



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

Ю.С. Артамонов

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве лабораторного практикума*

Магнитогорск
2014

Рецензенты:

Старший преподаватель,
АНО «Корпоративный центр подготовки кадров «Персонал»»
Г.Ф. Обухов

Кандидат технических наук, доцент кафедры электроники и микроэлектроники,
ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет
им. Г.И. Носова»
В.В. Леванов

Артамонов Ю.С.

Технические средства автоматизации [Электронный ресурс] : лабораторный практикум / Юрий Спиридонович Артамонов ; ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». – Электрон. текстовые дан. (1,28 Мб). – Магнитогорск : ФГБОУ ВПО «МГТУ», 2013. – 1 электрон. опт. диск (CD-R). – Систем. требования : IBM PC, любой, более 1 GHz ; 512 Мб RAM ; 10 Мб HDD ; MS Windows XP и выше ; Adobe Reader 8.0 и выше ; CD/DVD-ROM дисковод ; мышь. – Загл. с титул. экрана.

Настоящий лабораторный практикум «Технические средства автоматизации» написан в соответствии с учебной программой дисциплины «Технические средства автоматизации» и требованиями к обязательному минимуму содержания основной образовательной программы по направлению подготовки дипломированного специалиста. Рекомендуется непосредственно для студентов, обучающихся по направлению 220400.62 «Управление в технических системах», а также по другим направлениям.

В практикуме изучаются основные принципы построения линейных автоматических регуляторов и конструкции некоторых наиболее часто используемых элементов систем управления и их типовые характеристики, принципы построения измерителей рассогласования и управления исполнительными механизмами, параметры информационных и управляющих сигналов и соответствующие цепи передачи. Изучаются структуры, построение, расчёты установок автоматических регуляторов, настройка и опытная оптимизация параметров систем автоматического регулирования. Практикум содержит шесть глав, которые охватывают следующие темы: элементы систем управления, измерители рассогласования, дистанционная передача сигналов преобразователей; исполнительные механизмы и регулирующие органы; объект автоматического управления и его свойства; законы П-, И-, ПИ-регулирования; структурные схемы реальных линейных и релейно-импульсных промышленных регуляторов; построение П-, И-, ПИ-регуляторов температуры как типичных промышленных регуляторов; подробно разработанный лабораторный практикум из 10 лабораторных работ, охватывающий эти темы.

В книге содержится необходимый объём теоретических сведений для подготовки, выполнения лабораторных работ и обработки результатов, позволяющий обойтись без привлечения дополнительной литературы и произвести количественную оценку полученных результатов.

УДК 681.515.001.41

© Артамонов Ю.С., 2014
© ФГБОУ ВПО «Магнитогорский
государственный технический
университет им. Г.И. Носова», 2014

ПРЕДИСЛОВИЕ

Книга посвящена вопросам техники автоматического управления, а именно, изучению свойств наиболее распространённых элементов систем более узкого раздела систем автоматического управления – систем автоматического регулирования. Изложенный в книге материал соответствует программе дисциплины «Технические средства автоматизации» для подготовки специалистов по направлению 220400.

На эту дисциплину по учебному плану отводится только 70 часов аудиторных занятий и 40 часов на самостоятельную работу. Небольшой объём при обилии материала создаёт большие трудности при составлении пособия. Пришлось выбирать лишь самое существенное, останавливаясь лишь на основных вопросах, отбросив всё второстепенное, часто технически важное и новое. Поэтому в пособии не освещены такие вопросы, как конструктивные решения отдельных элементов автоматики, многочисленные методы расчёта настроек автоматических регуляторов, микропроцессорные средства управления. Чтобы пособие не напоминало каталог промышленных изделий, описательный материал сведён к минимуму, даны лишь основные принципиальные положения и ведущие технические идеи и стандартные параметры.

Курс технических средств автоматизации условно можно разбить на две части: часть теоретическую, дающую студентам необходимые знания в области используемой техники автоматического управления, и часть практическую, проводимую по большей части в лаборатории, где обучающиеся приобретают необходимые навыки в определении статических и динамических характеристик элементов систем и расчёте и наладке автоматических регулирующих устройств.

Анализ различных сложных систем управления показывает, что многие из них, независимо от назначения, имеют одинаковые узлы и блоки, как, например, преобразователи различных параметров, измерители рассогласования, исполнительные элементы. По этой причине такие узлы выделены в самостоятельную часть, чтобы избежать повторений.

Характер книги и её назначение: сделать обозримой область техники автоматического регулирования, дать основные теоретические сведения в этой области, что невозможно сделать без математического анализа. Математика применена здесь, однако, в минимальном объёме, без которого невозможно понять суть изучаемого явления.

Прообразом книги является учебное пособие «Лабораторный практикум по техническим средствам автоматизации», изданный ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова» в 2005 г. Текст расширен, во-первых, за счёт описания важнейших конструкций элементов систем автоматического управления, во-вторых, за счёт добавления некоторых разделов, в которых предлагаются упрощённые лабораторные работы, чтобы облегчить освоение материала студенту, впервые знакомящемуся с этой областью техники автоматического управления.

Цель книги и изложенного в ней лабораторного практикума – научить студента экспериментальным методам исследования статических и динамических характеристик элементов систем и регуляторов с использованием реальных объектов и регулирующих устройств со всеми присущими им нелинейностями и отклонением от поведения идеализированных моделей, научить практическому применению методов обработки полученных данных и оценкам получаемых погрешностей, научить расчёту уставок непрерывных и импульсных регуляторов.

Для углублённого самостоятельного изучения в конце каждой главы приведён библиографический список.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Обозначения основных величин и параметров	5
ВВЕДЕНИЕ	6
1. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ	7
1.1. Общие правила при выполнении экспериментальной части работы	7
1.2. Общие требования к оформлению отчётов	8
1.3. Статистическая обработка результатов измерений	8
2. ОБЪЕКТ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ	12
3. ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ	15
3.1. Назначение элементов и их общие свойства	15
3.2. Измерительные преобразователи	17
3.3. Автоматические компенсационные приборы	24
3.4. Исполнительные устройства	25
4. РЕГУЛИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА, РЕАЛИЗУЮЩИЕ ЛИНЕЙНЫЕ	30
5. СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ РЕАЛЬНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ РЕГУЛЯТОРОВ	36
5.1. Структурные схемы линейных регуляторов	36
5.2. Структурные схемы релейно-импульсных регуляторов	42
6. ИНСТРУКЦИИ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ	51
Лабораторная работа № 1. Градуировка устройства задающего токового ЗУ05 ...	51
Лабораторная работа № 2. Исследование дифференциально-трансформаторного преобразователя перемещения	55
Лабораторная работа № 3. Экспериментальное определение статических характеристик сельсинов в трансформаторном и индикаторном режимах работы	62
Лабораторная работа № 4. Изучение динамических свойств исполнительных механизмов МЭО 40/63-0,25 и ИМ 2/120 в схемах управления от бесконтактного пускателя ПБР-2м	71
Лабораторная работа № 5. Определение расходных характеристик и коэффициентов передачи регулирующих органов для автоматических систем регулирования	79
Лабораторная работа № 6. Определение параметров пропорционального регулятора и его настройка	89
Лабораторная работа № 7. Определение параметров интегрального регулятора и его настройка	99
Лабораторная работа № 8. Градуировка регулирующего прибора Р25.1	109
Лабораторная работа № 9. Экспериментальное определение динамических характеристик импульсного ПИ-регулятора	119
Лабораторная работа № 10. Определение оптимальных параметров динамической настройки ПИ-регулятора по экспериментальным характеристикам	136
ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ	151

Обозначения основных величин и параметров

A	- истинное значение измеряемой величины
$A(\omega)$	- амплитуда входных колебаний на частоте ω
$B(\omega)$	- амплитуда выходных колебаний на частоте ω
E	- э.д.с.
f	- частота
K_o	- коэффициент передачи объекта управления
$K_{ИМ}$	- статический коэффициент передачи исполнительного механизма
K_p	- коэффициент пропорциональности в законе П-регулирования
K_{p1}	- коэффициент передачи регулятора по скорости
L	- индуктивность катушки
M	- взаимная индуктивность двух катушек
Q	- расход среды
R	- сопротивление
r	- средняя арифметическая ошибка
R_0	- сопротивление терморезистора при начальной температуре t_0
R_H	- сопротивление нагрузки
R_t	- сопротивление терморезистора при температуре t
S	- средняя квадратичная ошибка
$S_{\bar{X}}$	- оценка среднего квадратичного отклонения $\bar{X}$
T_o	- постоянная времени объекта
T_{δ}	- постоянная времени балластного звена
T_{∂}	- постоянная времени дифференцирования
T_u	- постоянная времени интегрирования
$T_{из}$	- постоянная времени изодома
$T_{ИМ}$	- постоянная времени исполнительного механизма
$T_{пв}$	- постоянная времени предварения
$T_{пх}$	- время полного хода исполнительного механизма
t	- температура; общепринятое обозначение распределения Стьюдента
t_q	- квантиль распределения Стьюдента
U	- напряжение
$U_{вых}$	- выходное напряжение
U_n	- напряжение питания
V_{cp}	- средняя относительная скорость перемещения исполнительного механизма
$V_{зкв}$	- относительная скорость перемещения исполнительного механизма
$W(p)$	- передаточная функция
W_{PO}	- скорость среды во входном патрубке регулирующего органа
X	- выходная величина объекта
$\bar{X}$	- среднее арифметическое отдельных измерений
X_3	- заданное значение параметра
X_i	- результат отдельного измерения
$x_n(t)$	- текущее значение регулируемого параметра
y	- величина вносимого возмущения
Z	- полное сопротивление
z	- сигнал на входе схемы управления исполнительным механизмом
α	- доверительная вероятность
γ	- коэффициент заполнения выходных импульсов
Δ_{θ}	- зона возврата
$\Delta_{нч}$	- зона нечувствительности
$\Delta_{отп}$	- порог отпускания
ζ	- выходной сигнал обратной связи в релейно-импульсном регуляторе
ζ_n	- условный коэффициент сопротивления линии
ζ_{PO}	- условный коэффициент сопротивления регулирующего органа
μ	- относительный расход вещества среды
$\mu(t)$	- относительное перемещение исполнительного механизма
σ	- перерегулирование
τ	- время
τ_4	- чистое запаздывание
τ_{ϕ}	- постоянная времени демпфирования
$\varphi(\omega)$	- фазовый сдвиг на частоте ω
ψ	- степень затухания колебательного процесса
Ω	- угловая скорость вращения
ω	- круговая частота

ВВЕДЕНИЕ

Автоматизация производства является одной из приоритетных задач современной России. Автоматизация позволяет решить ряд социальных задач: улучшение условий труда, снижение аварийности, изменение социального состава работников путём привлечения высококвалифицированных специалистов по автоматике, повышение зарплаток трудящихся за счёт увеличения производительности труда и улучшения качества выпускаемой продукции.

Больших успехов достигла наука об управлении. Термин «управление» охватывает широкий круг понятий от управления технологическими процессами и механизмами до управления социальными структурами. Управление как частный случай включает в себя «регулирование» - поддержание некоторого параметра на заданном уровне.

Автоматический регулятор, принцип работы которого лежит в основе работы всех современных регуляторов, был разработан и испытан в 1765 г. И.И. Ползуновым за 20 лет до изобретения центробежного регулятора Дж. Уаттом. В регуляторе Ползунова был заложен принцип обратной связи при управлении по отклонению – самый распространённый из всех трёх принципов управления. Основы теории управления сформировались в середине XIX века, когда для решения проблем, связанных с применением автоматических регуляторов, были привлечены крупнейшие учёные, в том числе русские – Дж. Максвелл, И.А. Вышнеградский, Н.Е. Жуковский, А.М. Ляпунов и др.

Автоматические системы делятся на системы с разомкнутой цепью воздействия, с замкнутым контуром и комбинированные. Так могут быть реализованы как простые, так и весьма сложные автоматические и полуавтоматические системы. Они включают в себя элементы, выполняющие одну и ту же функцию, но имеющие различную физическую природу: электрические, пневматические, гидравлические, электронные. Задачей лабораторного практикума является не только рассмотрение отдельных элементов и блоков, а изучение принципов и законов функционирования автоматической системы в целом. Но и эта задача чересчур обширна, поэтому из изложения были исключены вопросы передачи информации, формирования команд управления в разомкнутых и замкнутых системах и линиях управления, функционирование вычислительных и логических устройств, многие аспекты динамики систем, ошибки и пр. Большая часть этих вопросов рассматривается в других дисциплинах, изучаемых на старших курсах.

Лабораторный практикум предназначен для закрепления пройденного теоретического материала, для приобретения практических навыков получения статических и динамических характеристик объектов управления, для практического изучения важнейших характеристик измерителей рассогласования, исполнительных механизмов и регулирующих органов, построения регулирующих устройств непрерывного действия и релейно-импульсных, овладения проверенными методами инженерного расчёта настроек и уставок автоматических регуляторов, т.е. со всеми вопросами, которые являются основой специальных знаний по профилю подготовки «Системы и средства автоматизации технологических процессов».

В литературе из приведённого библиографического списка вдумчивый студент найдёт дополнительные сведения о системах автоматического управления и регулирования, о конструкциях регулирующих органов и исполнительных механизмов, о характеристиках этих и других элементов автоматики, а также о применении средств вычислительной техники для автоматизации производственных процессов.

1. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Каждая лабораторная работа представляет собой, по сути дела, небольшую самостоятельную исследовательскую работу экспериментального характера. Выполнение каждой работы начинается с подготовки, в ходе которой изучается теоретический материал, задачи исследования, лабораторная установка и порядок проведения опытов. На этом этапе рекомендуется также начать составление будущего отчёта по работе, в который следует включить конспект наиболее важных положений работы и заготовки таблиц экспериментальных данных и графиков.

Теоретического материала, изложенного в данном сборнике, достаточно для подготовки к постановке опытов и обработки результатов. Однако для углублённого изучения материала следует пользоваться литературой, приведённой в библиографических списках инструкций к каждой лабораторной работе, поскольку эффективное усвоение изучаемого материала возможно только тогда, когда ясна цель эксперимента и имеется представление об ожидаемых результатах.

1.1. Общие правила при выполнении экспериментальной части работы

В лаборатории перед выполнением работы на лабораторном стенде необходимо обратить внимание на следующее.

Во-первых, надо внимательно изучить лабораторную установку, усвоить расположение и понять назначение органов управления.

Во-вторых, надо изучить градуировку шкал измерительных приборов и лимбов органов управления, т.е. понять, в каких единицах будет выражен результат измерений, и как отсчитать и определить его величину.

В-третьих, для щитов и стендов, на которые выведены контактные гнёзда элементов и отдельных функциональных узлов установок, надо спроектировать способ соединения этих гнёзд между собой и с измерительными приборами для получения заданной конфигурации объекта исследования.

При сборке цепей следует пользоваться специальными соединительными проводами, подбирая их без избыточной длины. При этом следует помнить, что у электронных приборов один из выводов соединён, как правило, с корпусом.

Перед измерениями следует определить диапазоны измеряемых величин, число измерений и значения, которые будет принимать независимая переменная. Число этих значений зависит от вида определяемых зависимостей. Для плавных монотонных зависимостей достаточно иметь 5...6 значений независимой переменной, равномерно распределённых по всему диапазону её изменения. При исследовании зависимостей, имеющих существенно неравномерный ход, число измерений в области большой кривизны кривых должно быть увеличено. В большинстве случаев в лабораторных работах для экономии времени не производится статистическая обработка результатов измерений, а через экспериментальные точки на глаз наиболее близко к ним проводятся плавные кривые, не выходящие за пределы исследуемого диапазона. Исключение составляют *кривые градуировок шкал*, которые проводятся *плавно через все* экспериментальные точки. Требования к графическому представлению результатов изложены в инструкциях к каждой лабораторной работе.

Все измерения, относящиеся к одной исследуемой схеме, должны производиться за короткий промежуток времени без перерыва во избежание

появления дополнительной неконтролируемой погрешности в измерениях, обусловленной различными внешними факторами, например, нагревом измерительных и регулирующих приборов, изменением температуры в помещении, колебаниями напряжения питающей сети и т.п.

1.2. Общие требования к оформлению отчётов

Отчёты пишутся каждым студентом самостоятельно и им подписываются. Отчёты по всем лабораторным работам сводятся в единую тетрадь, титульный лист которой должен быть оформлен в соответствии с принятым в вузе стандартом.

Схемы и графики вычерчивают карандашом с применением чертёжных инструментов. Все элементы схем должны быть выполнены с соблюдением стандартов на графические изображения. Значения аргумента на графиках надо откладывать по горизонтальной оси, значения функции – по вертикальной. На осях координат должны быть приведены названия аргумента и функции и их размерности. Каждый рисунок должен иметь содержательный заголовок, все рисунки должны быть пронумерованы. При изображении на одном графике нескольких кривых их также следует пронумеровать, расшифровку дать в подрисуночной подписи; для большей наглядности кривые дополнительно допускается изображать различными линиями (сплошными, штриховыми, штрих-пунктирными).

Примеры правильного выполнения рисунков можно найти ниже в настоящем пособии.

Таблицы должны быть чёткими по содержанию и удобочитаемыми. Каждая таблица должна иметь порядковый номер и название. Все графы головки и боковик должны иметь заголовки, сокращение слов в них не допускается. В заголовках граф (в головке) названия первого яруса надо начинать с прописных букв, названия второго и последующих – со строчных. Размерности цифровых данных, приводимых в таблицах, выносятся в текст боковика, головки или заголовка таблицы в сокращённых условных обозначениях, принятых в СИ. В местах пропусков в графах таблицы за отсутствием данных ставится знак тире. При повторении в последующих строках графы текста предыдущей строки в первой из них ставится «То же», а в остальных – кавычки.

Примеры правильного выполнения таблиц можно также найти в настоящем пособии.

Содержание текстовой части отчёта приводится в инструкциях к каждой лабораторной работе.

1.3. Статистическая обработка результатов измерений

Большинство измерений, проводимых в лабораторном практикуме, относятся к так называемым прямым измерениям, при которых средство измерений приводят во взаимодействие с объектом измерения и по показаниям средства измерения отсчитывают значение измеряемой величины. Выполненные таким путём измерения неизбежно содержат ошибки.

Первая ситуация. В большинстве лабораторных работ проводят измерения с предварительным оцениванием погрешностей, когда регламентированы типы применяемых средств измерения, условия измерения и заранее вычислены погрешности. Например, в условиях лаборатории измеряется постоянный ток срабатывания реле амперметром переносным М45М класса точности 1,0,

предназначенным для работы при температуре окружающей среды от – 40 до + 60°С и относительной влажности до 95 % ± 3 %, т.е. при условиях более широких, чем имеются в лаборатории. Выбранная длина шкалы прибора 15 мА. Показания прибора 5,6 мА. Результат измерения должен быть записан в виде

$$I_{cp} = (5,6 \pm 0,15) \text{ мА.}$$

Вторая ситуация. При измерениях могут появиться случайные погрешности, которые могут быть выявлены и оценены статистическими методами путём проведения многократных измерений. Типичный пример – измерение взаимной индуктивности первичной и вторичных обмоток при изменении положения плунжера дифференциально-трансформаторного преобразователя перемещения. Лабораторная установка для этих опытов содержит источник питания переменного тока 50 Гц 12 В, подключённый к сети 220 В, и фазочувствительный выпрямитель. При многократном измерении взаимной индуктивности при установке плунжера в положение, например, 1 мм при многократных измерениях будут получены разные данные, что обусловлено различными причинами:

неодинаковой установкой плунжера в заданное положение при разных измерениях;

неконтролируемым изменением напряжения питающей сети;

изменением параметров фазочувствительного выпрямителя во времени, а также под воздействием внешних факторов, главным из которых является нагрев элементов схемы, и др.

В рассматриваемом случае за окончательный результат всех измерений следует взять среднее арифметическое $\bar{x}$ всех n отдельных измерений и вычислить среднюю арифметическую r или среднюю квадратичную ошибку s по формулам:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n};$$

$$r = \frac{|\bar{x} - x_1| + |\bar{x} - x_2| + \dots + |\bar{x} - x_n|}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n |\bar{x} - x_i|}{n};$$

$$s = \sqrt{\frac{(\bar{x} - x_1)^2 + (\bar{x} - x_2)^2 + \dots + (\bar{x} - x_n)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}},$$

где $x_1, x_2, \dots, x_n$ – результаты отдельных измерений.

Обозначение $|\bar{x} - x_i|$ означает, что при подсчёте все разности считаются положительными без учёта их действительного знака.

При небольшом числе наблюдений следует пользоваться величиной s . При достаточно большом числе наблюдений (практически при $n \geq 30$) неважно, какую величину вычислять, потому что между s и r существуют простые соотношения:

$$s = 1,25r \text{ или } r = 0,8s.$$

В большинстве случаев целесообразно пользоваться величиной s , а не r , потому что пользуясь ошибкой s легко определить доверительные вероятности, так

как для этого есть специальные таблицы. Но вычислять среднюю арифметическую ошибку r проще, хотя теперь это несущественно, потому что никто не делает вычисления вручную, а только с помощью техники.

Правило: для нахождения случайной ошибки нужно определить два числа – величину ошибки и доверительную вероятность. Средней квадратичной ошибке величиной $1s$ соответствует доверительная вероятность 0,68, удвоенной средней квадратичной ошибке $2s$ – доверительная вероятность 0,95, утроенной $3s$ – доверительная вероятность 0,997.

Сказанное означает, например, что i -й результат измерений в 68 % из 100 % случаев окажется в интервале $\bar{x} \pm 1s$ и т.д.

При малом числе n среднюю арифметическую ошибку правильнее вычислять по следующей формуле:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n |\bar{x} - x_i|}{\sqrt{n(n-1)}},$$

при большом числе n различие между обеими формулами невелико.

Третья ситуация. Часто на этом обработку результатов измерений можно закончить. Однако, проводя повторные измерения той же величины, скорее всего получим другие значения $\bar{x}$, r , s . Если это необходимо, следует выяснить, насколько результаты могут изменяться при повторных измерениях. Для этого надо построить *доверительные интервалы для истинного значения измеряемой величины*. Как известно, доверительным интервалом называется интервал, который с заданной доверительной вероятностью накрывает истинное значение измеряемой величины.

Обычно доверительные интервалы строят, основываясь на распределении Стьюдента, которым называют распределение случайной величины t , вычисленной в предположении нормального распределения,

$$t = \frac{\bar{x} - A}{S_{\bar{x}}},$$

где A – истинное значение измеряемой величины;

$S_{\bar{x}}$ – оценка среднего квадратичного отклонения среднего арифметического $\bar{x}$ результатов наблюдений.

Доверительный интервал $[\bar{x} - t_q S_{\bar{x}}, \bar{x} + t_q S_{\bar{x}}]$ отвечает доверительной вероятности

$$\{|\bar{x} - A| \leq t_q S_{\bar{x}}\} = \alpha,$$

где t_q – q -процентная точка распределения Стьюдента; значение t_q находят в таблице, приводимой в книгах по статистике, по числу степеней свободы $k=n-1$ и уровню значимости $q=1-\alpha$;

n – число наблюдений.

Обычно при измерениях доверительную вероятность принимают равной 0,95 или 0,99 и лишь иногда 0,90.

На практике доверительные интервалы строят на основе распределения Стьюдента часто без проверки допустимости этого, поскольку реальные распределения – это обычно более «узкие» распределения, чем нормальное.

В применении к рассматриваемым задачам построения зависимости одной величины от другой следует найти доверительные интервалы для истинного значения вычисленной по результатам опытов величины.

Рассмотрим для примера типичный случай экспериментального изучения зависимости некоторой величины x от параметра z . Для этого измеряют x_1 при некотором значении z_1 , затем x_2 при z_2 и так далее до x_m при z_m . Затем повторяют эти измерения несколько раз, получая n серий измерений. Для дальнейшей статистической обработки находят средние арифметические $\bar{x}_j$ из n измерений x_i при значении параметра z_j , оценку среднего квадратичного отклонения $S_{\bar{x}_j}$ среднего арифметического $\bar{x}_j$ результатов наблюдений и доверительный интервал для каждого от 1 до m из этих средних арифметических.

Вот свод формул для расчётов, обозначения, справочные данные:

n – число отсчётов (число серий измерений);

x_i – значение каждого i -го измерения; $i=1,2,\dots,n$;

$k = n - 1$ – число степеней свободы;

α – доверительная вероятность;

$q = 1 - \alpha$ – уровень значимости;

A – истинное значение измеряемой величины;

t_q – q -процентная точка распределения Стьюдента при заданных k и q ;

при значении параметра z_j по всем x_{ij} находят

$$\bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij}; \quad S_{\bar{x}_j} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x}_j - x_{ij})^2}{n(n-1)}};$$

$\pm t_q S_{\bar{x}_j}$ – доверительный интервал, такой, что при заданной вероятности α $|\bar{x}_j - A| \leq t_q S_{\bar{x}_j}$.

При выполнении описанных лабораторных работ достаточно принять $\alpha=0,95$, следовательно, $q=0,05$. Выписка из таблицы квантилей распределения Стьюдента приведена в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Значения q -процентных точек распределения Стьюдента при $q=0,05$

Число степеней свободы k	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Значения q -процентных точек	12,71	4,30	3,18	2,78	2,57	2,45	2,36	2,31	2,26

Результаты статистической обработки удобно представить так, как показано в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Сводная таблица результатов статистической обработки измерений

Параметр z_j	z_1	z_2	...	z_{m-1}	z_m
Среднее арифметическое $\bar{x}_j$ результатов измерения			...		
Оценка $S_{\bar{x}_j}$ среднего квадратичного отклонения среднего арифметического результатов измерения			...		
Доверительный интервал	$\pm$	$\pm$	...	$\pm$	$\pm$

По результатам табл. 1.2 можно построить график изменения x в зависимости от величины z , на котором можно изобразить доверительные интервалы. Обычно доверительные интервалы изображают отрезками прямых длиной $2t_q S_{\bar{x}_j}$, параллельных оси измеряемой величины x , середины которых совпадают с $\bar{x}_j$ при данном значении z_j .

Библиографический список

1. Ю.С. Артамонов. Оформление отчётов по лабораторным работам: Инструкция по оформлению отчётов по дисциплине «Введение в специальность» для студентов специальности 210200 дневной и заочной форм обучения Магнитогорск: МГТУ, 2005. 10 с.
2. Метрология, стандартизация, сертификация и электроизмерительная техника: Учебное пособие/ К.К. Ким, Г.Н. Анисимов, В.Ю. Барбарович, Б.Я. Литвинов. – СПб.: Питер, 2006. – 368 с.: ил.

2. ОБЪЕКТ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

Объект автоматического управления представляет собой сложное звено, совместно с которым работает регулирующее устройство. В это звено входит технологический агрегат, средства измерения выходной величины, а также регулирующий орган (РО), управляющий подачей вещества или энергии по команде регулирующего устройства.

Объект управления характеризуется статической и динамическими характеристиками.

Статическая характеристика определяет свойства объекта в установившихся (статических) состояниях и представляет собой зависимость установившегося значения выходного сигнала объекта x от управляющего воздействия, т.е. от относительного расхода среды μ , определяемого положением регулирующего органа y . Объекты могут обладать линейной и нелинейными статическими характеристиками разного вида. Примеры таких характеристик приведены на рис. 2.1.

Управление линейным объектом, параметры которого остаются постоянными при разных режимах работы агрегата, существенно проще, чем нелинейным. Нелинейность объекта часто связана с нелинейностью технологического агрегата. Иногда нелинейность возникает вследствие нелинейности регулирующего органа. Наоборот, зачастую есть возможность при нелинейном технологическом агрегате так

подобрать нелинейность характеристики регулирующего органа, чтобы компенсировать нелинейность агрегата.

Средства измерения выходной величины, как правило, линейны.

Коэффициент передачи объекта. Коэффициент передачи $k_{об}$ представляет собой частное от деления изменения выходного сигнала объекта x при переходе из начального установившегося состояния x_1 в новое установившееся состояние x_2 на соответствующее изменение управляющего воздействия от μ_1 до μ_2 , которое обычно измеряют в процентах хода регулирующего органа или исполнительного механизма. Коэффициент передачи объекта $k_{об}$ есть величина, имеющая размерность:

$$k_{об} = \frac{x_2 - x_1}{\mu_2 - \mu_1} = \frac{\Delta x}{\Delta \mu} = \operatorname{tg} \alpha.$$

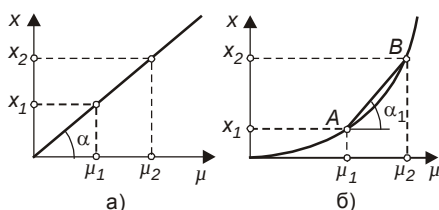


Рис. 2.1. Статические характеристики:
а - линейного объекта;
б - нелинейного объекта

При линейной статической характеристике это отношение постоянно по всему диапазону изменения входной величины и равно $\operatorname{tg} \alpha$ (рис. 2.1,а).

При нелинейной статической характеристике (рис. 2.1,б) угол α_1 в разных точках характеристики имеет различную величину, т.е. $k_{об}$ величина переменная. В системах *автоматического регулирования* заданное значение обычно изменяют мало, и регулируемый орган перемещается не во всём возможном диапазоне. В этом случае статическую характеристику можно

линеаризовать на рабочем участке, например, как показано на рис. 2.1,б отрезком АВ, и коэффициент передачи объекта находить как

$$k_{об.д.} = \frac{\Delta x}{\Delta \mu} = \operatorname{tg} \alpha_1.$$

Найденный так коэффициент передачи принято называть *дифференциальным коэффициентом передачи*.

При существенно нелинейной статической характеристике объекта при различных режимах работы дифференциальный коэффициент передачи может изменяться в широких пределах.

Одной из *динамических характеристик* является *характеристика разгона* объекта (кривая разгона), которая может быть получена как аналитически, так и экспериментально. Характеристикой разгона объекта называется изменение выходного регулируемого сигнала объекта x в функции времени, вызванное подачей на вход объекта ступенчатого воздействия величиной $\Delta \mu$ при условии, что до момента подачи этого воздействия объект находился в равновесном состоянии. При линейном объекте обычно достаточно иметь лишь одну характеристику разгона, полученную при воздействии регулирующего органа, из которой могут быть найдены другие динамические параметры и коэффициент передачи объекта.

Пример кривой разгона объекта приведён на рис. 2.2. По кривой разгона определяют следующие параметры.

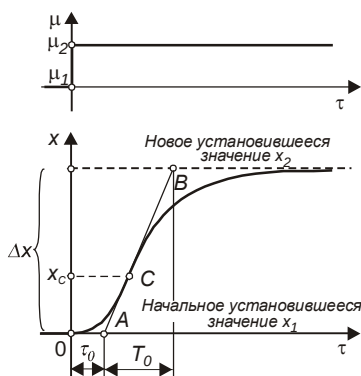


Рис. 2.2. Определение динамических параметров по кривой разгона статического объекта

установившегося значения x_2 , если бы это изменение происходило со скоростью, постоянной и максимальной в данном переходном процессе. На рис. 2.2 эту максимальную скорость характеризует наклон к оси времени отрезка AB .

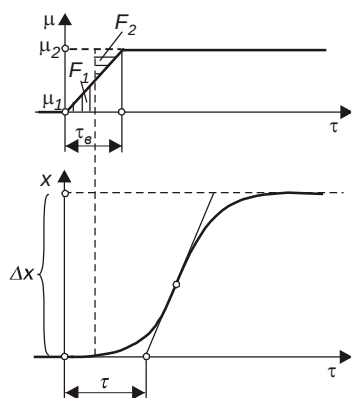


Рис. 2.3. Определение запаздывания с учётом времени внесения возмущения

Запаздывание τ_0 . Проведём в точке C максимальной скорости изменения выходного сигнала (в точке перегиба при S -образной кривой) касательную AB к кривой разгона и продолжим её до пересечения с линией начального установившегося значения выходного сигнала (точка A). Если значение x_C характеристики в точке перегиба C мало по сравнению с Δx ($x_C/\Delta x < 0,05 \dots 0,1$), то отрезок OA на оси времени от момента внесения возмущения до точки пересечения с касательной определит τ_0 – общее суммарное запаздывание объекта.

Постоянная времени объекта T_0 – это условное время изменения выходного сигнала от начального установившегося значения x_1 до нового установившегося значения x_2 , если бы это изменение происходило со скоростью, постоянной и максимальной в данном переходном процессе. На рис. 2.2 эту максимальную скорость характеризует наклон к оси времени отрезка AB .

Для объекта первого порядка, кривая разгона которого представляет собой экспоненту, постоянную времени T_0 можно определить с помощью касательной к любой точке кривой разгона.

Постоянную времени многоёмкостного объекта при тех же предположениях относительно величины x_C определяют по построению на рис. 2.2.

Оценка динамических свойств линейных объектов лишь постоянной времени T_0 и запаздыванием τ_0 объясняется тем, что обычно такие объекты можно с достаточной степенью точности аппроксимировать двумя последовательно включёнными элементарными звеньями – звеном с чистым запаздыванием $\tau_4 = \tau_0$ и звеном первого порядка с постоянной времени $T = T_0$.

Если запаздывание объекта соизмеримо со временем нарастания возмущения $\tau_в$, то при определении величины τ_0 следует заменить истинное возмущение типовым скачкообразным. На рис. 2.3 показан наиболее распространённый случай, когда возмущение μ нарастает по линейному закону. Момент внесения скачкообразного возмущения условно выбирают так, чтобы площади F_1 и F_2 были равны, а запаздывание объекта τ_0 вычисляют по выражению

$$\tau_0 = \tau - \frac{\tau_в}{2}.$$

Библиографический список

1. Малафеев С.И., Малафеев А.А. Основы автоматики и системы автоматического управления: учебник. - М.: ИЦ Академия, 2010. – 383 с.
2. Копелович А.П. Инженерные методы расчёта при выборе автоматических регуляторов. М.: Металлургиздат, 1960. – 190 с.

3. ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

3.1. Назначение элементов и их общие свойства

Автоматические регуляторы представляют собой разновидность автоматических систем управления. В то же время любой регулятор можно разделить на отдельные элементы, выполняющие определённые функции вне зависимости от конструкции регулятора. Каждый регулятор в том или ином виде может содержать рассмотренные ниже основные элементы (рис. 3.1).

Измерительные элементы или датчики D служат для измерения в процессе регулирования текущего (действительного) значения регулируемой величины x , изменяющегося вследствие действия на объект регулирования внешних возмущений F . По сигналам датчиков (в частном случае одного датчика) вырабатывается сигнал x_m , пропорциональный текущему значению регулируемой величины, удобный для работы последующих элементов схемы. Первичные преобразователи датчиков устанавливаются непосредственно на объекте регулирования O .

Параметры информационных сигналов регламентированы соответствующими стандартами. Пределы изменения сигналов постоянного тока составляют то 0 до ± 5 мА, от 0 до ± 20 мА и от 4 до 20 мА. Пределы изменения сигналов напряжения постоянного тока равны $0 \dots \pm 10$ мВ, $0 \dots \pm 1000$ мВ, $0 \dots \pm 10$ В. Пределы изменения сигналов напряжения переменного тока частотой 50 или 400 Гц составляют: от 0 до 1 В с переменной фазой и от 0 до 2 В без изменения фазы.

Задающий элемент $З$, или задатчик, служит для выработки опорного сигнала x_z , в соответствии с которым должна изменяться регулируемая величина. В системе автоматической стабилизации задатчик выдаёт постоянное значение регулируемой величины. В системах программного управления задатчик вырабатывает сигнал, изменяющийся в соответствии с заданной программой изменения регулируемой величины.

Элемент сравнения $ЭС$ обеспечивает сравнение заданного значения регулируемой величины x_z , полученного от задатчика, с измеренным значением x_m , поступающим от датчика, и на основе этого вырабатывает сигнал ошибки ε . В простых случаях сравнение заключается в вычитании x_z из x_m , и тогда ЭС называют измерителем рассогласования ИР. В очень многих конструкциях регуляторов элемент сравнения совмещается с задающим и измерительными элементами в одном блоке. В более сложных случаях при сравнении может потребоваться ряд вычислительных операций.

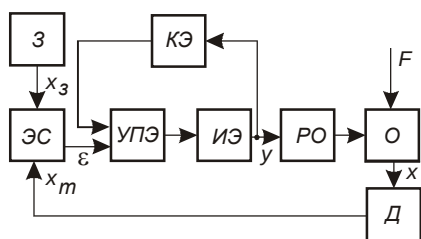


Рис. 3.1. Функциональная схема автоматической системы управления

Сигнал ошибки обычно очень мал и зачастую имеет неудобную для последующего использования форму. Это обуславливает необходимость применения дополнительных усилительных и преобразовательных элементов УПЭ.

Исполнительный элемент $ИЭ$ через регулирующий орган $РО$ служит для оказания регулирующего воздействия на объект регулирования O . Источником питания $ИЭ$ служит выходной каскад $УПЭ$, являющийся усилителем мощности.

Рассмотренные элементы совместно с объектом образуют замкнутую цепь для прохождения регулирующих воздействий. Но во многих случаях такое соединение не обеспечивает требуемых показателей работы АСР. Поэтому в общую схему системы вводят ряд дополнительных элементов, служащих для коррекции переходных

процессов. Корректирующие элементы КЭ могут создавать дополнительные воздействия в АСР, вызывающие соответствующие изменения закона регулирования. Очень часто КЭ образуются с помощью вспомогательных обратных связей, охватывающих один или несколько элементов системы.

Обычно все звенья системы обладают свойством направленного действия, т.е. передают воздействие только в одном направлении от входа к выходу. Следовательно, входная величина элемента не зависит от его выходной величины.

Классификацию элементов принято выполнять в зависимости от вида их статических и динамических характеристик.

Статическая характеристика элемента представляет зависимость выходной величины x_2 от входной x_1 при установившемся режиме. В зависимости от вида статические характеристики делятся на линейные и нелинейные. Для линейных элементов статическая характеристика может быть представлена прямой линией, уравнение которой имеет вид:

$$x_2 = x_{20} + kx_1,$$

где x_{20} – значение x_2 при $x_1 = 0$, определяемое выбором начала координат;

k – коэффициент передачи элемента, определяющий наклон характеристики.

Если статическая характеристика представлена нелинейной зависимостью $x_2 = f(x_1)$, то элемент считается нелинейным. Большинство элементов систем имеют нелинейные характеристики. Но так как анализ процессов в нелинейных системах затруднён, обычно стремятся нелинейные характеристики по возможности линеаризовать.

Коэффициент передачи элемента является одним из основных параметров, характеризующих статическое состояние системы. В общем случае, когда выходная величина имеет другую физическую природу по сравнению с входной, коэффициент передачи имеет размерность.

В тех случаях, когда все элементы системы можно описать дифференциальными уравнениями, основными характеристиками для анализа работы системы являются передаточные функции.

Амплитудно-фазо-частотная (АФЧХ) характеристика $W(j\omega)$ устанавливает связь между выходной и входной величинами при подаче на вход элемента гармонических колебаний с частотой ω и может изменяться от 0 до ∞ . Если на вход линейного элемента подавать гармонические колебания с частотой ω , то на выходе элемента после окончания переходного процесса также установятся гармонические колебания той же частоты ω , но отличные от входных по амплитуде и фазе. Зависимость между отношениями амплитуд выходных и входных колебаний и сдвигом фаз между ними в функции частоты ω может быть представлена в виде АФЧХ $W(j\omega)$.

Частота ω – величина именованная, обычно она имеет размерность радианы в секунду.

Для построения характеристики входные гармонические колебания частоты ω представляют в виде показательной функции

$$x_1 = A(\omega) e^{j\omega\tau},$$

где $A(\omega)$ – амплитуда входных колебаний на этой частоте ω ;

τ – время.

Выходная величина будет представлять собой колебания той же частоты, но с другой амплитудой $B(\omega)$ и фазой $\varphi(\omega)$, т.е.

$$x_2 = B(\omega)e^{j(\omega\tau + \varphi)} = B(\omega)e^{j\omega\tau} e^{j\varphi}.$$

Зависимость между выходной и входной величинами для каждой частоты можно представить на комплексной плоскости в виде вектора

$$W(j\omega) = x_2 / x_1 = [B(\omega) / A(\omega)] e^{j\varphi} = M(\omega)e^{j\varphi},$$

где $M(\omega) = B(\omega) / A(\omega)$ – модуль вектора амплитудно-фазочастотной характеристики.

Следовательно, модуль вектора амплитудно-фазочастотной характеристики представляет собой отношение амплитуды выходных колебаний к амплитуде входных на частоте ω , а аргумент вектора определяется сдвигом фаз между выходными колебаниями и входными и также зависит от частоты. При изменении частоты ω от 0 до ∞ вектор будет изменяться по величине и по направлению, причём его конец на комплексной плоскости (Re , Im) опишет кривую, которая является графическим выражением амплитудно-фазочастотной характеристики. При этом зависимость модуля $M(\omega)$ от частоты ω называется амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ), а зависимость аргумента $\varphi(\omega)$ от частоты ω называется фазочастотной характеристикой (ФЧХ).

При постоянном значении амплитуды на входе амплитудно-частотная характеристика непосредственно определяет свойства элемента как частотного фильтра, фазочастотная характеристика определяет сдвиг по фазе между колебаниями на выходе и на входе при разных частотах входных колебаний. Записывая вектор $W(j\omega)$ в алгебраической форме, получим:

$$W(\omega) = P(\omega) + Q(\omega),$$

где $P(\omega)$ называется действительной или вещественной частотной характеристикой, а $Q(\omega)$ – мнимой частотной характеристикой, причём вещественная характеристика представляет собой проекцию вектора $W(j\omega)$ на действительную ось Re , а мнимая характеристика – проекцию вектора на мнимую ось Im .

3.2. Измерительные преобразователи

Согласно рис. 3.1 все элементы являются преобразователями информации, поступающей на вход x_1 и передаваемой на выход x_2 .

Измерительный преобразователь – техническое устройство, построенное на определённом физическом принципе действия, выполняющее одно частное измерительное преобразование.

В зависимости от физической природы сигналов на входе и выходе измерительные преобразователи можно подразделить на ряд групп.

1. *Измерительные преобразователи неэлектрических величин*, имеющие на входе и выходе физически разные величины. Они преобразуют в электрическую величину давление, расход, температуру и т.п. и используются как первичные измерительные преобразователи.

2. *Измерительные преобразователи электрических величин*, имеющие на входе и выходе одинаковые физические величины: шунты, делители напряжения, измерительные трансформаторы и т.п.

3. *Измерительные преобразователи структуры* (аналого-цифровые, цифроаналоговые, преобразователи кода и пр).

К измерительным преобразователям относятся также нормирующие и межсистемные преобразователи.

В *нормирующих преобразователях* на вход подаются неэлектрические сигналы различных величин, например, от термопар и терморезисторов, а на выходе формируются унифицированные сигналы.

Межсистемные преобразователи предназначены для преобразования унифицированных сигналов разной физической природы, например, унифицированных пневматических сигналов в унифицированные электрические и наоборот.

Типов первичных измерительных преобразователей очень много. В настоящем лабораторном практикуме применяются лишь некоторые из них, принципиальное устройство которых показано на рис. 3.2.

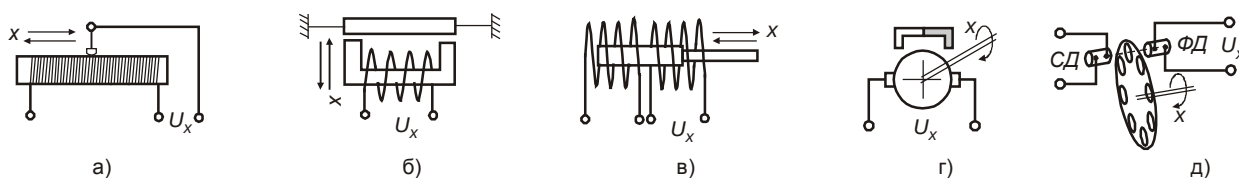


Рис. 3.2. Принципиальное устройство измерительных преобразователей лабораторных установок:
а) потенциометрический преобразователь перемещения; б) индуктивный преобразователь перемещения; в) трансформаторный преобразователь перемещения; г) тахометрический преобразователь с тахогенератором постоянного тока;
д) тахометрический импульсный фотодиодный преобразователь

Механические преобразователи служат для преобразования входных неэлектрических величин (давления, расхода, уровня) в выходные механические (перемещение, перепад давления, число оборотов в минуту), которые затем преобразуются в электрические величины с помощью специальных преобразователей.

Резистивные элементы (рис. 3.2,а), у которых при изменении входной величины изменяется активное сопротивление, в АСР обычно используются в качестве датчиков перемещения и задатчиков. Их основными достоинствами являются простота конструкции, возможность работать на постоянном и переменном токе, большой выходной сигнал, зачастую позволяющий отказаться от его последующего усиления. К основным недостаткам относятся наличие скользящего электрического контакта, относительно большие перемещения движка и значительные усилия для осуществления этих перемещений. Реостатная схема включения ввиду значительной нелинейности используется в АСР редко. Основная схема включения – потенциометрическая (рис. 3.3,а) с высокоомной нагрузкой, в которой при правильно выбранном режиме работы потенциометра характеристика элемента может быть сделана приблизительно линейной.

Статической характеристикой *потенциометрического элемента* (в рассматриваемом случае датчика) называется зависимость напряжения $U_{\text{вых}}$ на сопротивлении нагрузки R_n от перемещения движка потенциометра x , т.е. $U_{\text{вых}} = f(x)$. При равномерной намотке потенциометра величина сопротивления r_1 пропорциональна перемещению движка x , т.е. $r_1 = kx$, где x отсчитывается от нижнего по схеме конца потенциометра. В том случае, когда сопротивление нагрузки

намного больше внутреннего сопротивления потенциометра $R_i = r_1 r_2 / (r_1 + r_2)$, статическая характеристика изобразится прямой линией (рис. 3.3,б). Штриховой линией показан случай, когда R_H сравнимо по величине с внутренним сопротивлением потенциометра.

Линейная статическая характеристика реализуется, когда напряжение с потенциометра подаётся на вход электронного усилителя. В этом случае $R_H \gg R_i$, и выходное напряжение находится по формуле

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{п}} r_1 / R = U_{\text{п}} k x / l = U_{\text{п}} \alpha,$$

где $\alpha = r_1 / R = x / l$ – относительное перемещение движка;
 R – общее сопротивление потенциометра;
 l – длина намотки;
 k – коэффициент пропорциональности.

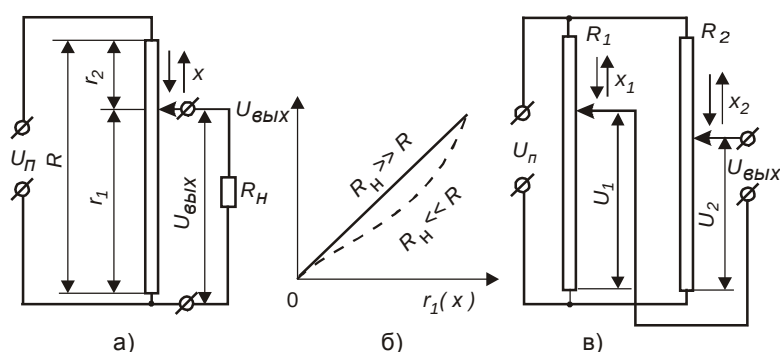


Рис. 3.3. Потенциометрический датчик активного сопротивления (а), его характеристика (б) и потенциометрическая схема вычитания (в)

Когда R_H сравнимо с внутренним сопротивлением потенциометра, то

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{п}} \alpha / [1 + (R / R_H) \alpha (1 - \alpha)] .$$

Чувствительность преобразователя при наличии нагрузки определяется производной $dU_{\text{вых}} / d\alpha$ и зависит от величины α . При малых перемещениях или при очень большом сопротивлении нагрузки чувствительность $S = |dU_{\text{вых}} / d\alpha|_{\alpha=0} = U_{\text{п}}$, т.е. определяется напряжением питания.

Динамические свойства потенциометрического преобразователя определяются видом нагрузки. При нагрузке активным сопротивлением он является безынерционным звеном.

Потенциометрические преобразователи могут соединяться друг с другом, образуя схемы суммирования их сигналов или вычитания; последняя схема приведена на рис. 3.3,в. Если один преобразователь в этой схеме используется в качестве датчика, а другой – задатчика, то эта схема представляет собой измеритель рассогласования, выходным сигналом которой будет напряжение, пропорциональное отклонению регулируемой величины от заданного значения.

В зависимости от требований к АСР диапазон изменения сигнала, снимаемого с задатчика, устанавливается равным 10, 20 или 100 процентам изменения регулируемой величины, и тогда говорят, например, о 10-процентном задатчике. Все типы выпускаемых промышленностью ручных резистивных задатчиков являются

потенциометрическими и подключаются по трёхпроводной схеме. Номинальные сопротивления датчиков лежат в широких пределах – от 10 Ом до 5 кОм.

Электромагнитные преобразователи основаны на изменении параметров электромагнитной цепи при действии измеряемых величин. К ним относятся индуктивные, трансформаторные и индукционные преобразователи.

Индуктивный преобразователь (рис. 3.2,б) представляет собой дроссель с изменяющимся воздушным зазором или площадью поперечного сечения воздушного зазора. Входная величина – перемещение, выходная – индуктивность обмотки сердечника. Диапазон изменения перемещения преобразователя с переменным воздушным зазором составляет 0,01...1 мм, с переменной площадью – до 5...8 мм. Для измерения больших перемещений применяют индуктивные преобразователи соленоидного типа, представляющие собой катушку с ферромагнитным сердечником; их диапазон простирается до 100...1000 мм.

Трансформаторный преобразователь (рис. 3.2,в) представляет собой магнитный сердечник с двумя обмотками. Входная величина – перемещение сердечника, выходная – взаимная индуктивность обмоток. Наибольшее распространение получили дифференциально-трансформаторные преобразователи с подвижным ферромагнитным сердечником. Они имеют хорошую линейность (до 0,1 %) и диапазон перемещения до 50...100 мм.

Конструкция и схема включения двух дифференциально-трансформаторных преобразователей, являющихся датчиками D_1 и D_2 двух выходных параметров объекта управления, и потенциометрического датчика $Зд$ в измеритель рассогласования приведены на рис. 3.4.

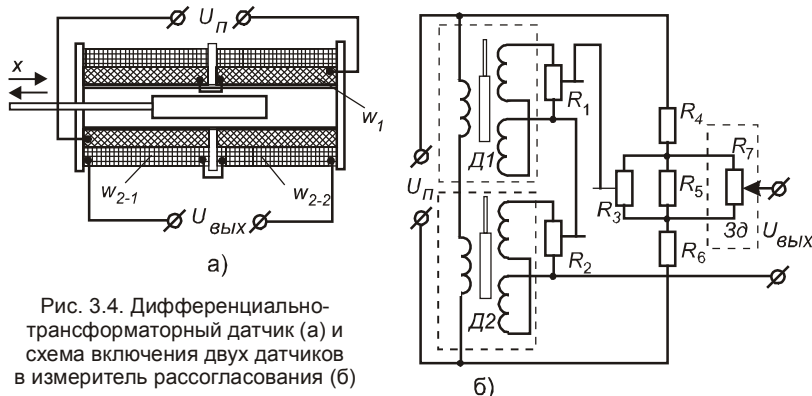


Рис. 3.4. Дифференциально-трансформаторный датчик (а) и схема включения двух датчиков в измеритель рассогласования (б)

В дифференциально-трансформаторном преобразователе при перемещении плунжера изменяется коэффициент взаимной индуктивности M двух катушек. При среднем положении плунжера напряжение $U_{вых} = 0$, поскольку э.д.с., индуцируемые в обеих обмотках w_2 , равны между собой. При смещении

плунжера из среднего положения равновесие э.д.с. нарушается, в результате чего на выходе преобразователя появляется переменное напряжение $U_{вых}$. Амплитуда выходного напряжения пропорциональна величине смещения плунжера от среднего положения, а угол фазового сдвига этого напряжения относительно напряжения питания U_n , который может быть равен 0° или 180° , характеризует направление смещения.

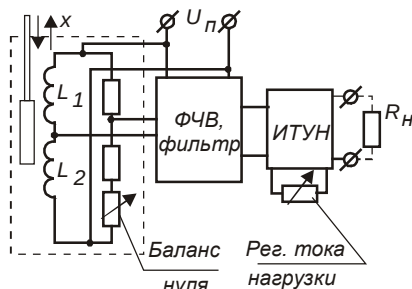


Рис. 3.5. Датчик перемещения с токовым выходным сигналом

Плунжерный дифференциальный индуктивный преобразователь имеет конструкцию, аналогичную дифференциально-трансформаторному преобразователю с тем отличием, что в каждой из двух секций катушки размещены только по одной обмотке. Эти обмотки с индуктивностями L_1 и L_2 , изменяющимися с приращениями противоположного знака, обычно включаются в два соседних плеча моста, два других плеча которого образованы

активными сопротивлениями. Если дифференциальный индуктивный преобразователь является датчиком перемещения, а ветвь из активных сопротивлений – задатчиком, вся схема представляет собой измеритель рассогласования. Если после моста включить фазочувствительный выпрямитель (ФЧВ) и источник тока, управляемый напряжением (ИТУН), получим преобразователь перемещения с токовым выходом. Блок-схема такого устройства приведена на рис. 3.5.

Сигнал с измерительного моста после фазочувствительного выпрямления и фильтрации поступает на ИТУН, к выходу которого подключена нагрузка R_n . В начальном положении плунжера дифференциального индуктивного преобразователя сигнал на выходе может быть сделан нулевым с помощью переменного резистора «Баланс нуля». В конечном положении плунжера ток нагрузки может быть установлен желаемой величины переменным резистором регулятора тока ИТУН «Регулировка тока нагрузки». Такая схема часто применяется в исполнительных механизмах для дистанционной передачи показаний о положении выходного вала. В этом случае перемещение плунжера осуществляется от кулачка, установленного на выходном валу.

С точки зрения динамических свойств *индуктивные и трансформаторные преобразователи представляются безынерционным звеном, если в качестве выходного сигнала используется напряжение $U_{вых}$, и инерционным звеном, если в качестве выходного сигнала используется ток.*

Индукционные преобразователи основаны на явлении электромагнитной индукции – наведении электродвижущей силы в электрическом контуре при изменении магнитного потока. К ним относятся сельсины и тахогенераторы.

Сельсины используют в качестве преобразователей угла поворота вала. Схема соединения сельсинов в измерителе рассогласования положения двух валов представлена на рис. 3.6. Переменное напряжение питания U_n подводится к статорной обмотке сельсина-датчика СД, выходное напряжение $U_{вых}$ снимается со статорной обмотки сельсина-трансформатора СТ. Если угловое положение обоих валов относительно одноимённых точек статоров характеризуется углами α и β , напряжение на выходе при использовании двух одинаковых сельсинов можно вычислить по формуле:

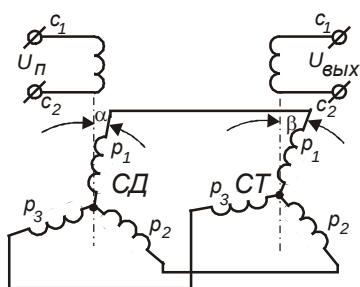


Рис. 3.6. Схема измерителя рассогласования на сельсинах

$$U_{вых} = \frac{3K}{4Z} E_{макс} \cos(\beta - \alpha),$$

где $E_{макс}$ – максимальное выходное напряжение при рассогласовании положений валов в 90° ;

Z – полное сопротивление одной роторной обмотки;

K – коэффициент пропорциональности.

По динамическим свойствам *сельсинный измеритель рассогласования при высокоомной нагрузке может быть отнесён к безынерционному звену.*

Преобразователями скорости вращения вала в автоматических системах управления служат тахогенераторы постоянного (рис.3.2,г) и переменного тока. Тахогенератор постоянного тока представляет собой электрический генератор постоянного тока небольшой мощности и выполняется либо с магнитоэлектрическим возбуждением от обмотки возбуждения, либо с возбуждением от постоянных

магнитов. Схема включения тахогенератора изображена на рис. 3.7. Электродвижущая сила якоря тахогенератора определяется по выражению:

$$E_{\text{я}} = k_e \Phi_{\text{в}} \Omega,$$

где k_e – постоянный коэффициент;

$\Phi_{\text{в}}$ – магнитный поток возбуждения;

Ω – угловая скорость вращения вала тахогенератора.

Если поток возбуждения величина постоянная, $E_{\text{я}}$ зависит только от скорости вращения. При наличии нагрузки на якоре тахогенератора происходит падение напряжения, поэтому выходное напряжение меньше э.д.с. и равно:

$$U = E_{\text{я}} - I_{\text{я}} R_{\text{я}},$$

где $I_{\text{я}} = U / R_{\text{н}}$ – ток якоря;

$R_{\text{н}}$ – сопротивление нагрузки.

Подставив $I_{\text{я}}$ в предыдущее выражение, получим:

$$U = \frac{E_{\text{я}}}{1 + (R_{\text{я}} / R_{\text{н}})} = \frac{k_e \Phi_{\text{в}}}{1 + (R_{\text{я}} / R_{\text{н}})} \Omega.$$

Это выражение представляет собой статическую характеристику тахогенератора с коэффициентом преобразования $k_{\tau} = \frac{k_e \Phi_{\text{в}}}{1 + (R_{\text{я}} / R_{\text{н}})}$, величина которого определяется сопротивлением нагрузки и потоком возбуждения.

Так как скорость вращения вала является производной по времени от угла поворота вала, *тахогенератор может служить в качестве дифференцирующего элемента*. Следовательно, если пренебречь постоянной времени якорной цепи тахогенератора, типично имеющей значение 0,02...0,05 с, *тахогенератор может считаться идеальным дифференцирующим звеном с передаточной функцией*

$$W_{\text{тг}}(p) = k_{\tau} p.$$

Имеется много вариантов конструкций цифровых измерителей положения вала и скорости вращения. Одна из конструкций изображена на рис. 3.2,д. Частота импульсного выходного сигнала непосредственно пропорциональна скорости вращения, а после интегрирования сигнала – величине перемещения вала. Как и тахогенератор, этот преобразователь имеет передаточную функцию *дифференцирующего звена*.

Тепловые преобразователи основаны на тепловых процессах. Их естественная входная величина – температура. Тепловыми преобразователями в лабораторных установках служат терморезисторы и термоэлектрические преобразователи – термопары.

Металлический *терморезистор* представляет собой проводник, сопротивление которого достаточно сильно зависит от температуры. Большинство химически чистых металлов обладает положительным температурным коэффициентом. Наиболее широкое распространение имеют платиновые и медные терморезисторы.

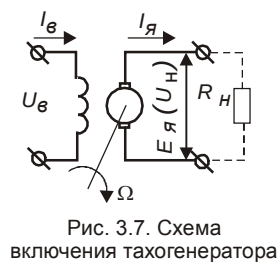


Рис. 3.7. Схема включения тахогенератора

Зависимость сопротивления медного терморезистора R_t при температуре t описывается формулой

$$R_t = R_0 e^{\alpha(t-t_0)},$$

где R_0 – сопротивление терморезистора при некоторой начальной температуре t_0 ,
 α – температурный коэффициент сопротивления.

Разлагая правую часть выражения в ряд и ограничиваясь первыми двумя членами ряда, что справедливо для многих металлов, получим линейную зависимость, являющуюся статической характеристикой терморезистора, в виде

$$R_t = R_0 [1 + \alpha (t - t_0)].$$

Статическая характеристика платинового терморезистора существенно нелинейна. Номинальные статические характеристики стандартных терморезисторов даются интерполяционными формулами и таблицами.

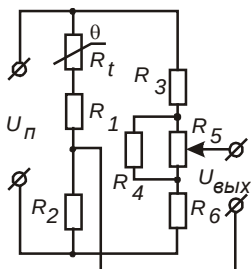


Рис. 3.8. Измеритель рассогласования с терморезистором

Терморезистор может быть включён в потенциометрическую схему измерителя рассогласования (рис. 3.8). Здесь R_t – терморезистор, являющийся датчиком температуры объекта регулирования, включён в мостовую схему, образованную резисторами $R_t, R_1 \dots R_6$. Резистор R_5 служит задатчиком, изменением величины резисторов $R_1 \dots R_4, R_6$ при заданном значении сопротивления задатчика R_5 производится балансировка схемы при номинальном значении температуры объекта. Диапазон изменения заданной температуры устанавливается выбором сопротивлений резисторов R_3, R_4, R_6 .

Собственно чувствительный элемент – терморезистор – заключён в защитный чехол и изолирован от него керамическими бусами, образуя конструктивное целое – термометр сопротивления. Точностные характеристики стандартных термометров сопротивления такие же, как термопар, но верхний предел измерения температуры существенно ниже. Чувствительность промышленных термометров сопротивления составляет $0,18 \dots 0,22 \text{ Ом/}^\circ\text{С}$. Массивный чехол и изоляция увеличивают тепловую инерцию преобразователя. Термометры сопротивления изготовляют малой, средней и большой инерционности с показателем тепловой инерции соответственно 10, 30 и 60 с. В динамическом отношении *термометр сопротивления является аperiodическим звеном первого порядка*.

Действие *термоэлектрических преобразователей* основано на свойстве металлов и сплавов создавать электродвижущую силу (термо-э.д.с.), зависящую от температуры мест соединения (спев) концов двух разнородных проводников (термоэлектродов).

Номинальные статические характеристики термоэлектрических преобразователей даются интерполяционными формулами и таблицами.

Измерение температуры сводится к измерению термо-э.д.с. термоэлектрического преобразователя при помощи электроизмерительных приборов, в качестве которых используют магнитоэлектрические милливольтметры и потенциометры. Соединение термоэлектрических преобразователей с измерительными приборами осуществляется специальными удлинительными проводами.

В промышленности применяют стандартные термоэлектрические преобразователи главным образом следующих типов: платинородий-платиновый, платинородий-платинородиевый, вольфрамрений-вольфрамрениевый, хромель-алюмелевый, хромель-копелевый. Самой чувствительной высокотемпературной термопарой является хромель-копелевая, но и её э.д.с не превышает 66 мВ.

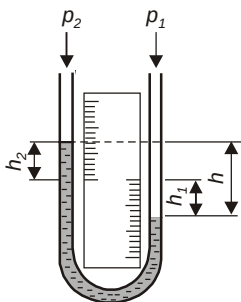


Рис. 3.9. Схема двухтрубного водяного манометра

Конструкция термоэлектрических преобразователей аналогична конструкции термометров сопротивления. Промышленность изготавливает преобразователи малой, средней, большой и ненормированной инерционности с показателями тепловой инерции от 5 до 180 с для погружаемых преобразователей и от 10 до 300 с для поверхностных преобразователей. По динамическим свойствам *термопреобразователь в чехле является апериодическим звеном первого порядка.*

Для измерения давления газа в установках использованы жидкостные и мембранные *дифференциальные манометры* для измерения разности двух давлений, из которых ни одно не является барометрическим. На рис. 3.9 изображён трубный манометр. Измеряемая разность давлений уравнивается и измеряется столбом рабочей жидкости, определяемым как сумма столбов h_1 и h_2 в обеих трубках колена.

В международной системе единиц (СИ) единицей давления является паскаль (Па). Для перевода давления, измеренного трубным манометром с водяным заполнением, следует использовать соотношение:

$$1 \text{ мм вод. ст.} = 9,80638 \text{ Па.}$$

В мембранном дифференциальном манометре изгиб мембраны под влиянием разности давлений воспринимается для электропередачи индуктивным преобразователем перемещения.

3.3. Автоматические компенсационные приборы

В лабораторных установках использованы автоматические потенциометры и измерительные мосты сопротивлений.

Автоматический потенциометр предназначен для измерения э.д.с. термопар. На рис. 3.10 показана электрическая схема автоматического потенциометра. Измеряемое напряжение E_x алгебраически суммируется с напряжением, снимаемым с диагонали АС измерительной схемы, и результат поступает на вход электронного усилителя ЭУ, к выходу которого подключён реверсивный асинхронный двигатель РД, автоматически сводящий сумму напряжений к нулю путём перемещения в соответствующем направлении подвижного контакта реохорда R. Одновременно двигатель перемещает стрелку показывающей части и перо самопишущей части потенциометра, и синхронно с ними перемещает движок потенциометрического преобразователя ПП, включаемого как датчик в дистанционной передаче показаний.

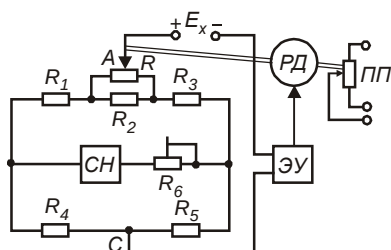


Рис. 3.10. Принципиальная схема автоматического потенциометра

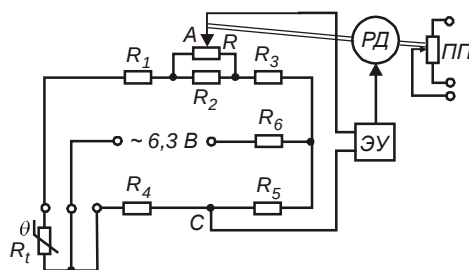


Рис. 3.11. Принципиальная схема автоматического уравновешенного моста

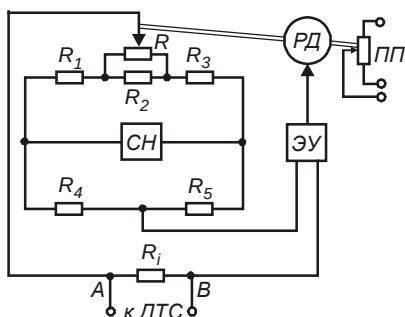


Рис. 3.12. Принципиальная схема прибора для измерения унифицированного токового сигнала

Автоматический мост сопротивлений (рис. 3.11) работает в комплекте с термопреобразователем сопротивления R_m . Измерительная диагональ моста AC подключена ко входу электронного усилителя ЭУ, выход которого связан с реверсивным асинхронным двигателем РД. При нарушении равновесия моста из-за изменения температуры термопреобразователя сопротивления реверсивный двигатель автоматически восстанавливает его путём перемещения в соответствующем направлении подвижного контакта реохорда R. Одновременно двигатель

перемещает в новое положение стрелку, перо и движок потенциометрического преобразователя ПП датчика дистанционной передачи показаний.

На рис. 3.12 приведена схема автоматического прибора (милливольтметра), работающего в комплекте с датчиком токового сигнала ДТС. Измерительная схема прибора отличается от измерительной схемы автоматического потенциометра тем, что на входе включён шунт R_i , на котором унифицированный токовый сигнал преобразуется в падение напряжения, изменяющееся в диапазоне 0...10 мВ.

Для токового сигнала 0...5 мА сопротивление шунта равно 2 Ом, а для сигнала 0...20 мА – 0,5 Ом.

3.4. Исполнительные устройства

Исполнительные устройства – это функциональные элементы систем автоматического управления, осуществляющие воздействие на объект управления. Они являются конечными устройствами в цепях автоматического управления технологическим агрегатом. Их структура и конструкции зависят от конечной цели применения. В общем случае они содержат следующие функциональные блоки: блок усиления, исполнительный механизм (ИМ), регулирующий орган (РО), блок ручного управления, датчик положения, блок обратной связи, блок сигнализации конечных положений.

По виду потребляемой энергии исполнительные механизмы подразделяют на электрические, гидравлические, пневматические.

Исполнительные механизмы характеризуют три группы параметров.

1. Параметры, определяющие работоспособность в конкретных условиях эксплуатации.

2. Параметры, необходимые для расчёта статической характеристики регулирующего органа.

3. Параметры, определяющие статические метрологические характеристики исполнительного механизма и исполнительного устройства на холостом ходу: ходовая характеристика, класс точности, чувствительность и пр.

Установлены следующие классы точности исполнительных устройств: 1,5; 2,5; 4,0; 6,0. Вероятность безотказной работы не ниже 0,98 за 2000 ч работы при доверительной вероятности 0,8.

В состав электрических ИМ обычно входят следующие элементы: электродвигатель постоянного или переменного тока (двухфазный или трёхфазный), редуктор, концевые и путевые выключатели, датчики положения выходного вала, тормозное устройство, ручной привод. В отечественной промышленности широко применяются исполнительные механизмы типа МЭО, МЭОК, МЭОБ, имеющие обширную номенклатуру типоразмеров.

В исполнительных механизмах с двигателями постоянного тока – ИМ пропорциональной скорости – используются электродвигатели с независимым возбуждением. Для управления этими механизмами применяют транзисторные или тринисторные усилители, управляемые активным токовым сигналом.

Наиболее часто используются исполнительные механизмы постоянной скорости с асинхронными и синхронными электродвигателями переменного тока. Различные скорости перемещения регулирующего органа реализуются вследствие различной продолжительности времени включения двигателя. Требуемый закон перемещения регулирующего органа при автоматическом управлении формируется регулирующим устройством и реализуется в результате повторно-кратковременного включения двигателя с соответствующим соотношением между продолжительностями включённого и выключенного состояний.

В зависимости от характера перемещения выходного органа электрические исполнительные механизмы подразделяют на три типа:

многооборотные электрические механизмы с вращающимся выходным органом, выходной вал которого совершает требуемое число оборотов;

однооборотные электрические исполнительные механизмы, выходной рычаг которых совершает поворот в пределах 360° ;

прямоходные электрические исполнительные механизмы с поступательным движением штока.

Все электрические исполнительные механизмы изготавливаются для работы в повторно-кратковременном режиме с числом включений до 300 в 1 ч и продолжительностью включений 25 %. Допускается работа в повторно-кратковременном реверсивном режиме в течение 1 ч с числом включений до 600.

Основными параметрами, характеризующими исполнительный механизм, являются:

крутящий момент на выходном валу или усилие на штоке;

номинальное время перемещения выходного органа;

номинальный угол поворота или номинальное перемещение штока;

величина управляющего сигнала или диапазон его изменения;

характер изменения величины средней относительной скорости в зависимости от длительности управляющего импульса.

В зависимости от способа усиления управляющего сигнала электрические исполнительные механизмы подразделяются на механизмы с контактным и с бесконтактным управлением. Включение, отключение и реверсирование механизмов

с контактным управлением осуществляется с помощью релейной или контакторной аппаратуры. Для бесконтактного управления используются преимущественно тринисторные усилители.

В динамическом отношении описанные исполнительные механизмы, если выходным сигналом считать перемещение выходного органа, являются *интегрирующим звеном* с передаточной функцией

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

где $T_{\text{им}}$ – постоянная времени исполнительного механизма, равная времени перемещения выходного органа из одного крайнего положения, соответствующего начальному положению регулирующего органа, в другое, соответствующее его конечному положению.

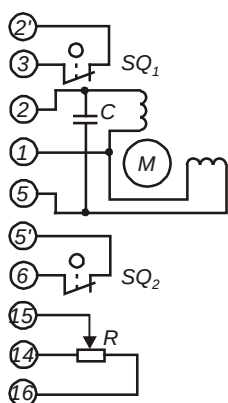


Рис. 3.13. Принципиальная электрическая схема механизмов типа МЭО-0,63 с предельным выключателем

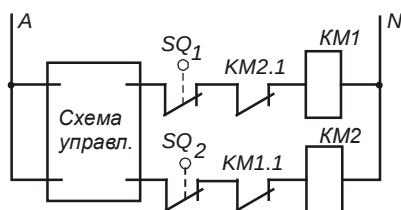


Рис. 3.14. Схема управления исполнительным механизмом

На рис. 3.13 приведена принципиальная схема исполнительного механизма с асинхронным двухфазным двигателем с минимальным набором аппаратуры, а именно, снабжённого конечными выключателями и датчиком положения выходного вала.

Каждый тип пускового устройства рассчитан на работу в комплекте с определённым типом исполнительного механизма. Наиболее распространённые ИМ постоянной скорости с асинхронными или синхронными двухфазными двигателями и трёхфазными асинхронными управляются от контактных релейных или бесконтактных тринисторных пусковых устройств.

Релейные пусковые устройства (рис. 3.14) представляют собой реверсивные магнитные контакторы, управление которыми в зависимости от их габаритов осуществляется либо непосредственно от регулирующих приборов, либо через промежуточные реле. Общая точка реверсивных контакторов $KM1$ и $KM2$ подключается к нейтрали N . Цепи управления контакторами содержат исключающую блокировку (контакты $KM1.1$ и $KM2.1$), делающую невозможным одновременное включение контакторов. Для остановки ИМ в крайних положениях в цепи контакторов вводятся контакты конечных выключателей (SQ_1 для одного направления, SQ_2 – для другого). Имеется много

стандартных схем для управления ИМ при различных условиях работы, однако изложенные принципы сохраняются.

Входные цепи бесконтактных пусковых устройств позволяют использовать обычно два вида управляющих сигналов:

- 1) активный токовый сигнал управления обычно $0... \pm 5$ мА или $0... \pm 20$ мА и сигнал в виде напряжения 24 ± 6 В постоянного или двухполупериодно выпрямленного тока;
- 2) пассивный сигнал управления в виде замыкания соответствующих входных зажимов с помощью бесконтактных или контактных ключей.

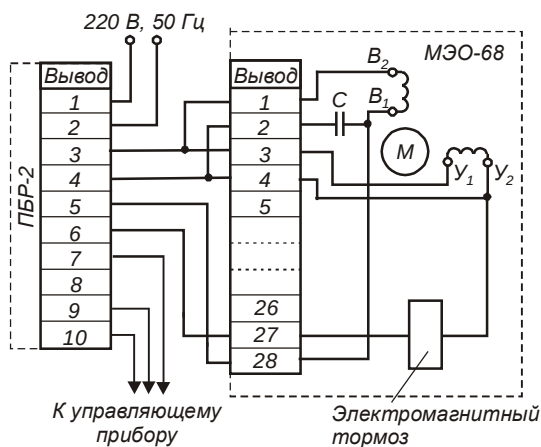


Рис. 3.15. Схема внешних соединений механизмов типа МЭО-68 с бесконтактным пускателем типа ПБР-2

Типичными примерами бесконтактных пусковых устройств являются тринисторные бесконтактные реверсивные пускатели двухфазный ПБР-2 и трёхфазный ПБР-3. На рис. 3.15 изображена схема подключения ИМ типа МЭО-68 к бесконтактному пускателю ПБР-2. Управляющим сигналом является подача через внешние контакты постоянного напряжения -24 В с зажима 10 колодки зажимов ПБР на зажимы 7 или 9 в зависимости от требуемого направления вращения. При использовании ПБР исключающая блокировка от ошибочного одновременного включения механизма в обоих направлениях вращения не требуется; соответствующая блокировка уже имеется в

схеме ПБР. Контакты конечных выключателей должны вводиться последовательно с зажимами 7 и 9 или в цепь зажима 10. Отдельная часть схемы ПБР предназначена для управления электромагнитным тормозом.

Регулирующие органы (РО) АСР делятся на генераторные и дроссельные. Подавляющее большинство регулирующих дроссельных органов представляет собой либо шиберы и поворотные заслонки, устанавливаемые обычно для регулирования расхода газа, либо дроссельные клапаны для жидкостей и пара. На

рис. 3.16 и 3.17 изображены поворотная заслонка и шибер.

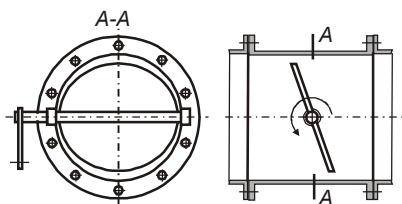


Рис. 3.16. Регулирующая поворотная заслонка

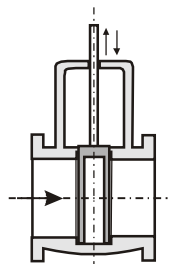


Рис. 3.17. Шибер (здвижка)

Расход регулирующей среды через регулирующий орган изменяется с изменением площади проходного сечения и перепада давления на регулирующем органе. Зависимость между

относительной площадью проходного сечения $F_s / F_{\max}$ и перемещением затвора s РО представляет собой его конструктивную характеристику. Для шиберов и поворотных заслонок эта зависимость имеет вполне определённый вид и изменить её нельзя, это непрофилируемые РО. Дроссельные клапаны являются профилируемыми РО и могут обладать разными конструктивными характеристиками. Промышленность, как правило, выпускает дроссельные клапаны с конструктивными характеристиками двух типов – линейной и экспоненциальной.

Статические характеристики РО подобны их конструктивным характеристикам только при постоянном перепаде давления на РО. Фактические статические характеристики РО зависят от условий установки: от соотношения перепада давления на РО Δp_{PO} и перепада давления в линии Δp_L , где расположен регулирующий орган. Это соотношение изменяется не только при установке РО в разных линиях, но и при изменении степени его открытия: по мере открывания перепад Δp_{PO} уменьшается, а перепад давления в линии Δp_L в связи с увеличением расхода возрастает.

Условия установки принято характеризовать величиной $\zeta_{\text{л}}$ – условным коэффициентом сопротивления линии, отнесённым к скорости потока $w_{\text{РО}}$ во входном патрубке РО.

Для линии можно записать:

$$\Delta p_{\text{л}} = \zeta_{\text{л}} \rho w_{\text{РО}}^2 / 2 ,$$

где $\Delta p_{\text{л}}$ – потеря напора в линии, Па;

ρ – плотность вещества, протекающего по линии и РО, кг/м³;

$w_{\text{РО}}$ – скорость вещества во входном патрубке РО, м/с.

Требуемую статическую характеристику РО можно получить, если обеспечить нужную величину условного коэффициента сопротивления линии $\zeta_{\text{л}}$.

Значение $\zeta_{\text{л}}$ определяется площадью проходного сечения РО при известном максимальном расходе $Q_{\text{макс}}$ регулирующей среды. Очевидно, что

$$w_{\text{РО макс}} = Q_{\text{макс}} / F_{\text{макс}} .$$

Подставив в предыдущую формулу, получим

$$\zeta_{\text{л}} = \frac{2 \Delta p_{\text{л}}}{\rho} \cdot \frac{F_{\text{макс}}^2}{Q_{\text{макс}}^2} ,$$

следовательно, площадь проходного сечения РО должна быть равна

$$F_{\text{макс}} = Q_{\text{макс}} \sqrt{\frac{\zeta_{\text{л}} \rho}{2 \Delta p_{\text{л}}}} .$$

Таким образом, определив по статической характеристике объекта регулирования необходимую форму статической характеристики РО и измерив (на действующем объекте) или рассчитав (при проектировании) общее сопротивление линии, можно вычислить максимальную площадь проходного сечения (и размеры) РО.

Сказанное о статических характеристиках РО относится к случаям установки РО в условиях переменного перепада давления на РО, который изменяется по мере изменения открытия РО. В отдельных случаях могут быть установлены автоматические регуляторы, поддерживающие постоянный перепад давления на РО. Тогда статическая характеристика РО совпадает с его конструктивной характеристикой. При необходимости статические характеристики РО можно изменять за счёт кинематических связей между исполнительным механизмом и регулирующим органом. Характеристики профилируемых регулирующих органов можно изменять, пересчитав профиль запорного органа.

Библиографический список

1. Маругин А.П. Элементы систем автоматики: учеб. пособие.- Екатеринбург: Уральский гос. горный ун-т, 2006. – 218 с.
2. Малафеев С.И., Малафеев А.А. Основы автоматики и системы автоматического управления: учебник.- М.: ИЦ Академия, 2010. – 383 с.

4. РЕГУЛИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА, РЕАЛИЗУЮЩИЕ ЛИНЕЙНЫЕ ЗАКОНЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Регулирующим воздействием (выходным сигналом) регулирующего устройства (РУ) является сигнал на выходе исполнительного устройства – поступательное перемещение штока, поворот выходного вала, величина сигнала на выходе усилителя напряжения или тока, служащего источником питания нагрузки (объекта регулирования) и т.п. В излагаемом в этой главе материале предполагается, что исполнительным устройством регулирующего устройства служит пропорциональное исполнительное устройство, выходная величина которого прямо пропорциональна входной величине, а также что передача сигнала от входа к выходу производится мгновенно без какой-либо инерции, т.е. *в динамическом отношении такое исполнительное устройство эквивалентно пропорциональному звену*. Хорошим приближением к этому идеальному исполнительному устройству является пропорциональный соленоид.

Пропорциональным регулирующим устройством (П-регулятором) называют устройство, у которого изменение регулирующего воздействия $y(\tau)$ от некоторого начального значения y_0 (выходной сигнал) пропорционально отклонению во времени $\varepsilon(\tau)$ регулируемой величины от заданного значения.

Закон регулирования П-регулятора

$$y(\tau) = k_p \varepsilon(\tau),$$

где k_p – коэффициент пропорциональности, являющийся параметром настройки регулятора; если $y(\tau)$ и $\varepsilon(\tau)$ величины именованные, k_p также является именованной величиной.

Величину $1/k_p$, выраженную в процентах, называют зоной пропорциональности.

В динамическом отношении П-регулятор аналогичен усилительному звену и имеет передаточную функцию

$$W_{\Pi}(p) = y(p) / \varepsilon(p) = k_p .$$

Таким образом, П-регулятор воздействует на исполнительный механизм (ИМ) пропорционально величине ошибки регулирования $\varepsilon(\tau)$.

Очень часто, а в системах программного управления почти всегда для уменьшения статической погрешности и увеличения запаса устойчивости применяют П-регуляторы с двумя органами настройки, реализующими закон регулирования в виде

$$y(\tau) = k_p \varepsilon(\tau) + \alpha_n x_3(\tau),$$

где $x_3(\tau)$ – заданное значение параметра;

α_n – коэффициент пропорциональности усиления по цепи формирования сигнала задания, $\alpha_n \approx 1/(k_{ИМ}k_0)$; $k_{ИМ}$, k_0 – статические коэффициенты передачи соответственно исполнительного механизма и объекта регулирования.

П-регуляторы называют также статическими регуляторами, так как в автоматических системах регулирования (АСР) с этими регулирующими устройствами при различных нагрузках регулируемого объекта регулируемая величина удерживается на различных значениях. Объясняется это тем, что перемещение регулирующего органа в новое положение, соответствующее новой нагрузке, может быть произведено только за счёт отклонения регулируемой величины от заданного значения (статической ошибки). Наличие члена $\alpha_{\pi}x_3(\tau)$, реализующего так называемую ручную перестановку, позволяет получить при некотором выбранном значении задания $x_3(\tau)$ статическую ошибку регулирования равной нулю.

Интегральное регулирующее устройство (И-регулятор) обеспечивает пропорциональную зависимость между изменением скорости регулирующего воздействия $dy(\tau)/d\tau$ и величиной отклонения $\varepsilon(\tau)$ регулируемой величины от заданного значения. Само же регулирующее воздействие $y(\tau)$ изменяется пропорционально интегралу по времени от $\varepsilon(\tau)$.

Идеализированный закон И-регулирования имеет вид:

$$y(\tau) = \frac{1}{T_{\text{и}}} \int_0^{\tau} \varepsilon(\tau) d\tau \quad \text{или} \quad \frac{dy(\tau)}{d\tau} = k_{\text{рл}} \varepsilon(\tau),$$

где $T_{\text{и}}$ – постоянная времени интегрирования, равная по величине тому времени, в течение которого относительное изменение регулирующего воздействия достигает значения, равного относительному скачкообразному отклонению ε_0 , поданному на вход регулятора; $T_{\text{и}}$ – параметр настройки регулятора;

$k_{\text{рл}}$ – коэффициент передачи регулятора по скорости, который численно равен скорости изменения выходного сигнала регулятора при отклонении регулируемой величины на единицу её измерения; размерность $k_{\text{рл}}$ зависит от размерностей $y(\tau)$ и $\varepsilon(\tau)$.

Таким образом, И-регулятор воздействует на ИМ пропорционально интегралу от величины ошибки и в динамическом отношении представляет собой интегрирующее звено.

Передачная функция И-регулятора имеет вид:

$$W_{\text{и}}(p) = y(p)/\varepsilon(p) = 1/(T_{\text{и}}p) = k_{\text{рл}}/p.$$

И-регуляторы называют также астатическими регуляторами, так как в АСР с этими регуляторами различным значениям внешнего возмущающего воздействия соответствует постоянное значение регулируемого параметра, равное заданному значению.

Пропорционально-интегральным регулирующим устройством (ПИ-регулятором) называют такое регулирующее устройство, у которого регулирующее воздействие пропорционально отклонению и интегралу от отклонения регулируемой величины.

Уравнение движения ПИ-регулятора записывается в виде

$$y(\tau) = k_{\text{р}} \left[\varepsilon(\tau) + \frac{1}{T_{\text{из}}} \int_0^{\tau} \varepsilon(\tau) d\tau \right],$$

где k_p и $T_{уз}$ – коэффициент пропорциональности и постоянная времени интегрирования, называемая постоянной времени изодрома, являющиеся параметрами настройки ПИ-регулятора.

Постоянную времени изодрома $T_{уз}$ часто называют временем удвоения, так как её величину определяют как время, в течение которого относительное регулирующее воздействие достигает своего удвоенного значения относительно пропорциональной составляющей $k_p \varepsilon_0$ при подаче на вход регулирующего устройства скачкообразного сигнала с относительной величиной отклонения ε_0 (при нулевых начальных условиях $y_0 = 0$).

Приведённое выше выражение можно записать в виде

$$\frac{dy(\tau)}{d\tau} = k_p \left[\frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau} + \frac{1}{T_{из}} \varepsilon(\tau) \right].$$

Из этого выражения следует, что скорость изменения регулирующего воздействия пропорциональна производной по времени от отклонения и величине отклонения.

Передаточная функция ПИ-регулятора имеет вид

$$W_{ПИ}(p) = y(p) / \varepsilon(p) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_{из}p} \right).$$

В динамическом отношении действие ПИ-регулятора эквивалентно суммарному действию пропорционального регулирующего устройства с коэффициентом пропорциональности k_p и интегрирующего регулирующего устройства с коэффициентом передачи $k_p/T_{уз}$, соединённых по параллельной схеме.

При скачкообразном изменении задания x_3 идеальный ПИ-регулятор мгновенно перемещает пропорциональный ИМ на величину $k_p x_3 k_{ИМ}$, пропорционально сигналу x_3 и коэффициенту передачи ИМ $k_{ИМ}$, и с этого же мгновенья ИМ дополнительно будет перемещаться в ту же сторону со скоростью $k_p x_3 k_{ИМ} / T_{уз}$, пропорциональной величине скачка входного сигнала.

Точно так же на выходе ПИ-регулятора при отклонении регулируемой величины от заданного значения мгновенно изменяется пропорциональная составляющая, и сразу же воздействие на исполнительный механизм постепенно увеличивается под влиянием интегральной составляющей.

ПИ-регуляторы также относятся к астатическим регулирующим устройствам.

В системах программного управления могут использоваться алгоритмы регулирования, которые формируются в следующих видах:

$$y(\tau) = k_p \varepsilon(\tau) + \frac{1}{T_{и}} \int_0^{\tau} \varepsilon(\tau) d\tau + \alpha_n x_3(\tau);$$

$$y(\tau) = k_p \left[\varepsilon(\tau) + \frac{1}{T_{из}} \int_0^{\tau} \varepsilon(\tau) d\tau \right] + \alpha_n x_3(\tau),$$

где T_u – постоянная времени интегрирования.

Пропорционально-дифференциальными регулирующими устройствами (ПД-регуляторами) называют регуляторы, у которых регулирующее воздействие пропорционально отклонению регулируемой величины и скорости этого отклонения. Так как скорость изменения отклонения регулируемой величины является её производной по времени, ПД-регуляторы называют ещё регулирующими устройствами с воздействием по производной.

Производная от отклонения или от самой регулируемой величины характеризует тенденцию изменения регулируемой величины. Величина и знак воздействия по производной позволяют регулирующему устройству как бы «предвидеть», в какую сторону и на сколько отклонилась бы регулируемая величина под действием данного возмущения, и соответственно «предварять» своим воздействием значительные отклонения регулируемой величины от заданного значения. РУ с воздействием по производной позволяют завершать процесс регулирования в более короткое время, чем все рассмотренные выше регулирующие устройства.

Закон ПД-регулирования имеет вид

$$y(\tau) = k_p \varepsilon(\tau) + T_d \frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau},$$

где k_p и T_d – коэффициент пропорциональности и постоянная времени дифференцирования, являющиеся параметрами настройки регулятора.

Часто вместо постоянной времени дифференцирования T_d используют постоянную времени предварения $T_{пв}$, которая также определяет значение составляющей регулирующего воздействия по скорости. Закон регулирования записывают тогда в виде

$$y(\tau) = k_p \left[\varepsilon(\tau) + T_{пв} \frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau} \right],$$

где $T_{пв} = T_d / k_p$.

Таким образом, выходной сигнал ПД-регулятора состоит из суммы двух составляющих, одну из которых называют пропорциональной, а другую дифференциальной, причём пропорциональная составляющая равна $k_p \varepsilon(\tau)$, а дифференциальная $k_p T_{пв} \frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau} = T_d \frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau}$.

Передаточная функция ПД-регулятора имеет вид

$$W_{ПД}(p) = y(p) / \varepsilon(p) = k_p (1 + T_{пв} p).$$

Кроме указанных выше уравнений ПД-регуляторы могут быть построены с использованием следующих зависимостей:

$$y(\tau) = k_p \left[\varepsilon(\tau) - T_{пв} \frac{dx_m(\tau)}{d\tau} \right],$$

где $x_m(\tau)$ – текущее значение регулируемого параметра, получаемого с датчика,

$$y(\tau) = k_p \left[\varepsilon(\tau) + T_{пв} \frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau} \right] + \alpha_n x_3(\tau);$$

$$y(\tau) = k_p \left[\varepsilon(\tau) - T_{пв} \frac{dx_\tau(\tau)}{d\tau} \right] + \alpha_n x_3(\tau).$$

Введение в регулирующее воздействие сигнала производной только от регулируемого параметра позволяет в ряде случаев улучшить динамические показатели работы АСР в пусковых режимах, а также в системах с программным и особенно со скачкообразным изменением задания.

ПД-регуляторы являются статическими регулируемыми устройствами.

Пропорционально-интегрально-дифференциальные регулирующие устройства (ПИД-регуляторы) это такие регулирующие устройства, идеализированный закон функционирования которых записывается в виде

$$y(\tau) = k_p \left[\varepsilon(\tau) + T_{пв} \frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau} + \frac{1}{T_{из}} \int_0^\tau \varepsilon(\tau) d\tau \right].$$

Таким образом, регулирующее воздействие пропорционально отклонению, скорости изменения отклонения и интегралу по времени отклонения регулируемой величины от заданного значения. ПИД-регулятор имеет три параметра настройки: k_p , $T_{пв}$, $T_{из}$.

В тех случаях, когда заданная величина претерпевает значительные изменения или изменяется скачкообразно, например, при программном регулировании, дифференциальную составляющую регулирующего воздействия формируют только по сигналу регулируемого параметра $x_m(\tau)$, т.е. закон регулирования записывают в виде

$$y(\tau) = k_p \left[\varepsilon(\tau) + \frac{1}{T_{из}} \int_0^\tau \varepsilon(\tau) d\tau - T_{пв} \frac{dx_\tau(\tau)}{d\tau} \right].$$

В соответствии с исходным идеализированным законом функционирования передаточную функцию ПИД-регулятора можно записать в виде

$$W_{ПИД}(p) = \frac{y(p)}{\varepsilon(p)} = k_p \left(1 + T_{пв} p + \frac{1}{T_{из} p} \right).$$

При скачкообразном изменении входного сигнала идеальный ПИД-регулятор в начальный момент времени оказывает практически мгновенно максимальное воздействие на ИМ, а затем величина этого воздействия спадает (в реальных регулирующих устройствах по экспоненте) до значения, определяемого пропорциональной частью регулятора, и одновременно, как и в ПИ-регуляторе, начинает оказывать своё влияние интегральная составляющая.

ПИД-регулятор по возможностям настройки является универсальным, так как с его помощью можно реализовать различные типовые законы регулирования (П, ПИ, ПД, ПИД).

Как известно, степень влияния производной на динамику процесса регулирования определяется не по абсолютной величине уставки $T_{пв}$, а по величине отношения $T_{пв}$ к постоянной времени, характеризующей инерционность автоматизируемого объекта. При этом малой постоянной времени объекта соответствует при применении закона ПИД-регулирования малое значение уставки постоянной времени интегрирования $T_{из}$ и наоборот. Поэтому можно рассматривать величину отношения $\lambda = T_{пв} / T_{из}$ как критерий для оценки эффективности введения в закон регулирования дифференцирующего воздействия.

Поэтому целесообразно переписать закон ПИД-регулирования в следующем виде:

$$y(\tau) = k_p \left[\varepsilon(\tau) + \lambda T_{из} \frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau} + \frac{1}{T_{из}} \int_0^{\tau} \varepsilon(\tau) d\tau \right]. \quad (A)$$

В ряде случаев бывает целесообразно закон ПИД-регулирования представлять в виде

$$y(\tau) = k_p \left[\varepsilon(\tau) + T_{пв} \frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau} + \frac{\lambda}{T_{пв}} \int_0^{\tau} \varepsilon(\tau) d\tau \right]. \quad (Б)$$

Из выражения (А) получаем, что $T_{пв} = \lambda T_{из}$, а из выражения (Б) – что постоянная времени изодрома $T_{из} = T_{пв} / \lambda$.

Если диапазон изменения λ лежит в пределах $0 \leq \lambda \leq \lambda_{\max}$, а уставка λ может производиться в этих пределах плавно и независимо от других параметров закона регулирования, то в регулирующем устройстве, работающем по закону (А), можно плавно переходить от ПИ- к ПИД-регулированию, а в устройстве, работающем по алгоритму (Б), от ПД- к ПИД-регулированию.

При воздействии на вход регулирующего устройства скачкообразного изменения задания, технологической пульсации регулируемого параметра, белого шума, помех от питающей сети и промышленных помех каскады П-, ПД- и ПИД-регуляторов могут насыщаться. Одним из способов борьбы с подобными помехами является введение в регулирующее устройство различных фильтрующих устройств – демпферов. Поэтому перед звеньями, формирующими закон регулирования, обычно включают такой демпфер, который подавляет высокочастотную составляющую спектра случайной помехи и помеху с частотой питающей сети.

При формировании закона ПИД-регулирования с демпфером передаточную функцию регулирующего устройства записывают в виде

$$W_{ПИД}(p) = \frac{y(p)}{\varepsilon(p)} = k_p \left(1 + T_{пв} p + \frac{1}{T_{из} p} \right) \frac{1}{1 + \tau_{дф} p},$$

где $\tau_{дф}$ – постоянная времени демпфера.

Обычно при настройке динамических параметров ПИД-регулятора с демпфером последний относят к оператору объекта регулирования (т.е. учитывают как часть объекта).

Так как высокочастотные помехи особенно опасны для канала формирования дифференциальной составляющей регулирующего воздействия, закон ПИД-регулирования реализуют в одном из следующих видов:

с одним демпфером

$$W_{\text{ПИД}}(p) = \frac{y(p)}{\varepsilon(p)} = k_p \left(1 + \frac{T_{\text{пв}} p}{(1 + \tau_{\text{дф}})} + \frac{1}{T_{\text{из}} p} \right),$$

с двумя демпферами

$$W_{\text{ПИД}}(p) = \frac{y(p)}{\varepsilon(p)} = \frac{k_p}{1 + \tau_{\text{дф}} p} \left(1 + \frac{T_{\text{пв}} p}{1 + \tau'_{\text{дф}} p} + \frac{1}{T_{\text{из}} p} \right).$$

Такое разделение функций составляющих закона ПИД-регулирования обеспечивает значительную устойчивость контуров регулирования, содержащих регулирующее устройство с указанным алгоритмом, и помогает добиться малых статической и динамической погрешностей АСР.

ПИД-регуляторы относятся к астатическим регулирующим устройствам.

Библиографический список

1. Малафеев С.И., Малафеев А.А. Основы автоматики и системы автоматического управления: учебник.- М.: ИЦ Академия, 2010. – 383 с.
2. Шишмарёв В.Ю. Основы автоматического управления: учеб. пособие. – М.: ИЦ Академия, 2008. – 348 с.

5. СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ РЕАЛЬНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ РЕГУЛЯТОРОВ

5.1. Структурные схемы линейных регуляторов

С помощью реальных промышленных регуляторов точно обеспечить тот или иной типовой закон регулирования невозможно. Промышленные регуляторы состоят из реальных элементов, поэтому их динамические характеристики отличаются от динамических характеристик, определяемых уравнениями идеальных регулирующих устройств.

Для оценки расхождения характеристик идеального и реального регуляторов передаточную функцию $W_p(p)$ реального регулятора представляют в виде произведения передаточной функции $W_{\text{ид}}(p)$ идеального регулятора и передаточной функции $W_{\text{б}}(p)$ некоторого фиктивного балластного звена:

$$W_p(p) = W_{\text{ид}}(p) W_{\text{б}}(p).$$

Балластное звено не имеет заранее известной передаточной функции. Разные регуляторы имеют балластные звенья с различными передаточными функциями. С помощью понятия «балластное звено» удобно оценивать степень отличия реального и соответствующего идеального регуляторов. Исследование балластного звена позволяет сделать вывод об особенностях структурной схемы и настройки того или иного реального регулятора.

Если регулятор идеальный, то передаточная функция балластного звена $W_{\text{б}}(p) = 1$, его модуль $W_{\text{б}}(\omega) = 1$, а фаза $\varphi_{\text{б}}(\omega) = 0$. Чем больше передаточная функция балластного звена отличается от единицы, тем значительно отличается качество регулирования в системах с идеальными и реальными регуляторами.

Автоматические регуляторы, формирующие один и тот же закон регулирования, могут быть построены по различным структурным схемам. Каждая из таких схем

обладает рядом достоинств и недостатков, которые необходимо учитывать при разработке регуляторов и при их эксплуатации. Анализ структурных схем позволяет не только оценить, насколько характеристики реального регулятора отличаются от характеристик идеального, но и установить причины этих отклонений. Рассмотрим некоторые структурные схемы.

Реальный промышленный П-регулятор в прямом канале обычно имеет безынерционный усилитель в виде усилительного звена с передаточной функцией $W_y(p) = k_y$ и исполнительное устройство. В исполнительных устройствах чаще всего применяются электрические исполнительные механизмы с двигателями постоянного и переменного тока или поршневые гидравлические исполнительные механизмы. В большинстве случаев это медленно работающие устройства. Инерцией движущихся частей исполнительного механизма можно как правило пренебречь и передаточную функцию записать в виде $W_{им}(p) = 1/(T_{им}p)$. Здесь $T_{им}$ – постоянная времени, под которой понимают время непрерывного движения при номинальной нагрузке и максимальной скорости выходного вала исполнительного механизма от одного крайнего положения до другого, соответствующих перемещению регулирующего органа между положениями его минимального и максимального открытия; иногда для этой постоянной времени применяют обозначение $T_{пх}$ – время полного хода.

Как следует из передаточной функции, в динамическом отношении такой ИМ является интегрирующим звеном.

Идеальный П-регулятор имеет передаточную функцию $W_{п}(p) = k_p$. Следовательно, для получения у реального П-регулятора такой же передаточной функции необходимо введение обратной связи. Для повышения коэффициента передачи прямого канала этой обратной связью должно охватываться и усилительное звено. С учётом изложенного, структурная схема реального П-регулятора должна иметь вид, представленный на рис. 5.1,а.

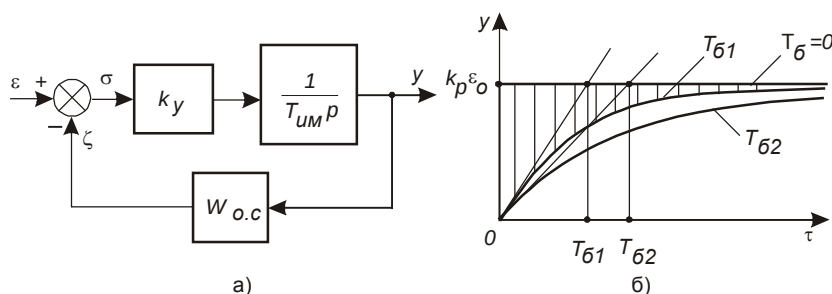


Рис. 5.1. Структурная схема П-регулятора (а) и реализуемый ею закон П-регулирования (б)

Найдём передаточную функцию полученного регулятора и оценим точность реализации закона П-регулирования.

Известно, что когда коэффициент передачи прямого канала достаточно велик, передаточная функция всего соединения определяется только

передаточной функцией его обратной связи, т.е.

$$W_{п}(p) = k_p = \frac{1}{W_{о.с.}(p)},$$

откуда получаем

$$W_{о.с.}(p) = \frac{1}{k_p} = k_{о.с.}.$$

Таким образом, канал обратной связи П-регулятора должен быть выполнен в виде усилительного звена с коэффициентом $k_{о.с.}$, равным обратному значению коэффициента передачи регулятора.

По формулам для вычисления передаточных функций при последовательном и встречно-параллельном включении звеньев найдём передаточную функцию полученного регулятора $W_{р}(p)$:

$$W_P(p) = \frac{k_y \cdot \frac{1}{T_{ИМ} p}}{1 + k_y \cdot \frac{1}{T_{ИМ} p} \cdot k_{o.c}} = \frac{1}{k_{o.c}} \cdot \frac{1}{\frac{T_{ИМ}}{k_y k_{o.c}} p + 1} = W_{П}(p) \cdot W_{\delta}(p).$$

Таким образом, реальный П-регулятор со структурной схемой по рис. 5.1,а в динамическом отношении представляется в виде последовательного соединения идеального П-регулятора с

$$W_{П}(p) = k_p = \frac{1}{k_{o.c}}$$

и некоторого балластного звена с

$$W_{\delta}(p) = \frac{1}{T_{\delta} p + 1}.$$

В динамическом отношении балластное звено является апериодическим звеном первого порядка с постоянной времени T_{δ} . Коэффициент передачи балластного звена равен единице, а постоянная времени

$$T_{\delta} = \frac{T_{ИМ}}{k_y k_{o.c}}.$$

Временные характеристики реального П-регулятора со структурной схемой по рис. 5.1,а представлены на рис. 5.1,б. Параметром настройки регулятора является коэффициент передачи $k_{o.c}$ устройства обратной связи. Чем меньше $k_{o.c}$, тем больше k_p и наоборот. Одновременно надо иметь в виду, что постоянная времени T_{δ} растёт с увеличением постоянной времени $T_{ИМ}$ исполнительного механизма и коэффициента передачи регулятора k_p . Наличие балластного звена в П-регуляторе объясняется конечным значением коэффициента усиления k_y . Действительно, если $k_y \rightarrow \infty$, то $T_{\delta} \rightarrow 0$, а $W_P(p) = k_p = W_{П}(p)$, т.е. рассматриваемый регулятор становится идеальным. Текущее значение динамической ошибки реализации закона П-регулирования при некотором $T_{\delta} = T_{\delta 1}$ показано на рис. 5.1,б высотой вертикальной штриховки.

Идеальный *И-регулятор* имеет передаточную функцию $W_{И}(p) = 1 / T_{И} p$. Типичная структурная схема интегрального регулятора состоит из усилительного и интегрирующего звеньев, охваченных отрицательной обратной связью, и, следовательно, совпадает со структурной схемой, изображённой на рис. 5.1,а. Если, как и ранее, считать усилитель безынерционным и обладающим очень большим коэффициентом усиления, а ИМ – идеальным интегрирующим звеном, то передаточная функция регулятора запишется в виде

$$W_P(p) \cong \frac{1}{W_{o.c}(p)} = W_{И}(p) = \frac{1}{T_{И} p},$$

откуда получим

$$W_{o.c}(p) = T_{И} p,$$

что означает, что в качестве обратной связи должно использоваться идеальное дифференцирующее звено. Если звеном обратной связи будет реальное дифференцирующее звено с передаточной функцией

$$W_{o.c}(p) = W_d(p) = \frac{k_d T_d p}{T_d p + 1},$$

где k_d – коэффициент передачи реального дифференцирующего звена, то закон регулирования будет таким:

$$W_P(p) = \frac{1}{k_d T_d p} \cdot (T_d p + 1) = W_{II}(p) \cdot W_o(p),$$

в котором постоянная времени интегрирования $T_u = k_d T_d$, а балластное звено в динамическом отношении представляет собой форсирующее звено.

Идеальный *ПИ-регулятор* имеет передаточную функцию

$$W_{ПИ}(p) = k_p + \frac{1}{T_{из} p},$$

или

$$W_{ПИ}(p) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_{из} p} \right) = k_p \frac{T_{из} p + 1}{T_{из} p}.$$

Если применён исполнительный механизм с передаточной функцией интегрирующего звена, регулятор может строиться по нескольким структурным схемам, из которых наиболее часто применяемые приведены на рис. 5.2.

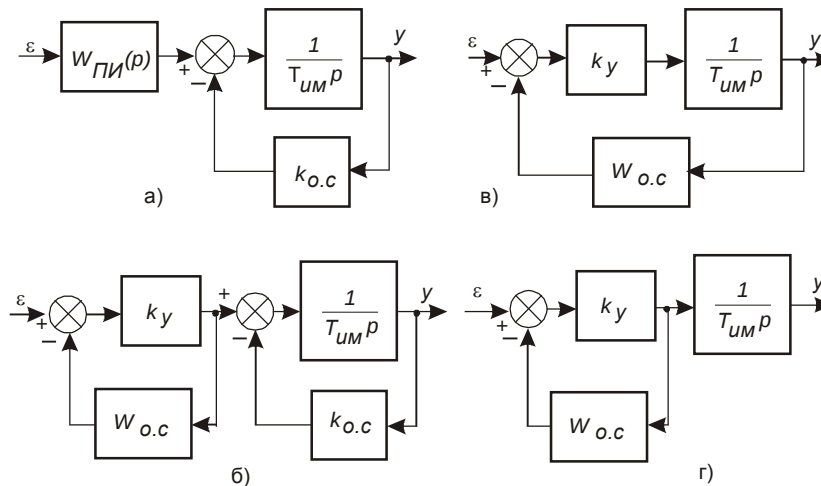


Рис. 5.2. Структурные схемы промышленных ПИ-регуляторов

По структурной схеме рис. 5.2,а формирование закона регулирования осуществляется как в идеальном ПИ-регуляторе. Для уменьшения отрицательного влияния на закон регулирования интегрирующих свойств ИМ последний охвачен отрицательной обратной связью в виде усилительного звена $W_{o.c} = k_{o.c}$. Передаточная функция этого ПИ-регулятора имеет вид:

$$W_P(p) = W_{ПИ}(p) \cdot \frac{1}{T_{им} p + k_{o.c}}.$$

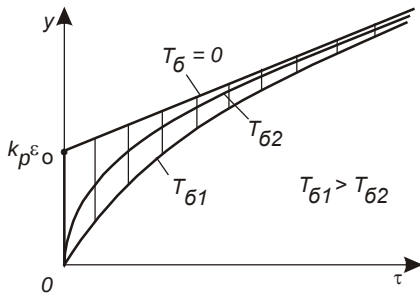


Рис. 5.3. Реализация закона
ПИ-регулирования регулятором
со структурной схемой по рис. 5.2,а

После преобразования для введения балластного звена получим

$$W_P(p) = \frac{W_{ПИ}(p)}{k_{o.c}} \cdot \frac{1}{\frac{T_{ИМ}p}{k_{o.c}} + 1} = \frac{W_{ПИ}(p)}{k_{o.c}} \cdot \frac{1}{T_{\delta}p + 1}.$$

Таким образом, регулятор реализует закон ПИ-регулирования с погрешностью, определяемой балластным апериодическим звеном с постоянной времени $T_{\delta} = T_{ИМ} / k_{o.c}$. На рис. 5.3 вертикальной штриховкой показано текущее значение динамической ошибки регулирования для некоторого значения $T_{\delta 1}$. Чем больше $k_{o.c}$, тем меньше T_{δ} и тем меньше погрешность реализации закона ПИ-регулирования. Однако одновременно уменьшается коэффициент передачи регулятора, который равен теперь $k_p/k_{o.c}$. Для сохранения требуемого значения коэффициента передачи регулятора одновременно с увеличением $k_{o.c}$ надо увеличивать k_p .

В регуляторе по рис. 5.2,б закон ПИ-регулирования реализуется за счёт динамических свойств канала обратной связи в усилительной части регулятора. При принятых раньше предположениях относительно коэффициента передачи прямого канала передаточная функция регулятора может быть записана в виде

$$W_P(p) = W_{ПИ}(p) = \frac{1}{W_{o.c}} \cdot \frac{1}{k_{o.c}},$$

откуда может быть найдена передаточная функция канала обратной связи, охватывающего усилитель:

$$W_{o.c}(p) = \frac{1}{k_{o.c} W_{ПИ}(p)}.$$

Если, например, требуется реализовать изодромный регулятор с передаточной функцией

$$W_{ПИ}(p) = k_p \left(\frac{T_{из}p + 1}{T_{из}p} \right),$$

передаточная функция канала обратной связи $W_{o.c}(p)$, будет

$$W_{o.c}(p) = \frac{1}{k_{o.c}} \cdot \frac{T_{из}p}{k_p(T_{из}p + 1)} = \frac{kT_{из}p}{T_{из}p + 1},$$

где $k = 1/(k_{o.c}k_p)$.

Следовательно, канал обратной связи в усилительной части регулятора должен быть выполнен в виде реального дифференцирующего звена с $k_{\delta} = k$ и $T_{\delta} = T_{из}$.

В структурной схеме по рис. 5.2,в закон ПИ-регулирования реализуется за счёт динамических свойств канала обратной связи, охватывающего усилитель и исполнительный механизм.

Передаточная функция регулятора $W_P(p)$ определяется выражением

$$W_P(p) = W_{ПИ}(p) = \frac{1}{\frac{T_{ИМ}p}{k_y} + W_{o.c.}(p)}.$$

Если коэффициент усиления прямого канала достаточно велик, то $T_{ИМ}p / k_y \approx 0$, и можно записать

$$W_P(p) = \frac{1}{W_{o.c.}}.$$

Отсюда можно найти передаточную функцию канала обратной связи. Для изодромного регулятора получим

$$W_{o.c.}(p) = \frac{1}{k_p} \cdot \frac{T_{из}p}{T_{из}p + 1} = \frac{kT_{из}p}{T_{из}p + 1}.$$

Следовательно, канал обратной связи должен быть выполнен как реальное дифференцирующее звено с $k_{\partial} = k = 1/k_p$ и $T_{\partial} = T_{из}$.

Принципиальное отличие регулятора, построенного по структурной схеме рис. 5.2,г, состоит в том, что в нём для формирования закона ПИ-регулирования используются динамические свойства исполнительного механизма.

Необходимую передаточную функцию канала обратной связи можно найти из условия $W_P(p) = W_{ПИ}(p)$:

$$W_P(p) \approx \frac{1}{W_{o.c.}(p)T_{ИМ}p}.$$

Для изодромного закона регулирования получим

$$k_p \frac{T_{из}p + 1}{T_{из}p} = \frac{1}{W_{o.c.}(p)T_{ИМ}p},$$

откуда найдём функцию $W_{o.c.}(p)$:

$$W_{o.c.}(p) = \frac{k}{Tp + 1},$$

где $k = \frac{T_{из}}{k_p T_{ИМ}}$, $T = T_{из}$.

Таким образом, в качестве обратной связи в ПИ-регуляторе по этой структурной схеме надо включить апериодическое звено.

Положительной особенностью схемы по рис. 5.2,г является то, что для реализации регулятора не нужна обратная связь по положению ИМ, что сокращает число линий связи.

ПИД-регуляторы также могут быть построены по различным структурным схемам. Одна из типичных структурных схем изображена на рис. 5.4,а. Она позволяет строить ПИД-регуляторы из унифицированных блоков. Для формирования пропорционально-интегральной составляющей сигнала регулирования используется ПИ-регулятор по рис. 5.2,г. Дифференцирующий блок конструктивно может выполняться отдельно от других блоков.

Передаточная функция регулятора с такой структурной схемой может быть записана в виде:

$$W_P(p) = k_p \frac{T_D T_{из}^2 + T_{из} p + 1}{T_{из} p} \cdot \frac{1}{\left(\frac{s T_{из} p}{a(s+1)} + 1 \right) (s+1)(s_2 T_{из} p + 1)},$$

где $k_p = T_{из} / (k T_{им})$; $T_{из} = T_1 a$; $T_D = T_2 (k_2 + 1) / a$; $a = 1 + (k_2 + 1) T_2 / T_1$; $s = T_{им} k_p / (k_1 T_{из})$; $s_2 = T_2 / T_{из}$.

В этом случае передаточная функция балластного звена имеет вид:

$$W_6(p) = \frac{s/(s+1)}{\left(\frac{s T_{из}}{a(s+1)} p + 1 \right) (s_2 T_{из} p + 1)}.$$

Это – передаточная функция апериодического звена второго порядка. Максимальное отношение $T_D / T_{из} = 0,25$. Оно достигается при $a = 2$ или $(T_2 / T_1)(k_2 + 1) = 1$. Это обстоятельство может рассматриваться как недостаток такой схемы, поскольку ограничивает область применения ПИД-регуляторов. Переходные характеристики регуляторов при различных s приведены на рис. 5.4,б. При $s = 0$ и $s_2 = 0$ регулятор становится идеальным.

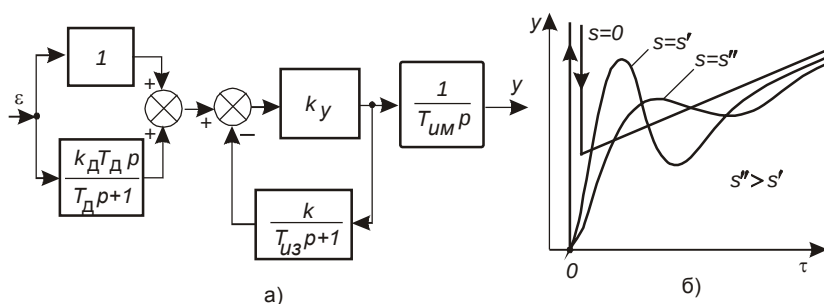


Рис. 5.4. Структурная схема и переходные характеристики реального промышленного ПИД-регулятора

5.2. Структурные схемы релейно-импульсных регуляторов

В промышленности большое распространение получили *регулирующие устройства с импульсным выходным сигналом* и исполнительным механизмом постоянной скорости, снабжённым асинхронным или синхронным двигателем переменного тока. Такие регулирующие устройства формируют управляющее воздействие в виде последовательности электрических импульсов постоянной амплитуды, временные характеристики которых зависят от рассогласования между

фактическим и заданным значениями регулируемой величины, параметров реализуемого закона регулирования и ряда других факторов.

Во время работы регулирующего устройства происходит усиление его выходных импульсов до уровня, необходимого для управления ИМ интегрирующего типа. Это осуществляется с помощью пускового устройства, контактного или бесконтактного, которое является усилителем мощности. В общем виде ИМ можно рассматривать как нелинейное звено, входным сигналом которого является длительность управляющих импульсов, а выходным – перемещение вала ИМ.

Выходной сигнал регулирующего устройства, управляющий ИМ, характеризуется двумя переменными величинами – длительностью импульсов τ_u и длительностью пауз между ними τ_n .

При подаче на вход ИМ через пусковое устройство импульса длительностью τ_u выходной вал ИМ переместится в относительных единицах на величину $\Delta y = \tau_u / T_{ИМ}$. При воздействии на вход ИМ последовательности импульсов перемещение его выходного органа будет осуществляться в первом приближении по следующему закону:

$$y(\tau) = y_0 + \frac{1}{T_{ИМ}} \int \frac{\tau_u}{\tau_u + \tau_n} d\tau,$$

где y_0 – начальное положение ИМ в относительных единицах.

Это уравнение является уравнением движения ИМ в так называемом скользящем (пульсирующем) режиме.

Скользящий режим является основным режимом работы регулирующего устройства с импульсным выходным сигналом. Именно в этом режиме уравнение регулятора наиболее близко к линейному. При скользящем режиме скорость нарастания сигнала рассогласования на входе регулирующего устройства всегда должна быть меньше скорости его компенсации сигналом функциональной обратной связи. При этом максимально возможный сигнал обратной связи также должен быть больше входного сигнала.

В пульсирующем режиме перемещение ИМ имеет прерывистый характер. При каждом включении пускового устройства ИМ перемещается на величину

$$\Delta y = V_{экв} \tau_u,$$

где $V_{экв}$ – эквивалентная скорость перемещения при данной продолжительности импульса τ_u .

Во время паузы положение ИМ неизменно.

Большинство промышленных объектов из-за их значительной инерционности обладают достаточно хорошими фильтрующими свойствами, поэтому прерывистое перемещение ИМ в пульсирующем режиме работы регулирующего устройства воспринимается ими как плавное, происходящее с некоторой усреднённой скоростью $V_{ср}$, которую можно найти по формуле

$$V_{ср} = V_{экв} \frac{\tau_u}{\tau_u + \tau_n} = V_{экв} \cdot \gamma,$$

где γ – коэффициент заполнения выходных импульсов регулирующего устройства.

Коэффициент заполнения импульсов γ играет роль самостоятельного параметра, так как он практически полностью характеризует последовательность выходных импульсов регулирующего устройства. Поэтому уравнение движения ИМ в скользящем режиме можно представить также в абсолютных единицах в виде

$$y(\tau) = y_0 + \int \gamma v_{экв} d\tau.$$

Совокупность технических средств, состоящая из регулирующего устройства с импульсным выходным сигналом и ИМ интегрирующего типа с соответствующим пусковым устройством образует электрический регулятор, который в пульсирующем режиме позволяет формировать в первом приближении законы П-, ПИ- либо ПИД-регулирования.

Регулирующее устройство с импульсным выходным сигналом выполняет функции релейного усиления в прямом канале, содержащем релейный элемент, и формирование динамических свойств регулятора с помощью контура функциональной обратной связи. Поэтому регулирующее устройство характеризуется зонами нечувствительности Δ_n и возврата Δ_e , а также параметрами функциональной обратной связи.

Будем считать, что пусковое устройство и ИМ выполняют вместе функции усиления и интегрирования выходного сигнала регулирующего устройства. В результате динамические свойства исполнительной части электрического регулятора можно в линеаризованном виде характеризовать следующей передаточной функцией:

$$W_{им}(p) = 1 / T_{им} p.$$

Поэтому структурную схему регулирующего устройства вместе с исполнительной частью можно представить в виде, изображённом на рис. 5.5.

Обобщённая структурная схема регулирующего устройства содержит трёхпозиционный релейный элемент, охваченный частотнозависимой отрицательной обратной связью с передаточной функцией $W_{o.c}(p)$, и входное звено с передаточной функцией $W_{ex}(p)$.

Трёхпозиционный релейный элемент характеризуется коммутируемым выходным напряжением z , зоной нечувствительности Δ_n , зоной возврата Δ_e и порогом отпускания $\Delta_{отп} = \Delta_n / 2 - \Delta_e$.

Релейный элемент вступает в работу только при таких уровнях входного сигнала σ , при которых имеет место неравенство

$$|\sigma| > \Delta_n / 2.$$

Релейный элемент выключается тогда, когда сигнал σ достигнет значения

$$|\varepsilon - \zeta| = \Delta_n / 2 - \Delta_e = \Delta_{отп}.$$

В регулирующих устройствах с импульсным выходным сигналом дополнительными параметрами настройки должны быть выбраны зона нечувствительности и зона возврата трёхпозиционного релейного элемента. Как будет показано ниже, от величины зоны возврата существенным образом зависит минимальная длительность включения ИМ. При работе регулирующего устройства в пульсирующем режиме сигнал σ перед релейным элементом пульсирует в пределах зоны возврата. Выбор слишком малой продолжительности включения ИМ приводит к его повышенному износу.

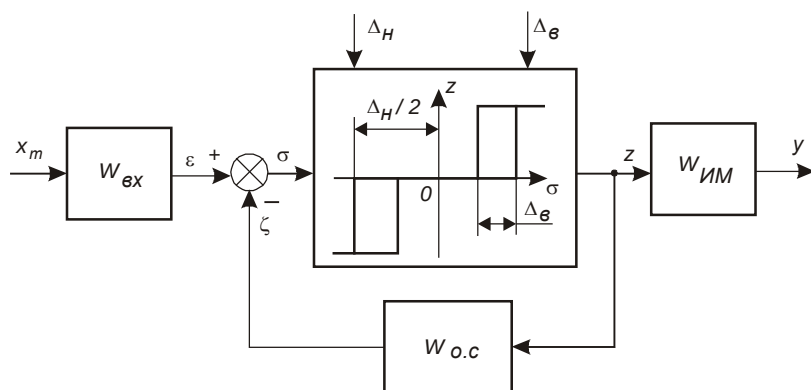


Рис. 5.5. Структурная схема электрического регулятора, содержащего регулирующее устройство с импульсным выходным сигналом и интегрирующий исполнительный механизм

В регулирующем устройстве с релейно-импульсным выходным сигналом, реализующем закон ПИ-регулирования, входное устройство представляет собой измеритель рассогласования $\varepsilon(\tau)$, а обратная связь реализована в виде аperiodического звена с передаточной функцией

$$W_{o.c} = \frac{k}{Tp+1};$$

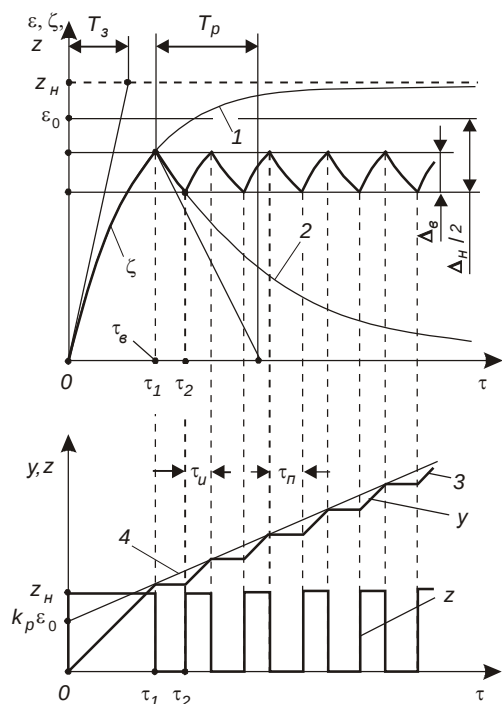


Рис. 5.6. Переходные процессы в разомкнутом релейно-импульсном ПИ-регуляторе при подаче на его вход скачкообразного возмущения $\varepsilon(t)=\varepsilon_0$

обычно это RC-цепь с переключаемыми постоянными времени при заряде T_z и разряде T_p .

Рассмотрим работу регулятора в разомкнутой АСР. При поступлении на вход регулятора постоянного сигнала рассогласования $|\varepsilon_0| > \Delta_H/2$ релейный элемент срабатывает и включает ИМ, который начинает вращаться с постоянной скоростью, перемещая регулируемый орган в сторону уменьшения рассогласования. Одновременно сигнал z или его часть z_H подаётся на устройство обратной связи. Так как устройство обратной связи является аperiodическим звеном, при поступлении на его вход постоянного напряжения $U_{вх} = |z_H|$ на его выходе появится выходное напряжение ζ , возрастающее по экспоненте 1 (рис. 5.6). Это напряжение ζ

направлено встречно напряжению входного сигнала ε_0 , вследствие чего результирующее напряжение $\sigma = \varepsilon_0 - \zeta$, поступающее на вход релейного элемента, начнёт уменьшаться.

При уменьшении σ до значения $\sigma = \varepsilon_0 - \zeta = \Delta_{omn}$ релейный элемент выключится (момент времени τ_1), сигнал z на входе пускового устройства ИМ станет равен нулю, ИМ остановится. Напряжение на входе канала обратной связи также станет равным нулю. С этого момента напряжение на выходе канала обратной связи ζ станет уменьшаться по экспоненте 2, напряжение σ станет возрастать, и при $\sigma > \Delta_H / 2$ (момент времени τ_2) релейный элемент вновь сработает, ИМ включится, а на вход канала обратной связи поступит сигнал z_H . Напряжение ζ на выходе канала обратной связи вновь станет возрастать по экспоненте, повторяющей ход экспоненты 1. Далее процессы включения и выключения (автоколебательный режим) будут повторяться. График перемещения выходного элемента ИМ $y(\tau)$ имеет вид ломаной линии 3, которая может быть приближённо заменена прямой 4.

Сравнивая линеаризованный закон изменения $y(\tau)$ (прямая 4) с идеальным законом ПИ-регулирования, можно утверждать, что релейно-импульсный ПИ-регулятор с ИМ постоянной скорости со структурой, показанной на рис. 5.5, *приближённо реализует закон ПИ-регулирования*. Пропорциональная составляющая закона ПИ-регулирования приближённо реализуется при изменении $\varepsilon(\tau)$ за счёт начального быстрого перемещения в течение времени τ_6 (время первого включения), а интегральная – за счёт последующего автоколебательного режима работы релейного элемента, охваченного отрицательной обратной связью.

Для обеспечения независимой настройки продолжительности импульсов τ_u и пауз τ_n с помощью специального автоматического переключателя в цепи обратной связи переключаются постоянные времени при заряде T_3 и разряде T_p .

Определим параметры приближённого закона ПИ-регулирования данного регулятора.

Обозначим через ζ_3 величину сигнала обратной связи на участке заряда (экспонента 1), а через ζ_p – на участке разряда (экспонента 2). Для продолжительности импульса можно получить

$$\tau_u = \frac{\Delta_B}{-\frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau} + \frac{kz_H}{T_3} - \frac{\zeta_3}{T_3}}.$$

В этом уравнении ζ_3 неизвестно. Поэтому оценим, каким может быть ζ_3 на участке автоколебательного режима работы регулятора. С точки зрения уменьшения ошибки регулирования регулятор будет работать тем лучше, чем меньше Δ_H и, соответственно, σ , наилучшее значение которой $\sigma \approx 0$. Отсюда получаем

$$\varepsilon(\tau) - \zeta_3 = \sigma \approx 0, \text{ т.е. } \zeta_3 \approx \varepsilon(\tau).$$

Подставив полученное значение ζ_3 , найдём

$$\tau_u = \frac{\Delta_B}{-\frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau} + V_{CB} - \frac{\varepsilon(\tau)}{T_3}},$$

где $V_{св} = kZ_H / T_3$ – параметр настройки регулятора, называемый «скоростью связи», характеризующий наклон экспоненты 1 в точке $t = 0$.

Длительность пауз определяется выражением

$$\tau_n = \frac{\Delta_B}{\frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau} + \frac{\varepsilon(\tau)}{T_p}}.$$

Теперь можно найти коэффициент заполнения γ :

$$\gamma = \frac{\frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau} + \frac{\varepsilon(\tau)}{T_p}}{B + V_{св}},$$

где $B = \varepsilon(\tau) \left(\frac{1}{T_p} + \frac{1}{T_3} \right).$

Так как средняя скорость перемещения выходного органа ИМ $v_{ср} = \gamma v_{экв}$, с учётом найденного выражения для γ можно записать:

$$v_{ср} = \frac{v_{экв}}{V_{св} + B} \left(\frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau} + \frac{1}{T_p} \varepsilon(\tau) \right),$$

откуда

$$y_{ср} = \frac{v_{экв}}{V_{св} + B} \left(\varepsilon(\tau) + \frac{1}{T_p} \int \varepsilon(\tau) d\tau \right).$$

Если постоянные времени заряда и разряда одинаковы, то $B = 0$, и последнее выражение можно записать так:

$$y(\tau)_{ср} = \frac{v_{экв}}{V_{св}} \left(\varepsilon(\tau) + \frac{1}{T_{из}} \int \varepsilon(\tau) d\tau \right) = k_p \left(\varepsilon(\tau) + \frac{1}{T_{из}} \int \varepsilon(\tau) d\tau \right),$$

где $k_p = v_{экв} / V_{св} = v_{экв} T_3 / (kZ_H)$,

$$T_{из} = T_p = T_3.$$

Таким образом, релейно-импульсный регулятор со структурной схемой по рис. 5.5 действительно приближённо реализует закон ПИ-регулирования с параметрами настройки k_p и $T_{из}$.

Найдём время первого включения регулятора $\tau_в$ при $\varepsilon(t) = \varepsilon_0$. Если $kZ_H \gg \varepsilon_0$, кривая 1 за время $\tau_в$ незначительно отклонится от прямой, и ζ компенсирует входной сигнал $\varepsilon(t) = \varepsilon_0$ за время $\tau_в$, равное

$$\tau_в = (\varepsilon_0 - \Delta_{омп}) / V_{св}.$$

Если $\varepsilon_0 \gg \Delta_H / 2$, приближённо можно записать

$$\tau_в \approx \varepsilon_0 / V_{св},$$

что на действующем регуляторе позволяет экспериментально найти коэффициент передачи регулятора k_p по формуле:

$$k_p = v_{\text{эв}} \tau_{\text{в}} / \varepsilon_0 .$$

Рассмотренное построение импульсного ПИ-регулятора базируется на реализации регулятора по структурной схеме рис. 5.2,г. Как можно увидеть из рис. 5.6, для технической реализации регулятора экспоненциальная зависимость сигнала обратной связи ζ от времени не обязательна. Например, закон изменения ζ от времени может быть линейным как на участках нарастания ζ , так и на участках уменьшения. Такая зависимость может быть реализована проще, особенно при использовании микропроцессорного управления. Формулы соответствующих зависимостей при этом будут другими, однако результат – приближённая реализация закона ПИ-регулирования – будет таким же.

Библиографический список

1. Шишмарёв В.Ю. Основы автоматического управления: учеб. пособие.–М.: ИЦ Академия, 2008.– 348 с.
2. Маругин А.П. Элементы систем автоматики: учеб. пособие. – Екатеринбург: Уральский гос. горный университет, 2006. – 218 с.

Устройство питается от одноканального источника постоянного напряжения ИП–32 на 30 В, встроенного в корпус.

Устройство представляет собой источник тока, построенный как однокаскадный усилитель постоянного тока на транзисторе VT по схеме с общим эмиттером и последовательной отрицательной обратной связью (резисторы R_6 и R_7). Нагрузка включается в коллекторную цепь VT при сопротивлении нагрузки $2...3\text{ кОм}$ прямо (между контактами 4 и 7 штепсельного разъёма), через балластный резистор R_8 при сопротивлении нагрузки $1...2\text{ кОм}$ (контакты разъёма 4 и 6) или через резисторы R_8+R_9 при сопротивлении нагрузки $0...1\text{ кОм}$ (контакты разъёма 4 и 5).

Входной сигнал задания устанавливается движком потенциометра R_5 .

Питание входных цепей датчика стабилизировано стабилитроном VD_1 , для компенсации динамического сопротивления которого входная цепь подключена к диагонали моста $R_1 - VD_1 - R_2 - R_3$. Температурная стабилизация выходного тока усилителя постоянного тока осуществлена применением в эмиттерной цепи VT медного резистора R_7 , имеющего положительный температурный коэффициент сопротивления, и германиевого точечного диода VD_2 в цепи базы.

2. Лабораторная установка

На рис.2 изображён эскиз щита лабораторной установки САУ уровнем жидкости в резервуаре, в измеритель рассогласования которой входит устройство задающее токовое ЗУ05 (позиция 6). Оно расположено в верхней правой части щита и предназначено для ручного задания уровня жидкости в резервуаре, которое должно поддерживаться в процессе автоматического регулирования.

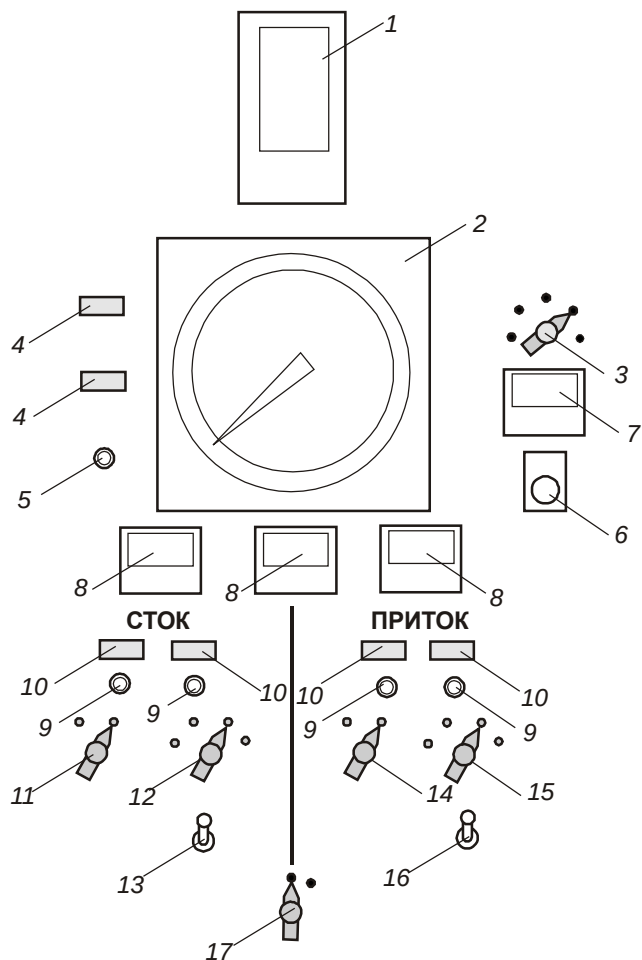


Рис. 2. Размещение элементов САУ на щите управления:

- 1 - регулятор Р25;
- 2 - КСП-3 измерителя уровня;
- 3 - установка предельного уровня жидкости в объекте;
- 4 - контрольные лампы предельных уровней;
- 5 - кнопка управления аварийным сливом;
- 6 - ручной токовый задатчик ЗУ05;
- 7 - миллиамперметр контроля тока задатчика;
- 8 - указатель величины стока, притока и их разности;
- 9 - кнопки дистанционного управления стоком и притоком;
- 10 - контрольные лампы;
- 11, 14 - переключатели управления;
- 12 - задание периода изменения стока;
- 13, 16 - включение ограничения наименьшей величины стока и притока;
- 15 - выбор времени полного хода исполнительного механизма;
- 17 - сетевой выключатель лабораторной установки

Для градуировки лимба ручки управления ЗУ05 непосредственно над задатчиком расположен миллиамперметр со шкалой на 5 мА (позиция 7). Этот миллиамперметр не является необходимой принадлежностью ЗУ05, а установлен только для осуществления градуировки шкалы по току.

3. Программа работы и порядок её выполнения

- 1) Изучить принцип работы источника тока.
- 2) Устанавливая по миллиамперметру выходные токи задатчика от 0 до 5 мА через 0,5 мА, получить зависимость *«Выходной ток – Показания по лимбу задатчика»*. Результаты представить в таблице и в виде графика.
- 3) Рассчитать и представить в таблице и на графике абсолютную погрешность установки заданного тока (по всему диапазону) по лимбу задатчика в координатах *«Показания по лимбу – Погрешность установки тока»*.
- 4) Рассчитать приведённую погрешность градуировки токового задатчика ЗУ05.

4. Оформление отчёта

Отчёт должен содержать:

- 1) цель работы и краткое описание принципа работы токового задатчика ЗУ05;
- 2) таблицы результатов и графики;
- 3) анализ погрешностей токового задатчика ЗУ05;
- 4) выводы по работе, которых должны быть обсуждены возможные причины появления погрешности задания тока задатчиком ЗУ05 и приведены максимальная абсолютная и приведённая погрешности.

Контрольные вопросы

1. Объяснить принцип работы источника тока, построенного на биполярном транзисторе по схеме с общим эмиттером.
2. Как влияет на внутреннее сопротивление источника тока коэффициент передачи по току биполярного транзистора?
3. Какие элементы схемы ЗУ05 обеспечивают температурную стабильность тока нагрузки задатчика?
4. Для какой цели в схеме ЗУ05 установлены в цепи коллектора резисторы R_8 и R_9 ?
5. Как построить измеритель рассогласования с токовым задатчиком и датчиком с токовым выходом?
6. Как построить измеритель рассогласования с токовым задатчиком и резистивным потенциометрическим датчиком?

Библиографический список

1. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство. Пер. с нем. – М.: Из-во «ДМК Пресс», 2009. – 832 с., ил.

2. Фрайден Дж. Современные датчики: справочник. – М.: Техносфера, 2006. – 588 с.

Лабораторная работа № 2. Исследование дифференциально-трансформаторного преобразователя перемещения

Цель работы:

- 1) экспериментальное исследование параметров унифицированного дифференциально-трансформаторного преобразователя перемещения ПД-4;
- 2) оценка погрешности его работы.

1. Общие положения

К измерительным преобразователям (прежний эквивалентный термин «датчик») относятся все основные узлы электронных схем для измерения неэлектрических величин, располагающиеся непосредственно у объекта, как правило, для последующей дистанционной передачи результатов измерения.

При применении преобразователей определяющим фактором является погрешность, допустимая величина которой при регулировании процессов обычно составляет 1...2%, а в задачах контроля 2...3%.

Дифференциально-трансформаторные преобразователи и системы передачи характеризуются высокой надёжностью и простотой реализации и применяются в тех случаях, когда вносимая ими погрешность допустима по условиям измерения.

2. Конструкция преобразователя и его работа

Конструкция дифференциально-трансформаторного преобразователя (в дальнейшем ДТП) изображена на рис. 1,а, а его электрическая схема на рис. 1,б. Преобразователь состоит из намотанных на цилиндрическом каркасе двух секций

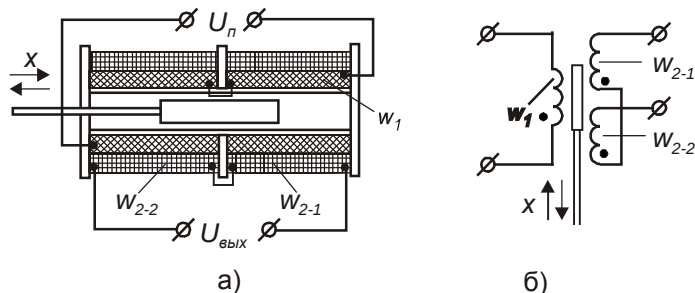


Рис. 1. Конструкция дифференциально-трансформаторного преобразователя (а) и его электрическая схема (б)

обмотки возбуждения w_1 (первичная обмотка), включённых согласно, и двух секций w_{2-1} и w_{2-2} вторичной (выходной) обмотки, включённых встречно (точки у выводов на рис. 1,б обозначают начала обмоток).

Внутри каркаса катушки расположен цилиндрический плунжер (сердечник) из ферромагнитного материала, имеющий возможность

перемещения внутри катушки вдоль её оси на величину x . Обмотка возбуждения подключена к источнику питания переменного тока. ДТП является *параметрическим* преобразователем, в котором *перемещение плунжера преобразуется в параметр – взаимную индуктивность* между первичной и вторичной обмотками. Выходным сигналом является напряжение, снимаемое со вторичной обмотки.

Магнитный поток обмотки возбуждения индуцирует в секциях вторичной обмотки э.д.с., значения которых являются функцией тока питания первичной обмотки I , частоты тока ω и взаимной индуктивности M_{2-1} и M_{2-2} между секциями вторичной обмотки и первичной обмоткой. Благодаря тому, что обмотки обеих половин вторичной обмотки идентичны, что достигается их тщательным изготовлением, взаимные индуктивности M_{2-1} и M_{2-2} равны между собой при среднем

$$M = M_H \frac{X}{X_H} e^{-j\varphi},$$

положении плунжера внутри катушки преобразователя. При перемещении плунжера вверх (рис. 1,б) из среднего положения взаимная индуктивность M_{2-1} увеличивается, а M_{2-2} уменьшается. Соответственно, если плунжер смещается из среднего положения вниз, M_{2-1} уменьшается, а M_{2-2} увеличивается. Так как секции w_{2-1} и w_{2-2} включены встречно, то взаимная индуктивность $M = M_{2-1} - M_{2-2}$ между выходной обмоткой и обмоткой возбуждения в зависимости от положения плунжера определяется по выражению

где M_H – номинальное значение взаимной индуктивности, соответствующее номинальному рабочему ходу плунжера из среднего положения x_H ;

x – текущее отклонение плунжера от среднего положения;

φ – значение угла фазового сдвига сигнала напряжения переменного тока по отношению к току питания, определяемое конструкцией преобразователя и качеством его изготовления.

Выходная э.д.с. преобразователя (эффективное значение) может быть подсчитана по формуле

$$E = \omega I M_H \frac{X}{X_H} e^{-j\varphi},$$

при расчёте по которой выходное значение э.д.с. получается в вольтах, если подставить

$\omega = 2\pi f$;

f – частота тока питания в герцах;

I – ток обмотки возбуждения в амперах;

M_H – номинальное значение взаимной индуктивности в генри;

φ – в радианах.

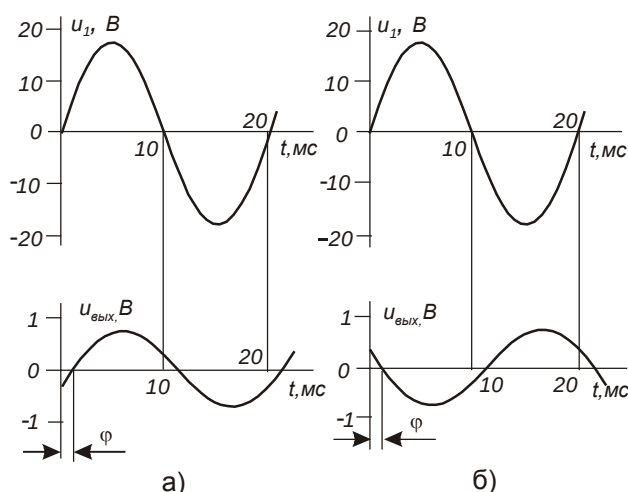


Рис. 2. Осциллограммы мгновенных значений напряжения возбуждения u_1 и выходного $u_{\text{вых}}$ при смещении плунжера на одинаковую величину: а) в одну сторону; б) в противоположную сторону

При смещении плунжера из среднего положения на одну и ту же величину, но в разные стороны, величина выходного напряжения будет одинаковой, однако при этом меняется угол фазового сдвига этого напряжения по отношению к напряжению, приложенному к первичной обмотке. На рис. 2 показаны графики изменения во времени мгновенных значений напряжения для этих двух случаев.

На рис. 2,а угол фазового сдвига выходного напряжения близок к 0° (φ – небольшой определённый выше угол сдвига величиной не более $7...8^\circ$), на рис. 2,б угол фазового сдвига близок к 180° , а по величине мгновенные значения э.д.с. в соответствующие моменты времени совпадают. Поэтому

для определения не только величины, но и направления смещения плунжера обычный вольтметр эффективного значения непригоден, и измерения надо производить фазочувствительным вольтметром (ФЧВ).

Примерами серийных преобразователей являются следующие преобразователи.

Унифицированные взаимозаменяемые преобразователи ДТП-1, ДТП-2, ДТП-3 имеют номинальный рабочий ход из среднего положения $\pm 1,6$; $\pm 2,5$; ± 4 мм соответственно. Допустимое отклонение рабочего хода плунжера этих преобразователей не превышает $\pm 25\%$ от номинального значения.

Плунжер изготовлен из сталей марок Э8, Э10 или Э12. Для его защиты от коррозии он заключён в оболочку из нержавеющей немагнитной стали 36НХТЮ, а также дополнительно он может быть помещён в разделительную немагнитную трубку, предохраняющую катушку и прибор от влияния внешней среды.

Для унифицирования статической характеристики к выходу преобразователя подключён делитель напряжения, состоящий из переменного резистора сопротивлением 330 Ом и включённого последовательно с ним проволоочного резистора из манганина сопротивлением (980 ± 2) Ом.

Номинальное значение взаимной индуктивности для всех модификаций преобразователей составляет $M_n = (10 \pm 0,09)$ мГ.

Угол сдвига $\varphi = 0,1222$ рад. или 7° при $f = 50$ Гц.

Номинальное напряжение питания цепи возбуждения равно 12 В, номинальное значение выходного напряжения 400 мВ.

Паспортное значение нелинейности зависимости $M = f(x/x_n)$ не более 0,5% от M_n . Предел допустимой основной погрешности не более 1% от M_n .

Унифицированные преобразователи ПД-3, ПД-4, ПД-5 с номинальным рабочим ходом плунжера от среднего положения $\pm 1,5$; ± 2 ; ± 4 мм соответственно имеют аналогичную конструкцию, но катушка этих преобразователей заключена во внешний электромагнитный экран.

Для унификации характеристик к выходу преобразователя подключён переменный резистор сопротивлением 2,2 кОм. При номинальном токе питания 320 мА (напряжение 12 В) номинальное значение взаимной индуктивности 10 мГ (рис.3) с отклонением не более 0,5%, т.е. такое же, как у ДТП-1, ДТП-2, ДТП-3. При этом значении M_n изменение выходной э.д.с. составляет 1 В.

Угол сдвига $\varphi = (0,131 \pm 0,026)$ рад. или $(7,5 \pm 1,5)^\circ$ при частоте 50 Гц и $(8 \pm 1,5)^\circ$ при 60 Гц.

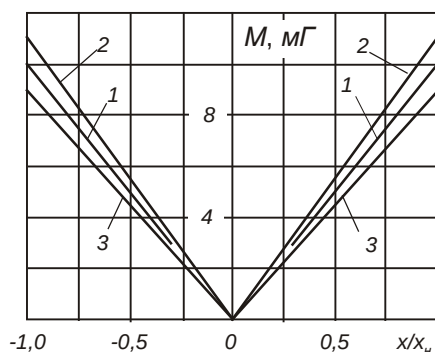


Рис. 3. Характеристики взаимной индуктивности передающего преобразователя типа ПД при различных токах питания с частотой 50 Гц:
1 - при номинальном токе;
2 - большем номинального на 10%;
3 - меньшем номинального на 10 %

Дифференциально-трансформаторные преобразователи этого типа используются только в первичных приборах, например, в мембранных дифференциальных манометрах, ротаметрах и т.п.

3. Лабораторная установка

Лабораторная установка представляет собой автономный стенд, в котором размещены исследуемый ДТП типа ПД-4, устройство для перемещения его плунжера на ± 2 мм, считая от среднего положения, фазочувствительный вольтметр эффективного значения со шкалой на 1 В и источник питания установки,

подключаемый к сети 220 В 50 Гц. Лицевая панель станда изображена на рис. 4,а, а функционально-принципиальная схема на рис. 4,б.

Устройство для перемещения плунжера ПД-4 представляет собой кулачок с образующей, выполненной по спирали Архимеда, радиус которой увеличивается пропорционально углу поворота, в который через рычаг упирается шток плунжера. Ручка кулачка снабжена стрелкой со шкалой, отградуированной в миллиметрах перемещения. Ручку этого устройства можно

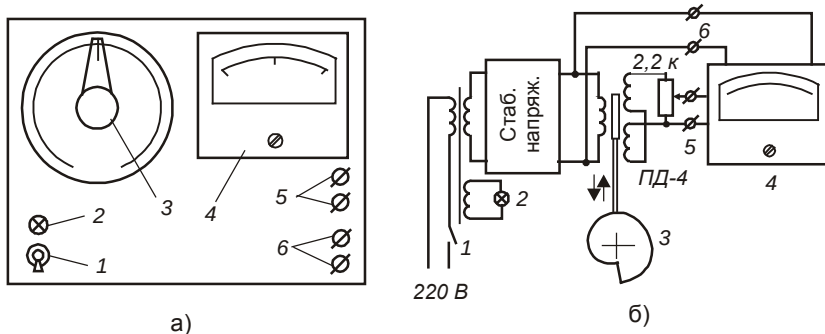


Рис. 4. Стенд (а) и его функционально-принципиальная схема (б):
1 - выключатель питания; 2 - сигнальная лампочка включения питания;
3 - устройство для перемещения плунжера со шкалой; 4 - ФЧВ; 5 - гнезда
выходной обмотки; 6 - гнезда обмотки возбуждения

перемещать от положения -2 мм до положения $+2$ мм и обратно только в направлениях, включающих прохождение отметки 0 мм.

Шкала ФЧВ имеет отметку 0 В посередине. Отклонение стрелки *вправо* соответствует *совпадению* фаз напряжения выходной обмотки и обмотки возбуждения, отклонение *влево* – *фазовому сдвигу* этих напряжений на 180° с точностью до φ (см. рис. 2).

Для наблюдения мгновенных значений напряжений на экране осциллографа концы выходной обмотки и обмотки возбуждения выведены на гнезда 5 и 6.

4. Выполнение работы

1) Ознакомиться с конструкцией и изучить теоретические основы работы унифицированного ДТП. Образец преобразователя входит в комплект лабораторной установки и выдаётся учебным мастером.

2) Устанавливая стрелку устройства для перемещения плунжера ДТП на оцифрованные точки шкалы, измерить ФЧВ выходные напряжения с учётом угла фазового сдвига 0° или 180° относительно напряжения на обмотке возбуждения. Все необходимые для этого соединения ФЧВ с измеряемыми цепями уже произведены внутри станда.

Каждый цикл измерений при перемещении плунжера от -2 мм до $+2$ мм проделать 10 раз ($n=10$). Результаты занести в таблицу экспериментальных и расчётных данных. Рассчитать среднее арифметическое $\bar{U}_{\text{вых},i}$ измеренных величин в каждом из девяти положений плунжера ($i = 1, 2, \dots, 9$), абсолютную погрешность $\Delta U_{\text{вых},i}$, относительную погрешность $\varepsilon_{U_{\text{вых},i}}$ и величину средней квадратичной ошибки единичного результата $S_{U_{\text{вых},i}}$. Рассчитанные значения внести в ту же таблицу. Формулы для статистических расчётов приведены ниже.

Результаты экспериментов и статистической обработки

Параметр $U_{\text{вых.}}, \text{ В}$	Положение плунжера в точках $i = 1, 2, \dots, 9; \text{ мм}$								
	-2	-1,5	-1	-0,5	0	0,5	1	1,5	2
$U_{\text{вых. 1}}$									
$U_{\text{вых. 2}}$									
.									
.									
.									
$U_{\text{вых. 10}}$									
$U_{\text{вых. } i}$									
$\Delta U_{\text{вых}}$									
$\varepsilon U_{\text{вых. отн.}}$									
$S U_{\text{вых. с. к.}}$									

Используя средние значения $\bar{U}_{\text{вых. } i}$, построить график зависимости выходного напряжения преобразователя $U_{\text{вых.}}$ от положения плунжера, условно откладывая выходное напряжение, совпадающее по фазе с напряжением возбуждения, вверх, а противоположное по фазе вниз от точки $U_{\text{вых.}} = 0$. Оценить отклонение средних значений от линейной зависимости.

3) Вычислить номинальные значения взаимной индуктивности между первичной и вторичными обмотками для данного экземпляра преобразователя по формуле

$$M_H = \frac{U_{\text{вых. H}}}{2\pi f I},$$

где $U_{\text{вых. H}}$ – выходное напряжение преобразователя (среднее арифметическое значение) в положениях плунжера +2 мм и –2 мм; В;

f – частота тока питания обмотки возбуждения; $f = 50 \text{ Гц}$;

I – ток питания обмотки возбуждения преобразователя; $I = 0,32 \text{ А}$.

4) Подключить двухлучевой осциллограф к гнездам 5 и 6 для получения согласованных во времени осциллограмм мгновенных значений напряжений возбуждения и выходного, аналогичных приведённым на графиках рис. 2. Получить осциллограммы при положениях плунжера преобразователя +2 и –2 мм и по ним определить фазовый сдвиг между напряжением возбуждения и выходным в момент времени, соответствующий четверти периода питающего напряжения, и угол фазового сдвига φ в начале периода. Перед началом опытов следует тщательно согласовать начала развёрток по обоим каналам осциллографа. Рекомендуется измерения производить на фотографии экрана осциллографа, сделанной цифровой фотокамерой.

5) Вместо осциллографа к гнездам 5 и 6 подключить фазометр и измерить фазовый сдвиг между напряжением возбуждения и выходным при положениях плунжера +2 и –2 мм; по полученным результатам определить угол фазового сдвига φ .

5. Стандартные формулы для статистических расчётов

Среднее арифметическое $\bar{x}$ величин измерений $x_1, x_2, \dots, x_n$ в каждой из девяти

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \dots + x_n).$$

оцифрованных точек на шкале перемещений

Абсолютная погрешность в каждой из этих девяти точек $\Delta x_i = \bar{x} - x_i$.

Относительная погрешность $\varepsilon_x = \frac{\Delta x_i}{\bar{x}}$.

Средняя квадратичная ошибка единичного результата при n измерениях

$$s_n = \sqrt{\frac{(\bar{x} - x_1)^2 + (\bar{x} - x_2)^2 + \dots + (\bar{x} - x_n)^2}{n-1}}.$$

О точности вычислений.

Ошибка, полученная в результате вычислений, должна быть примерно на порядок (т.е. в 10 раз) меньшей суммарной ошибки измерений. Так как погрешности измерения напряжения ФЧВ и градуировки шкалы устройства для перемещения плунжера не превышают 1%, погрешность измерения в каждой точке будет несколько больше, но не хуже, чем 2%. Поэтому число значащих цифр в промежуточных вычислениях должно быть три, а в окончательном результате два.

Более подробно со статистическими расчётами можно ознакомиться в материале в 1.3, что позволит облегчить и упростить вычисления средней квадратичной ошибки.

6. Оформление отчёта

Отчёт должен содержать:

- 1) электрическую схему преобразователя и краткое описание его работы;
- 2) функционально-принципиальную схему лабораторной установки;
- 3) результаты опытов в виде таблицы и графиков;
- 4) выводы по работе, в которых следует отразить близость полученных результатов к ожидаемым для данного преобразователя.

Контрольные вопросы

1. Описать конструкцию унифицированного ДТП.
2. Нарисовать типовую электрическую схему включения унифицированного ДТП.
3. Назвать номинальный рабочий ход преобразователей ДТП1, ДТП2, ДТП3, ПД3, ПД4, ПД5.
4. Объяснить, какой электрический параметр является выходной величиной унифицированного преобразователя, и привести его номинальное значение.
5. Привести формулу, по которой рассчитывается выходная э.д.с. преобразователя в зависимости от хода его плунжера.
6. Объяснить, в чём состоит унификация преобразователей, что в них унифицировано и как это сделано.
7. Привести номинальные значения параметров питания цепи обмотки возбуждения и величину выходного напряжения преобразователей обоих изучаемых типов.
8. Указать области применения ДТП.

Библиографический список

1. Ключев А.С. Автоматическое регулирование: Учеб. для вузов. – М.: Высш. шк., 2000. – 351 с.
2. Фрайден Дж. Современные датчики: справочник. – М.: Техносфера, 2006. – 588 с.

Лабораторная работа № 3. Экспериментальное определение статических характеристик сельсинов в трансформаторном и индикаторном режимах работы

Цель работы:

- 1) изучить конструкции сельсинов;
- 2) опытным путём получить статические характеристики сельсина-датчика;
- 3) изучить работу сельсинов в трансформаторном и индикаторном режимах;
- 4) экспериментально получить статические характеристики сельсинного измерителя рассогласования углов поворота и индикаторной передачи угла в схемах с парным и дифференциальным включением сельсинов.

1. Общие сведения

Сельсин как элемент автоматики представляет собой электрическую индукционную машину небольшой мощности. Обычный сельсин имеет четыре обмотки. Одна из обмоток расположена на статоре, и её выводы маркируются символами c_1-c_2 . Три других обмотки одинаковы, сдвинуты друг относительно друга на 120° и расположены на роторе. Эти обмотки соединены звездой, их концы маркируются символами $p_1-p_2-p_3$, их общая точка не выведена. Имеется много разновидностей конструкций сельсинов, в том числе с обратным расположением обмоток, с расположением всех четырёх обмоток на статоре – бесконтактные сельсины, однако принято называть обмотку c_1-c_2 статорной, а обмотки $p_1-p_2-p_3$ – роторными.

В дифференциальном сельсине на статоре и роторе размещено по три сдвинутых относительно друг друга на 120° и соединённых в звезду обмотки, маркируемых соответственно $c_1-c_2-c_3$ и $p_1-p_2-p_3$.

Все напряжения в сельсинах – однофазные, угол фазового сдвига между напряжениями на статорной и роторной обмотках может быть или 0° , или 180° (при коротких соединительных линиях, содержащих лишь активные сопротивления).

В зависимости от выполняемых функций в схемах синхронной передачи угла и вращения сельсины разделяются на сельсины-датчики, сельсины-приёмники, дифференциальные сельсины-датчики и сельсины-приёмники, сельсины-трансформаторы.

Сельсин-датчик используется в качестве элемента, воспроизводящего угловые перемещения командного вала и передающего их сельсину-приёмнику.

Сельсин-приёмник воспроизводит закон движения, заданный сельсином-датчиком, в виде углового перемещения ротора, пропорционального угловому перемещению ротора сельсина-датчика.

С помощью *дифференциального сельсина* (датчика или приёмника) производится алгебраическое суммирование величин угловых перемещений.

Сельсин-трансформатор воспроизводит закон движения, заданный сельсином-датчиком, в виде электрического напряжения, функционально связанного с угловым перемещением ротора сельсина-датчика.

Сельсины, предназначенные для указанных функций, имеют между собой конструктивные отличия, однако в синхронных передачах с невысокими требованиями к точности отработки рассогласования зачастую требуемые сельсины заменяют другими.

В автоматических системах регулирования сельсины обычно используются в двух основных режимах работы индукционных синхронных передач: трансформаторном и индикаторном (измерительном).

При трансформаторной синхронной передаче напряжение питания подаётся только на статорную обмотку сельсина-датчика, роторные обмотки обоих сельсинов соединяют между собой, а статорную обмотку сельсина-трансформатора включают на нагрузку. При повороте ротора сельсина-датчика на некоторый угол в статорной обмотке сельсина-трансформатора наводится э.д.с., амплитуда которой функционально связана с углом рассогласования между угловыми положениями роторов сельсина-датчика и сельсина-трансформатора, а угол фазового сдвига между этой э.д.с. и напряжением питания зависит от направления (знака) рассогласования. Другими словами, при таком включении сельсины выполняют функцию измерителя рассогласования положений двух валов, правда, не с линейной, а с синусоидальной зависимостью выходного напряжения от величины угла рассогласования.

При индикаторной синхронной передаче статорные обмотки сельсина-датчика и сельсина-приёмника соединяют параллельно; на эти обмотки подаётся напряжение питания. Роторные обмотки обоих сельсинов соединяют между собой. Если угловые положения роторов датчика и приёмника неодинаковы, под действием возникающих синхронизирующих моментов они приходят в согласованное положение. При принудительном вращении ротора сельсина-датчика вал ротора сельсина-приёмника вращается с той же скоростью, что и вал ротора датчика, т.е. следит за угловым положением ротора датчика.

2. Основные схемы включения сельсинов

2.1. Трансформаторный режим работы

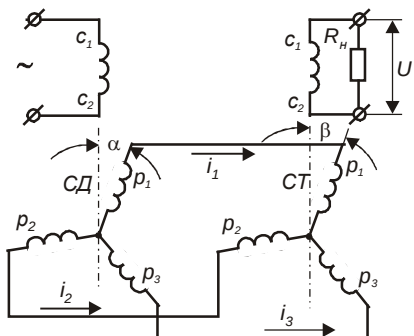


Рис. 1. Парная схема включения сельсинов в трансформаторном режиме: СД - сельсин-датчик; СТ - сельсин-трансформатор

Так называемая парная схема включения сельсинов приведена на рис.1. Схема обеспечивает преобразование угла рассогласования в напряжение с точностью, определяемой собственной погрешностью сельсинов, длиной линии передачи, а также величиной сопротивления нагрузки R_n , включенной в цепь статорной обмотки сельсина-трансформатора. Выходной величиной является напряжение U . Схема находит широкое применение в следящих системах для измерения углов рассогласования между управляющим и исполнительным валами.

Если оба сельсина в схеме одинаковы и изготовлены тщательно, а линии связи короткие, законы изменения токов в роторных обмотках сельсина-трансформатора от угла поворота α сельсина-датчика будут такие:

$$\begin{aligned} i_1 &= [E_{\text{макс}} / (2Z)] \cdot \cos \alpha; \\ i_2 &= [E_{\text{макс}} / (2Z)] \cdot \cos(\alpha - 120^\circ); \\ i_3 &= [E_{\text{макс}} / (2Z)] \cdot \cos(\alpha + 120^\circ); \end{aligned}$$

где $E_{\text{макс}}$ — максимальная э.д.с. роторной обмотки сельсина-датчика;

Z – полное сопротивление одной роторной обмотки.

Каждая из роторных обмоток создаёт в сельсине-трансформаторе магнитный поток, взаимодействующий с обмоткой его статора, создавая в ней свою долю суммарной э.д.с. Законы изменения этих э.д.с. в статорной обмотке сельсина-трансформатора будут следующими:

$$\begin{aligned}E_1 &= K i_1 \cos \beta ; \\E_2 &= K i_2 \cos(\beta - 120^\circ); \\E_3 &= K i_3 \cos(\beta + 120^\circ),\end{aligned}$$

где K – постоянный коэффициент пропорциональности между током и магнитным потоком в предположении отсутствия насыщения магнитопровода сельсина-трансформатора.

Суммарная э.д.с. в статорной обмотке сельсина-трансформатора $E_{СТ}$ находится как векторная сумма этих э.д.с.:

$$\begin{aligned}E_{СТ} &= E_1 + E_2 + E_3; \\E_{СТ} &= E_{СТ\max} \cos(\beta - \alpha); \\E_{СТ\max} &= E_{\max} \cdot 3K/(4Z),\end{aligned}$$

где $E_{СТ\max}$ – максимальное значение выходного напряжения на статорной обмотке сельсина-трансформатора при $\alpha - \beta = 0$.

Данная зависимость неудобна, потому что при угле рассогласования, равном нулю, выходное напряжение максимально. Чтобы получить при нулевом рассогласовании нулевое выходное напряжение, поступают так: устанавливают валы в согласованное положение, а затем, поворачивая один из сельсинов за корпус, добиваются нулевого выходного напряжения. Этому положению, согласно формуле, будет соответствовать $\beta - \alpha = 90^\circ$, и формула запишется так:

$$E_{СТ} = E_{СТ\max} \sin(\beta - \alpha \pm 90^\circ).$$

Знаки «+» или «-» выбираются в зависимости от того, в какую сторону был произведён поворот статора, что позволяет установить желаемый фазовый сдвиг между выходным напряжением сельсина-трансформатора и напряжением питания при появлении рассогласования.

Крутизна выходного напряжения сельсина-трансформатора в любом положении ротора

$$K_{СТ} = dE_{СТ} / d\vartheta,$$

где $d\vartheta$ – приращение угла рассогласования роторов.

Наибольшая величина крутизны выходного напряжения имеет место при $\vartheta = 0$.

Схема включения сельсина-датчика, сельсина-трансформатора и дифференциального сельсина представлена на рис. 2.

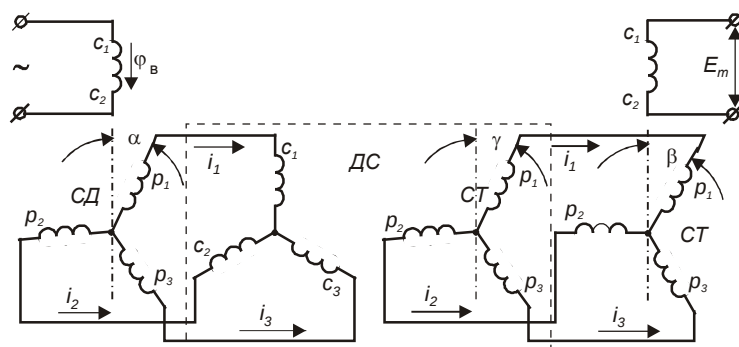


Рис. 2. Включение дифференциального сельсина между сельсином-датчиком и сельсином-трансформатором:
 СД - сельсин-датчик; СТ - сельсин-трансформатор; ДС - дифференциальный сельсин

Схема применяется в следящих системах в тех случаях, когда возникает необходимость ввода в систему дополнительных поправок. Поправки вводятся с помощью дифференциального сельсина ДС в виде угла поворота γ его ротора. Датчиками в этой схеме являются сельсин СД и дифференциальный сельсин ДС. Приёмником служит сельсин-трансформатор СТ, выходное напряжение которого зависит от суммы или разности угловых перемещений роторов датчиков. Началом отсчёта при вводе угла γ считается такое положение ротора сельсина ДС, при котором магнитные оси потоков обмоток ротора и статора совпадают.

2.2. Индикаторный режим работы

Парная схема включения сельсинов показана на рис.3. При синфазном питании обмоток возбуждения датчика и приёмника схема обеспечивает синхронную и синфазную передачу угла и вращения с точностью, определяемой собственной погрешностью сельсинов, длиной линии связи, а также величиной нагрузочного момента на валу приёмника. Схема находит широкое применение для целей телепередачи угла поворота.

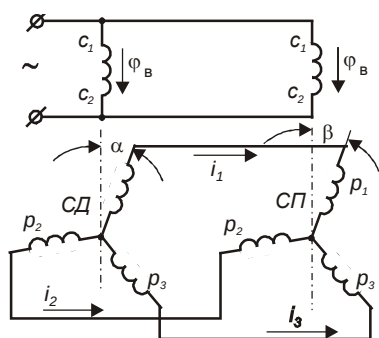


Рис. 3. Парная схема включения сельсинов в индикаторном режиме: СД - сельсин-датчик; СП - сельсин-приёмник

Все величины и характеристики индикаторной передачи угла обычно определяют по отношению к сельсину-приёмнику вследствие того, что ротор сельсина-датчика перемещают принудительно.

Важнейшей характеристикой индикаторной передачи является зависимость статического синхронизирующего момента от угла рассогласования между роторами датчика и приёмника в положении покоя.

Крутизна кривой статического синхронизирующего момента определяет удельный синхронизирующий момент, развиваемый на валу приёмника при его рассогласовании с датчиком на один градус (единица измерения – *грамм-сантиметры на градус*).

Статическая погрешность передачи характеризуется величиной статической ошибки, определяемой углом рассогласования между осями датчика и приёмника в состоянии равновесия при отсутствии вращения. Величина статической ошибки зависит от момента нагрузки на валу приёмника и собственной погрешности

сельсинов. В зависимости от величины собственной погрешности сельсины различают по классам точности.

Практическая формула для вычисления статического синхронизирующего момента M_c такая :

$$M_c = M_{max} \cdot \sin \vartheta ,$$

где $\vartheta = \beta - \alpha$ – угол рассогласования между осями датчика и приёмника;

M_{max} – максимальный синхронизирующий момент на роторе сельсина-приёмника при $\vartheta = 90^\circ$.

На ротор сельсина-датчика действует тот же момент, только противоположного знака.

Синхронизирующий момент сельсинной передачи весьма невелик, его достаточно для приведения во вращение механических счётчиков, стрелок и т.п., поэтому такая передача и называется индикаторной передачей угла.

Статическая погрешность сельсинной схемы ϑ_c и коэффициент добротности k_d определяются по формулам:

$$\vartheta_c = M_{\tau p} / m_0; \quad k_d = m_0 / M_{\tau p},$$

где $M_{\tau p}$ – момент трения на валу приёмника;

m_0 – удельный синхронизирующий момент при угле рассогласования, близком к нулю.

Дифференциальная схема включения сельсинов в режиме индикаторной передачи угла изображена на рис. 4.

Схема используется для алгебраического суммирования угловых перемещений. Передача угла и вращения в этом случае осуществляются с помощью сельсинов СД, СП и ДС, причём сельсины СД, СП и ДС могут работать как в качестве датчиков, так и в качестве приёмников. Во всех случаях ротор приёмника в зависимости от направления углов поворота поворачивается на угол, равный сумме или разности углов, задаваемых датчиками. В режиме синхронного вращения скорость вращения ротора приёмника будет равна сумме или разности скоростей вращения датчиков. Если ротор сельсина ДС заторможен, то он превращается в трансформатор, и передача становится обычной, т.е. при повороте ротора одного из сельсинов ротор другого повернётся на такой же угол.

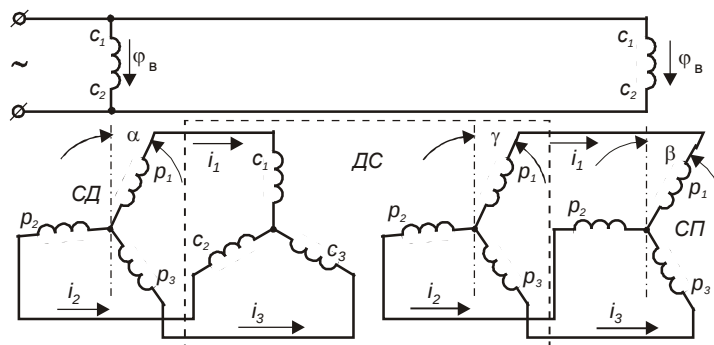


Рис. 4. Включение дифференциального сельсина между сельсином-датчиком и сельсином-приёмником:
СД - сельсин-датчик; СП - сельсин-приёмник; ДС - дифференциальный сельсин

3. Лабораторная установка

Лабораторная установка представляет собой стенд, в котором закреплены два бесконтактных сельсина типа БД-404А и дифференциальный сельсин типа ДИД-101. Так как корпуса сельсинов не имеют крепёжных отверстий или фланцев, а только упорные кольца, сельсины закреплены хомутами в произвольном положении. Выводы статорных и роторных обмоток сельсинов выведены на гнёзда, размещённые на передней панели стенда. Стенд имеет встроенный источник питания с напряжением 110 В и частотой 50 Гц , к которому можно подключать статорные обмотки одного или двух сельсинов.

Для измерения напряжений в исследуемых точках на стенде имеется фазочувствительный вольтметр с напряжением максимального отклонения 50 В . Нулевая отметка вольтметра расположена посередине шкалы, отклонение стрелки *вправо соответствует углу сдвига 0°* между измеряемым напряжением и напряжением питания на гнёздах 1 и 2, отклонение *влево – углу 180°* .

Валы сельсинов снабжены шкалами для отсчёта углов поворота в градусах. Следует иметь в виду, что шкалы сельсинов имеют нуль в верхней точке шкалы исключительно из соображений удобства отсчёта, этот нуль никак не связан с действительным положением роторов сельсинов относительно их статоров, согласованное положение сельсинов (нулевой угол рассогласования) находится из опытов, описанных ниже.

На валах сельсина-датчика и дифференциального сельсина имеются тормозные устройства, позволяющие фиксировать валы в заданном положении.

На валу сельсина-приёмника установлен рычаг грузового нагрузочного устройства. Длина рычага равна 60 мм . К установке прилагается набор грузов, обеспечивающий нагружение сельсина-приёмника вращающим моментом вплоть до опрокидывающего. Грузы набора имеют массы $5, 10, 20, 30, 40, 45\text{ г}$.

Электрические характеристики сельсинов

Тип сельсина	Напряжение возбуждения, В	Частота, Гц	Ток возбуждения, А	Потребляемая мощность, Вт	Вторичное напряжение, В	Момент трения при $I_{\text{возб}} = I_{\text{возб.ном}}$, Г·см	Удельный момент, Г·см/град	Максимальный синхронизирующий момент, Г·см
БД-404А	110	50	0,45	12,5	49	15	-	-
БД-404Б	110	50	0,40	12,5	150	15	-	-
БС-404А	110	50	0,45	12,5	49	10	4,5	240
БС-404Б	110	50	0,45	12,5	150	10	4,0	210
ДИД-101	50	50	-	-	49	10	6,0	300

4. Программа работы и порядок её выполнения

1) Подключить к источнику питания статорную обмотку только сельсина-датчика и включить стенд. С помощью фазочувствительного вольтметра в функции угла поворота ротора сельсина измерить э.д.с. между выводами роторных обмоток E_{p1-p2} , E_{p2-p3} , E_{p3-p1} . Результаты представить в виде таблицы и графика. Напряжения, имеющие угол фазового сдвига 0° , следует откладывать на графике вверх от оси абсцисс (угол поворота), а имеющие угол фазового сдвига 180° – вниз.

Используя полученные результаты, вычислить и занести в таблицу, а затем привести на графике в функции угла поворота ротора э.д.с. отдельных роторных обмоток E_{p1} , E_{p2} , E_{p3} .

Придумать схему, позволяющую измерить эти э.д.с., собрать её и получить такие же значения из опыта. Сравнить опытные и теоретически полученные результаты в табличном виде через каждые 30° угла поворота.

2) Собрать схему по рис. 1, не подключая к статорной обмотке нагрузку R_H (холостой ход). Установить ротор сельсина-датчика в положение 0° по его шкале и зафиксировать его. Изменяя положение ротора сельсина-трансформатора и измеряя напряжение на его выходе, найти положение ротора сельсина-трансформатора, при котором выходное напряжение равно нулю. Это положение соответствует взаимному рассогласованию роторов обоих сельсинов в 90° . Поворачивая из этого положения ротор сельсина-трансформатора на угол в пределах одного оборота, т.е. вводя рассогласование ϑ , измерить, занести в таблицу и построить график изменения э.д.с. статорной обмотки сельсина-трансформатора в функции угла $(90 + \vartheta)$.

Из этих опытов и теоретической зависимости найти максимальные значения положительной $\Delta_{\text{макс}+}$ (в сторону большей величины измеренного напряжения по сравнению с теоретическим значением) и отрицательной $\Delta_{\text{макс}-}$ (в сторону меньшей величины указанного напряжения) статической ошибки. Рассчитать максимальную ошибку по формуле

$$\Delta = (|\Delta_{\text{макс}+}| + |\Delta_{\text{макс}-}|) / 2.$$

Определить также величину $E_{\text{СТмакс}}$ и крутизну выходного напряжения сельсина-трансформатора близ нулевого значения угла рассогласования.

3) Собрать схему по рис. 2. При заданных преподавателем углах α и γ выполнить операции и вычисления, изложенные в предыдущем пункте.

Для установки угла γ найти согласованное положение дифференциального сельсина как положение, при котором выходное напряжение сельсина-трансформатора равно нулю, когда между роторами сельсина-датчика и сельсина-трансформатора имеется нулевое рассогласование, определённое в предыдущем опыте.

4) Собрать схему по рис. 3. Убедиться, что при принудительном повороте одного из сельсинов другой также поворачивается в ту же сторону. Плавное поворачивая ротор сельсина-датчика поочерёдно в обе стороны, найти предельный угол поворота $2\vartheta_c$, внутри которого вал сельсина-приёмника остаётся неподвижным; этот угол очень мал, $1...2^\circ$, поэтому измерение нужно делать точно. Определить по шкалам сельсинов точки согласованного положения валов посередине угла $2\vartheta_c$. Нагружая с помощью грузового устройства вал сельсина-приёмника различными моментами, построить зависимость статического синхронизирующего момента от

угла рассогласования валов ϑ . По этой зависимости и измеренному значению ϑ_c вычислить $M_{\max}$, m_0 , $M_{\text{тр}}$, k_∂ . Сравнить полученные результаты с табличными данными.

5) Собрать схему по рис. 4 и убедиться, что она работает так, как описано в подразделе 2.2. Зафиксировать вал дифференциального сельсина и, поступая как в пункте 4, найти $2\vartheta_c$ и точки согласованного положения валов сельсинов датчика и приёмника, $M_{\max}$, m_0 , $M_{\text{тр}}$, k_∂ .

6) Обсудить полученные результаты в резюме.

5. Оформление отчёта

Отчёт по работе должен содержать:

- 1) принципиальные схемы, использованные в опытах;
- 2) таблицы экспериментальных данных;
- 3) графики полученных зависимостей с построениями на них, с помощью которых определялись искомые величины;
- 4) выводы по этапам работы и по работе в целом, в которых следует сравнить ожидаемые и полученные результаты.

Контрольные вопросы

1. Каковы функции сельсина-датчика, сельсина-приёмника, сельсина-трансформатора, дифференциального сельсина?
2. Написать законы изменения токов от угла поворота сельсина-датчика в роторных обмотках сельсина-трансформатора.
3. Написать закон изменения э.д.с. в статорной обмотке сельсина-трансформатора.
4. Объяснить, как получить синусоидальную зависимость выходного напряжения сельсина-трансформатора от угла рассогласования.
5. Написать зависимость статического синхронизирующего момента индикаторной передачи от угла рассогласования между роторами сельсинов датчика и приёмника.
6. Как найти крутизну кривой статического синхронизирующего момента?
7. Что такое статическая точность и добротность передачи?
8. Нарисовать парные схемы включения сельсинов в индикаторном и трансформаторном режимах работы.
9. Нарисовать дифференциальные схемы включения сельсинов в индикаторном и трансформаторном режимах работы.
10. Если валы всех трёх сельсинов на рис. 4 зафиксированы в изображённых положениях при $\alpha=20^\circ$, $\beta=30^\circ$, $\gamma=40^\circ$, в какую сторону и на какой угол повернётся ротор дифференциального сельсина, если его освободить?
11. Куда и на какой угол повернётся ротор сельсина СП в примере п. 10, если его освободить?
12. Куда и на какой угол в том же примере повернётся СД?

Библиографический список

1. Малафеев С.И., Малафеев А.А. Основы автоматики и системы автоматического управления: учебник.- М.: ИЦ Академия, 2010. – 383 с.
2. Свечарник Д.В. Дистанционные передачи. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1959. 312с.
3. Испытания электрических микромашин: Учеб. пособие для втузов. Астахов Н.В., Лопухина Е.М. и др. / М.: Высшая школа, 1973. 220с.
4. Верхопятницкий П.Д. Электрические элементы автоматики. Л.: Госиздат судостроительной промышленности, 1963. 536 с.
5. Технические средства автоматики. Кишнёв В.В., Иванов В.А., Тохтабаев Г.М., Афанасьев А.М. М.: Металлургия, 1981. 240 с.

Лабораторная работа № 4. Изучение динамических свойств исполнительных механизмов МЭО 40/63-0,25 и ИМ 2/120 в схемах управления от бесконтактного пускателя ПБР-2м

Цель работы:

- 1) ознакомиться со схемами исполнительных механизмов МЭО 40/63-0,25 и ИМ 2/120 и пускателя ПБР-2м;
- 2) разработать схемы дистанционного управления исполнительными механизмами от кнопок управления через магнитный пускатель;
- 3) изучить схемы подключения МЭО 40/63-0,25 к бесконтактному реверсивному пускателю ПБР-2м и дистанционному указателю положения выходного вала;
- 4) экспериментально получить импульсную характеристику МЭО 40/63-0,25 совместно с ПБР-2м при сопутствующей и встречной нагрузках на выходном валу исполнительного механизма.

1. Исполнительные механизмы и пускатели

1.1. Однооборотные исполнительные механизмы

Исполнительный механизм (ИМ) – специализированный привод регулирующего органа. Он включает в себя двигатель с редуктором, конечные и путевые выключатели и датчики положения выходного вала.

К однооборотным исполнительным механизмам относятся механизмы, угол поворота выходного вала которых не превышает 360° . Однооборотные ИМ работают с бесконтактными и контактными пусковыми устройствами. Имеется много типов однооборотных ИМ.

Часто применяемые ИМ типа МЭО выпускаются в нескольких модификациях. Они характеризуются тремя величинами:

$M_{кр}$ – номинальным крутящим моментом на выходном валу, величина которого указывается изготовителями в $кгм$ или $Нм$;

$T_{ИМ}$ – номинальным временем движения в секундах выходного вала ИМ от минимума до максимума в пределах $\varphi_{ИМ}$;

$\varphi_{ИМ}$ – номинальным полным ходом выходного вала ИМ, величина которого даётся в долях одного оборота выходного вала.

Модификации МЭО имеют следующие стандартные значения этих величин:

$M_{кр} = 40, 100, 250, 630, 1600, 4000 \text{ Нм}$;

$T_{ИМ} = 10, 25, 63, 160 \text{ с}$;

$\varphi_{ИМ} = 0,25; 0,63 \text{ об.}$

Например, модификация МЭО 40/63-0,25 имеет параметры: $M_{кр}=40 \text{ Нм}$; $T_{ИМ}=63 \text{ с}$; $\varphi_{ИМ}=0,25 \text{ об.}$

Тормозное устройство в МЭО (в модификациях, снабжённых тормозным устройством) имеет электромагнитный привод в виде соленоида, срабатывающего при появлении напряжения питания на обмотке двигателя. Соленоид воздействует на тормозную колодку вала электродвигателя, растормаживая электродвигатель при включённом питании, при отключении питания тормозная колодка прижимается к тормозному барабану пружиной.

Выпускаются МЭО с различными комплектами датчиков положения выходного вала: реостатным датчиком БДР- 11 или двумя реостатными датчиками БСПР-10; индуктивным датчиком с устройством «люфт» БДИ-БЛ; токовым БДТ, состоящим из блока датчиков магнитных БДМ-2 и блока усилителей БУ-2 или токовым сигнализатором положения БСПТ-10; двумя индуктивными датчиками положения, располагаемыми в блоке датчиков БДИ-6 или БСПИ-10, в которых, кроме того, находятся четыре микровыключателя с двумя независимыми цепями каждый.

ИМ МЭО снабжаются двухфазными и трехфазными асинхронными двигателями, характеризующимися тем, что при непрерывном вращении в установившемся режиме они имеют постоянную скорость вращения. Это определяет название этих ИМ – исполнительные механизмы постоянной скорости.

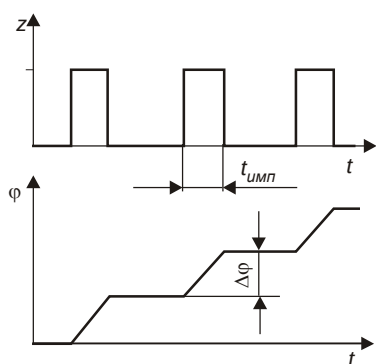


Рис. 1. Обработка управляющих импульсов ИМ постоянной скорости

Работа электрического ИМ постоянной скорости в релейном регуляторе происходит следующим образом. Релейный регулирующий прибор выдает серию импульсов напряжения z , поступающих на обмотки двигателя. Каждый импульс длительностью $t_{имп}$ вызывает поворот выходного вала механизма на некоторый угол $\Delta\varphi$ (рис. 1). При воздействии на механизм последовательности импульсов выходной вал поворачивается на угол φ , равный сумме углов поворота, полученных от каждого импульса, т.е. ИМ является интегрирующим устройством. Современные АСР предъявляют к ИМ высокие требования в отношении их динамических свойств. В частности, ИМ должны обеспечить обработку с минимальными искажениями импульсов длительностью порядка 0,1 ... 0,2 с.

Эквивалентной скоростью ИМ называется отношение

Эквивалентной скоростью ИМ называется отношение

$$S_{эkv.} = \Delta\varphi / t_{имп}.$$

Зависимость эквивалентной скорости ИМ от длительности импульсов, так называемая импульсная характеристика электрического ИМ, удобна для оценки динамических свойств ИМ.

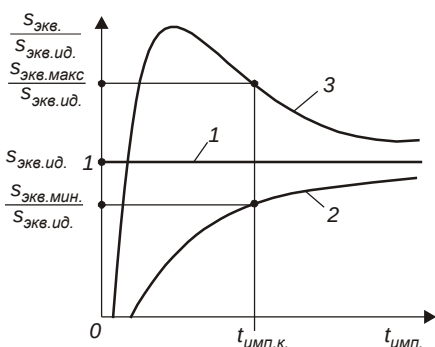


Рис. 2. Импульсная характеристика электрического ИМ

У идеального ИМ величина $S_{эkv.}$ не зависит от длительности импульсов, её можно найти как $S_{эkv.ид.} = \varphi_{им} / T_{им.}$ На рис. 2, на котором по оси ординат отложено отношение $S_{эkv.}/S_{эkv.ид.}$, эта зависимость эквивалентной скорости от продолжительности импульсов изображена как прямая 1.

На работу ИМ существенное влияние оказывают инерция движущихся частей, переходные процессы в управляющем устройстве, в электромагнитном тормозе и т.п. За счёт этого эквивалентная скорость реального ИМ оказывается зависящей от длительности управляющих импульсов, от коэффициента заполнения

импульсов, от направления приложения момента нагрузки, а импульсная характеристика становится нелинейной (см. рис. 2, кривые 2,3).

Кривая 2 соответствует нагружению ИМ номинальным моментом сопротивления (такую нагрузку называют встречной по направлению). Кривая 3

соответствует нагружению ИМ сопутствующей по направлению движения нагрузкой с величиной, составляющей половину номинальной нагрузки. При длительностях управляющих импульсов, больших 0,7...0,8 с, $S_{экв.}$ почти не зависит от продолжительности импульсов $t_{имп.}$. Разница в $S_{экв.}$, определяемая по кривым 2 и 3, зависит только от величины скольжения двигателя, т.е. от его статической характеристики.

Время разгона двигателя и время выбега при коротких управляющих импульсах становятся соизмеримыми с $t_{имп.}$ и поэтому оказывают влияние на $S_{экв.}$. При нагрузке ИМ встречным моментом время разгона возрастает, выбег уменьшается. Это приводит к уменьшению $S_{экв.}$, поэтому кривая 2 с укорочением длительности импульсов приближается к оси абсцисс.

При сопутствующей нагрузке время разгона уменьшается, а время выбега увеличивается. Из-за нелинейности этих процессов с уменьшением длительности импульсов $S_{экв.}$ вначале увеличивается, а затем резко спадает к оси абсцисс (кривая 3).

Если рассматривать ИМ как звено, входным сигналом которого является длительность управляющих импульсов, а выходным – угол поворота выходного вала, то идеальный ИМ являлся бы линейным звеном. Реальный ИМ, у которого $S_{экв.}$ не постоянна, представляет собой нелинейное звено регулятора. Неучёт этой нелинейности часто приводит к ошибкам в расчёте настроек промышленных регуляторов.

Импульсная характеристика электрического ИМ часто используется для количественной оценки динамических свойств ИМ. Импульсные характеристики выпускаемых в настоящее время ИМ должны укладываться в пределы, определяемые по следующей методике, принятой на заводах-изготовителях.

1) Берётся некоторая контрольная длительность управляющих импульсов в секундах, определяемая по эмпирической формуле

$$t_{имп.к} = 0,5 - \frac{5}{T_{им}/\varphi_{им}},$$

где $T_{им}$ – время перемещения ИМ из начального положения в конечное, с;

$\varphi_{им}$ – номинальный угол поворота ИМ в долях одного оборота.

2) При отработке импульсов длительностью $t_{имп.к}$ относительная минимальная эквивалентная скорость $S_{экв. мин.}/S_{экв. уд.}$ (см. рис. 3) не должна быть меньше 0,15.

3) Максимальная эквивалентная скорость $S_{экв. макс.}/S_{экв. уд.}$ при этой продолжительности импульсов не должна превышать 1,5.

4) Высота "горба" на кривой 3 не должна быть больше 2,5.

Можно видеть, что пределы, установленные заводами-изготовителями для оценки качества своей продукции, достаточно широки, поэтому при расчёте настроек регуляторов следует пользоваться экспериментально снятыми импульсными характеристиками ИМ, нагруженных в соответствии с режимом эксплуатации на автоматизируемом объекте.

1.2. Пусковые устройства электродвигателей ИМ

Пусковые устройства выполняют как на базе магнитных реверсивных контакторов, так и бесконтактными с использованием тринисторов – тиристоры или симисторов. Достоинством контактных пусковых устройств является их высокая

перегрузочная способность по току и стойкость при значительных импульсных перенапряжениях в питающей сети, а основной их недостаток – невысокая надёжность из-за возможности подгорания контактов или их слипания. Бесконтактные пускатели обладают более высокой надёжностью, но пригодны лишь для управления маломощными ИМ (максимальный коммутируемый ток до 4 А).

Имеется несколько типов бесконтактных пусковых устройств. На примере бесконтактного реверсивного пускателя ПБР-2м, используемого в лабораторной установке, можно ознакомиться со схмотехническими решениями пускателей и способами их включения.

На рис. 3 приведена блок-схема ПБР-2м. В пускателе можно выделить симисторные бесконтактные ключи 6, 7, 8 и схему для управления ими 1, включающую схему 2 для определения направления движения ИМ, и схемы управления открыванием ключей – блокинг-генераторы 3, 4, 5. Пускатель управляется внешним активным сигналом, представляющим собой двухполупериодно выпрямленное синусоидальное напряжение со средним значением $24 \pm 6 В$ или напряжение постоянного тока той же величины. В зависимости от желаемого направления движения ИМ это напряжение подаётся на клеммы 8 – 7 (направление с условным названием "Меньше") или 8 – 9 (направление "Больше") плюсом на клемму 8. Предусмотрена возможность управления пускателем пассивным сигналом (замыкание внешних контактов), для чего в пускателе имеется источник питания цепи дистанционного управления 9 напряжением $24 \pm 2 В$, плюс которого соединен с клеммой 8 внутри прибора, а минус с клеммой 10. В пускателе сделана блокировка входных цепей, исключающая пуск ИМ при ошибочной одновременной подаче управляющих сигналов на клеммы 8 – 7 и 8 – 9.

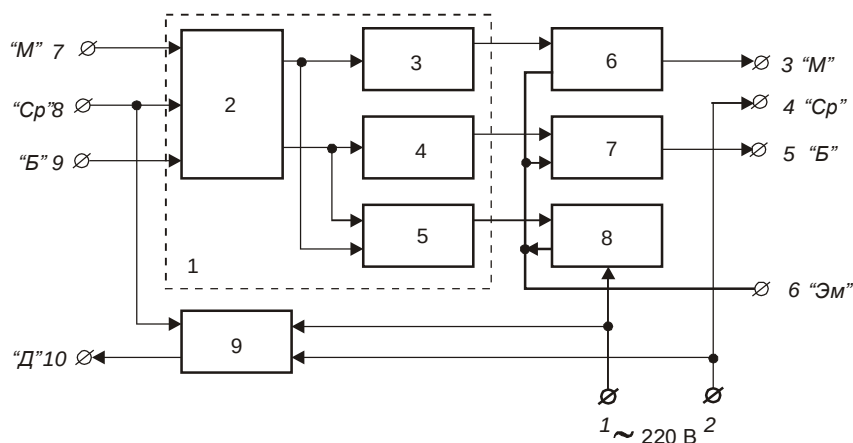


Рис. 3. Блок-схема бесконтактного пускателя ПБР-2м :

1 - схема управления бесконтактными ключами; 2 - схема определения направления движения исполнительного механизма; 3, 4 - блокинг-генераторы управления симисторными ключами направлений "М" (меньше) и "Б" (больше) соответственно; 5 - блокинг-генератор управления симисторным ключом электромагнитного тормоза "Эм"; 6, 7, 8 - симисторные ключи направлений "М", "Б" и электромагнитного тормоза "Эм" соответственно; 9 - источник питания цепи дистанционного управления "Д"

Обмотки двухфазного конденсаторного двигателя ИМ подключаются к клеммам 4 – 3 и 4 – 5, обмотка электромагнитного тормоза – к клеммам 4 – 6 .

Подробно схему ПБР-2М и схемы его подключения к исполнительным механизмам можно изучить по заводской инструкции «Пускатель бесконтактный реверсивный ПБР-2м. Техническое описание и инструкция по эксплуатации».

2. Лабораторная установка

Лабораторная установка представляет собой щит управления, на котором смонтированы два ИМ с устройствами для регулирования момента нагрузки, ПБР-2м, генератор пассивных управляющих импульсов, защищенный от короткого замыкания источник питания 24 ± 2 В для цепи дистанционного управления, коммутационное поле, счётчик числа управляющих импульсов, электрический секундомер, кнопки выбора направления движения и ключ разрешения подачи управляющих импульсов "Пуск".

Исполнительный механизм МЭО 40/63-0,25, использованный в лабораторной установке, снабжён комплектом из двух индуктивных датчиков БДИ-6 и датчика с токовым выходным сигналом БСПТ-10. Принципиальная схема МЭО 40/63-0,25 изображена на рис. 4. МЭО этого типа имеет электрический тормоз (диоды и резисторы на схеме), осуществляющий торможение путём подачи постоянного тока в обмотки управления после их отключения от сети переменного тока.

Другой исполнительный механизм, установленный на щите, ИМ 2/120 ($M_{кр}=2$ кГм; $T_{им}/\varphi_{им}=120$ с; $\varphi_{им}=0,33$) оборудован конденсаторным двухфазным двигателем, двумя концевыми выключателями, потенциометрическим датчиком угла поворота выходного вала с сопротивлением 120 Ом и не имеет тормозного устройства. Его принципиальная схема изображена на рис. 4б.

К кривошипам ИМ прикреплены рычаги с переставляемыми грузами. Перемещение груза из одного крайнего положения в другое меняет нагрузку ИМ от $0,5$ до 1 $M_{кр}$. Выходные валы обоих ИМ снабжены шкалами, отградуированными в градусах угла поворота.

Генератор пассивных управляющих импульсов замыкает свой выходной контакт КТ на время от $0,1$ до 1 с, регулируемое в 10 ступенях через $0,1$ с. Пауза между импульсами сохраняется постоянной и выбрана равной 1 с, что достаточно для полной остановки ИМ после окончания импульса, одновременно число импульсов подсчитывается дискретным электрическим счётчиком.

На лабораторном стенде имеются узлы релейных схем, включающие реле, кнопки управления, переключатели, с помощью которых можно собрать схемы управления исполнительным механизмом ИМ 2/120. Схемы этих узлов (рис. 5) изображены на щите управления, выводы узлов подключены к сборке зажимов, также расположенной на щите. Сборка схем управления производится проводами с вилочными оконцевателями путём соединения клемм на сборке зажимов.

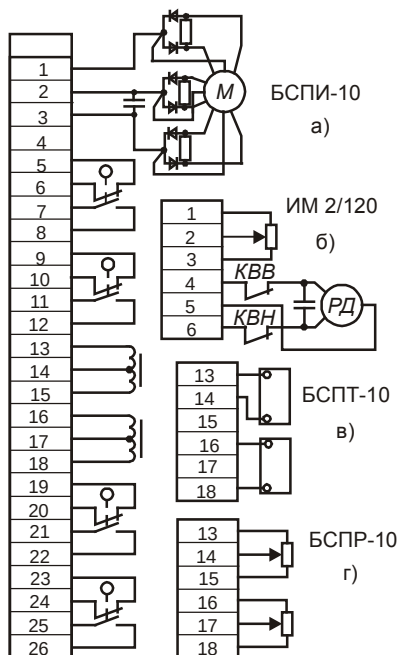
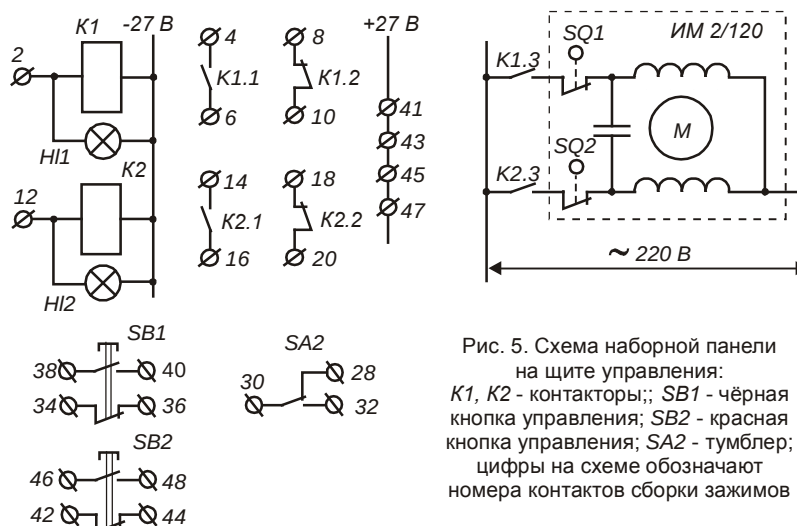


Рис. 4. Принципиальные схемы МЭО с различными вариантами исполнения датчиков положения выходного вала (а, в, г) и ИМ 2/120 (б)



3. Программа работы и её выполнение

1) Изучить конструкцию исполнительного механизма МЭО. Открыть крышку колонки управления ИМ и изучить расположение и способ регулировки датчиков положения выходного вала и конечных (путевых) выключателей. Отрегулировать конечные выключатели на срабатывание при угле поворота рычага примерно на $\pm 20^\circ$, считая от горизонтального положения рычага.

2) По «Техническому описанию и инструкции по эксплуатации» пускателя изучить схему пускателя ПБР- 2м, схемы его соединения с МЭО 40/63-0,25. Начертить принципиальную схему такого соединения и после её проверки преподавателем собрать на стенде. Пользуясь встроенным в ПБР-2м источником питания цепи дистанционного управления или источником питания лабораторного стенда, убедиться в правильности работы схемы. Убедиться, что ИМ движется в заданном направлении при подаче только одного сигнала управления и останавливается при одновременной подаче сигналов обоих направлений.

Разработать и начертить принципиальную схему соединения ПБР-2м и ИМ 2/120, проверить её правильность у преподавателя, собрать на стенде и опробовать.

3) Синтезировать и собрать контактную схему реверсивного управления исполнительным механизмом ИМ 2/120 на контакторах *K1, K2* и пусковых кнопках *SB1, SB2*. Исполнительный механизм должен двигаться в обоих направлениях только в течение времени нажатия соответствующей кнопки.

4) Усложнить схему, введя в нее блокировку движения исполнительного механизма (запрет движения) при одновременном нажатии обеих кнопок.

5) В схему по пунктам 3 и 4 ввести блокировки, обеспечивающие движение исполнительного механизма до конца (до отключения конечными выключателями) после кратковременного нажатия любой из кнопок.

6) В схему по пункту 5 ввести переключатель *SA2* для остановки исполнительного механизма в любом промежуточном положении.

7) В исполнительном механизме МЭО 40/63 отрегулировать положение конечных выключателей так, чтобы он останавливался в положениях, заданных преподавателем.

8) Отрегулировать БСПТ-10 потенциометрами, расположенными на его корпусе, валики которых выведены «под шлиц» и обозначены «0%» и «100%», так,

чтобы в конечных положениях вала исполнительного механизма дистанционный указатель положения показывал 0% и 100%.

9) Собрать схему для импульсного управления движением одного из исполнительных механизмов в направлениях «Меньше» и «Больше», включив последовательно с источником питания цепи дистанционного управления лабораторного стенда замыкающий контакт *КТ*. Убедиться в работоспособности схемы.

Установив рычаг в нижнее положение непосредственно перед срабатыванием конечного выключателя, ограничивающего движение вниз, передвинуть груз на конец рычага до упора, создав на выходном валу ИМ момент нагрузки, равный $1 M_{кр}$. Сбросить показание счётчика на нуль. Включить ключ выбора направления движения рычага вверх, включить ключ «Пуск» и отсчитать число импульсов и угол поворота выходного вала при перемещении рычага почти на полный ход вверх (не допуская срабатывания конечного выключателя). Вычислить эквивалентную скорость ИМ.

Переместить рычаг в почти крайнее положение вверх, нагрузить ИМ моментом нагрузки $0,5 M_{кр}$, передвинув груз на середину рычага, и поступая аналогично изложенному выше, вычислить эквивалентную скорость ИМ при движении вниз.

Сделав опыты для всех 10 ступеней продолжительности управляющих импульсов для обоих исполнительных механизмов, построить импульсные характеристики МЭО 40/63-0,25 и ИМ 2/120, а также найти $S_{эв.мин.}$ и $S_{эв.макс.}$.

4. Оформление отчёта

Отчёт должен содержать:

- 1) разработанные принципиальные схемы соединений исполнительных механизмов, ПБР- 2м, генератора импульсов, ключей;
- 2) таблицы экспериментальных данных;
- 3) графики зависимости эквивалентной скорости ИМ от продолжительности управляющих импульсов при встречной и сопутствующей нагрузках.
- 4) рассчитанные по стандартной методике $S_{эв.мин.}$, $S_{эв.макс.}$ и высоту «горба» на графике.
- 5) анализ расхождений ожидаемых результатов и полученных в опытах, если они имеются, выводы по этапам работы и по работе в целом.

Контрольные вопросы

1. Начертить принципиальные схемы дистанционного управления МЭО 40/63 и ИМ 2/120 от кнопок управления и электромагнитных контакторов.
2. Как регулируют момент срабатывания концевых (путевых) выключателей?
3. Как отрегулировать индуктивные преобразователи ИМ МЭО с тем, что бы из двух преобразователей можно было собрать один дифференциальный индуктивный преобразователь, два преобразователя ?
4. Спроектировать схему дистанционного указателя положения выходного вала ИМ с индуктивными датчиками положения комплекта БСПИ-10.
5. Спроектировать схему дистанционного указателя положения выходного вала ИМ с потенциометрическими датчиками комплекта БСПР-10.

6. Спроектировать схему дистанционного указателя положения выходного вала ИМ с токовым сигнализатором положения комплекта БСПТ-10.
7. Начертить блок-схему ПБР- 2М и объяснить по ней работу пускателя.
8. Объяснить по принципиальной схеме ПБР-2м, как течёт ток в обмотках двигателя ИМ при его вращении в направлениях «*Больше*» и «*Меньше*».
9. Объяснить по принципиальной схеме ПБР-2м, как при обоих направлениях вращения получает питание электромагнитный тормоз.
10. Начертить схему соединения ПБР-2м с МЭО 40/63- 0,25 и ИМ 2/120.
11. Объяснить ход кривых эквивалентной скорости ИМ.

Библиографический список

1. Наладка средств автоматизации и автоматических систем регулирования: Справочное пособие / А.С. Ключев, А.Т. Лебедев, С.А. Ключев, А.Г. Товарнов; Под. ред. А.С. Ключева. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1989, 386 с., ил.
2. Яковлев Ю.С., Мальгин О.А., Камчаткин А.П. Технические средства локальных САР. Чебоксары: Чувашкнигоиздат, 1973. 336 с., ил.
3. «Пускатель бесконтактный реверсивный». Техническое описание и инструкция по эксплуатации.
4. Промышленные приборы и средства автоматизации: Справочник / В.Я. Баранов, Т.Х. Безновская, В.А. Бек и др.; Под общ. ред. В.В. Черенкова. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние. 1987. – 847 с., ил.

Лабораторная работа № 5. Определение расходных характеристик и коэффициентов передачи регулирующих органов для автоматических систем регулирования

Цель работы:

- 1) на специализированной лабораторной установке по опытным данным построить расходные характеристики регулирующих органов при различных условных коэффициентах сопротивления трубопроводной линии;
- 2) по этим характеристикам построить зависимости коэффициентов передачи регулирующих органов от хода затвора;
- 3) сформулировать рекомендации по выбору диапазона хода затвора, в котором обеспечивается требование постоянства коэффициента передачи регулирующего органа в автоматической системе регулирования.

1. Основные характеристики регулирующих органов

Для изменения расхода среды в объекте регулирования в автоматических системах регулирования (АСР) наиболее часто используется исполнительное устройство, состоящее из дроссельного регулирующего органа (РО) и исполнительного механизма. От правильности расчёта пропускной способности и выбора расходной характеристики РО во многом зависит качество процесса регулирования, так как в отличие от других звеньев АСР (датчики, регуляторы и пр.) пропускные и расходные характеристики РО существенно искажаются внешними факторами, особенно гидравлическими характеристиками трубопроводов.

Критерием оценки при выборе расходной характеристики РО является коэффициент передачи, используемый для расчёта АСР.

1.1. Некоторые определения

Регулирующие органы характеризуются многими параметрами, основными из которых являются: условный проход, пропускная и условная пропускная способности.

Условным проходом D_y называется номинальный диаметр прохода в присоединительных патрубках РО.

Пропускной способностью K_v называется расход в $\text{м}^3/\text{ч}$ жидкости с плотностью 1000 кг/м^3 при перепаде давления на РО в 100 кПа .

Условной пропускной способностью K_{vy} называется номинальное значение пропускной способности при максимальном (условном) ходе затвора РО, выраженное в $\text{м}^3/\text{ч}$.

Кроме приведённых основных параметров РО, определяющих их конструкцию и размеры, имеются другие параметры, которые учитывают при выборе РО в зависимости от конкретных условий их применения.

Конструктивная характеристика устанавливает зависимость изменения относительного проходного сечения РО от степени его открытия. Перемещение (ход) затвора РО принято выражать в относительных единицах

$$s = S / S_{\text{макс}}$$

где S – текущее перемещение затвора;

$S_{\text{макс.}}$ – перемещение затвора для полного открытия РО.

В соответствии с этим конструктивная характеристика представляет собой зависимость $F_s/F_{\text{макс.}} = f(s)$, где F_s и $F_{\text{макс.}}$ – площади проходного сечения при некотором положении затвора s и при полном его открытии, т.е. при $s = 1$.

Пропускная характеристика (внутренняя или идеальная) устанавливает зависимость пропускной способности от перемещения затвора s РО при постоянном перепаде давления на РО 100 кПа: $K_{vs} / K_{vy} = f(s)$. Серийно выпускаемые РО обычно имеют линейные или равнопроцентные пропускные характеристики.

При линейной пропускной характеристике приращение пропускной способности пропорционально перемещению затвора:

$$dK_v / ds = C,$$

где C – постоянная величина.

При равнопроцентной пропускной характеристике отношение относительного приращения пропускной способности к относительному перемещению затвора есть величина постоянная:

$$(dK_v / K_v) / ds = C.$$

Примеры конструктивных характеристик круглой поворотной заслонки и двух шиберов с разными формами полотна изображены на рис. 1.

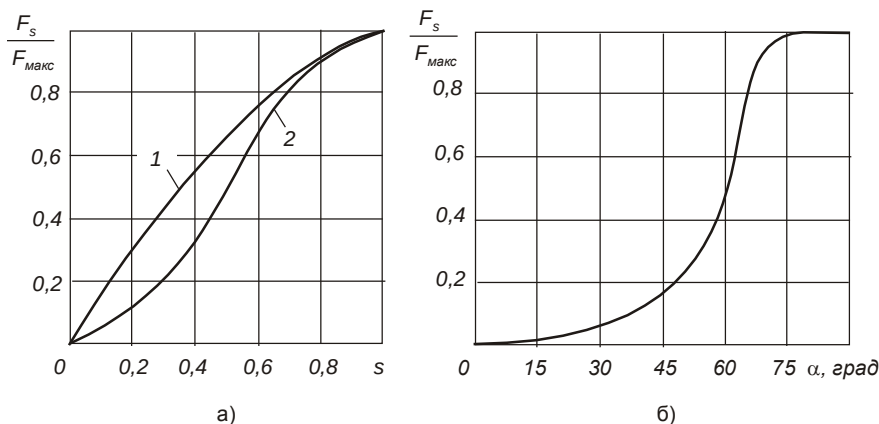


Рис. 1. Конструктивные характеристики шиберов (а) и поворотной заслонки (б):

1 - шибер со скруглённым полотном; 2 - шибер с прямоугольным полотном

1.2. Расходная характеристика

В рабочих условиях вид пропускной характеристики изменяется в зависимости от изменения гидравлического сопротивления трубопроводной сети и режимов движения регулируемого потока. Характеристику РО в рабочих условиях принято называть *расходной характеристикой*, представляющей собой зависимость относительного расхода среды от степени открытия РО $\mu = f(s)$, где $\mu = Q_s / Q_{s \text{ макс.}}$; Q_s – расход среды при положении затвора РО s ; $Q_{\text{макс.}}$ – расход среды при полностью открытом РО при $s = 1$.

Конструктивные, пропускные и расходные характеристики регулирующих органов связаны между собой соотношениями

$$\frac{K_v}{K_{vy}} = \frac{F_s}{F_{\max}} \cdot \frac{w_{POs}}{w_{PO\max}} \sqrt{\frac{\Delta p_{PO\max}}{\Delta p_{POs}}} = \frac{Q_s}{Q_{\max}} \sqrt{\frac{\Delta p_{PO\max}}{\Delta p_{POs}}},$$

где $\Delta p_{PO\max}$ – безвозвратная потеря напора в РО при его полном открытии, Па;

Δp_{POs} – то же при положении затвора РО s ;

$w_{PO\max}$ – средняя скорость вещества во входном патрубке РО при его полном открытии, м/с;

w_{POs} – то же при положении затвора s .

Пропускная характеристика поворотной заслонки близка к равнопроцентной, пропускные характеристики шиберов обоих исполнений – к линейной.

Если РО установлен в системе с трубопроводом, вид расходной характеристики РО изменяется.

Безвозвратная потеря напора в системе Δp_c складывается из потерь напора в трубопроводной линии Δp_l и в РО Δp_{PO} :

$$\Delta p_c = \Delta p_l + \Delta p_{PO}. \quad (1)$$

Безвозвратные потери напора Δp_l и Δp_{PO} и условные коэффициенты сопротивления линии ζ_l и РО ζ_{PO} связаны следующими зависимостями:

$$\Delta p_l = \zeta_l \rho w_{PO}^2 / 2, \text{ Па}; \quad (2)$$

$$\Delta p_{PO} = \zeta_{PO} \rho w_{PO}^2 / 2, \text{ Па}, \quad (3)$$

где ρ – плотность вещества, кг/м³.

Условный коэффициент сопротивления линии выражает общее гидравлическое сопротивление линии, приведённое к скорости во входном патрубке РО. Отдельные участки линии могут иметь различные внутренние диаметры и поэтому различные скорости движения вещества. При расчёте условного коэффициента сопротивления линии можно было бы использовать скорость вещества на любом участке и иметь соответствующие значения ζ_l , но обычно используют скорость во входном патрубке РО, так как в этом случае все формулы упрощаются.

Если положить, как это имеет место в большинстве промышленных АСР, что плотность проходящего через РО вещества является величиной постоянной, и что условный коэффициент сопротивления линии не зависит от нагрузки, потерю напора в системе Δp_c для любого расхода можно выразить так:

$$\Delta p_c = (\zeta_l + \zeta_{PO}) \rho w_{PO}^2 / 2, \text{ Па}.$$

Расход вещества через РО при некотором положении его затвора s может быть определён из выражения

$$Q_s = F_{PO} \sqrt{\frac{2 \Delta p_s}{\rho (\zeta_l + \zeta_{POs})}}, \text{ м}^3/\text{с},$$

а относительный расход из выражения

$$\mu_s = \sqrt{\frac{(\zeta_{\text{л}} + \zeta_{\text{РО макс.}}) \Delta p_{\text{с}}}{(\zeta_{\text{л}} + \zeta_{\text{РО с}}) \Delta p_{\text{с макс.}}}}, \quad (4)$$

где $F_{\text{РО}}$ – площадь проходного сечения входного патрубка РО, м^2 ;

$\zeta_{\text{РО макс.}}$ и $\zeta_{\text{РО с}}$ – условные коэффициенты сопротивления РО соответственно при его полном открытии и при положении затвора s ;

$\Delta p_{\text{с макс.}}$ и $\Delta p_{\text{с}}$ – потери напора в системе соответственно при полном открытии РО и при положении s его затвора, Па .

Из этих выражений следует, что чем больше развит трубопровод, тем больше отличается расходная характеристика от пропускной. При полном отсутствии трубопровода эти две характеристики совпадают.

На рис. 2 изображены примеры расходных характеристик шиберов и поворотной заслонки при различных значениях условного коэффициента сопротивления линии.

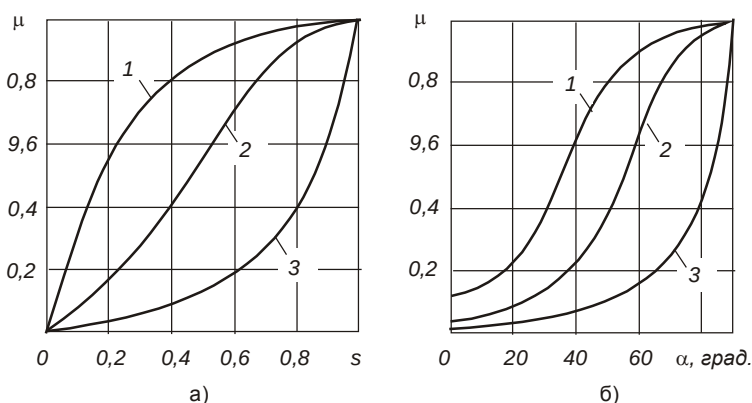


Рис. 2. Расходные характеристики круглого шиберов (а) и поворотной заслонки (б) с $\zeta_{\text{РО макс.}} = 0,024$ при: 1 - $\zeta_{\text{л}} = 10$; 2 - $\zeta_{\text{л}} = 1$; 3 - $\zeta_{\text{л}} = 0,01$

Для обеспечения требуемых значений статических и динамических параметров при расчётах АСР требуется правильный выбор формы пропускной характеристики РО. Задача выбора условно может быть разделена на два этапа:

1) выбор формы расходной характеристики, обеспечивающей постоянство коэффициента передачи РО во всём диапазоне нагрузок объекта регулирования;

2) выбор формы пропускной характеристики, обеспечивающей в данных условиях желаемую форму расходной характеристики регулирующего органа.

Если в АСР действуют преимущественно *внутренние* возмущения, идущие по каналу регулирующих воздействий, предпочтительным является применение РО с *равнопроцентной* пропускной характеристикой, поскольку в этом случае коэффициент передачи РО $k = d\mu / ds$ существенно не изменяется.

При преимущественно *внешних* возмущениях (изменение нагрузки, задания и др.) коэффициент передачи остаётся неизменным у РО с *линейной* пропускной характеристикой.

Эти рекомендации действительны, однако, лишь в тех случаях, когда гидравлическое сопротивление в сети определяется почти исключительно РО, т.е. когда $\zeta_{\text{РО макс.}} \gg \zeta_{\text{л}}$. В большинстве практических случаев это требование не выполняется. Как следует из рис. 2, форма расходных характеристик существенно изменяется в зависимости от соотношения потерь напора в линии и в РО или, что то же, соотношения условных коэффициентов сопротивления линии и РО $\Delta p_{\text{л}} / \Delta p_{\text{РО}} = \zeta_{\text{л}} / \zeta_{\text{РО}}$. Поэтому выбор вида расходной характеристики в каждом конкретном случае

применения РО диктуется необходимостью получения с заданной точностью постоянства коэффициента передачи РО k в заданном диапазоне изменения нагрузок от s_1 до s_2 , а не формой предпочтительной пропускной характеристики РО, где s_1 и s_2 – пределы перемещения затвора РО в АСР.

Формулирование рекомендаций для выбора возможного диапазона перемещения затвора от s_1 до s_2 при различных отношениях условных коэффициентов сопротивления линии и РО для шиберов и поворотной заслонки должно явиться главным результатом настоящей работы.

2. Лабораторная установка

Схема лабораторной установки изображена на рис. 3. Лабораторная установка состоит из трубопровода 1, изготовленного из стальной холоднотянутой трубы с

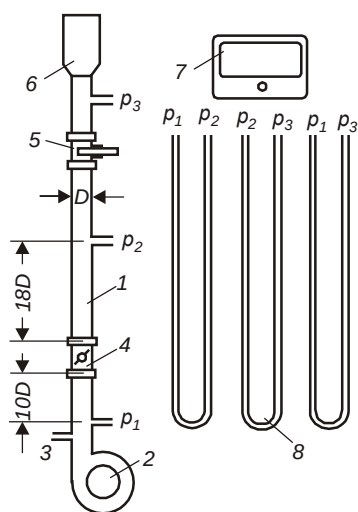


Рис. 3. Схема лабораторной установки:
1 - трубопровод;
2 - воздушный компрессор;
3 - патрубок к регулятору давления воздуха от компрессора;
4 - исследуемый регулируемый орган;
5 - регулирующий орган для изменения сопротивления линии;
6 - турбинный измеритель расхода воздуха;
7 - показывающий прибор измерителя расхода воздуха;
8 - блок дифференциальных манометров

внутренним диаметром $D=36$ мм, через который продувается воздух, нагнетаемый воздушным компрессором 2. Давление воздуха p_1 на входе в трубопровод стабилизировано регулятором давления 3, расход воздуха измеряется турбинным расходомером 6, показывающий прибор которого 7 установлен в верхней части щита.

Для изменения расхода воздуха на трубопроводе установлены исследуемый РО 4, а также РО 5, предназначенный для изменения сопротивления линии. Для измерения потерь напора на регулирующем органе РО 4 и на участках трубопровода линия снабжена устройствами для отбора статических давлений $p_1 \dots p_3$. Потери напора $p_1 - p_2$, $p_2 - p_3$, $p_1 - p_3$ измеряются U-образными дифференциальными водяными манометрами 8.

Безвозвратная потеря напора в системе $\Delta p_c = p_1 - p_3$. Потеря напора в линии Δp_l может быть вычислена как разность $\Delta p_c - \Delta p_{PO}$. Потеря напора $p_1 - p_2$ включает в себя потерю напора в РО Δp_{PO} плюс потери на трение потока воздуха $\Delta p_{тр}$ в трубопроводе на участках $10D$ (до РО) и $18D$ (после РО). Последние представляют собой функцию критерия Рейнольдса и свойств поверхности трубопровода и могут быть определены из формулы Фаннинга $\frac{\Delta p_{тр} \cdot D}{\rho \cdot w^2 \cdot L}$. Эта зависимость не может быть

выражена математическим путём, а находится только из опытов, в которых варьируются размеры трубы, материал, из которого она изготовлена, шероховатость стенок, скорость потока и пр. Кривая, выражающая соотношение между критерием Рейнольдса $Re_s = \frac{D \cdot w_s \cdot \rho}{\mu}$, рассчитываемым при скорости потока w_s , соответствующей текущему положению s затвора РО, и формулой Фаннинга приведена на рис. 4.

Для использования этой кривой входящие в критерий Рейнольдса и формулу Фаннинга величины должны быть выражены в следующих единицах:

$\Delta p_{тр}$ – потери напора от трения в трубопроводе в *паскалях* ($1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$);

D – внутренний диаметр трубопровода в *сантиметрах* (см);

ρ – плотность воздуха в *килограммах на кубический метр* (кг/м^3) при рабочих температуре и давлении в трубопроводе;

w_s – средняя скорость потока воздуха в *метрах в секунду* (м/с);

μ – динамическая вязкость воздуха в *сантипуазах*; $\mu = 0,01 \text{ сП}$;

L – длина участка трубопровода в *метрах* (м).

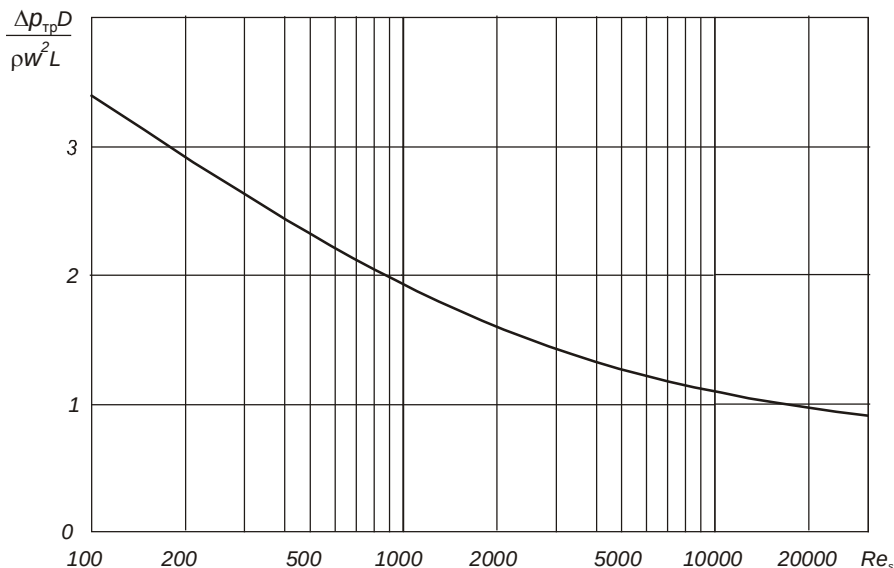


Рис. 4. Графическое решение уравнения Фаннинга для расчёта потери напора на трение в трубопроводе лабораторной установки

В процессе выполнения работы требуется получить зависимости коэффициентов передачи упорной поворотной заслонки и одного из шиберов (с прямоугольным или скруглённым полотном в соответствии с заданием) от перемещения s регулирующего органа при разных условных коэффициентах сопротивления линии.

Для достижения этой цели установка снабжена сменными регулирующими органами.

Поворотная заслонка с упорами имеет диаметр проходного сечения 20 мм и плоское крыло толщиной 0,5 мм. Крыло заслонки установлено на валу диаметром 3 мм, снабжённом указателем и шкалой, позволяющими определить положение затвора в градусах угла поворота крыла α . Перпендикулярному оси трубопровода положению плоскости крыла соответствует $\alpha=0^\circ$, совпадающему с осью – $\alpha=90^\circ$.

Шибер также имеет диаметр проходного сечения 20 мм и сменные полотна со скруглённым по радиусу 10,5 мм полотном и с полотном, срезанным по прямой. На выступающей наружу части полотна нанесены деления, соответствующие относительному перемещению затвора через каждую пятую часть его полного хода.

Изменение условного коэффициента сопротивления линии осуществляется перемещением полотна РО 5, установленного в верхней части трубопровода, в качестве которого использован шибер с проходным сечением диаметром 36 мм.

У всех регулирующих органов диаметр присоединительных патрубков D_y равен диаметру трубопровода D и составляет 36 мм.

3. Программа работы и её выполнение

1) Собрать лабораторную установку для исследования поворотной заслонки, установив заслонку на трубопровод с помощью хомутов.

2) Включить установку и получить опытные данные для построения расходных характеристик заслонки, меняя угол поворота крыла заслонки и положение полотна шибера (РО 5 на рис. 3), изменяющего сопротивление линии.

Отсчёты показаний приборов следует производить через каждые 15° угла поворота заслонки от закрытого положения до полностью открытого и при всех шести положениях полотна шибера.

Результаты наблюдений занести в протокол наблюдений.

3) По формулам (1)...(4) и по графику уравнения Фаннинга на рис. 4 рассчитать значения $\Delta p_{тр}$, $\Delta p_{л}$, $\zeta_{л}$, $\zeta_{РО\ S}$, $\zeta_{РО\ макс.}$, μ_s и результаты также занести в протокол наблюдений.

4) По полученным значениям построить семейство кривых относительного расхода μ от положения затвора s ; параметр семейства – условный коэффициент сопротивления линии $\zeta_{л}$.

Поскольку опытные данные неизбежно имеют разброс, при построении зависимостей $\mu = f(s)$ произвести сглаживание кривых, проводя их плавно и наиболее близко к опытным точкам, ориентируясь на ход аналогичных кривых, приведённых на рис. 2.

5) Продифференцировав зависимости $Q_s=f(s)$ (или $\mu=f(s)$), построить семейство зависимостей коэффициента передачи заслонки $k = dQ_s/ds$ от положения затвора s $k=f(s)$; параметр семейства – условный коэффициент сопротивления линии $\zeta_{л}$.

Дифференцирование можно произвести любым способом: аналитическим, в таблице или графическим. Имея зависимости $Q_s=f(s)$ в виде сглаженных графиков, удобно произвести графическое дифференцирование по методике, изложенной в рассмотренном ниже примере (рис. 5).

Протокол наблюдений

Опытные данные					Расчёты				
s	α , град.	p_c , Па	$p_1 -$ p_2 , Па	Q_s , м ³ /ч	$\Delta p_{тр}$, Па	$\Delta p_{л}$, Па	$\zeta_{л}$	$\zeta_{РО\ S}$	μ_s
0	0								
	15								
	:								
	90								
0,2	0								
	15								
	:								
	90								
.....									

Пусть кривой 1 задана зависимость $Q_s = f(s)$. Для определения производной $k = dQ_s/ds$ при некотором значении s достаточно провести касательную к графику в соответствующей точке и измерить её угловой коэффициент.

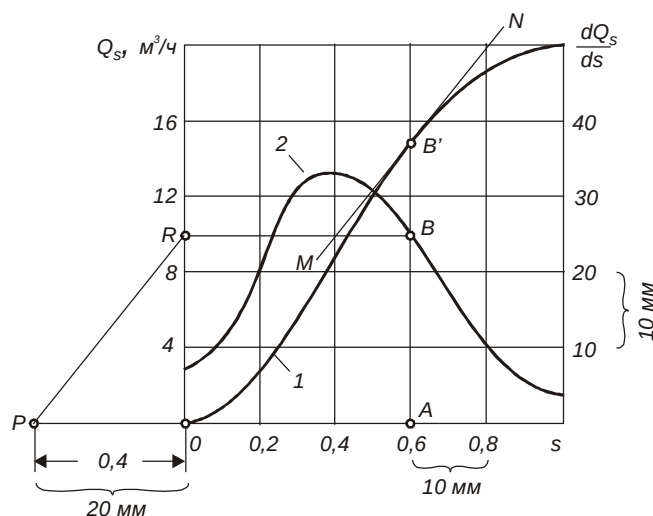


Рис. 5. Построение зависимости коэффициента передачи PO от перемещения затвора по заданной расходной характеристике: 1 - расходная характеристика; 2 - коэффициент передачи PO

Разложим ось s на столь малые не обязательно равные элементы, чтобы соответствующие части кривой 1 по возможности мало отличались от прямолинейных отрезков, и найдём их средние ординаты. Затем, выбрав на горизонтальной оси полюс P на расстоянии OP от начала, станем проводить через него отрезки PR , параллельные касательным MN к кривой в точках B' упомянутых средних ординат. Наконец, через точки R проведём прямые, параллельные оси s , до пересечения с соответствующими ординатами в точках B (или с продолжениями ординат). Кривая 2, соединяющая эти точки, и будет искомой.

Ординаты построенной кривой пропорциональны соответствующим значениям производной dQ_s/ds . Масштаб для них по вертикальной оси, т.е. какая длина шкалы по оси соответствует единице dQ_s/ds , может быть найден из следующих соображений.

Если m_1 и m_2 масштабы осей s и Q_s , то масштаб m' для производной будет равен $m' = (m_2/m_1) \cdot OP$, где OP – длина отрезка OP в единицах длины.

В нашем примере на рис. 5 каждое деление шкалы по оси s , составляющее 0,2 относительной величины от полного хода PO , имеет длину 10 мм, а отрезок OP длину двух делений, т.е. 20 мм. Каждое деление шкалы по оси Q_s , равное $4 \text{ м}^3/\text{ч}$, также имеет длину 10 мм. Из этого получаем

$$m_1 = \frac{10 \text{ мм}}{0,2 \text{ единицы } s}; \quad m_2 = \frac{10 \text{ мм}}{4 \text{ единицы } Q_s};$$

$$m' = \frac{10}{4} \cdot \frac{0,2 \text{ [единицы } s]}{10 \text{ [единицы } Q_s]} \cdot 20 \text{ мм} = 1 \frac{\text{от носит . величина } s}{\text{м}^3 / \text{ч}},$$

что означает, что каждый 1 мм шкалы для производной соответствует $1 \frac{\text{м}^3 / \text{ч}}{\text{от носит . величина } s}$.

Численное значение производной dQ_s/ds в точке B равно

$$\frac{\text{длина от резка } AB}{m'} = \frac{25 \text{ мм [единицы } Q_s]}{1 \text{ мм [единицы } s]} = 25 \frac{\text{м}^3 / \text{ч}}{\text{от носит . величина } s}.$$

В случае расчёта для поворотной заслонки единицей s будет градус угла её поворота.

Путём выбора полюсного расстояния ОР можно сделать любой удобный масштаб.

6) Оценить изменение коэффициента передачи k заслонки при изменении s и сформулировать условия применимости данной заслонки с $\zeta_{PO \text{ макс}}$ при различных ζ_l в АСР, дать рекомендации по выбору допустимого диапазона хода РО от s_1 до s_2 . При этом надо учесть, что в АСР по отклонению *изменение коэффициента передачи РО в диапазоне его хода в полтора-два раза обычно допустимо*, если не выдвинуты более жёсткие требования.

7) Собрать лабораторную установку для исследования шибера, установив его на трубопровод. Повторить пункты 2...6 программы работы, построить зависимости коэффициента передачи шибера с данным $\zeta_{PO \text{ макс.}}$ от относительного хода затвора s при различных ζ_l , сделать выводы, дать рекомендации по диапазону изменения положения затвора данного РО.

4. Оформление отчёта

Отчёт должен содержать:

- 1) краткое содержание ключевых вопросов теоретического введения;
- 2) таблицы опытных данных, таблицы расчётов, графики расходных характеристик, графики изменения коэффициента передачи РО в зависимости от хода затвора;
- 3) анализ сходства и отличий опытных и теоретических кривых;
- 4) выводы по отдельным этапам работы и по работе в целом.

Контрольные вопросы

1. Перечислить и дать определение основным характеристикам регулирующих органов АСР.

2. Почему расходная характеристика РО, установленного на длинном трубопроводе, отличается от такой же характеристики РО, установленного на коротком трубопроводе?

3. Что такое условный коэффициент сопротивления линии и как его рассчитать?

4. Как экспериментально определить условные коэффициенты сопротивления линии, регулирующего органа и системы?

5. Как вычислить расход вещества через регулирующий орган при некотором среднем положении его затвора?

6. В каких случаях применяют регулирующие органы с линейной и с равнопроцентной характеристиками?

7. В каких случаях регулирующий орган с равнопроцентной пропускной характеристикой может быть использован в АСР, в которой требуется линейная пропускная характеристика?

8. Какие размеры должна иметь стандартная установка для экспериментального определения расходной характеристики регулирующего органа? Где должны быть расположены точки для измерения давлений в этой установке?

9. Если присоединительные патрубки регулирующего органа имеют иной диаметр, чем трубопровод экспериментальной установки, как определить скорость потока в присоединительном патрубке?

Библиографический список

1. Наладка средств автоматизации и автоматических систем регулирования: Справочное пособие / А.С. Ключев, А.Т. Лебедев, С.А. Ключев и др.; Под ред. А.С. Ключева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 368 с.
2. П.И. Кузьмин. Выбор и расчёт дроссельных регулирующих органов. – М.: Госэнергоиздат, 1960. – 160 с.
3. Арзуманов Э.С. Расчёт и выбор регулирующих органов автоматических систем. – М.: Энергия, 1971.

Лабораторная работа № 6. Определение параметров пропорционального регулятора и его настройка

Цель работы:

- 1) изучить свойства и структуру П-регулятора;
- 2) изучить показатели качества процесса регулирования;
- 3) научиться определять статические и динамические параметры объекта регулирования;
- 4) изучить способы расчёта настроек и определения уставок П-регулятора;
- 5) определить параметры САУ с П-регулятором и статическим объектом.

1. Качество регулирования и настройка регулятора

1.1. Возмущения технологического процесса

Различают возмущения, связанные с изменением нагрузки объекта регулирования (вносимые в объект), и возмущения, возникающие при установке нового задания регулятору (вносимые в регулятор). Изменение нагрузки является основным источником нарушений режима работы объекта регулирования. Изменение задания характерно для систем программного управления. Возмущения бывают по продолжительности длительными, краткими и импульсными, постоянной величины и изменяющиеся во времени. В данной лабораторной работе изучается влияние длительных скачкообразных возмущений, поэтому в дальнейшем другие виды возмущений не рассматриваются.

Вносимое в объект регулирования возмущение u_e обычно выражается в эквивалентном перемещении в процентах регулирующего органа (или исполнительного механизма), нужном для полной компенсации отклонения регулируемой величины под влиянием возмущения. Вносимое в регулятор возмущение выражается в единицах измерения регулируемой величины или в виде относительной величины (в долях от текущего установившегося значения регулируемой величины) при линейном объекте.

1.2. Качество процесса регулирования

На рис. 1,а приведена примерная кривая переходного процесса в статическом объекте (без регулятора) при однократном скачкообразном возмущении на входе объекта без регулирующего воздействия. Чтобы уменьшить отклонение или полностью устранить его, необходимо ввести регулирующее воздействие и обеспечить надлежащее качество переходного процесса.

Рассмотрим основные показатели качества процесса регулирования. Пусть переходный процесс вызван однократным скачкообразным возмущением как наиболее тяжёлой формой возмущения. Такой переходный процесс в САУ с П-регулятором и статическим объектом показан на рис. 1,б.

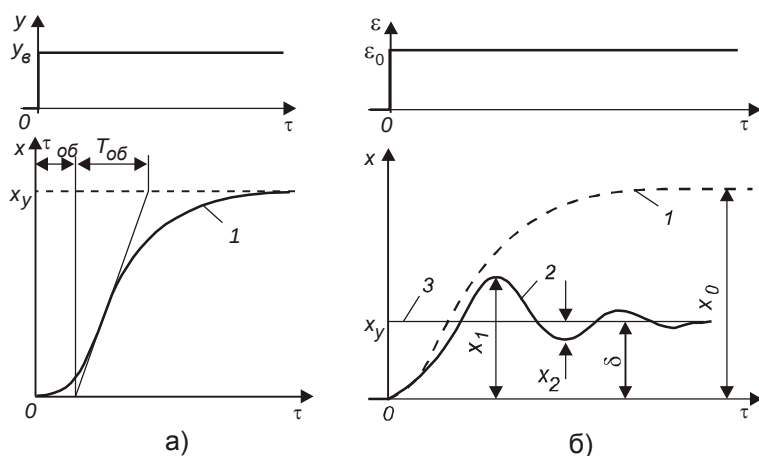


Рис. 1. Переходный процесс в статическом объекте:
 а) аппроксимация переходного процесса в объекте экспонентой с запаздыванием; б) переходный процесс при регулировании с остаточным отклонением от задания
 (1 - без регулятора; 2 - с регулятором ; 3 - заданное значение)

Максимальное отклонение регулируемой величины от задания в ходе процесса регулирования равно x_1 . Это наибольшее отклонение в сходящемся процессе регулирования, оно непосредственно следует за возмущением. Величина x_1 зависит от динамических свойств объекта, величины возмущения, принятого закона регулирования и настроек регулятора. Величина этого отклонения особенно существенна, если даже временное значительное

отклонение от задания по технологическим условиям недопустимо.

Перерегулирование. Степень колебательности переходного процесса характеризуется величиной перерегулирования – отношением амплитуды x_2 второго колебания противоположного направления к x_1 ; это отношение выражается в процентах величины x_1 . Изменением настроек регулятора можно получить разные перерегулирования: от нуля при апериодическом ходе процесса до 100% при установившихся незатухающих колебаниях и даже свыше 100% при расходящихся колебаниях.

Чем больше перерегулирование, тем более колебателен процесс, тем он продолжительнее, тем больше первая, максимальная амплитуда x_1 при одновременно увеличивающейся амплитуде x_2 . Выбирая необходимую величину перерегулирования, следует исходить из условий технологического процесса: целесообразности меньших максимальных, но двухсторонних отклонений от задания при более колебательном и длительном процессе регулирования, или односторонних отклонений с большой амплитудой, но при более быстром окончании переходного процесса.

Время регулирования. Продолжительность регулирования охватывает период времени τ_p (рис. 2) с момента отклонения регулируемой величины от задания до возвращении её регулятором к заданному значению. Чтобы характеризовать воздействие регулятора, время τ_p очень часто относят к величине запаздывания объекта $\tau_{об}$.

В зависимости от настроек регулятора продолжительность переходного процесса может быть различной. Однако она не может быть меньше определённого значения, минимального для регулятора данного типа. Это минимальное время свойственно так называемому граничному апериодическому процессу регулирования (рис. 2,а). Во всех других случаях по обе стороны от границы апериодичности (для затянутых апериодических или колебательных процессов) время регулирования увеличивается (рис. 2,б,в).

1.3. Оптимальные типовые процессы регулирования

Оптимальный процесс регулирования – понятие относительное, всё зависит от конкретных требований со стороны технологического процесса. Наиболее часто встречаются три типовых переходных процесса регулирования (рис. 2):

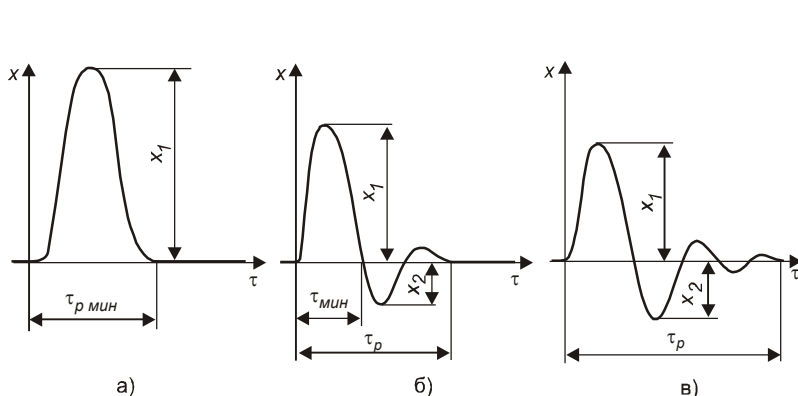


Рис.2. Типовые оптимальные процессы регулирования: а) граничный апериодический с минимальным временем регулирования; б) с 20%-ным перерегулированием и минимальным временем первого полупериода; в) с 40%-ным перерегулированием

а) граничный апериодический процесс с минимальным временем регулирования τ_p (рис. 2,а);

б) процесс с 20%-ным перерегулированием и минимальным временем первого полупериода колебаний (рис. 2,б);

в) процесс с минимальной квадратичной площадью отклонения, т.е. $\min \int x^2 d\tau$ (рис. 2,в).

Граничный апериодический процесс характеризуется минимальным общим временем регулирования τ_p , отсутствием перерегулирования x_2 и минимальным регулирующим воздействием.

Процесс с 20%-ным перерегулированием является промежуточным и используется, когда некоторое перерегулирование допустимо. При этом уменьшается максимальное динамическое отклонение x_1 .

Процесс с минимальной квадратичной площадью отклонения отличается наибольшими регулирующим воздействием и временем регулирования и перерегулированием порядка 40...50%. Однако он характеризуется наименьшей величиной максимального динамического отклонения x_1 .

Один из этих типовых процессов почти всегда может удовлетворить технологическим требованиям различных агрегатов, т.е. будет оптимальным.

1.4. Оптимальные настройки регулятора

Рекомендуемые ниже настройки П-регулятора позволяют получить три указанных выше типовых процесса регулирования. П-регулятор имеет закон регулирования вида $y(\tau) = k_p \varepsilon(\tau)$, где k_p – коэффициент передачи регулятора, измеряемый в следующих единицах:

$$\frac{\% \text{ хода регулирующего органа}}{\text{единица измерения регулируемой величины}}.$$

Имеется много методов вычисления настроек регулятора. Копеловичем / 3 / на основании результатов исследования регуляторов на моделях предложено значение оптимальной настройки k_p находить по графику рис. 3, построенному в функции отношения времени запаздывания $\tau_{об}$ к постоянной времени объекта регулирования $T_{об}$. Последние, в свою очередь, в результате элементарных построений

определяются из кривой разгона объекта (рис. 1,а). Время запаздывания $\tau_{об}$ находится как отрезок на временной оси, отсекаемый касательной, проведённой к кривой разгона на её начальном участке в точке перегиба.

Довольно простыми экспериментальными правилами настройки, приводящими к удовлетворительным результатам, являются правила, сформулированные Циглером и Никольсом [2] в предположении, что степень затухания составляет 0,7...0,9. По этим правилам увеличивают коэффициент k_p регулятора настолько, чтобы система стала совершать незатухающие колебания и, следовательно, находилась бы на границе устойчивости. Это значение k_p обозначают через $k_{рн}$.

Оптимальная настройка П-регулятора соответствует $k_p = 0,5 k_{рн}$.

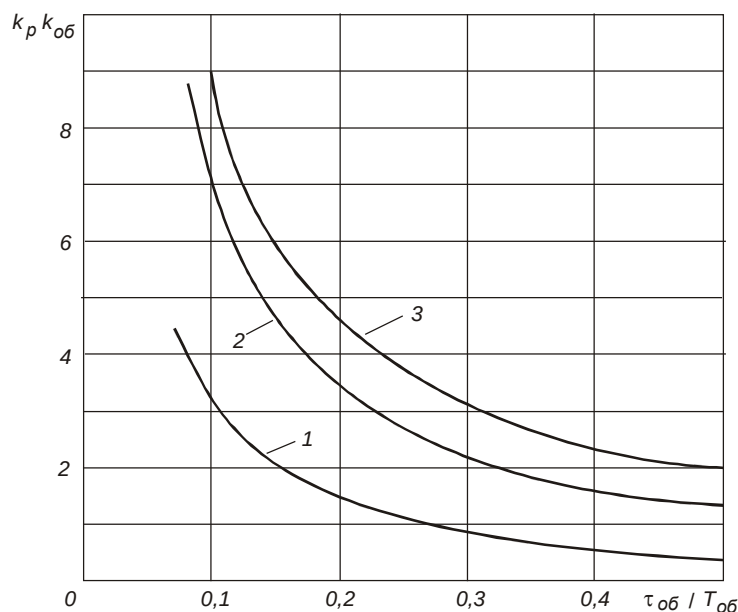


Рис. 3. Оптимальные настройки П-регулятора:
1 - аperiodический процесс; 2 - 20%-ное перерегулирование;
3 - 40%-ное перерегулирование

1.5. Определение уставок П-регулятора

Градуировку уставок регулятора производят путём определения кривых разгона регулятора при различных положениях органов настройки. САУ при этом должна быть разомкнута, а регулятор сбалансирован в центре опыта, т.е. при типичном заданном значении регулируемой величины.

При одном определённом положении органов настройки на вход регулятора подают

однократное скачкообразное возмущение – изменение регулируемой величины или заданного значения, тем самым изменяя величину отклонения регулируемой величины x_m от задания x_3 . При этом регистрируют изменение выходной величины $y(\tau)$, т.е. положение регулирующего органа (или исполнительного механизма) по соответствующему указателю положения.

Величину возмущающего воздействия ε выбирают так, чтобы при каждом положении органов настройки выходную величину можно было измерить достаточно точно. Измеряют величину вводимого изменения входной величины Δx (она же ε) в единицах измерения регулируемой величины и соответствующее этому

перемещение исполнительного механизма Δy (рис. 4). Коэффициент передачи регулятора находят из формулы $\Delta y = k_p \Delta x$, откуда получают:

$$k_p = \frac{\Delta y}{\Delta x} \frac{\% \text{ хода исполнительного механизма}}{\Delta x \text{ единица измерения регулируемой величины}}.$$

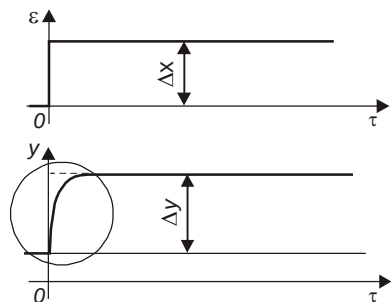


Рис. 4. Градуировка П-регулятора

На первый взгляд П-регулятор имеет только один параметр настройки – k_p . В реальном регуляторе, если коэффициент усиления усилителя не бесконечен и

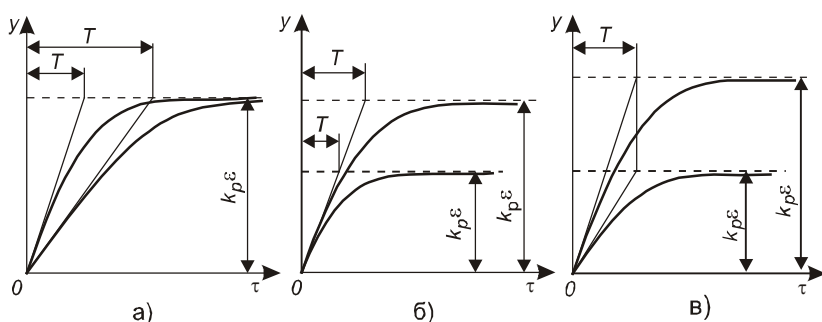


Рис. 5. Влияние на переходный процесс изменения параметров элементов схемы П-регулятора

применён интегрирующий исполнительный механизм, кривая разгона регулятора на участке, обведённом на рис. 4 окружностью, может изменяться под влиянием других параметров (рис. 5).

Изменение скорости исполнительного механизма меняет постоянную времени экспоненты на начальном

участке, но не влияет на коэффициент передачи k_p (рис. 5,а).

Изменение глубины обратной связи изменяет постоянную времени и k_p , неизменным остаётся угол наклона касательной, проведённой к обеим экспонентам в начале координат (рис. 5,б).

Изменение коэффициента усиления измерительного элемента меняет k_p , сохраняя постоянную времени (рис. 5,в).

2. Лабораторная установка

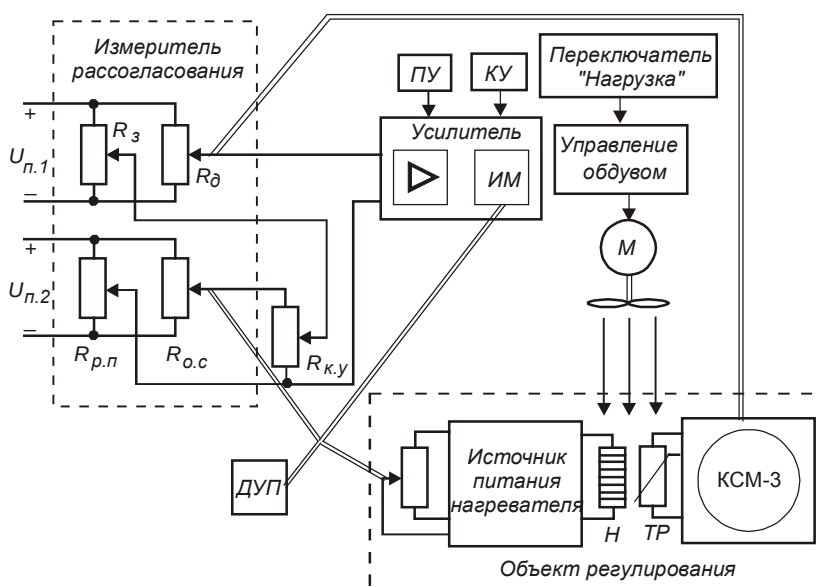


Рис. 6. Функционально-принципиальная схема САУ с П-регулятором: R_3 - потенциометр "Задание" (на щите); R_θ - датчик температуры (в КСМ-3); $R_{p.l}$ - потенциометр "Ручная перестановка" (на щите); $R_{o.c}$ - потенциометр обратной связи (в исполнительном механизме); $R_{k.y}$ - потенциометр "Коэффициент усиления" (на щите); ИМ - исполнительный механизм; ПУ - переключатель управления "Автоматическое" - "Ручное"; КУ - ключ управления "Больше" - "Меньше"; ДУП - дистанционный указатель положения выходного вала ИМ (на щите); Н - нагреватель; ТР - терморезистор; $U_{n.1}$, $U_{n.2}$ - не имеющие общей точки стабилизированные источники питания измерительных мостов

Лабораторная установка представляет собой щит управления, в котором смонтирована схема САУ с П-регулятором. Объектом управления САУ является электрический нагреватель, обдуваемый потоком воздуха от вентилятора. Выходная величина объекта – температура нагревателя – измеряется термометром сопротивления с автоматическим уравновешенным мостом КСМ-3. По сравнению с постоянной времени нагревателя постоянные времени термометра сопротивления и КСМ-3 малы и их можно присоединить к постоянной времени объекта.

Нагреватель получает питание от регулируемого электронного источника питания, который в данных условиях применения можно считать безынерционным звеном. Управляющий вход нагревателя – вал

потенциометра, управляющего напряжением источника питания – соединён с выходным валом исполнительного механизма. Этот вход можно считать входом объекта. Скорость исполнительного механизма можно менять ступенчато (3 ступени) с помощью переключателя на щите управления.

Нагрузка объекта создаётся потоком воздуха, который можно менять ступенчато (3 ступени). Соответствующий переключатель установлен на щите управления, его три положения условно названы «М» (малая нагрузка), «Н» (номинальная) и «Б» (большая).

Функционально-принципиальная схема САУ с П-регулятором изображена на рис. 6, а размещение элементов на щите управления САУ – на рис. 7. На щите установлен цифровой вольтметр для измерения напряжения между разными точками схемы. Точки подключения вольтметра в зависимости от положения переключателя перечислены в таблице под рис. 7.

Измеритель рассогласования выполнен резистивным потенциометрическим и включает в себя два уравновешенных моста. Ручка задатчика R_3 установлена на щите управления и снабжена условной шкалой. Датчиком R_δ является выходной реохорд КСМ-3. Потенциометр ручной перестановки $R_{p.п}$ установлен на щите управления, датчик положения выходного вала исполнительного механизма $R_{o.c}$ осуществляет жёсткую обратную связь, делающую регулятор П-регулятором.

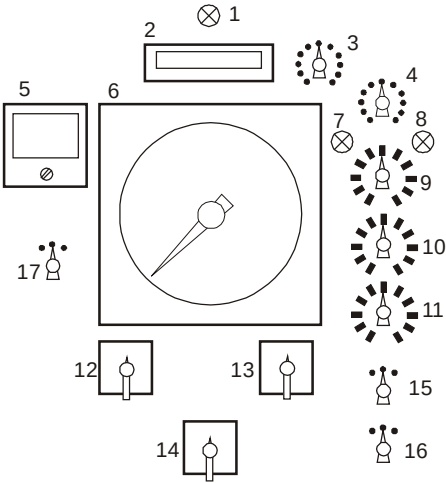


Рис. 7. Эскиз щита САУ с П-регулятором : 1 - сигнальная лампа "Установка включена"; 2 - вольтметр; 3 - переключатель выбора цепей измерения вольтметра; 4 - переключатель "Нагрузка"; 5-ДУП; 6 - КСМ-3; 7, 8 - сигнальные лампы движения ИМ в стороны "Меньше" и "Больше"; 9 -потенциометр $R_{p.п}$; 10 -потенциометр $R_{к.у}$; 11 - потенциометр R_3 ; 12 - переключатель управления ПУ; 13 - ключ управления КУ; 14 - включение установки; 15 - $U_{п.1}$; 16 - $U_{п.2}$; 17 - задание скорости ИМ

Выбор цепей измерения вольтметра на щите П-регулятора

возмущения во всём диапазоне изменения температуры объекта и при трёх нагрузках.

Положение переключателя вольтметра	Назначение цепи измерения
1	Напряжение между движком $R_{p.п}$ и минусом $U_{п.2}$
2	Напряжение между движком $R_{o.c}$ и минусом $U_{п.2}$
3	Напряжение между движком R_3 и минусом $U_{п.1}$
4	Напряжение между движком R_δ и минусом $U_{п.1}$
5	Напряжение на входе усилителя
6	Напряжение источника питания $U_{п.1}$
7	Напряжение источника питания $U_{п.2}$
8...11	Цепи для диагностики установки

3. Программа работы и её выполнение

1) По функционально-принципиальной схеме САУ с П-регулятором составить структурную схему регулятора и найти передаточную функцию регулятора.

2) В режиме управления «Ручное» получить статические характеристики объекта управления по каналам управления и

Величину входного воздействия – положения вала ИМ – следует отсчитывать в процентах по шкале ДУП, выходную величину – температуру нагревателя – по шкале КСМ-3 в градусах. Коэффициент передачи объекта регулирования является при этом величиной, имеющей размерность. Величина

возмущения u_e выражается в процентах хода исполнительного механизма.

По полученным данным найти коэффициент передачи объекта $k_{об}$ по каналу управления, построить график в координатах «Положение ИМ – $k_{об}$ ».

Из тех же данных определить величину возмущения u_e , приведённую к перемещению ИМ, и относительную величину нагрузки, считая нагрузку в положении переключателя «Н» за 100%. Результаты представить в таблице и графически.

3) Записать на диаграмме и построить в прямоугольных координатах временную характеристику объекта управления. Предполагая, что объект есть последовательное соединение звена запаздывания с временем запаздывания $\tau_{об}$ и апериодического звена первого порядка с постоянной времени $T_{об}$, определить $\tau_{об}$ и $T_{об}$.

4) Получить статические характеристики П-регулятора, отражающие зависимости перемещения вала исполнительного механизма от величины рассогласования ε – разности текущей и заданной температур – при нескольких коэффициентах передачи регулятора (система управления должна быть разомкнута). Во всех опытах следует установить неизменными

напряжение источника питания $U_{п.2}$, при котором его переключатель установлен в положение 2,

скорость исполнительного механизма, соответствующую положению 2 его переключателя скорости.

Нужно поставить три опыта при трёх напряжениях источника питания $U_{п.1}$. В каждом опыте изменяемой величиной является коэффициент усиления усилителя, регулируемый ручкой потенциометра $R_{к.у}$ «Коэффициент усиления».

Коэффициент усиления прямого канала прямо пропорционален коэффициенту усиления усилителя и напряжению питания источника $U_{п.1}$, а коэффициент усиления канала обратной связи (глубина обратной связи) – напряжению источника $U_{п.2}$.

Перед каждым опытом в режиме управления «Ручное» установить некоторое значение температуры объекта, лучше всего в центре опыта, и дождаться окончания переходного процесса. Затем с использованием вольтметра сбалансировать мостовую схему измерителя рассогласования, а именно:

изменяя положение ручки R_3 , добиться равенства показаний вольтметра в положениях переключателя 3 и 4;

установить переключатель вольтметра в положение 5, ручку $R_{к.у}$ в положение 11 и сбалансировать измеритель рассогласования ручкой $R_{р.п.}$ «Ручная перестановка»;

по окончании описанной процедуры балансировки включить режим управления «Автоматическое», поскольку управление исполнительным механизмом от регулятора возможно только в этом режиме;

разомкнуть систему управления, отключив КСМ-3 от сети.

Для получения искомых точек статической характеристики

установить ручку переключателя напряжения питания $U_{п.1}$ в положение 1;

установить ручку потенциометра $R_{к.у}$ в положение 2;

изменить величину задания ручкой R_3 , внося известное рассогласование ε , и по окончании переходного процесса вычислить перемещение исполнительного механизма как разность достигнутого и исходного положений;

получить остальные точки характеристики, последовательно переводя ручку $R_{к.у}$ в положения 5, 8 и 11 и вычисляя перемещение исполнительного механизма (естественно, во всех опытах вычитается одно и то же исходное положение).

Повторить опыты при положениях 2 и 3 переключателя напряжения источника питания $U_{п.1}$.

Величину ε следует отсчитывать в единицах температуры объекта, измеряя ε по приращению показаний вольтметра в положении его переключателя 3 и используя переводной коэффициент из единиц напряжения в единицы температуры. Этот коэффициент находится при каждом из трёх напряжений источника питания $U_{п.1}$ следующим образом.

При отключённом от сети КСМ-3 устанавливают его стрелку в центр опыта, устанавливают переключатель вольтметра в положение 4, вручную перемещают стрелку на 20...30 °С и измеряют соответствующее этому перемещению приращение показаний вольтметра. Переводной коэффициент получают как частное от деления этих двух величин.

По полученным данным построить график семейства характеристик в координатах «Коэффициент усиления усилителя – Коэффициент передачи регулятора», на котором параметрами семейства являются напряжения источников питания $U_{п.1}$ и $U_{п.2}$.

При некотором среднем коэффициенте усиления усилителя, обеспечивающем апериодический переходный процесс, при напряжениях питания $U_{п.1}$ и $U_{п.2}$ в среднем положении их переключателей и средней скорости исполнительного механизма по ДУП и секундомеру получить запись переходного процесса П-регулятора. Затем, меняя по одному параметру за один раз, т.е. изменяя напряжения и скорость исполнительного механизма, получить ещё две записи переходного процесса П-регулятора и сравнить результаты с графиками, приведёнными на рис. 5.

5) По графикам, приведённым на рис. 3, рассчитать оптимальные настройки для упомянутых выше трёх типовых переходных процессов.

Найти, кроме того, настройки регулятора по Циглеру и Никольсу. Для получения автоколебательного процесса вероятно придётся поставить переключатель $U_{п.1}$ в положение 3.

Положение органов настройки (уставки регулятора) определить по полученным графикам семейства характеристик.

6) Реализовать полученные уставки, поставив восемь опытов.

Для каждого из трёх типовых переходных процессов выполнить следующие действия.

В режиме управления «Ручное» нагреть объект при номинальной нагрузке до температуры по шкале КСМ-3 в центре опыта.

По окончании переходного процесса ручками потенциометров R_z и $R_{р.п}$ по вольтметру сбалансировать измеритель рассогласования как описано выше в п.4. Замкнуть САУ и включить режим «Автоматическое». При правильной балансировке измерителя рассогласования ИМ не должен сдвинуться с места.

Ручкой «Задание» ввести рассогласование ε по каналу управления и получить полную запись переходного процесса.

Поскольку исследуется статический регулятор, которому органически присуща статическая ошибка (остаточное отклонение, остаточная неравномерность), измерить эту ошибку можно следующим образом. По окончании переходного процесса надо поставить переключатель вольтметра в положения 3 и 4, найти

разность измеренных напряжений, которая представляет собой рассогласование между заданным и текущим значениями температуры объекта, и с помощью уже найденного переводного коэффициента вычислить ошибку в единицах температуры.

Для получения переходного процесса регулятора как реакции на возмущение вместо введения рассогласования ε переключить нагрузку в положение «М» или «Б».

Аналогично ставятся два опыта при реализации настройки регулятора по Циглеру и Никольсу.

Для уменьшения затрат времени при постановке опытов каждый новый опыт необязательно начинать из центра опыта, а за исходную температуру можно взять температуру, достигнутую в конце предыдущего опыта, при которой следует сбалансировать измеритель рассогласования в новом опыте. В соответствии с исходной точкой нужно выбирать и знак рассогласования.

7) Для всех полученных переходных процессов найти остаточное отклонение, максимальное динамическое отклонение, перерегулирование, время регулирования.

8) Сделать выводы о качестве процессов регулирования и о согласии полученных экспериментальных данных с ожидавшимися результатами.

3. Оформление отчёта

Отчёт должен содержать:

- 1) статические характеристики объекта управления;
- 2) градуировки органов настройки регулятора;
- 3) расчётные значения параметров настройки регулятора;
- 4) переходные процессы в САУ;
- 5) необходимые пояснения в тексте;
- 6) выводы по этапам работы и по работе в целом.

Контрольные вопросы

1. Определить показатели качества процесса регулирования.
2. Для чего служит ручная перестановка? Написать закон П-регулирования, в котором была бы учтена ручная перестановка.
3. Как найти передаточную функцию регулятора?
4. Как найти коэффициент передачи k_p и в каких единицах его измерить?
5. Как найти возмущение y_e и в каких единицах его измерить?
6. Какие типы переходных процессов имеют наибольшее распространение?
7. Как найти оптимальные настройки П-регулятора?
8. Как найти настройки П-регулятора по Циглеру и Никольсу?
9. Как определить и реализовать уставки П-регулятора?
10. Чем объясняется наличие остаточного отклонения?

Библиографический список

1. Ключев А.С. Автоматическое регулирование: Учебник. М.: Высш. шк., 1986. – 351 с.
2. Оппельт В. Основы автоматического регулирования. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960. 606 с.
3. Копелович А.П. Инженерные методы расчёта при выборе автоматических регуляторов. М.: Металлургиздат, 1960.
4. Малафеев С.И., Малафеев А.А. Основы автоматики и системы автоматического управления: учебник.- М.: ИЦ Академия, 2010. – 383 с.

Лабораторная работа № 7. Определение параметров интегрального регулятора и его настройка

Цель работы:

- 1) изучить свойства и структуру И-регулятора;
- 2) изучить показатели качества процесса регулирования;
- 3) научиться определять статические и динамические параметры объекта регулирования и регулятора;
- 4) изучить способы расчёта настроек и определения уставок И-регулятора;
- 5) определить параметры САУ с И-регулятором и статическим объектом.

1. Качество регулирования и настройка регулятора

1.1. Возмущения технологического процесса

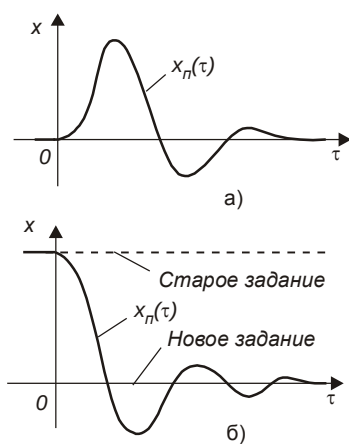


Рис. 1. Переходные процессы в системе при возмущениях :
а) изменение нагрузки;
б) изменение задания

Различают возмущения, связанные с изменением нагрузки объекта регулирования (вносимые в объект), и возмущения, возникающие при установке нового задания регулятору (вносимые в регулятор). Как следует из рис. 1, кривые изменения регулируемой величины $x_n(t)$ в одной и той же системе управления при однократном скачке изменения нагрузки и задания регулятору отличаются друг от друга. Чтобы получить одинаковый переходный процесс в обоих случаях, надо изменять настройки регулятора.

Изменение нагрузки является основным источником изменений режима работы регулируемого объекта. Изменение задания играет важную роль в системах программного регулирования.

По продолжительности возмущение может быть длительное, продолжительность которого значительно превышает время регулирования, кратковременное, мгновенное, скачкообразное и монотонное. В данной лабораторной работе изучается влияние длительных скачкообразных возмущений, поэтому в дальнейшем другие виды возмущений не рассматриваются.

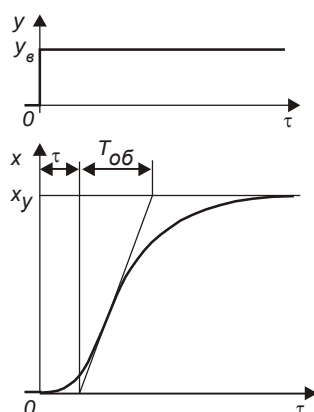


Рис. 2. Переходный процесс в статическом объекте и его аппроксимация экспонентой с запаздыванием

Основной показатель возмущения – его величина. При расчёте удобно использовать величину возмущения, выраженную в процентах хода регулирующего органа y_s . Так, изменение производительности объекта всегда сопровождается вполне определённым перемещением регулирующего органа, которое необходимо для поддержания установленного значения регулируемой величины, поэтому возмущение по нагрузке может быть сведено к величине перемещения регулирующего органа y_s , выражаемого обычно в процентах.

1.2. Качество процесса регулирования

На рис. 2 приведена примерная кривая переходного процесса в статическом объекте (без регулятора) при однократном скачкообразном возмущении на входе объекта y_e без регулирующего воздействия. Если возмущение конечно, самовыравнивание через некоторое время приостановит дальнейшее отклонение регулируемой величины от задания, и, таким образом, будет достигнуто новое установившееся значение. Однако возникающее при этом отклонение обычно технологически недопустимо.

Чтобы уменьшить отклонение или полностью устранить его, т.е. вернуть регулируемую величину к заданному значению, необходимо ввести регулирующее воздействие. Степень вводимого регулирующего воздействия определяется типом регулятора и его настройками.

Вид переходного процесса при регулировании определяет качество регулирования.

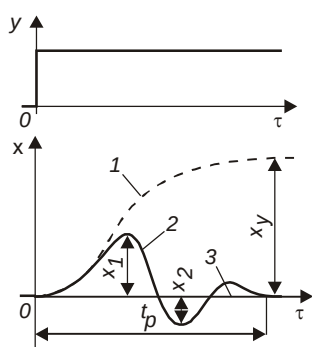


Рис. 3. Переходный процесс при регулировании без остаточного отклонения от задания: 1 - без регулятора; 2 - с регулятором; 3 - заданное значение

Рассмотрим основные показатели качества процесса регулирования. Будем рассматривать процесс регулирования, вызванный однократным скачкообразным возмущением как наиболее тяжелой формой возмущения.

Максимальное динамическое отклонение регулируемой величины от задания в ходе процесса регулирования x_1 . Это наибольшее отклонение в сходящемся процессе регулирования, оно непосредственно следует за возмущением. Величина этого отклонения имеет большое значение особенно в тех случаях, когда значительное отклонение от задания по технологическим условиям недопустимо, даже временное. Величина x_1 зависит от динамических свойств объекта, величины возмущения, принятого закона регулирования и настроек регулятора.

Перерегулирование. Степень колебательности переходного процесса удобно характеризовать величиной перерегулирования – отношением амплитуды второго колебания x_2 противоположного направления к x_1 ; это отношение выражается в процентах величины x_1 . Изменением настроек регулятора можно получить различные перерегулирования: от нуля при апериодическом ходе процесса до 100% при установившихся незатухающих колебаниях и даже свыше 100% при расходящихся колебаниях.

Чем больше перерегулирование, тем более колебателен процесс, тем он продолжительнее, тем меньше первая, максимальная амплитуда x_1 при одновременно увеличивающейся амплитуде x_2 . Выбирая необходимую величину перерегулирования, следует исходить из условий технологического процесса: целесообразности меньших максимальных, но двухсторонних отклонений от задания при более колебательном и длительном процессе регулирования, или односторонних отклонений с большой амплитудой, но при более быстром окончании переходного процесса.

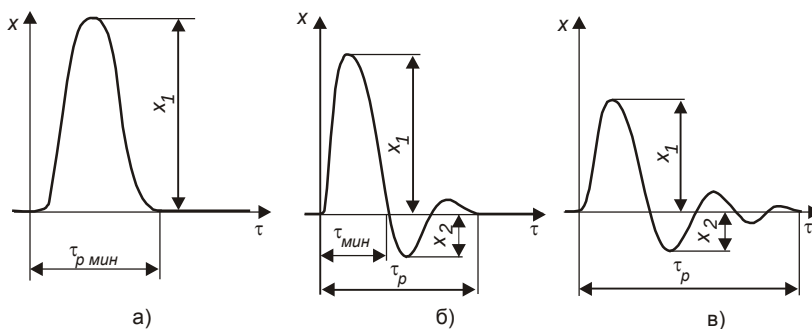


Рис. 4. Типовые оптимальные процессы регулирования : а) граничный аperiodический с минимальным временем регулирования; б) с 20%-ным перерегулированием и минимальным временем первого полупериода; в) с минимальной квадратичной площадью отклонения

Время регулирования.

Продолжительность регулирования охватывает период времени τ_p (рис. 4) с момента отклонения регулируемой величины от задания до возвращения её регулятором к заданному значению. Время τ_p зависит от динамических свойств объекта, принятого закона регулирования и настроек регулятора. Чтобы

характеризовать

воздействие регулятора, время τ_p зачастую относят к величине запаздывания объекта $\tau_{об}$.

В зависимости от настроек регулятора продолжительность переходного процесса может быть различной. Однако она не может быть меньше определённого значения, минимального для регулятора данного типа. Это минимальное время свойственно так называемому граничному аperiodическому процессу регулирования (рис. 4,а). Во всех других случаях по обе стороны от границы аperiodичности (для затянутых аperiodических или колебательных процессов) время регулирования увеличивается (рис. 4,б,в).

1.3. Оптимальные типовые процессы регулирования

Оптимальный процесс регулирования – понятие относительное, всё зависит от конкретных требований со стороны технологического процесса. Наиболее часто встречаются три типовых переходных процесса регулирования:

а) граничный аperiodический процесс с минимальным временем регулирования τ_p (рис. 4,а);

б) процесс с 20%-ным перерегулированием и минимальным временем первого полупериода колебаний (рис. 4,б);

в) процесс с минимальной квадратичной площадью отклонения, т.е. $\min \int x^2 d\tau$ (рис. 4,в).

Граничный аperiodический процесс характеризуется минимальным общим временем регулирования t_p , полным отсутствием перерегулирования x_2 , а также минимальным регулирующим воздействием.

Процесс с 20%-ным перерегулированием является промежуточным и используется, когда некоторое перерегулирование допустимо. При этом уменьшается максимальное динамическое отклонение x_1 .

Процесс с минимальной квадратичной площадью отклонения отличается наибольшим регулирующим воздействием, перерегулированием (порядка 40...50%) и временем регулирования. Однако он характеризуется наименьшей величиной максимального динамического отклонения x_1 .

Один из этих типовых процессов почти всегда может удовлетворить технологическим требованиям различных агрегатов, т.е. будет оптимальным.

1.4. Оптимальные настройки регулятора

Рекомендуемые ниже настройки И-регулятора позволяют получить три указанных выше типовых процесса регулирования [3]. И-регулятор имеет закон регулирования вида $y(\tau) = k_{p1} \int \varepsilon(\tau) d\tau$, где k_{p1} – коэффициент передачи регулятора, характеризующий скорость исполнительного механизма регулятора при данном рассогласовании ε . Коэффициент k_{p1} измеряется в следующих единицах:

$$\frac{\% \text{ хода регулирующего органа}}{\text{секунда} \cdot (\text{единица измерения регулируемой величины})}.$$

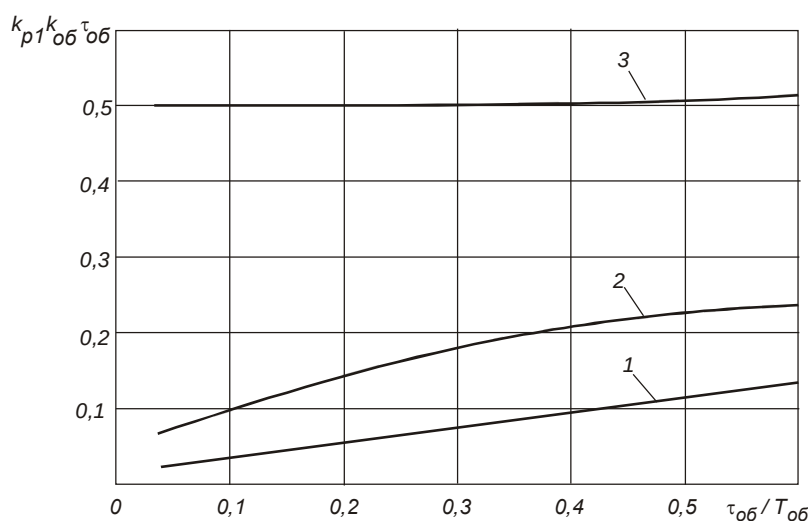


Рис. 5. Оптимальные настройки И-регулятора :
1 - аperiodический переходный процесс;
2 - с 20%-ным перерегулированием;
3 - с минимальной квадратичной площадью отклонения

Значение оптимальной настройки k_{p1} вычисляется по произведению $k_{p1}k_{об}\tau_{об}$, которое находится по графику рис. 5, построенному в функции отношения времени запаздывания $\tau_{об}$ к постоянной времени объекта регулирования $T_{об}$. Последние, в свою очередь, в результате элементарных построений определяются из кривой разгона объекта (рис. 2). Время запаздывания $\tau_{об}$ находится как отрезок на временной оси, отсекаемый касательной, проведённой к кривой разгона на её начальном участке в точке перегиба.

1.5. Определение уставок И-регулятора

Градуировку уставок регулятора производят путём определения кривых разгона регулятора при различных положениях органов настройки. САУ при этом должна быть разомкнута, а регулятор сбалансирован в центре опыта, т.е. при типичном заданном значении регулируемой величины.

При одном определённом положении органов настройки на вход регулятора подают однократное скачкообразное возмущение – изменение регулируемой величины или заданного значения, тем самым изменяется величина отклонения текущего значения регулируемой величины x_n от задания x_z . При этом регистрируют изменение во времени выходной величины $y(\tau)$, т.е. положение регулирующего органа (или исполнительного механизма) по соответствующему указателю положения.

Кривую разгона определяют 2...3 раза при каждом положении органов настройки и затем берут средний результат.

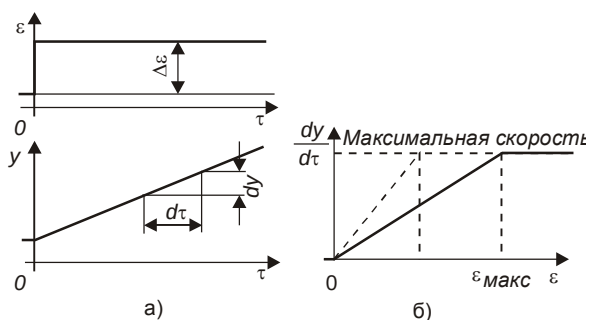


Рис. 6. Градуировка И-регулятора:
а) кривая разгона регулятора;
б) зона пропорциональной скорости

Величину возмущающего воздействия ϵ выбирают так, чтобы при каждом положении органов настройки выходную величину можно было изучить достаточно точно. Величину вводимого изменения входной величины измеряют в единицах измерения регулируемой величины, а по полученной кривой разгона $y(\tau)$ определяют скорость перемещения исполнительного механизма dy/dt , (% хода/с) (рис. 6,а). Поскольку $y = k_{p1} \int \epsilon(\tau) d\tau$, то, очевидно, коэффициент передачи регулятора для принятого положения органов настройки

$$k_{p1} = \frac{dy/dt}{\epsilon} \cdot \frac{\% \text{ хода}}{\text{секунда} \cdot (\text{ед. изм. рег. вел.})}.$$

Величину возмущения надо выбирать в пределах зоны пропорциональности dy/dt , которая у И-регулятора ограничена определённой величиной возмущения $\epsilon_{\text{макс}}$, выше которой скорость исполнительного механизма достигает постоянного максимального значения (рис. 6,б). Величина $\epsilon_{\text{макс}}$ зависит и от настройки k_{p1} .

2. Лабораторная установка

Лабораторная установка состоит из щита, на котором смонтирована САУ с И-регулятором.

Объектом регулирования САУ является электрический нагреватель с автоматическим потенциометром КСП-3 и термопарой, измеряющей температуру нагревателя. Таким образом, постоянная времени потенциометра входит как составная часть в постоянную времени объекта. Нагреватель получает питание от регулируемого электронного источника питания, в динамическом отношении представляющего собой пропорциональное звено.

Управляющий вход объекта – вал переменного резистора схемы источника питания, регулирующего напряжение на нагревателе – соединён с выходным валом исполнительного механизма.. В САУ применён *исполнительный механизм с пропорциональной скоростью* перемещения, снабжённый двигателем постоянного тока с независимым возбуждением.

Скорость двигателя измеряется тахогенератором постоянного тока независимого возбуждения. Напряжение тахогенератора в качестве сигнала обратной связи подаётся на вход электронного усилителя последовательно с сигналом измерителя рассогласования. Глубину обратной связи можно менять изменением напряжения, снимаемого с тахогенератора. Так как канал обратной связи является дифференцирующим, а передаточная функция прямого канала регулятора благодаря электронному усилителю с коэффициентом усиления порядка 1000 имеет большой модуль и обратной величиной этой функции можно пренебречь, в регуляторе реализуется закон И-регулирования.

На коэффициент передачи измерителя рассогласования, можно влиять изменением напряжения питания измерителя рассогласования.

Возмущение создаётся изменением потока воздуха от вентилятора, обдувающего нагреватель. Величина нагрузки может изменяться ступенчато. Этим ступеням соответствуют три положения переключателя “Нагрузка”, условно названные “М” (малая нагрузка), “Н” (номинальная) и “Б” (большая).

Функционально-принципиальная схема САУ и размещение элементов САУ на щите управления приведены на рис. 7 и 8, а в таблице – положения переключателя вольтметра, применяемого при исследовании регулятора, и соответствующие им цепи измерения.

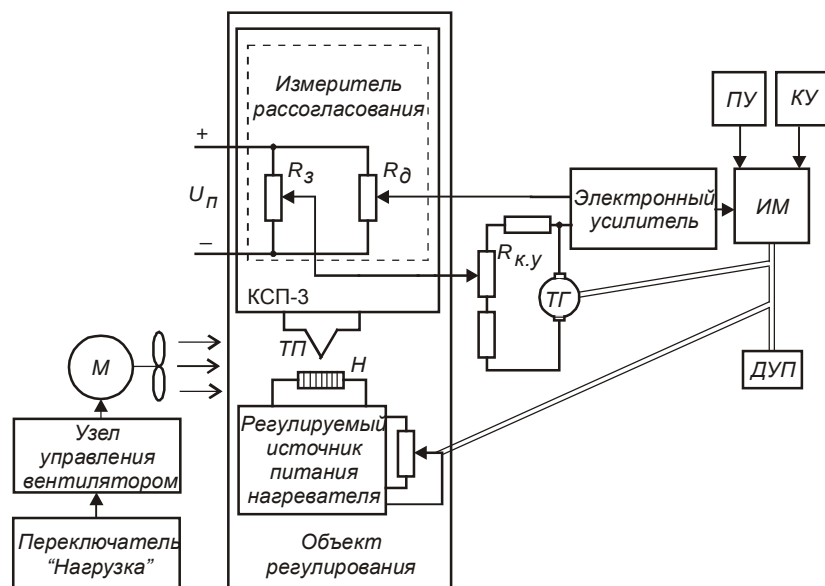


Рис. 7.
Функционально-принципиальная схема системы автоматического управления с И-регулятором:
 R_3 – потенциометр «Задание» (в корпусе КСП-3, на передней панели);
 R_d – потенциометр датчика температуры (реохорд КСП-3);
 $R_{к.у}$ – потенциометр «Коэффициент усиления» (на щите);
ИМ – исполнительный механизм; ТГ – тахогенератор постоянного

тока;

ПУ – переключатель управления «Автоматическое» – «Ручное»;

КУ – ключ дистанционного управления «Больше» – «Меньше»;

ДУП – дистанционный указатель положения выходного вала исполнительного механизма; Н – нагреватель; ТП термopара;

U_n – регулируемый источник питания измерителя рассогласования

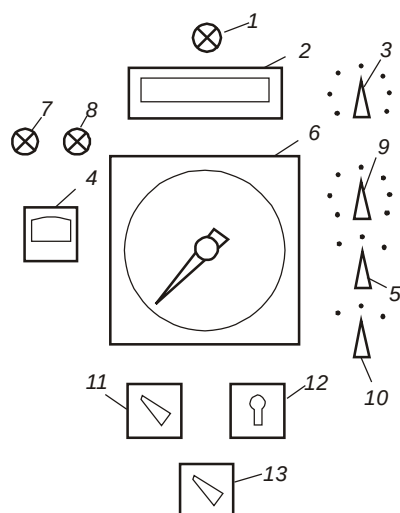


Рис. 8. Размещение элементов САУ с И-регулятором на щите управления :

- 1 - сигнальная лампа "Установка включена";
- 2 - вольтметр;
- 3 - переключатель выбора цепей измерения вольтметра 2;
- 4 - ДУП;
- 5 - переключатель режима управления вентилятором "Нагрузка";
- 6 - самопишущий потенциометр с встроенным задатчиком КСП-3;
- 7, 8 - сигнальные лампы движения ИМ в стороны "Меньше" и "Больше";
- 9 - потенциометр $R_{ку}$ "Коэффициент усиления";
- 10 - регулятор напряжения U_n ;
- 11 - переключатель управления ПУ;
- 12 - ключ управления КУ;
- 13 - сетевой выключатель щита

Выбор цепей измерения вольтметра на щите И-регулятора

Положение переключателя вольтметра	Назначение цепи измерения
1	Напряжение между движком R_3 и минусовым выводом источника питания U_n
2	Напряжение между движком R_0 и минусовым выводом источника питания U_n
3	Напряжение между движками R_3 и R_0 на выходе измерителя рассогласования
4	Напряжение питания U_n
5...11	Цепи для диагностики установки

3. Программа работы и её выполнение

1) По функционально-принципиальной схеме САУ составить структурную схему регулятора и найти его передаточную функцию.

2) В режиме «Ручное» получить статические характеристики объекта управления по каналам управления и возмущения во всём диапазоне изменения температуры объекта и при трёх нагрузках.

Величину входного воздействия – положение вала ИМ – отсчитывают в процентах по шкале ДУП, выходную величину отсчитывают по шкале КСП-3 в единицах измерения температуры. Коэффициент передачи объекта регулирования является при этом величиной, имеющей размерность.

Величину возмущения $y_в$ выражают в процентах хода исполнительного механизма.

По полученным данным вычислить коэффициент передачи объекта $k_{об}$ по каналу управления и построить график в координатах «Положение ИМ – $k_{об}$ ».

Из тех же данных определить величину возмущения y_e , приведённую к перемещению ИМ, и относительную величину нагрузки, считая нагрузку в положении переключателя «Н» за 100%. Результаты представить в таблице и графически.

3) Записать на диаграмме и построить в прямоугольных координатах временную характеристику объекта управления. Предполагая, что объект есть последовательное соединение звена запаздывания с временем запаздывания $\tau_{об}$ и апериодического звена первого порядка с постоянной времени $T_{об}$, определить $\tau_{об}$ и $T_{об}$.

4) Отградуировать органы настройки регулятора в единицах k_{p1} , а именно, шкалы потенциометра $R_{к.у}$ и переключателя напряжения питания измерителя рассогласования U_n .

Для этого в разомкнутой САУ получают временные характеристики И-регулятора $y(\tau)$ как зависимости перемещения вала ИМ от времени при скачкообразном изменении отклонения регулируемой величины ε при нескольких значениях коэффициента усиления усилителя и трех значениях напряжения питания измерительного моста U_n (трех коэффициентах передачи измерителя рассогласования).

Размыкание системы управления объектом регулирования в лабораторной установке производится отключением КСП-3 от сети.

Последовательность операций следующая.

В режиме управления «Ручное» согласно статической характеристике перемещением исполнительного механизма устанавливают температуру объекта управления по КСП-3 в центре опыта и дожидаются окончания переходного процесса.

Отключают от сети КСП-3, размыкая этим систему управления.

С использованием вольтметра балансируют мостовую схему измерителя рассогласования, а именно:

изменяя положение ручки R_3 , добиваются равенства показаний вольтметра в положениях 1 и 2 переключателя цепей вольтметра;

контролируют правильность произведенной балансировки по отсутствию напряжения на входе усилителя в положении 3 переключателя цепей вольтметра.

Задают значения напряжения U_n и положение движка $R_{к.у}$, а затем задают требуемое значение скачкообразного отклонения регулируемой величины ε *встроенным задатчиком КСП-3* и переключают режим управления на «Автоматическое». С этого момента по показаниям ДУП и секундомера находят точки временной характеристики и соответствующие им скорости перемещения ИМ. По результатам измерений вычисляют k_{p1} и строят три кривых семейства характеристик в координатах «Деления по шкале $R_{к.у} - k_{p1}$ »; параметром кривых семейства является напряжение U_n .

5) По графикам, приведённым на рис. 5, рассчитать оптимальные настройки для упомянутых выше трёх типовых переходных процессов.

Положение органов настройки (уставки регулятора) определяют по полученным графикам семейства характеристик.

6) Реализовать полученные уставки, поставив шесть опытов.

Для каждого из трёх типовых переходных процессов следует выполнить следующие действия.

В режиме управления «Ручное» нагреть объект до температуры по шкале КСП-3 в центре опыта при номинальной нагрузке.

По окончании переходного процесса ручкой потенциометра R_3 по вольтметру сбалансировать измеритель рассогласования.

Замкнуть САУ, включив режим «Автоматическое». При правильной балансировке измерителя рассогласования ИМ не должен сдвинуться с места.

Ручкой «Задание» быстро ввести рассогласование ε по каналу управления и получить запись переходного процесса.

Для получения переходного процесса регулятора как реакции на возмущение вместо введения рассогласования ε переключить нагрузку в положение «М» или «Б».

7) Для всех полученных переходных процессов найти максимальное динамическое отклонение, перерегулирование, время регулирования.

8) Сделать выводы о качестве процессов регулирования и о согласии полученных экспериментальных данных с ожидавшимися результатами.

4. Оформление отчёта

Отчёт должен содержать:

- 1) краткое, но исчерпывающее описание хода работы;
- 2) статические и динамические характеристики объекта управления;
- 3) переходные функции регулятора;
- 4) переходные процессы в САУ;
- 5) рассчитанные значения параметров настройки регулятора;
- 6) необходимые пояснения в тексте;
- 7) выводы по этапам работы и по работе в целом.

Контрольные вопросы

1. Написать формулу закона И-регулирования и определить входящие в неё величины.
2. Перечислить и пояснить ход типовых переходных процессов при автоматическом регулировании.
3. Определить показатели качества процесса регулирования.
4. Как найти передаточную функцию регулятора?
5. Как опытным путём найти коэффициент передачи k_{p1} ?
6. Как повлияет на k_{p1} изменение глубины дифференцирующей обратной связи?
7. Как экспериментально найти возмущение y_e , эквивалентное изменению нагрузки?
8. Как найти оптимальные настройки И-регулятора?
9. Как определить и реализовать уставки И-регулятора?

Библиографический список

1. Ключев А.С. Автоматическое регулирование: Учебник. М.: Высш. шк., 1986. – 351 с.
2. Оппельт В. Основы автоматического регулирования. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960. 606 с.
3. Копелович А.П. Инженерные методы расчёта при выборе автоматических регуляторов. М.: Metallurgizdat, 1960.

Лабораторная работа № 8. Градуировка регулирующего прибора Р25.1

Цель работы:

- 1) изучить принципы работы импульсного ПИ-регулятора;
- 2) изучить принцип действия прибора Р25.1;
- 3) изучить подключение прибора;
- 4) отградуировать органы настройки прибора.

1. Структурная схема импульсного ПИ-регулятора

Совокупность технических средств, состоящая из регулирующего устройства с импульсным выходным сигналом и исполнительным механизмом (ИМ) интегрирующего типа с соответствующим пусковым устройством образует электрический регулятор, который в пульсирующем режиме позволяет формировать *в первом приближении* закон ПИ-регулирования.

Регулирующее устройство с импульсным выходным сигналом выполняет функции релейного усиления в прямом канале, содержащем релейный элемент, и формирование динамических свойств регулятора с помощью контура функциональной обратной связи.

Будем считать, что исполнительная часть регулятора, включающая пусковое устройство и ИМ, выполняют вместе функции усиления и интегрирования выходного сигнала регулирующего устройства. В результате динамические свойства исполнительной части электрического регулятора можно в линеаризованном виде характеризовать следующей передаточной функцией интегрирующего звена:

$$W_{\text{ИМ}}(p) = 1 / T_{\text{ИМ}} p.$$

Поэтому структурную схему регулятора вместе с исполнительной частью можно представить так, как на рис. 1.

Обобщённая структурная схема регулирующего устройства содержит трёхпозиционный релейный элемент, охваченный частотнозависимой отрицательной обратной связью с передаточной функцией $W_{\text{о.с}}(p)$, и входное звено с передаточной функцией $W_{\text{вх.}}(p)$.

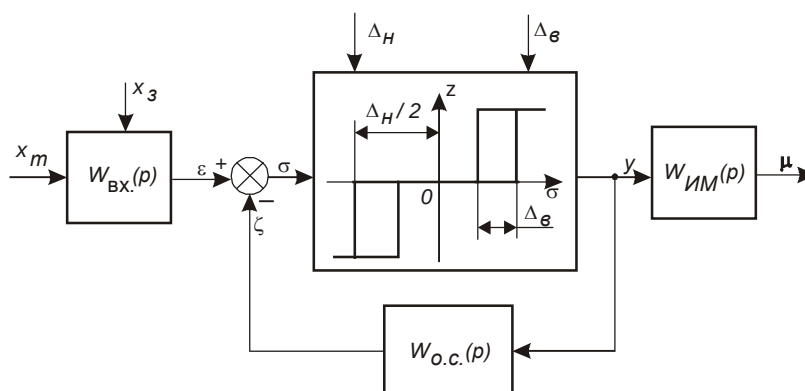


Рис. 1. Структурная схема регулятора с регулирующим устройством с импульсным выходным сигналом и интегрирующим исполнительным механизмом

Трёхпозиционный релейный элемент характеризуется коммутируемым выходным напряжением z , зоной нечувствительности Δ_H , зоной возврата $\Delta_в$ и порогом отпускания $\Delta_{отп} = \Delta_H / 2 - \Delta_в$.

Релейный элемент срабатывает только при таких уровнях входного сигнала σ , при которых имеет место неравенство

$$|\sigma| = |\varepsilon - \zeta| = |(x_m - x_3) - \zeta| > \Delta_H / 2,$$

где $\varepsilon = x_m - x_3$ – рассогласование;

x_m и x_3 – соответственно измеренное текущее и заданное значения выходного сигнала.

Релейный элемент выключается тогда, когда сигнал σ достигнет значения

$$\sigma = \Delta_H / 2 - \Delta_в = \Delta_{отп}.$$

В регулирующем устройстве с импульсным выходным сигналом настроечными параметрами являются коэффициент передачи k_p , постоянная времени интегрирования T_u (или изодрома $T_{уз}$) и дополнительно зона нечувствительности и зона возврата трёхпозиционного релейного элемента. Как будет показано ниже, от величины зоны возврата существенным образом зависит минимальная длительность включения ИМ. При работе регулирующего устройства в пульсирующем режиме сигнал σ перед релейным элементом пульсирует в пределах зоны возврата.

В регулирующем устройстве с релейно-импульсным выходным сигналом, реализующем закон ПИ-регулирования, входное устройство представляет собой измеритель рассогласования ε , а обратная связь реализована в виде апериодического звена с передаточной функцией

$$W_{о.с.}(p) = \frac{k}{Tp + 1};$$

обычно это RC-цепь с переключаемыми постоянными времени T при заряде T_3 и разряде T_p .

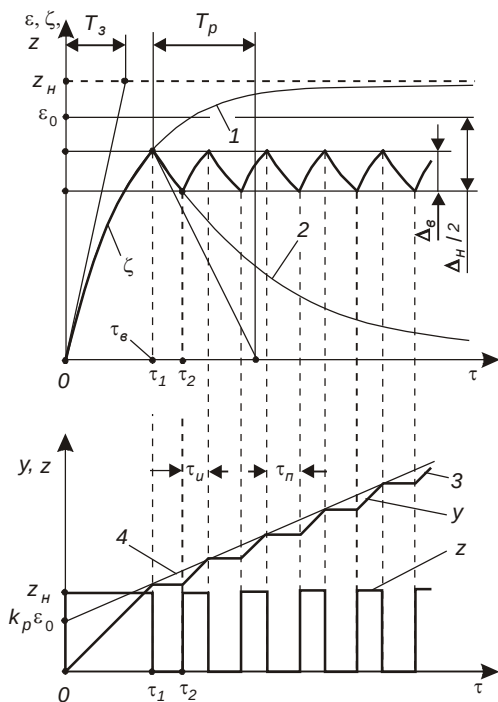


Рис. 2. Переходные процессы в разомкнутом релейно-импульсном ПИ-регуляторе при подаче на его вход скачкообразного возмущения $\varepsilon(\tau)=\varepsilon_0$

Рассмотрим работу регулятора в *разомкнутой* АСР. При поступлении на вход регулятора постоянного сигнала рассогласования $|\varepsilon_0| > \Delta_H / 2$ релейный элемент срабатывает и включает ИМ, который начинает вращаться с постоянной скоростью, перемещая регулирующий орган в сторону уменьшения рассогласования. Одновременно сигнал z или его часть z_H подаётся на устройство обратной связи. Так как устройство обратной связи является аperiodическим звеном, при поступлении на его вход постоянного напряжения $U_{вх}=|z_H|$ на его выходе появится выходное напряжение ζ , возрастающее по экспоненте 1 (рис. 2). Это напряжение ζ направлено встречно напряжению входного сигнала ε_0 , вследствие чего результирующее напряжение $\sigma = \varepsilon_0 - \zeta$, поступающее на вход релейного элемента, начнёт уменьшаться.

При уменьшении σ до значения $\sigma = \varepsilon_0 - \zeta = \Delta_{отп}$ релейный элемент выключится (момент времени τ_1), сигнал z_H на входе пускового устройства ИМ станет равным нулю, ИМ остановится. Напряжение на входе канала обратной связи также станет равным нулю. С

этого момента напряжение на выходе канала обратной связи ζ станет уменьшаться по экспоненте 2, напряжение σ станет возрастать, и при $\sigma > \Delta_H / 2$ (момент времени τ_2) релейный элемент вновь сработает, ИМ включится, и на вход канала обратной связи поступит сигнал z_H . Напряжение ζ на выходе канала обратной связи вновь станет возрастать по экспоненте, повторяющей ход экспоненты 1. Далее процессы включения и выключения (автоколебательный режим) будут повторяться. График перемещения выходного элемента ИМ $y(t)$ имеет вид ломаной линии 3, которая может быть приближённо заменена прямой 4.

Сравнивая линеаризованный закон изменения $y(t)$ (прямая 4) с идеальным законом ПИ-регулирования, можно утверждать, что релейно-импульсный ПИ-регулятор с ИМ постоянной скорости со структурой, показанной на рис.1, *приближённо реализует закон ПИ-регулирования*. Пропорциональная составляющая закона ПИ-регулирования приближённо реализуется при изменении ε за счёт начального быстрого перемещения в течение времени τ_6 (время первого включения), а интегральная – за счёт последующего автоколебательного режима работы релейного элемента, охваченного отрицательной обратной связью.

Для обеспечения независимой настройки продолжительности импульсов τ_u и пауз τ_n с помощью специального автоматического переключателя в цепи обратной связи можно переключать постоянные времени при заряде T_z и разряде T_p .

2. Параметры прибора Р25.1 и принцип действия

С помощью регулирующего прибора Р25.1 в комплекте с ИМ постоянной скорости может быть реализована структурная схема импульсного ПИ-регулятора по

рис. 1 с демпфированием входного сигнала. Прибор Р25.1 работает в комплекте с дифференциально-трансформаторными преобразователями (ДТП) и унифицированными токовыми преобразователями на 0...5, 0...20 мА, а также 0...10 В (последний подается на специальный вход).

При включении по специальной схеме прибор может работать с реостатными и ферродинамическими преобразователями.

Приборы выпускаются в двух исполнениях: со встроенным индикатором положения ИМ (Р25.1.2) и без него (Р25.1.1).

Приборы Р25.1 работают в комплекте с магнитными пускателями $\approx 24/\sim 220$ В и исполнительными механизмами типа МЭО, с бесконтактными реверсивными пускателями ПБР и ИМ типа МЭОБ, электрогидравлическими ИМ типа РИМ, а также могут непосредственно управлять ИМ с электродвигателями переменного тока мощностью до 80 ВА.

Функциональная схема прибора Р25 приведена на рис. 3.

Она содержит измерительный блок Р-012 и регулирующий блок Р-011, одинаковый для всех модификаций приборов.

Измерительный блок включает в себя сумматор и нормирующий операционный усилитель 1 и стабилизированный источник напряжения постоянного тока.

В сумматоре измерительного блока Р-012 суммируются сигналы от преобразователей (ДТП или токовых) и сигнал от моста «Задатчик — Корректор». Коэффициент передачи сигнала каждого из преобразователей может устанавливаться независимо от других потенциометрами «Чувствительность» k_1 , k_2 , k_3 . Суммарный сигнал выпрямляется, фильтруется и поступает на вход нормирующего операционного усилителя.

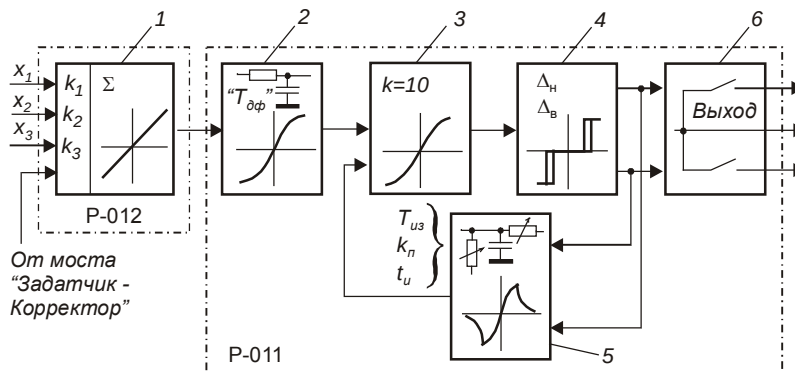


Рис. 3. Функциональная схема регулирующего прибора Р25:

- 1 - сумматор и нормирующий усилитель; 2 - демпфер;
- 3 - суммирующий усилитель; 4 - схема сравнения;
- 5 - инерционное звено обратной связи; 6 - выходные ключи

Электронный блок Р-011 предназначен для формирования закона регулирования и коммутации выходных цепей. Он включает в себя демпфер 2, суммирующий усилитель 3, схему сравнения 4, выходные бесконтактные ключи 6, инерционное звено блока отрицательной обратной связи 5.

Сигнал рассогласования с измерительного блока поступает на демпфер 2, представляющий собой RC -звено с регулируемой постоянной времени демпфирования $\tau_{дф}$ (на лицевой панели прибора ручка регулятора обозначена « $T_{дф}$ »). Демпфирование служит для подавления высокочастотных помех.

С выхода демпфера сигнал поступает на вход суммирующего усилителя 3, где алгебраически суммируется с сигналом обратной связи, поступающим с выхода зве-

на 5. Усилитель 3 имеет передаточную функцию аperiodического звена первого порядка с коэффициентом усиления $k = 10$.

Далее сигнал поступает на один из двух триггеров схемы сравнения 4 (релейный элемент) в зависимости от полярности сигнала на выходе усилителя 3. Схема сравнения имеет регулируемые зону нечувствительности Δ_n и зону возврата $\Delta_в$. При величине сигнала на выходе усилителя 3, превышающем $\Delta_n/2$, на выходе схемы сравнения скачком появляется сигнал, который подается на выходные ключи 6. В зависимости от полярности сигнала на входе схемы сравнения открывается один из выходных ключей и коммутируется внешняя цепь.

Сигналы на выходе схемы сравнения подаются на вход цепи обратной связи с передаточной функцией инерционного звена 5. С помощью цепи отрицательной обратной связи регулируются параметры k_n – коэффициент передачи, $T_{из}$ – постоянная времени изодрома (на лицевой панели прибора ручка регулятора обозначена « T_u »), τ_u – длительность импульса включения ИМ.

Сигнал отрицательной обратной связи с выхода блока 5 поступает на вход суммирующего усилителя 3 для компенсации сигнала рассогласования. При этом сигнал на входе схемы сравнения 4 уменьшается до значения порога отпускания $\Delta_{отп.} = |\Delta_n/2 - \Delta_в|$, и сигнал на её выходе и, следовательно, на входе блока 5 становится равным нулю. Когда закончится импульс включения τ_u , выходные ключи закрываются, ИМ останавливается, наступает пауза.

После отключения сигнала обратной связи из схемы сравнения 4 сигнал на выходе блока 5 начинает плавно уменьшаться, а сигнал на входе схемы сравнения 4 вновь возрастать до порога срабатывания, по достижении которого подается сигнал обратной связи в блок 5, и вновь открывается выходной ключ. Закончилась пауза τ_n , начинается новый импульс.

Цикл повторяется. Чередование импульсов и пауз будет продолжаться, пока сигнал рассогласования на выходе измерительного усилителя 3 не окажется в пределах зоны $\pm|\Delta_n/2 - \Delta_в|$.

Таким образом, блок Р-011 формирует на своем выходе последовательность импульсов и пауз. Интегрирование импульсов при помощи ИМ постоянной скорости позволяет получить пропорционально-интегральный закон регулирования.

Длительность импульса первого включения $\tau_в$ зависит от значения сигнала рассогласования в начальный момент времени и скорости компенсации его сигналом отрицательной обратной связи. Скорость компенсации, в основном, определяет коэффициент передачи k_p . Время импульса τ_u и время паузы τ_n определяют значение постоянной времени изодрома $T_{из}$.

При выключении блока обратной связи 5 переключателем рода работ, расположенным на передней панели прибора, блок Р-011 выполняет функции трехпозиционного релейного элемента, и регулятор становится релейным.

3. Лабораторная установка

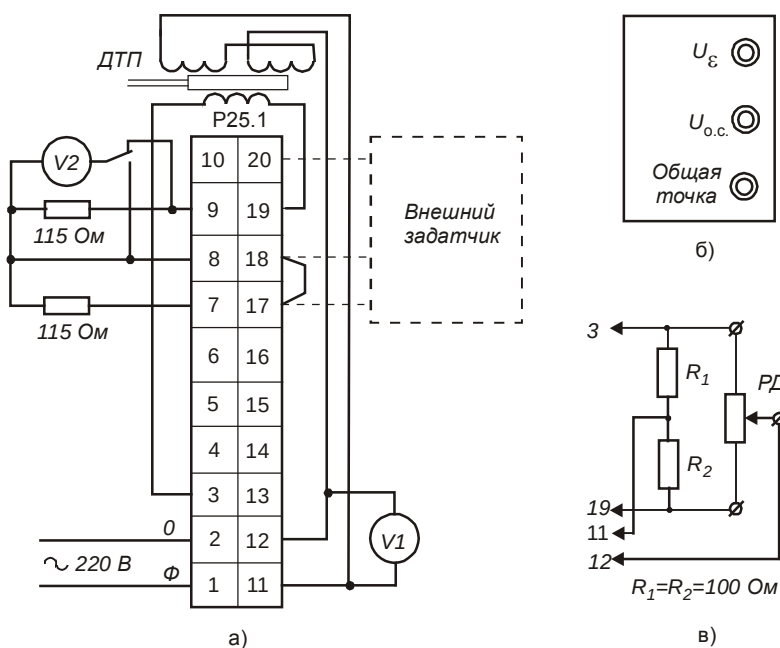


Рис. 4. Схемы для проверки и градуировки регулирующего прибора Р25.1:
а) с дифференциально-трансформаторным преобразователем ДТД;
б) контрольные гнезда на передней панели прибора;
в) вариант с подключением потенциометрического датчика РД

Лабораторная установка состоит из набора элементов и приборов, необходимых для экспериментального получения важнейших характеристик прибора Р25.1. Для исследования работы прибора Р25.1 следует собрать схему, приведенную на рис. 4а.

Для этого имеется набор следующего оборудования: V_2 – вольтметр постоянного тока 0...30 В; резисторы 115 Ом, 10 Вт – 2 шт., являющиеся нагрузкой выходных ключей при питании от внутреннего источника выпрямленного напряжения 24 В; ДТД – дифференциально-трансформаторный

преобразователь (датчик); V_1 – милливольтметр электронный переменного тока с переключаемыми пределами измерения 0...75 мВ, 0...300 мВ, 0...900 мВ; секундомер. Вольтметр и милливольтметр установлены на панели лабораторной установки.

Дифференциально-трансформаторный преобразователь и механизм перемещения его плунжера расположены под панелью лабораторной установки. Ручка перемещения плунжера выведена через прорезь в панели в виде вертикального лимба. Гнезда для измерения выходного напряжения датчика выведены на панель

4. Программа работы и её выполнение

Подготовительный теоретический этап работы.

1) Изучить принцип работы импульсного ПИ-регулятора и построение его структурной схемы.

2) По рис. 2 понять, как в разомкнутой автоматической системе регулирования (АСР) компенсируется рассогласование неизменной величины ε_0 сигналом обратной связи. Следует разобраться, как влияет изменение постоянной времени звена обратной связи на длительность импульса первого включения $\tau_{\text{в}}$, продолжительность импульсов включения ИМ $\tau_{\text{и}}$, и какое это оказывает влияние на получаемые k_p и $T_{\text{из}}$. Полученные результаты отразить в отчёте.

3) Изучить функциональную схему прибора Р25.1 по рис. 3. Для успешного освоения материала следует указать, аналогами каких физических параметров являются напряжения, соответствующие горизонтальным и вертикальным осям графиков, изображённых в символах электронных узлов, и каким математическим

зависимостям подчиняется ход кривых на этих графиках. В отчёте привести соответствующие ответы.

Экспериментальный этап работы.

Конечной целью этого этапа является построение градуировочных графиков органов управления прибора Р25.1, а именно, шкал «Задание», «Корректор», «Зона нечувствительности» в зависимости от величины сигнала x_m , поступающего от датчика.

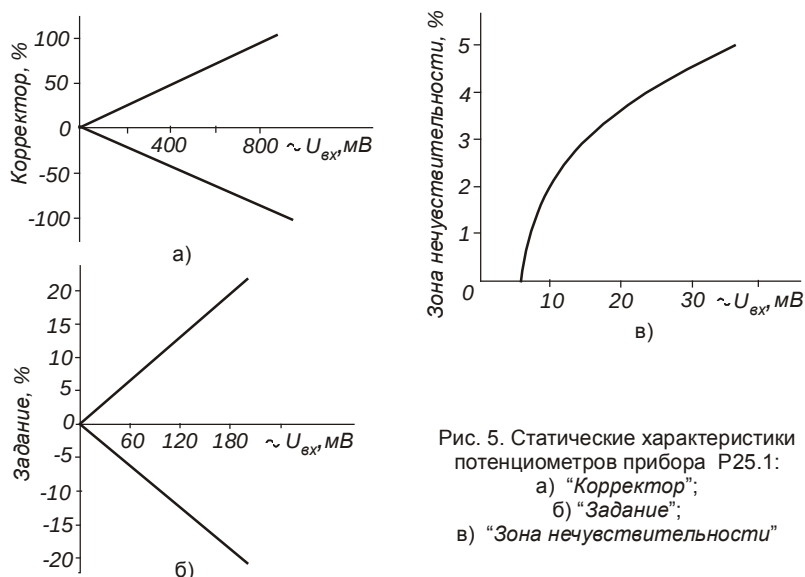


Рис. 5. Статические характеристики потенциометров прибора Р25.1:
а) «Корректор»;
б) «Задание»;
в) «Зона нечувствительности»

На рис. 5 приведены усреднённые статические характеристики потенциометров «Задание», «Корректор» и «Зона» регулирующих приборов Р25.1, приводимые в паспорте прибора. Примерно такие же характеристики должны получиться в результате проведённых измерений.

Из статических характеристик видно, что при правом (или левом) крайнем положении ручки потенциометра «Корректор» может быть

скомпенсирован входной сигнал с эффективным значением до примерно 1000 мВ ($\pm 100\%$), и в любой точке положения ручки «Корректор» потенциометром «Задание» можно дополнительно осуществить компенсацию напряжения до 200 мВ ($\pm 20\%$).

В лабораторной установке дифференциально-трансформаторный преобразователь ДТП подключён ко входу « k_1 ». Для получения статических характеристик нужно выполнить следующее.

1) Подготовительные операции.

Подключить милливольтметр к выходным зажимам ДТП.

Подключить к выходу прибора Р25.1 вольтметр постоянного тока.

Ручки «К2», «К3» потенциометров «Чувствительность» и потенциометра «Зона» установить в крайнее левое (против часовой стрелки) положение, ручку потенциометра «К1» – в крайнее правое положение.

Ручку «Задание» установить в положение «0 %».

Переключатель рода работ установить в положение «Релейный регулятор», переключатель станции управления ИМ в положение «А» – автоматическое.

2) Включить лабораторную установку.

Загорится один из светодиодов индикации выхода, вал ИМ придёт во вращение. Измерить напряжения на зажимах 7,8 и 8,9 на нагрузочных резисторах 115 Ом. На одной из пар зажимов оно должно укладываться в границы 21...27 В

постоянного тока, одновременно на другой паре зажимов оно должно быть не более $0,5\text{ В}$.

3) Снять статические характеристики. Так как в приборе Р25.1 доступа к схеме измерительного моста нет, характеристики нужно снимать компенсационным методом. Для этого нужно выполнить следующее.

Установить на выходе ДТП напряжение 0 В .

Плавно вращая ручку потенциометра «Корректор», отметить два деления шкалы, когда гаснет один светодиод, а потом зажигается другой. Ручку потенциометра «Корректор» установить в среднее между этими делениями положение, в котором не горит ни один светодиод. Это будет *исходное положение состояния баланса* схемы, от которого ведутся все отсчёты напряжений.

Статическая характеристика потенциометра «Корректор».

Повернуть ручку потенциометра «Корректор» на 20% от состояния баланса. Загорится один из светодиодов. Изменять напряжение ДТП до тех пор, пока светодиод не погаснет. Измерить напряжение на ДТП. Это будет первая точка статической характеристики.

Аналогично получить остальные точки обеих ветвей статической характеристики через 20% .

Статическая характеристика потенциометра «Задание».

Вернуть ручку потенциометра «Корректор» в положение состояния баланса, напряжение с ДТП установить равным 0 В , убедиться, что ручка «Задание» стоит в положении « 0% ». Проконтролировать, что не горит ни один светодиод, в противном случае подкорректировать положение ручки «Корректор».

Повернуть ручку потенциометра «Задание» на 5% . Поступая аналогично описанному выше, получить точки статической характеристики потенциометра «Задание» через 5% .

Статическая характеристика потенциометра «Зона».

Вернуть все органы настройки в состояние баланса.

Установить ручку потенциометра «Зона» в положение « 1% ». Изменить напряжение, снимаемое с ДТП, до момента вспыхивания одного из светодиодов. Получена одна точка статической характеристики. Получить остальные точки через 1% .

Напряжение с ДТП установить равным 0 В . Ручку «Зона» повернуть вправо до упора (5%). Включение светодиодов должно происходить при повороте ручки «Задание» в обе стороны от состояния баланса не более чем на $\pm 2,5\%$.

4) Проверить функционирование узлов прибора, определяющих параметры динамической настройки регулятора. Для этого надо выполнить ряд подготовительных операций.

Ручки «К1», «К2», «К3» потенциометров «Чувствительность» следует установить в крайнее левое положение, а ручки «Задание» и «Корректор» — в положение состояния баланса.

Переключатель рода работ установить в положение «ПИ-регулятор». Ручку «К_{л-63}» установить в положение « 5 дел. ». Ручку «Т_{из}» — в положение « 5 с » при положении переключателя постоянной времени изодрома « $\times 1$ ». Ручку потенциометра «Импульс» поставить в положение « $0,5\text{ с}$ ».

Задатчик повернуть на 2%. При этом один из светодиодов загорится на 5...8 с (замерить секундомером), затем погаснет и дальше будет включается импульсами, также импульсно должен перемещаться ИМ. Измерить продолжительность импульсов, отразить на графике их последовательность.

Убедиться, что в таком же опыте при повороте вправо ручки «Импульс» продолжительность импульсов и пауз увеличивается.

Повторить один из опытов при установке переключателя постоянной времени изодрома « $T_{из}$ » в положение « $\times 10$ ». Отметить, как изменится последовательность импульсов и пауз.

5. Оформление отчёта

Отчёт должен содержать:

1) цель работы, структурную схему импульсного ПИ-регулятора, графики переходных процессов в импульсном ПИ-регуляторе, блок-схему и краткое описание работы Р25.1;

2) функциональную схему Р25.1 по рис. 3, отличающуюся от изображённой на рис. 3 тем, что на горизонтальных и вертикальных осях графиков функционирования блоков должны быть приведены физические величины, аналогами которых являются сигналы в приборе;

3) монтажную схему опытной установки;

4) экспериментальные статические характеристики и всю последовательность операций для их получения;

5) словесное описание поведения индикаторов прибора и исполнительного механизма при манипуляциях органами настройки;

5) выводы по работе, в которых следует обсудить соответствие полученных результатов ожидавшимся из описания функционирования прибора.

Контрольные вопросы

1. Объяснить структуру и работу электрического регулятора, содержащего импульсное регулирующее устройство и ИМ постоянной скорости.

2. Объяснить принцип работы импульсного регулирующего прибора Р25.1.

3. Как с помощью Р25.1 реализовать релейное регулирование и закон ПИ-регулирования?

4. Для чего нужно демпфирование в регуляторе?

5. Написать формулу закона регулирования, реализуемого в регулирующем приборе Р25.1.

6. Как и куда к регулирующему прибору Р25.1 подключить исполнительный механизм постоянной скорости МЭО?

7. Как и куда к регулирующему прибору Р25.1 подключить реверсивный электромагнитный пускатель?

8. С какими входными сигналами может работать Р25.1?

Библиографический список

1. Наладка средств автоматизации и автоматических систем регулирования: Справочное пособие / А.С. Ключев, А.Т. Лебедев, С.А. Ключев, А.Г. Товарнов; Под ред. А.С.Ключева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 368 с.: ил.
2. Заводская инструкция к Р25.1 «Приборы регулирующие Р25. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Е3.222.008 ТО».

Лабораторная работа № 9. Экспериментальное определение динамических характеристик импульсного ПИ-регулятора

Цель работы:

- 1) изучить взаимосвязь настроек и уставок регулятора;
- 2) изучить метод характеристик разгона;
- 3) изучить частотный метод;
- 4) изучить метод экспоненциальных возмущений;
- 5) экспериментально определить скорость связи, коэффициент передачи, постоянную времени изодрома;
- 6) определить степень влияния нагрузки исполнительного механизма постоянной скорости на динамические характеристики импульсного ПИ-регулятора.

1. Расчёт и реализация уставок ПИ-регулятора

Под расчетом уставок регулятора понимают определение положения регулирующих органов настроек регулятора, обеспечивающих реализацию рассчитанных параметров динамической настройки регулятора, а именно, его коэффициента пропорциональности k_p и постоянной времени интегрирования T_u (или постоянной времени изодрома $T_{из}$). Органы управления выпускаемых промышленностью регулирующих приборов снабжены шкалами, оцифрованными в большинстве случаев в условных единицах. Иногда шкалы оцифрованы в абсолютных единицах. Но и в этом случае в реальной смонтированной автоматической системе действительные значения параметров могут существенно отличаться от установленных на шкалах.

На коэффициент пропорциональности регулятора k_p влияют коэффициенты масштабирования измерителя рассогласования k_i (i – номер входа при измерителе рассогласования с несколькими входами), коэффициент передачи регулирующего органа k_{PO} , коэффициент передачи измерительного преобразователя (датчика) k_d и коэффициент пропорциональности регулирующего прибора k_n :

$$k_p = k_i k_d k_{PO} k_n .$$

В то время как k_i и k_d обычно известны, из-за нелинейности регулирующего органа и зависимости эквивалентной скорости исполнительного механизма от продолжительности импульсов включения в пульсирующем режиме k_{PO} величина переменная. Из сказанного следует, что $k_p = k_n$ только при определенных условиях. Поэтому оцифровка шкалы k_n регулирующего прибора в значительной степени условна, она обычно делается для $k_i k_d k_{PO} = 1$ при использовании исполнительного механизма с номинальным временем перемещения исполнительного механизма $T_{им} = 63$ с.

В этом случае коэффициент пропорциональности регулирующего прибора получает обозначение $k_{п-63}$. При использовании исполнительного механизма с другим временем $T_{им}$ коэффициент пропорциональности прибора пересчитывается по формуле

$$k_p = k_{p-63} \frac{63 c}{T_{им, c}}.$$

Для получения действительного значения k_p градуировка шкалы k_p регулирующего прибора должна производиться экспериментально.

На действительную величину T_u ($T_{уз}$) помимо параметров регулирующего прибора влияет эквивалентная скорость перемещения исполнительного механизма, зависящая от величины и направления действия момента нагрузки и от продолжительности импульсов включения в пульсирующем (скользящем) режиме. Поэтому градуировка шкалы T_u ($T_{уз}$) также должна производиться экспериментально.

Имеется несколько методов экспериментального определения динамических параметров регуляторов. Все они основаны на изучении вида графика выходного сигнала регулятора при известном возмущении на его входе.

1.1. Метод характеристик разгона

Определение динамических параметров регулятора этим методом основано на изучении изменения его выходного сигнала во времени при подаче на вход регулятора скачкообразного возмущения.

Для определения динамических параметров ПИ-регулятора в уравнении

$$y = k_p \left(\varepsilon + \frac{1}{T_{им}} \int \varepsilon d\tau \right)$$

положим $\varepsilon = \varepsilon_0$. Тогда получим

$$y = k_p \varepsilon_0 + \frac{k_p \varepsilon_0}{T_{им}} \tau.$$

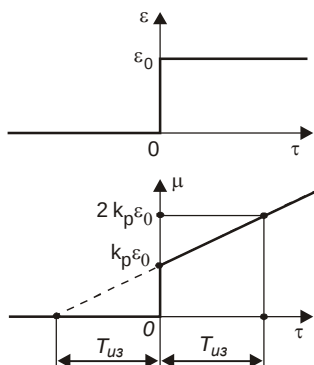


Рис. 1. К определению динамических характеристик ПИ-регулятора методом характеристик разгона

Это будет уравнением разгона идеального ПИ-регулятора. График его приведен на рис. 1.

Коэффициент пропорциональности k_p определяется при $\tau = 0$ как отношение пропорциональной части характеристики разгона, равной $k_p \varepsilon_0$, к величине ε_0 . Постоянная времени издромы $T_{уз}$ определяется как время, за которое выходной сигнал удваивается по сравнению с моментом времени $\tau = 0$.

В реальных регуляторах проявляются нелинейности, и ход графика изменяется. На рис.2,а изображены графики регулирующих воздействий (выходных сигналов регулятора) при скачкообразном возмущении и различных нагрузках исполнительного механизма, а на рис.2,б аналогичные графики при меньшей длительности управляющих импульсов $\tau_{имп}$ в пульсирующем режиме.

Когда на вход регулятора подаётся скачкообразное возмущение ε_0 (см. рис.2,а), регулирующий прибор первоначально выдаёт импульс большой длительности $\tau_в$, и исполнительный механизм отрабатывает пропорциональную часть регулирующего воздействия с коэффициентом пропорциональности k_p . За счет нелинейности статической характеристики исполнительного механизма угол поворота его

выходного вала $\varphi_{им}$, соответствующий пропорциональной части, для случая большей нагрузки M_{H2} будет несколько меньше, чем его поворот при меньшей нагрузке M_{H1} , и коэффициент пропорциональности k_p также станет меньше.

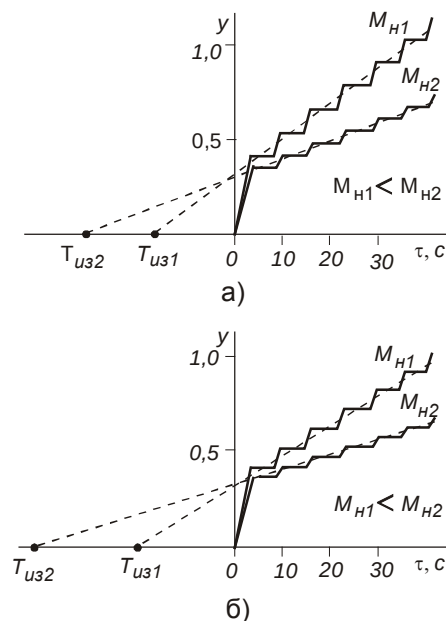


Рис. 2. Графики перемещения вала ИМ при скачкообразном возмущении при различной нагрузке ИМ: а) - при большей продолжительности управляющих импульсов; б) - при меньшей продолжительности управляющих импульсов

При уменьшении величины зоны возврата Δ_δ релейного элемента и соответствующем уменьшении длительности управляющих импульсов $\tau_{имп}$ (см. рис.2,б) величина перемещения, соответствующая пропорциональной части, останется той же, период следования управляющих импульсов и высота ступенек уменьшатся, а постоянные времени изодрома $T_{из}$ при обеих нагрузках станут больше.

Так как нелинейность исполнительного механизма зависит от нагрузки, значения динамических параметров, определяемые по этому методу, также будут зависеть от нагрузки, т.е. будут определены с погрешностью.

Скорость связи $V_{св}$, коэффициент пропорциональности k_p и постоянная времени изодрома $T_{из}$ определяются довольно просто.

Для определения скорости связи рассчитывают величину скачкообразного входного сигнала (тока, напряжения) в относительных единицах:

$$\varepsilon_0 = \frac{I_{вх.0}}{I_{вх.ном}} \text{ или } \varepsilon_0 = \frac{U_{вх.0}}{U_{вх.ном}},$$

где $I_{вх.ном}$, $U_{вх.ном}$ – номинальное значение входного сигнала токового или напряжения;

$I_{вх.0}$, $U_{вх.0}$ – скачкообразный входной сигнал.

Подав скачкообразный входной сигнал, измеряют длительность τ_δ импульса первого (продолжительного) включения на выходе регулирующего прибора, который характеризует «пропорциональную часть» выходного сигнала. Скорость связи определяют по формуле

$$V_{св} = \frac{\varepsilon_0}{\tau_\delta} \left[\frac{1}{с} \right].$$

Коэффициент пропорциональности регулятора находится по формуле

$$k_p = \frac{1}{V_{св} T_{п.х.}} [\text{от н.ед.}],$$

где $V_{св}$ – скорость связи регулятора, $1/с$;

$T_{п.х.}$ – время полного хода исполнительного механизма, с.

За полный ход механизма принимается угол поворота выходного вала механизма, соответствующий перемещению регулирующего органа от начального положения до конечного.

Для определения $T_{из}$ на вход подаётся скачкообразный входной сигнал ε_0 . При работе регулирующих приборов в ПИ-режиме после первого включения τ_e наблюдается последовательность коротких импульсов выходного сигнала, характеризующая интегральную часть закона регулирования. Способ определения $T_{из}$ ясен на рис.3.

Для $T_{из}$ получаем:

$$T_{из} = \frac{\tau_B}{\tau_{имп}} (\tau_{имп} + \tau_{пауз}).$$

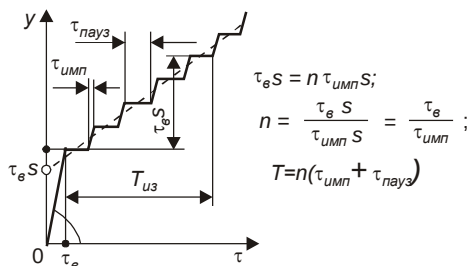


Рис. 3. Переходная характеристика импульсного ПИ-регулятора

Для расчета по этой формуле эксперимент ставить неудобно, поэтому за некоторый отрезок времени $\Sigma(\tau_{имп} + \tau_{пауз})$ измеряют суммарную длительность импульсов $\Sigma\tau_{имп}$, например, электрическим секундомером, и $T_{из}$ вычисляют по формуле

$$T_{из} = \tau_B \frac{\Sigma(\tau_{имп} + \tau_{пауз})}{\Sigma\tau_{имп}}.$$

1.2. Частотный метод

В этом методе на вход регулятора подается возмущение гармонической (синусоидальной), прямоугольной, трапецеидальной или треугольной формы, вырабатываемое специальным инфранизкочастотным генератором.

При воздействии на вход регулятора *синусоидального* возмущения некоторой частоты с постоянной амплитудой A выходной сигнал регулятора будет представлять собой периодическую функцию той же частоты, в общем случае отличную от синусоидальной. Далее известными методами из полученного выходного сигнала выделяется первая гармоника. Её амплитуда B и фаза будут отличаться от амплитуды и фазы возмущения. По результатам обработки регистрограмм выходного сигнала для различных частот возмущения строятся амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики исследуемого регулятора.

Если на вход регулятора подается *симметричное прямоугольное* возмущение, для него справедливо разложение

$$\varepsilon(\tau) = \frac{4A}{\pi} (\sin \omega \tau + \frac{1}{3} \sin 3\omega \tau + \dots),$$

где A – пиковое отклонение вверх (вниз) прямоугольного сигнала.

Амплитуды гармонических составляющих равны:

$$A_1 = 1,27A; A_3 = 0,42A \text{ и т.д.}$$

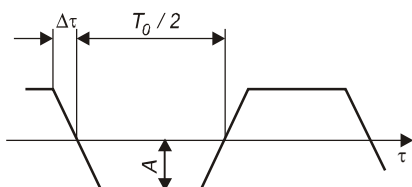


Рис. 4. Трапецеидальное возмущение

При использовании трапецеидального возмущения (рис.4) имеет место разложение

$$\varepsilon(\tau) = \frac{4A}{\pi\alpha} \left(\sin\alpha \sin\omega\tau + \frac{1}{3^2} \sin^3\alpha \sin 3\omega\tau + \dots \right),$$

где $\alpha = \frac{2\pi\Delta\tau}{T_0}$ – характеристика степени трапецеидальности.

Амплитуды гармонических составляющих равны:

$$A_1 = \frac{4A}{\pi\alpha} \sin\alpha; \quad A_3 = \frac{4A}{9\pi\alpha} \sin^3\alpha \text{ и т.д.}$$

При *треугольной* форме возмущения имеем разложение

$$\varepsilon(\tau) = \frac{8A}{\pi^2} \left(\sin\omega\tau - \frac{1}{3^2} \sin 3\omega\tau + \dots \right).$$

Амплитуды гармонических составляющих равны:

$$A_1 = 0,8A; \quad A_3 = 0,09A \text{ и т.д.}$$

По этим формулам сначала вычисляют амплитуду первой гармоники входного сигнала A_1 . В выходных колебаниях находят амплитуду и фазу φ первой гармонической составляющей B_1 , т.е. получают одну из точек АФЧХ. Повторяя это для различных частот и используя две-три гармонических составляющих, можно построить всю характеристику.

Частотный метод является достаточно универсальным методом исследования регулятора. Возможности его использования для определения динамических параметров вытекают из следующего.

Для ПИ-регулятора, работающего по закону

$$y = k_p \left(\varepsilon + \frac{1}{T_{из}} \int \varepsilon d\tau \right),$$

уравнения для амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик будут соответственно:

$$M(\omega) = k_p \sqrt{1 + \frac{1}{\omega^2 T_{из}^2}}, \quad \varphi(\omega) = \arctg \left(-\frac{1}{\omega T_{из}} \right),$$

где $M(\omega)$ – отношение амплитуд B_i / A_i i -ых гармонических составляющих обоих сигналов на данной частоте ω .

Отсюда получаем выражения для k_p и $T_{из}$:

$$k_p = \frac{M(\omega)}{\sqrt{1 + \frac{1}{\omega^2 T_{из}^2}}}; \quad T_{из} = -\frac{tg\varphi(\omega)}{\omega}.$$

Поскольку $M(\omega)$ находится как отношение амплитуды первой гармоники выходного сигнала регулятора к амплитуде входного синусоидального возмущения (или к A_1 при несинусоидальном входном сигнале), это величина именованная. Для перевода $M(\omega)$ в безразмерную форму как A , так и B нужно нормировать, разделив их на соответствующие сигналы на нулевой частоте.

Как показывает опыт, если амплитуды и частоты взяты такие, что обеспечивается достаточно глубокий скользящий (пульсирующий) режим работы регулятора, длительность выдаваемых регулирующим прибором импульсов будет меняться сравнительно мало, т.е. в процессе измерений эквивалентная скорость исполнительного механизма будет меняться незначительно. Поэтому при использовании частотного метода величина ошибок, о которых упоминалось при рассмотрении метода характеристик разгона, также будет незначительной, и ими при практических измерениях вполне можно пренебречь.

1.3. Метод экспоненциальных возмущений

Влияние нелинейности исполнительного механизма при определении динамических параметров регуляторов можно исключить, используя метод экспоненциальных возмущений. Идея метода состоит в том, чтобы в процессе измерений положение рабочей точки на импульсной характеристике исполнительного механизма оставалось неизменным, т.е. поддерживалась неизменной длительность импульсов $\tau_{имп}$, вырабатываемых регулирующим прибором. Этого можно достичь, подавая на вход регулятора возмущение, меняющееся по экспоненциальному закону. Для этого между источником скачкообразного возмущения ε_0 и регулятором следует включить апериодическое звено первого порядка. В этом случае передаточная функция идеального ПИ-регулятора вместе с апериодическим звеном будет иметь вид

$$W(p) = \frac{1}{T_a p + 1} k_p \frac{T_{из} p + 1}{T_{из} p},$$

где T_a – постоянная времени апериодического звена.

Если подобрать T_a так, чтобы $T_a = T_{из}$, получим

$$W(p) = \frac{k_p}{T_{из} p}.$$

При скачкообразном изменении сигнала на входе апериодического звена $\varepsilon = \varepsilon_0$ на входе регулятора будет экспоненциальный сигнал. Изображение выходного сигнала будет таким:

$$y(p) = \frac{k_p}{T_{из} p^2} \varepsilon_0.$$

Переходя к оригиналу, получим

$$y(t) = \frac{k_p \varepsilon_0}{T_{из}} t,$$

т.е. уравнение прямой линии, выходящей из начала координат под углом β к оси абсцисс. Этот угол определяется из равенства

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{k_p \varepsilon_0}{T_{из}}.$$

Таким образом, если постоянную времени T_a подобрать так, что выходная величина будет изменяться по закону прямой линии, выходящей из начала координат, то $T_{из} = T_a$, а коэффициент пропорциональности можно будет определить из соотношения

$$k_p = \frac{T_{из}}{\varepsilon_0} \frac{\mu(\tau_1)}{\tau_1},$$

где $y(t_1)$ – значение выходной величины регулятора в некоторый произвольно выбранный момент времени τ_1 .

При другой продолжительности импульсов $\tau_{имп}$ рабочая точка сместится по импульсной характеристике исполнительного механизма, величина углового перемещения выходного вала исполнительного механизма, вызванного действием каждого импульса, также станет другой. В результате изменится угол β наклона прямой и, следовательно, коэффициент пропорциональности регулятора k_p .

2. Лабораторная установка

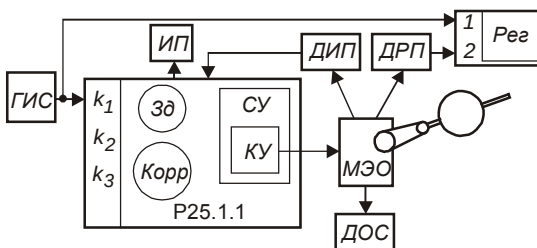


Рис. 5. Блок-схема лабораторной установки

На рис. 5 представлена блок-схема ПИ-регулятора, построенного на основе регулирующего прибора Р25.1.1 и реализованного на лабораторном стенде.

Токовый выходной сигнал ε генератора испытательных сигналов 0...5 мА подается на узел масштабирования k_1 и на вход канала 1 регистратора Рег (низкоомный токовый вход 0...5 мА). В качестве задатчиков используются внутренние задатчик Зд и корректор Корр .

К выходным зажимам регулирующего прибора через пусковые реле, не показанные на блок-схеме, подсоединен исполнительный механизм МЭО, нагруженный регулируемым моментом сопротивления вращению. С индуктивных преобразователей МЭО, включенных по дифференциальной схеме, для получения замкнутой системы регулирования на узел масштабирования k_3 может быть подан сигнал обратной связи (датчик ДОС). С выходным валом МЭО соединены дополнительно два потенциометрических преобразователя (датчики). С датчика измерителя положения ДИП, получающего питание переменным током от

регулирующего прибора, на соответствующий вход Р25.1.1 подаётся сигнал для управления внешним индикатором положения *ИП* исполнительного механизма. С датчика регистратора положения *ДРП* исполнительного механизма, питаемого постоянным током от дополнительного источника, на вход канала 2 регистратора *Рег* (высокоомный вход по напряжению 0...5 В) подаётся напряжение, пропорциональное углу поворота исполнительного механизма.

Выбор режима управления исполнительным механизмом – автоматического или ручного – осуществляется от ключа управления *КУ* станции управления *СУ*, встроенной в Р25.1.1.

Размещение элементов и мнемоническая схема лабораторной установки изображены на рис. 6.

Регулирующий прибор Р25.1.1 размещен на стенде справа. Его клеммы соединены с гнездами на панели стенда, снабженными нумерацией, совпадающей с нумерацией колодки зажимов самого прибора. Зажимы питания 1 и 2 и зажимы 7, 9, 10, служащие для управления пусковыми реле исполнительного механизма, соединены заранее со схемой управления *МЭО* и показаны на панели стенда символически. Подробное описание Р25.1.1 дано в инструкции «Приборы регулирующие Р25. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Е3.222.008 ТО».

Установленный регулирующий прибор Р25.1.1 имеет следующие номинальные электрические параметры:

номинальный токовый входной сигнал, подаваемый на узел масштабирования k_1 , зашунтированный резистором с сопротивлением 78,7 Ом, равен 3,5 мА, что соответствует напряжению на входных зажимах 275 мВ;

номинальный сигнал переменного тока на входах узлов масштабирования k_2 и k_3 Ш.

Исполнительный механизм МЭО 40/63 – 0,25 установлен в нижней части стенда. С помощью кабеля выводы датчиков положения выходного вала исполнительного механизма *ДОС*, *ДИП*, *ДРП* соединены с гнездами, расположенными на мнемосхеме. На кривошипе выходного вала закреплен рычаг, вдоль которого можно перемещать и фиксировать в двух положениях груз, создающий вращающий момент нагрузки. В крайнем положении груза на конце рычага вращающий момент на валу исполнительного механизма равен номинальному для данного МЭО моменту 40 Н·м, в среднем положении – 20 Н·м. При подъёме груза нагрузка встречная, при опускании – сопутствующая, поэтому эквивалентная скорость исполнительного механизма зависит от направления вращения.

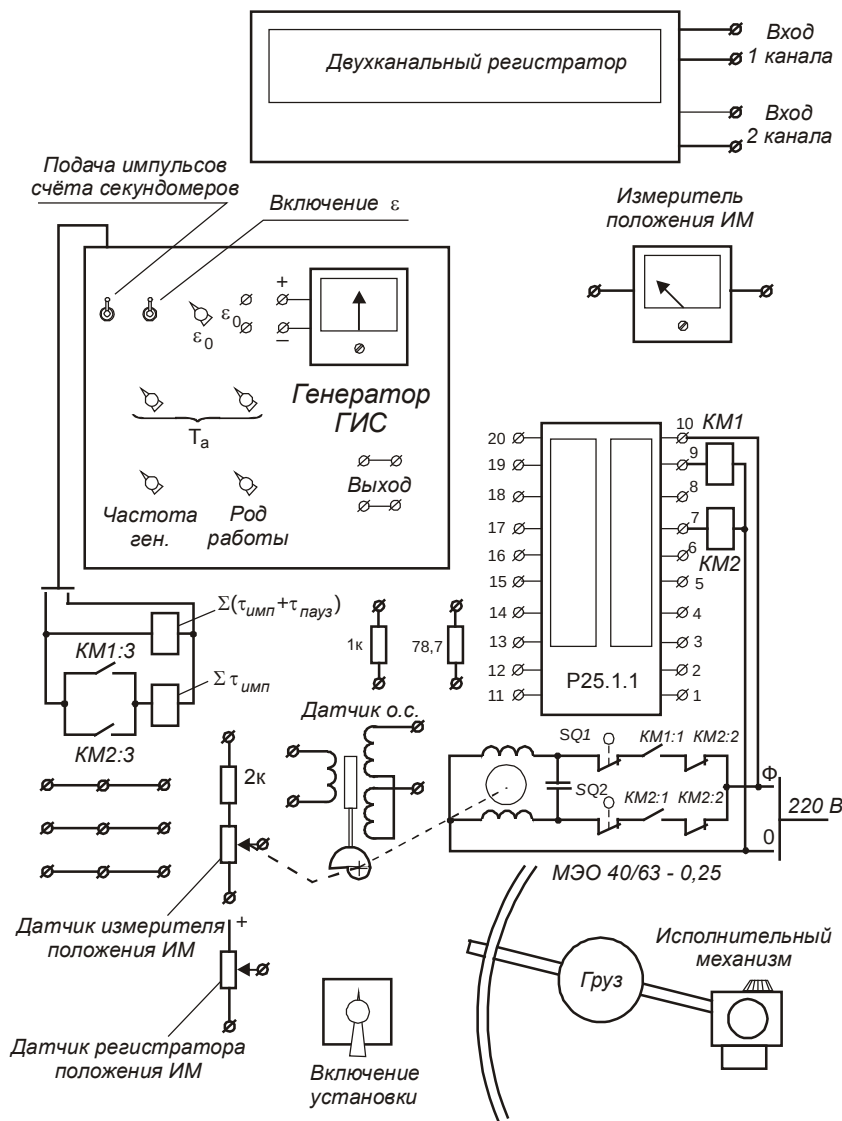


Рис. 6. Размещение элементов лабораторной установки

Конечные выключатели SQ_1 и SQ_2 настроены так, что угол полного хода исполнительного механизма составляет 90° .

Генератор испытательных сигналов ГИС, встроенный в стенд слева вверху, является многофункциональным прибором.

Он содержит следующие основные узлы:

источник регулируемого по величине скачкообразного возмущения ε_0 с регулируемым выходным напряжением постоянного тока $0 \dots 3 \text{ В}$;

апериодическое звено первого порядка с регулируемой постоянной времени T_a ;

генератор однополярного напряжения треугольной формы с пиковым отклонением вверх 3 В и регулируемой ступенчато частотой (5 ступеней)

преобразователь напряжение – ток с крутизной 1 мА/В , включенный на выходе ГИС;

вольтметр постоянного тока с пределами $\pm 10 \text{ В}$;

датчик импульсов с периодом повторения $0,1 \text{ с}$ для управления счетчиками секундомеров.

Сигналы скачкообразного и экспоненциального возмущений ε_0 и с генератора напряжения треугольной формы на испытуемый регулятор подаются через преобразователь напряжение – ток. Выбор требуемого режима работы ГИС осуществляется переключателем «Род работы» на три положения:

левое положение – подача скачкообразного возмущения $0...3$ мА;

среднее положение – подача экспоненциально нарастающего возмущения с асимптотическим значением ε_0 ;

правое положение – периодическое возмущение треугольной формы $0...3$ мА.

Источник скачкообразного возмущения ε_0 представляет собой потенциометр, подключённый к стабилизированному напряжению, ручка которого выведена на панель ГИС. Для целей измерения напряжение ε_0 выведено на гнезда рядом с ручкой потенциометра « ε_0 ». Напряжение может быть измерено с помощью встроенного в ГИС вольтметра. Слева от ручки потенциометра установлен переключатель « ε_0 » для подачи сигнала в исследуемый регулятор. В среднем и нижнем положениях переключателя сигнал ε_0 отключён от входа регулятора; эти положения используются при установке требуемого значения ε_0 . При переводе переключателя в верхнее положение напряжение скачкообразного возмущения ε_0 подаётся на выходной преобразователь напряжение – ток (переключатель «Род работы» в крайнем левом положении).

Для получения экспоненциально нарастающего возмущения между источником скачкообразного возмущения ε_0 и выходным преобразователем напряжение – ток включается апериодическое звено первого порядка с постоянной времени T_a . Величина T_a может регулироваться двумя переключателями магазина сопротивлений, позволяющими набирать сопротивления $0...500$ кОм с дискретностью 10 кОм. Установленная величина постоянной времени T_a в секундах подсчитывается как произведение коэффициента $0,4$ на суммарное сопротивление магазина сопротивлений в килоомах.

Для подачи экспоненциально нарастающего возмущения надо переключатель «Род работы» установить в среднее положение и переключателем « ε_0 » включить требуемое по величине возмущение ε_0 .

В крайнем правом положении переключателя «Род работы» на выходе ГИС устанавливаются колебания тока треугольной формы $0...3$ мА, период которых может быть выбран переключателем «Период». Переход с одной ступени периода к другой изменяет период примерно в 5 раз. При проведении измерений период следует откалибровать по скорости движения ленты регистратора. Амплитуда выходного тока в ГИС не регулируется, входной сигнал, поступающий в регулятор, может быть изменен шунтированием входа регулятора (нагрузки ГИС) внешним резистором.

Для измерения времени первого включения регулятора $\tau_в$ и суммы времени импульсов и пауз в пульсирующем режиме работы релейного ПИ-регулятора имеется источник $0,1$ -секундных импульсов, включаемый тумблером, расположенным в левом верхнем углу лицевой панели ГИС. Импульсы проходят на дискретные счётчики секундомеров при включении переключателя « ε_0 ». Верхний секундомер начинает работать сразу после включения переключателя, отсчитывая суммарное время импульсов и пауз. Нижний секундомер, включаемый через контакты пусковых реле исполнительного механизма КМ1:3 и КМ2:3, суммирует только время импульсов. Продолжительность $\tau_в$ можно отсчитывать по любому из счетчиков, однако удобнее это делать по нижнему. Для облегчения отсчета над

секундомерами размещены индикаторные лампочки, загорающиеся во время отработки импульсов.

С помощью *двухканального регистратора А660 – 001-01* возможно на одной бумажной ленте записать два сигнала, например, на входе и выходе регулятора. Канал 1 регистратора используется для записи сигнала на входе регулятора. В этом случае канал 1 должен включаться между выходом ГИС и входом регулирующего прибора Р25.1.1 последовательно. Канал 2 регистратора подключается параллельно нижней ветви потенциометрического датчика положения ДРП.

Скорость перемещения ленты регистратора регулируется встроенным кварцевым генератором. Установленная скорость отсчитывается с оцифровки переключателя скорости. Таким образом, регистрограммы сигналов могут быть расшифрованы как по величине сигналов, так и по времени.

При расшифровке регистрограмм следует иметь в виду, что перья обоих каналов смещены относительно друг друга вдоль направления движения диаграммной бумаги, причём величина смещения зависит от типа перьев. Поэтому перед измерением фазового сдвига надо вручную передвинуть по направляющим обе каретки с перьями и измерить расстояние между линиями на диаграммной бумаге, заметив при этом, как расположены каналы.

3. Программа работы и её выполнение

1) Изучить конструкцию и принципиальные схемы включения регулирующего прибора Р25.1.1 по инструкции «Приборы регулирующие Р25. Техническое описание и инструкция по эксплуатации ЕЗ.222.008 ТО».

2) Спроектировать регулятор положения выходного вала исполнительного механизма. Для этого, пользуясь блок-схемой рис. 5 и инструкцией к регулирующему прибору Р25.1.1, разработать принципиальную схему регулятора и показать её преподавателю для проверки.

3) Спроектировать схему для определения динамических параметров регулятора (т.е. в разомкнутой системе регулирования), включающую ГИС и регистратор, определить номера зажимов и способ соединения элементов. Показать схему преподавателю для проверки.

4) Собрать на стенде лабораторную установку.

5) Включить установку. В режиме ручного управления с помощью потенциометра ИП, выведенного «под шлиц» на субблоке Р012 прибора Р25.1.1, установить чувствительность измерителя положения выходного вала исполнительного механизма, обеспечивающую перемещение стрелки измерителя от 0 до 100% при перемещении исполнительного механизма из начального (нижнего) положения в конечное.

Отградуировать шкалу регистратора в градусах угла поворота вала исполнительного механизма (канал 2).

6) Установить потенциометр «Демпфер» в положение 0 с.

7) Определить k_p и $T_{из}$ методом характеристик разгона для варианта задания, данного преподавателем.

Здесь проводятся четыре опыта: по два при движении груза вверх и вниз при различных продолжительностях импульсов регулятора. При движении вверх груз устанавливается на конце рычага, при движении вниз – посередине. Во всех опытах используют одно и то же скачкообразное возмущение ε_0 .

Для получения хода исполнительного механизма вверх надо:

- а) включить ГИС в режим подачи скачкообразного возмущения ε_0 ;
- б) при выключенном переключателе « ε_0 » установить как можно более точно по вольтметру $\varepsilon_0 = 0$ и включить переключатель « ε_0 »;
- в) ручками «Задание» и «Корректор» сбалансировать Р25.1.1 так, чтобы отсутствовали импульсы на его выходе, затем в режиме ручного управления установить исполнительный механизм возможно ближе к положению, в котором он отключается концевым выключателем, не допуская срабатывания выключателя;
- г) выключить переключатель « ε_0 » и установить $\varepsilon_0 = 3 \text{ В}$ по встроенному вольтметру;
- д) сбросить показания счётчиков, подготовить регистратор к записи, включить тумблер «Счетчики», установить автоматический режим работы Р25.1.1;
- е) включить переключатель « ε_0 », подав ступенчатое возмущение;
- ж) получить регистрограммы процесса, одновременно по счетчикам определить значения $\tau_{\text{в}}$, $\Sigma\tau_{\text{имп}}$, $\Sigma(\tau_{\text{имп}} + \tau_{\text{пауз}})$;
- з) вычислить k_p и $T_{\text{уз}}$ двумя способами – по показаниям счётчиков и геометрическим построением на регистрограмме.

Для получения хода исполнительного механизма вниз следует поменять местами провода, идущие к узлу масштабирования k_1 Р25.1.1. Остальные операции остаются теми же.

8) Определить k_p и $T_{\text{уз}}$ методом экспоненциальных возмущений для варианта задания по указанию преподавателя.

Эти опыты проводятся также при движении исполнительного механизма вверх и вниз. Отличие в опытах состоит в том, что ГИС работает в режиме экспоненциального возмущения, счетчик времени не используется, а расчёт k_p и $T_{\text{уз}}$ ведется только на основании измерений регистрограмм. Последовательность операций та же, что описана выше. Опыт повторяют, подбирая постоянную времени T_a такую, чтобы регистрограмма представляла собой ступенчатую линию, аппроксимируемую прямой, выходящей из начала координат.

8) Получить амплитудно-частотную и фазочастотную характеристики регулятора и определить k_p и $T_{\text{уз}}$ частотным методом для варианта задания, указанного преподавателем.

Для этого надо выполнить следующее:

- а) включить ГИС в режим скачкообразного возмущения;
- б) при выключенном переключателе « ε_0 » установить по вольтметру $\varepsilon_0 = 1,5 \text{ В}$ и включить переключатель;
- в) ручками «Задание» и «Корректор» сбалансировать Р25.1.1 так, чтобы отсутствовали импульсы на его выходе. Затем в режиме ручного управления установить исполнительный механизм в среднее положение и переключить Р25.1.1 на автоматический режим;
- г) подготовить регистратор к записи;
- д) переключить ГИС в режим треугольного напряжения;
- е) на всех частотных диапазонах генератора треугольного напряжения получить достаточно полные регистрограммы входного и выходного сигналов регулятора (два полных периода);

ж) по результатам обмера регистрограмм построить амплитудно-частотную, фазочастотную и амплитудно-фазочастотную характеристики регулятора и рассчитать k_p и T_{uz} .

Алгоритм обработки регистрограмм и вычислений амплитуды и фазы гармонических составляющих приведен ниже.

4. Варианты заданий

Варианты заданий для определения k_p и T_{uz} методом характеристик разгона и методом экспоненциальных

возмущений при движении исполнительного механизма вверх (момент нагрузки 40 Н·м) и вниз (момент нагрузки 20 Н·м)

Номер задания	Зона, %	Импульс, с	T_{uz} , с	k_1
1	1	0,8 0,2	60	1
2	2	0,8 0,2	50	0,6
3	2	0,8 0,1	50	0,8
4	3	0,9 0,2	40	1
5	2	0,6 0,1	40	0,6
6	3	0,8 0,2	30	0,4
7	4	0,8 0,2	30	0,5

Варианты заданий для определения k_p и T_{uz} частотным методом при движении исполнительного механизма вверх и вниз

Номер задания	Зона, %	Импульс, с	T_{uz} , с	k_1
1	1	0,8	80	0,8
2	1	0,8	70	0,8
3	1	0,6	60	0,8
4	2	0,6	50	0,6
5	2	0,6	40	0,6
6	2	0,4	30	0,6
7	3	0,3	20	0,6
8	2	0,2	20	0,5
9	3	0,5	30	0,8

5. Обработка регистрограмм при применении частотного метода

Разложение на гармонические составляющие записи периодических колебаний перемещения выходного вала исполнительного механизма целесообразно делать с использованием стандартных компьютерных программ. При отсутствии компьютера гармонический анализ полученных записей можно сделать вручную.

В линейной системе, какой является лабораторная установка, при подаче на вход регулятора периодических колебаний треугольной формы на выходе устанавливаются периодические колебания формы, отличной от треугольной, но симметричные относительно оси времени (т.е. не содержащие чётных гармоник) и относительно точек $\pi/2, 3\pi/2$ и т.д. Это позволяет использовать для описания колебаний ряд Фурье, состоящий из одних косинусов, что значительно облегчает вычисления. Кроме того, амплитуды гармоник резко убывают с частотой, поэтому следует ограничиться первой и третьей гармониками.

Алгоритм обработки графиков следующий.

1. Выбрать один полный период (интервал) T на графике функции (см. пример ниже).
2. Разделить интервал на *чётное* число k равных подынтервалов и измерить ординаты точек кривой на границах интервалов относительно оси времени.
3. Определить значения коэффициентов A_n в ряду Фурье

$$y(t) = \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos n\omega\tau),$$

где $\omega = 2\pi/T$.

Коэффициенты A_n в данной формуле представляют собой амплитуд n -ых гармоник и находятся по формуле

$$A_n = 2 \sum_{m=1}^{m=k} \left[\frac{a_m \cos n\theta_m}{k} \right],$$

где m – номер подынтервала, равный $1, 2, \dots, k$;

a_m – ордината в m -ом подынтервале на графике функции;

θ_m – фазовый угол в m -ом подынтервале на основной частоте, равный $2\pi m/k$, рад.

Точность анализа будет возрастать при увеличении числа подынтервалов. В частности, если число интервалов равно k , наивысшая гармоника n , определяемая с помощью этого метода, будет меньше, чем $k/2$.

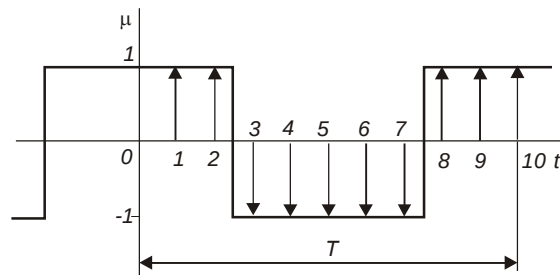


Рис. 7. Форма сигнала регистратора (к примеру)

Пример: определить амплитуды первой (основной) и третьей гармоник, которые содержатся в сигнале, показанном на рис. 7.

Чтобы получить величину третьей гармоники, необходимо разделить период функции T более чем на шесть интервалов. Выберем 10 интервалов по 36° каждый.

Определим амплитуду основной частоты, проводя вычисления непосредственно в таблице.

Ордината m	Амплитуда a_m	Угол θ_m , град	$\cos \theta_m$	$a_m \cos \theta_m$	$\sin \theta_m$	$a_m \sin \theta_m$
1	1	36	0,809	0,809	0,588	0,588
2	1	72	0,309	0,309	0,951	0,951
3	-1	108	-0,309	0,309	0,951	-0,951
4	-1	144	-0,809	0,809	0,588	-0,588
5	-1	180	-1,000	1,000	0	0
6	-1	216	-0,809	0,809	-0,588	0,588
7	-1	252	-0,309	0,309	-0,951	0,951
8	1	288	0,309	0,309	-0,951	-0,951
9	1	324	0,809	0,809	-0,588	-0,588
10	1	360	1,000	1,000	0	0
				$\Sigma = 6,472$		$\Sigma = 0$

Следовательно: $A_1 = \frac{6,472}{10} \cdot 2 = 1,294$.

Проведя аналогичные вычисления при $n=3$, определим амплитуду третьей гармоники:

$$A_3 = -0,494.$$

Знак минус показывает, что между третьей гармоникой и основной частотой существует сдвиг фаз 180° .

Замечание. Точная величина амплитуды основной частоты равна $4/\pi = 1,272$, а точная величина амплитуды третьей гармоники равна $4/(3\pi) = -0,425$. Точность при анализе графическим методом возрастает при увеличении числа подынтервалов.

6. Оформление отчёта

Отчёт должен содержать:

- 1) цель работы, варианты заданий;
- 2) подробное описание хода работы по шагам;
- 3) принципиальную схему регулятора положения выходного вала исполнительного механизма с необходимыми пояснениями;
- 4) принципиальную и монтажную схемы установки для определения динамических параметров регулятора;
- 5) регистрограммы опытов с указанием масштабов по осям;
- 6) результаты обработки регистрограмм;
- 7) расчёты с оформлением окончательных результатов в виде итоговых таблиц и графиков;
- 8) графики АЧХ, ФЧХ и АФЧХ регулятора;
- 9) выводы по каждому этапу работы и по работе в целом.

Контрольные вопросы

1. Составить блок схему ПИ-регулятора с использованием регулирующего прибора Р25.1.1 и исполнительного механизма МЭО 40/63-0,25.
2. Нарисовать схему измерителя рассогласования регулирующего прибора Р25.1.1, показав в ней цепи установки задания от внешнего и внутреннего задатчиков и корректора.
3. Нарисовать схемы подключения МЭО 40/63-0,25 к регулирующему прибору Р25.1.1 через промежуточные реле.
4. Нарисовать схемы подключения к Р25.1.1 цепей измерителя положения выходного вала исполнительного механизма при использовании потенциометрического и дифференциально-трансформаторного датчиков.
5. Показать, как соотносятся между собой коэффициент передачи ПИ-регулятора k_p и коэффициент передачи регулирующего прибора k_n .
6. Объяснить определение k_p и $T_{уз}$ ПИ-регулятора методом характеристик разгона.
7. Как влияет на ход регистрограмм, полученных методом характеристик разгона, изменение нагрузки исполнительного механизма постоянной скорости? Как влияет изменение продолжительности импульсов, вырабатываемых регулирующим прибором?
8. Объяснить определение k_p и $T_{уз}$ ПИ-регулятора частотным методом.

9. Как измерить угол фазового сдвига между периодическим сигналом, поданным на вход регулятора, и первой гармоникой сигнала, снимаемого с датчика перемещения исполнительного механизма?
10. Как по результатам обмера регистрограмм построить АЧХ, ФЧХ и АФЧХ?
11. Объяснить суть метода экспоненциальных возмущений для определения K_p и $T_{уз}$ релейного ПИ-регулятора.
12. Как пойдут кривые на регистрограммах, если T_a будет больше или меньше $T_{уз}$?

Библиографический список

1. Яковлев Ю.С., Мальгин О.А., Камчаткин А.П. Технические средства локальных САР. Чебоксары: Чувашкнигиздат, 1973. 336с
2. Власов-Власюк О.Б. Экспериментальные методы в автоматике. М.: Машиностроение, 1989. 412с.
3. Макаров И.М., Менский Б.М. Линейные автоматические системы (элементы теории, методы расчёта и справочный материал). Учеб. пособие для вузов. М.: Машиностроение, 1977.
4. Сборник задач по теории автоматического регулирования двигателей внутреннего сгорания. Крутов В.И. М.: Машиностроение, 1972. 209 с.

Лабораторная работа № 10. Определение оптимальных параметров динамической настройки ПИ-регулятора по экспериментальным характеристикам

Цель работы:

- 1) на специализированной лабораторной установке экспериментально получить статические и динамические характеристики объекта управления, построить АФЧХ объекта;
- 2) рассчитать динамические параметры настройки субоптимального регулятора для инерционного объекта первого порядка с запаздыванием;
- 3) определить параметры настройки регулятора по АФЧХ регулируемого объекта;
- 4) рассчитать уставки импульсного регулятора Р25.1 лабораторной установки, реализовать рассчитанные параметры настройки и оценить качество полученных переходных процессов в АСР объекта.

1. Основные теоретические сведения

1.1. Типовые модели динамики инерционных статических объектов управления

Если переходная характеристика объекта имеет S-образную форму, то наклон, кривизна характеристики и её расстояние от оси ординат зависят от динамических свойств конкретного объекта (кривая 1 на рис.1).

Для практических расчетов системы управления таким объектом S-образную кривую переходного процесса, снятую при единичном ступенчатом воздействии, достаточно охарактеризовать следующими параметрами, определяемыми непосредственно по графику:

передаточным коэффициентом объекта $k_{об}$;

постоянной времени объекта T_o ;

полным запаздыванием τ_o , которое складывается из чистого запаздывания $\tau_ч$ и переходного запаздывания τ_n , т.е.

$$\tau_o = \tau_ч + \tau_n .$$

Параметры T_o и τ_o определяются достаточно легко – проведением касательной АВ к наиболее крутому участку переходной характеристики. Выделение длины горизонтального участка OD, соответствующего запаздыванию $\tau_ч$, обычно затруднено, поэтому $\tau_ч$ можно определить только с погрешностью.

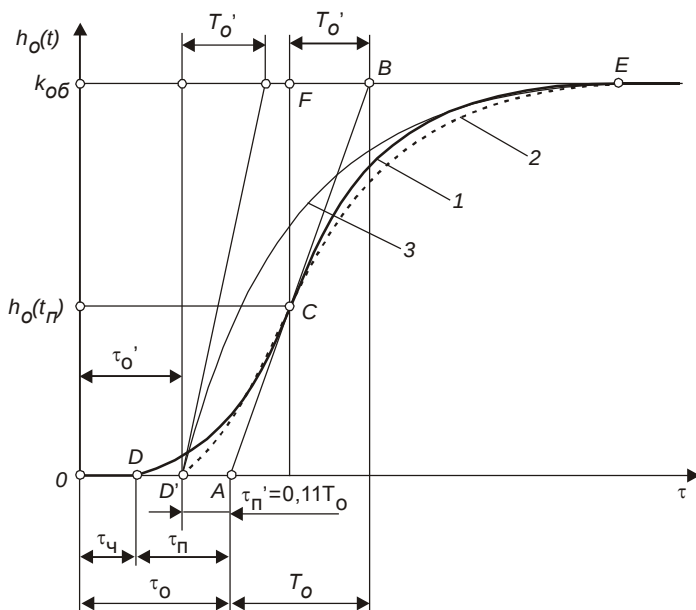


Рис. 1. Переходные характеристики реального объекта (кривая 1) и его приближённых моделей второго (кривая 2) и первого (кривая 3) порядков с запаздыванием

При расчете параметров настройки систем управления объектами с S-образными переходными характеристиками используют либо непосредственно параметры $k_{об}$, T_o , τ_o , τ_χ и τ_p , которые обобщённо характеризуют статику и динамику реальных объектов, либо используют упрощённые модели объекта, коэффициенты которых однозначно выражаются через указанные экспериментальные параметры.

Если заведомо известно, что описываемый объект состоит из одинаковых одноёмкостных

объектов, соединённых последовательно, то наиболее точное приближение к S-образной характеристике обеспечивает передаточная функция

$$W_o(p) = k_{об} \exp(-p\tau_\chi) / (T_{oi}p + 1)^n \quad (1)$$

т.е. наилучшей моделью динамики объекта является последовательное соединение n инерционных звеньев первого порядка с одинаковыми постоянными времени T_{oi} и звена запаздывания с τ_χ . Модель (1) служит удовлетворительной аппроксимацией и в тех случаях, когда объект состоит из неодинаковых звеньев. Важно только, чтобы у такого объекта число неодинаковых звеньев было не меньше трех, а их постоянные времени не сильно отличались друг от друга. Достоинством модели (1) является возможность воспроизводить с её помощью относительно большое полное запаздывание τ_o , состоящее только из переходного запаздывания τ_p .

Хорошее приближение к S-образной переходной характеристике даёт передаточная функция с равными постоянными времени и запаздыванием

$$W_o(p) = k_{об} \exp(-p\tau_o) / (T_{oi}p + 1)^2, \quad (2)$$

где $T_{oi} = T_o / 2,72$;

$$\tau_o' = \tau_o - \tau_p' = \tau_o - 0,107 T_o;$$

τ_p' – переходное запаздывание модели (1) при $n = 2$.

Иначе говоря, параметры данной модели однозначно выражаются через параметры T_o и τ_o экспериментальной переходной характеристики:

$$W_o(p) = k_{об} \exp [-p (\tau_o - 0,11 T_o)] / (0,368 T_o p + 1)^2. \quad (3)$$

Передаточным функциям (2) и (3) на рис.1 соответствует кривая 2, начинающаяся в точке D' . Очевидно, что при данном способе аппроксимации почти весь интервал τ_0 должен быть смоделирован как чистое запаздывание, т.е. $\tau_4 = \tau_0'$.

Переходную S-образную характеристику можно приближенно заменить экспонентой с запаздыванием (кривая 3 на рис.1). Параметры T_0' и τ_0' передаточной функции

$$W_0(p) = k_{об} \exp(-p\tau_0') / (T_0'p + 1) \quad (4)$$

выбирают так, чтобы экспонента пересекала аппроксимируемую кривую в двух точках и проходила в среднем наиболее близко к ней. Очевидно, что такое математически нестрогое требование может быть выполнено при разных сочетаниях параметров T_0' и τ_0' . Один из возможных способов определения параметров модели (4), изложенный в [4], заключается в следующем.

Полагают, что экспонента модели (4) начинается в той же точке D' , что и модели второго порядка, т.е. что

$$\tau_0' \approx \tau_0 - 0,11 T_0, \quad (5)$$

а постоянную времени определяют как разность между абсциссами точки B и точки перегиба C , т.е.

$$T_0' = \tau_B - \tau_n.$$

Ордината $h_0(\tau_n)$ точки перегиба у объектов с одинаковыми постоянными времени лежит в диапазоне $(0,26...0,41) k_{об}$, причём меньшее значение относится к случаю, когда объект имеет второй порядок, а большее – к объектам с $n \geq 9$. Отсюда следует, что

$$T_0' \approx (0,59...0,74) T_0, \quad (6)$$

и передаточная функция (4) с учетом (5) и (6) может быть записана в виде

$$W_0(p) = k_{об} \exp [-p (\tau_0 - 0,11 T_0)] / (0,67 T_0 p + 1). \quad (7)$$

В большинстве практических случаев модель первого порядка с запаздыванием (7) является достаточно точной и в то же время достаточно простой. При значениях $\tau_0/T_0 > 0,5$ удовлетворительной моделью может служить передаточная функция

$$W_0(p) = k_{об} \exp [-p \tau_0] / (0,67 T_0 p + 1). \quad (8)$$

1.2. Динамическая частотная характеристика объекта

Если на входе объекта действует гармоническое возмущающее воздействие вида

$$x(\tau) = A \sin \omega \tau,$$

где A – амплитуда входных колебаний,

ω – частота колебаний, рад/с,

то по истечении некоторого времени на выходе объекта установятся колебания выходной величины $y(\tau)$ той же частоты с амплитудой B и смещением по фазе φ относительно входных колебаний (рис. 2,а)

$$y(\tau) = B \sin (\omega \tau + \varphi).$$

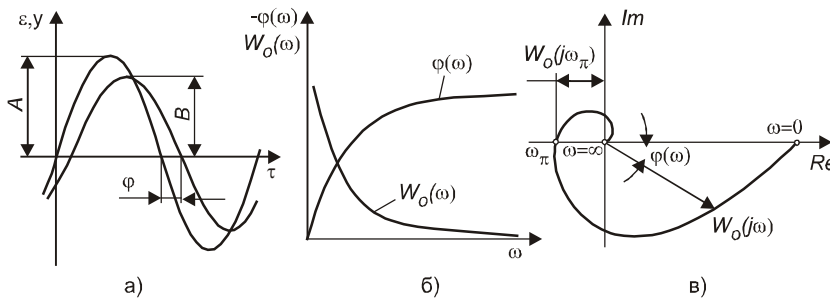


Рис. 2. Построение годографа АФЧХ объекта: а) колебания входного ε и выходного y параметров объекта; б) АЧХ и ФЧХ; в) годограф АФЧХ

Зависимости отношения амплитуд B/A и фазового сдвига между этими колебаниями от частоты ω представляют собой амплитудно-частотную характеристику $W_o(j\omega)$ (АЧХ) и фазочастотную характеристику $\varphi(\omega)$ (ФЧХ), графические изображения которых показаны на рис. 2,б. Комплексная функция

частоты, называемая амплитудно-фазочастотной характеристикой (АФЧХ) объекта, графически на комплексной плоскости может быть представлена кривой, которую очерчивает конец вектора $W_o(j\omega)$ при изменении частоты ω от 0 до ∞ (рис. 2.в).

1.3. Определение параметров настройки ПИ-регулятора

Существует много методов определения параметров настройки регуляторов. В соответствии с целями лабораторной работы рассмотрим три из них, часто применяемые в инженерной практике для инерционных объектов первого и второго порядков с запаздыванием, описываемых передаточными функциями (2) и (4).

1). «Наиболее благоприятным» (по В. Оппелту) или близким к оптимальному для объекта с инерционной частью, действительно близкой к звену первого порядка (4), является ПИ-регулятор, т.е. имеющий передаточную функцию

$$W_p(p) = k_p + \frac{k_{p1}}{p} = k_p + \frac{1}{T_{из}p} = k_p \left(1 + \frac{1}{T_{из}p} \right) = k_p \frac{T_{из}p + 1}{T_{из}p},$$

где k_p , k_{p1} – коэффициенты соответственно пропорциональной и интегральной частей;

$T_{из}$ и $T_{из}$ – постоянные времени интегрирования и изодрома.

Настроечные параметры этого регулятора выбираются равными

$$k_p = T_o' / k_{об} \tau_o'; \quad T_{из} = T_o'. \quad (9)$$

Для упрощённой типовой модели первого порядка с запаздыванием (8), наиболее часто используемой в практических расчетах, соотношения (9) принимают вид

$$k_p = 0,67 T_o / k_{об} \tau_o ; T_{уз} = 0,67 T_o. \quad (10)$$

Для объекта (2), имеющего инерционную часть второго порядка, близким к оптимальному будет ПИД-регулятор, настроечные параметры которого должны быть равны

$$k_p = 0,74 T_o / k_{об} \tau_o' ; T_{уз} = 0,74 T_o ; T_{\delta} = 0,18 T_o.$$

2). Если динамические характеристики и параметры объекта заранее не известны, можно попытаться найти наилучшие настроечные параметры регулятора непосредственно на реальной системе по отклику «живого» объекта, если по условиям технологии допустим описываемый ниже эксперимент. Циглер и Никольс [2] предложили следующий простой порядок и правила:

а) регулятор, подключённый к объекту, переводят в режим пропорционального регулирования;

б) увеличивают передаточный коэффициент k_p до тех пор, пока в замкнутом контуре не возникнут незатухающие колебания, т.е. система не окажется на границе устойчивости;

в) в этом предельном критическом состоянии системы определяют значения коэффициента $k_{p\text{кр.}}$ и периода незатухающих колебаний $T_{\text{кр.}}$;

г) через эти параметры критического режима вычисляют настроечные параметры выбранного заранее закона регулирования:

для П-регулятора

$$k_p = 0,5 k_{p\text{кр.}} ;$$

для PI-регулятора

$$k_p = 0,45 k_{p\text{кр.}} , T_{уз} = 0,85 T_{\text{кр.}} ;$$

для ПИД-регулятора

$$k_p = 0,6 k_{p\text{кр.}} , T_{уз} = 0,5 T_{\text{кр.}} , T_{\delta} = 0,12 T_{\text{кр.}} .$$

Полученные настроечные параметры обеспечивают коэффициенты демпфирования $\xi=0,2...0,3$, при которых перерегулирование составляет $\sigma = 0,53...0,37$.

3). Оптимальные параметры настройки регуляторов могут быть найдены графоаналитически по годографу АФЧХ объекта. Для этого вначале определяются границы области устойчивости системы регулирования с использованием критерия устойчивости Найквиста.

Амплитудно-фазовая характеристика разомкнутой одноконтурной системы регулирования записывается в виде:

$$W(j\omega) = W_o(j\omega) W_{\text{пер}}(j\omega).$$

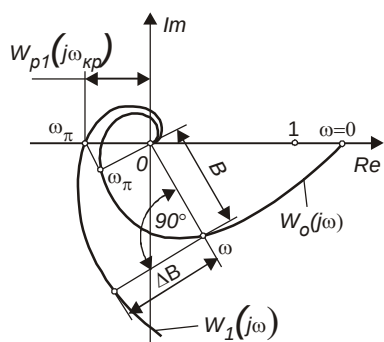


Рис.3. Построение АФЧХ разомкнутой системы с ПИ-регулятором по АФЧХ объекта

Чтобы определить устойчивость замкнутой системы по известной АФЧХ объекта, достаточно умножить её на характеристику регулятора и посмотреть, охватывает ли полученная амплитудно-фазовая характеристика разомкнутой системы точку с координатами $(-1, j0)$. При ПИ-регуляторе амплитудно-фазовая характеристика разомкнутой системы

$$W(j\omega) = k_p (1 - j / (\omega T_{из})) W_o(j\omega)$$

при $k_p = 1$ имеет вид

$$W_1(j\omega) = W_o(j\omega) - j W_o(j\omega) / (\omega T_{из}) .$$

Таким образом, чтобы получить амплитудно-фазовую характеристику разомкнутой системы с ПИ-регулятором при $k_p = 1$ и некотором заданном $T_{из}$, следует к каждому вектору длиной АФЧХ объекта добавить вектор длиной $\Delta B = B/(\omega T_{из})$, повернутый на 90° по часовой стрелке (рис. 3). Предельная (критическая) величина коэффициента передачи регулятора $k_{p\text{ пред.}}$ для выбранного значения $T_{из}$ равна обратной величине отрезка $W_{p1}(j\omega)$, отсекаемого характеристикой $W_1(j\omega)$ на отрицательной вещественной полуоси.

Пример расчёта. Определим критические параметры настройки регуляторов в системе регулирования температуры электропечи, АФЧХ которой изображена на рис. 4. Входная величина объекта измеряется в долях от диапазона перемещения регулирующего органа, выходная – в единицах температуры печи.

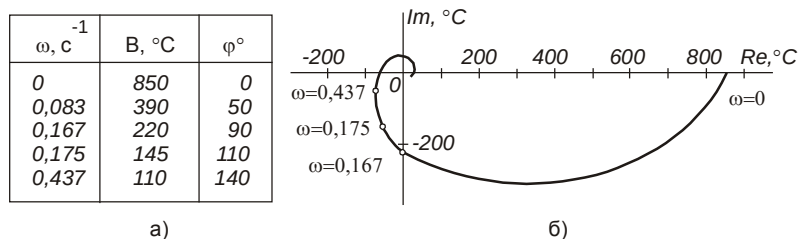


Рис. 4 . АФЧХ электропечи : а) опытные данные; б) годограф

Определение настроек П-регулятора.

Из АФЧХ объекта находим, что при угле фазового сдвига, равном -180° , значение АФЧХ $W_o(j\omega_\pi) = -60^\circ\text{C}$. Следовательно, предельная величина коэффициента передачи регулятора $k_{p\text{ пред.}} = -0,0166 \text{ } 1/^\circ\text{C}$, т.е. система будет работать устойчиво, если при отклонении температуры на 1°C регулятор переместит регулирующий орган не более чем на $0,0166$ его полного хода. Неравномерность регулирования, которая будет иметь место при изменении нагрузки объекта, соответствующем полному ходу регулирующего органа, в этой системе не может быть сделана меньше 60°C , т.е. П-регулятор в установившихся режимах поддерживает регулируемую величину около заданного значения с погрешностью $\pm 30^\circ\text{C}$.

Определение настроек ПИ-регулятора.

На рис. 5,а показано построение амплитудно-фазовых характеристик разомкнутой системы для трёх значений $T_{уз}$. Зависимость $k_{p \text{ пред.}}$ от $T_{уз}$ приведена на рис. 5,б.

Критические значения параметров настройки – это те значения, при превышении которых система регулирования теряет устойчивость (автоколебательный режим считается неустойчивым). Чтобы переходный процесс

имел заданную степень затухания колебаний, необходимо определить оптимальные в этом смысле параметры настройки. Показатель колебательности M , т.е. относительное значение максимума амплитудно-частотной характеристики замкнутой системы

$$M = [W_{\text{зам}}(\omega)]_{\text{макс.}} / W_{\text{зам}}(0),$$

из условия нужного запаса устойчивости системы. Считается, что следует выбирать $M = 1,1 \dots 1,5$.

Алгоритм определения оптимальных параметров настройки следующий:

а) под углом $\beta = \arcsin(1/M)$ к отрицательной вещественной полуоси АФЧХ проводят луч ON ; при $M=1,5$ угол $\beta = 41^\circ$ (рис. 5,а);

б) строят окружности с центрами на отрицательной вещественной полуоси, касающиеся одновременно этого луча и АФЧХ разомкнутой системы при различных заранее выбранных значениях $T_{уз i}$, близких к ожидаемому оптимальному значению $T_{уз}$, и измеряют в масштабе этой оси радиусы полученных окружностей R_i ;

в) при каждом значении $T_{уз i}$ рассчитывают предельные значения $k_{p \text{ пред.} i}$, обеспечивающие заданные значения M , по формуле

$$k_{p \text{ пред.} i} = M / [(M^2 - 1) R_i];$$

г) по этим точкам в координатах $T_{уз} - k_{p \text{ пред.}}$ строят график и находят точку с максимальным отношением $k_{p \text{ пред.} i} / T_{уз i}$, т.е. точку касания прямой OK , выходящей из начала координат, и полученной зависимости, которая и будет соответствовать оптимальной настройке регулятора (рис. 5,б).

Для рассматриваемого примера оптимальными динамическими параметрами настройки будут

$$k_{p \text{ опт.}} = 0,032 \text{ } 1/^\circ\text{C}; \quad T_{уз \text{ опт.}} = 16 \text{ с.}$$

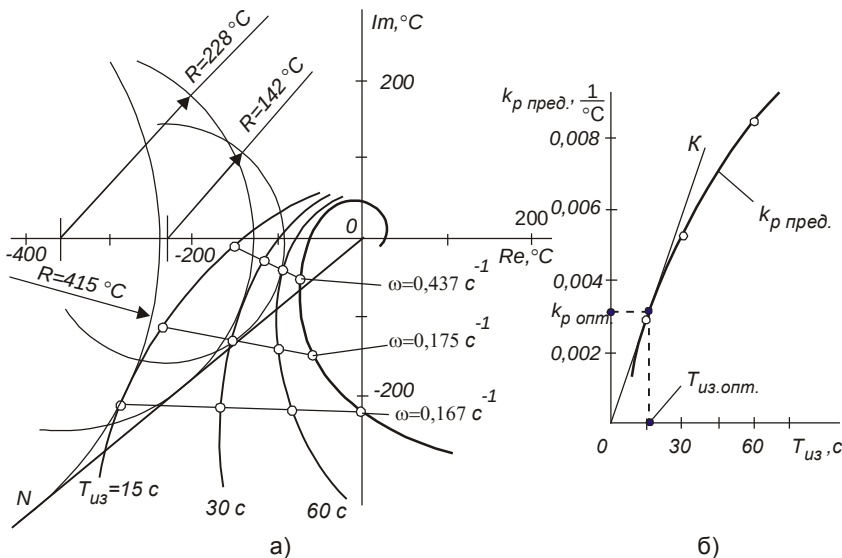


Рис. 5. Построение АФЧХ разомкнутой системы при различных значениях $T_{уз}$ (а) и зависимости $k_{p \text{ пред.}}$ от $T_{уз}$ (б)

1.4. Прямые показатели качества системы управления

Прямые показатели качества определяют по графику переходного процесса, возникающего в системе при ступенчатом внешнем воздействии на систему. На рис. 6 приведён график переходного процесса, вызванного изменением задающего воздействия x_3 . За начало отсчёта выходной величины $y(\tau)$ принято значение $x(-0)$, которое было до подачи ступенчатого воздействия. Так как в лабораторной работе исследуется ПИ-регулятор, в котором обеспечивается нулевая статическая ошибка, вопросы расчета статической точности ниже не рассматриваются.

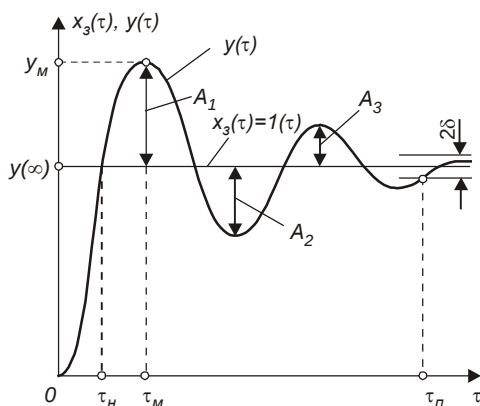


Рис. 6. Прямые показатели качества процесса регулирования по каналу задания

Перерегулирование σ равно отношению первого максимального отклонения управляемой переменной $y(\tau)$ от её установившегося значения $y(\infty)$ к этому установившемуся значению:

$$\sigma = \frac{y_m - y(\infty)}{y(\infty)} \cdot 100 = \frac{A_1}{y(\infty)} \cdot 100, \%$$

Качество процесса управления считается удовлетворительным, если $\sigma \leq 30...40\%$.

Само по себе первое максимальное отклонение y_m тоже является показателем качества. При формировании требований к системе указывают допустимое значение максимального отклонения.

Длительность существования динамических отклонений $y(\tau)$ от нового установившегося значения $y(\infty)$ принято оценивать несколькими характерными моментами времени.

Длительность переходного процесса t_{τ} – интервал времени от момента приложения ступенчатого воздействия до момента, после которого отклонения $y(t)$ от $y(\infty)$ становятся меньше заданного числа δ , т.е. до момента

$$|y(\tau) - y(\infty)| \leq \delta.$$

Очень часто в промышленной автоматике принимают величину $\delta = 5...10\%$ от $y(\infty)$.

Время нарастания τ_n , *время достижения первого максимума* τ_m и *период затухающих колебаний* являются дополнительными временными показателями.

Степень затухания ψ вычисляется по формуле

$$\psi = \frac{A_1 - A_3}{A_1} = 1 - \frac{A_3}{A_1},$$

где A_1 и A_3 – соседние максимальные отклонения одного знака.

Интенсивность затухания колебаний в системе считается удовлетворительной, если $\psi = 0,75...0,95$.

2. Лабораторная установка

Лабораторная установка смонтирована на щите управления. Функционально – принципиальная схема установки изображена на рис. 7, а размещение элементов АСР – на рис.8.

Объект управления состоит из электрической печи с нагревателем сопротивления, безынерционного электронного регулируемого источника напряжения питания нагревателя и автоматического потенциометра КСПЗ, подключённого к термопаре ТП, измеряющей температуру печи.

Регулирующим органом РО является потенциометр, положение движка которого задаёт напряжение источника питания нагревателя. Входной вал РО перемещается исполнительным механизмом ИМ. Положение ИМ определяется сигналом регулирующего прибора Р25.1 как в автоматическом, так и в дистанционном режимах. В последнем случае для управления ИМ используется станция управления Р25.1, в которой совмещены функции переключателя управления «Ручное» – «Автоматическое» и ключа управления «Меньше» –

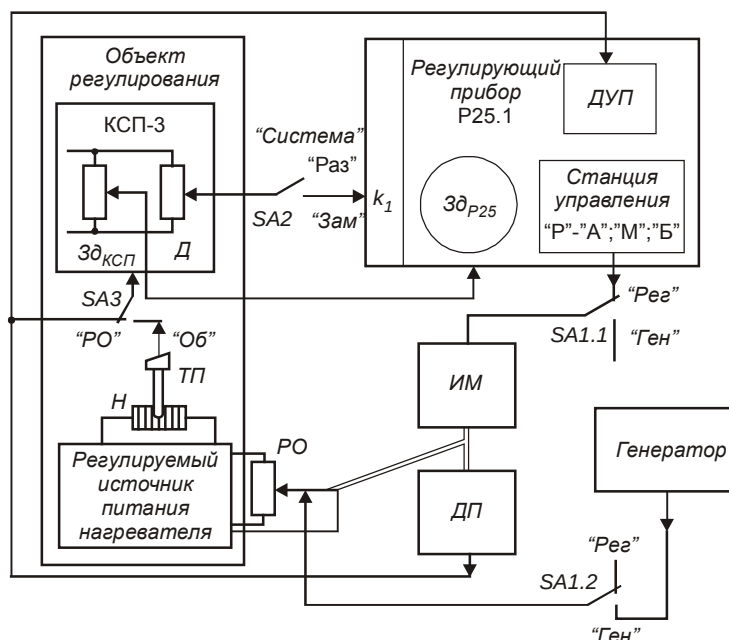


Рис. 7. Функционально-принципиальная схема САУ:

k_1 - узел масштабирования коэффициента передачи $k_{п-63}$ прибора Р-25.1;

ИМ - исполнительный механизм ; РО - регулирующий орган ;

Д - датчик выходной величины объекта управления или положения регулирующего органа;

$Зд_{КСП}$ - задатчик, расположенный в КСП-3; $Зд_{Р25}$ - задатчик, расположенный в Р25.1;

ДУП - дистанционный указатель положения исполнительного механизма;

ДП - датчик положения исполнительного механизма;

ТП - термопара ; Н - нагреватель

;SA1 - переключатель управления исполнительным механизмом от регулятора или генератора;

SA2 - переключатель замыкания или размыкания системы управления;

SA3 - переключатель подключения входа КСП-3 к выходу регулирующего органа или датчику положения исполнительного механизма

«Больше». В качестве дистанционного указателя положения ДУП исполнительного механизма используется прибор, встроенный в регулирующий прибор Р25.1.

Задание системе управления устанавливается разными задатчиками, один из

которых $3d_{P25}$ находится в P25.1, а другой $3d_{КСП}$ встроен в КСПЗ. Система управления может быть замкнута или разомкнута переключателем SA2, включённым в цепь сигнала с реохорда КСПЗ, являющегося датчиком D температуры объекта.

Для получения динамических частотных характеристик объекта управления установка содержит инфранизочастотный генератор синусоидальных колебаний, сигнал с выхода которого может быть подключён ко входу регулируемого источника питания нагревателя вместо сигнала от ИМ переключателем SA1. Органами управления генератором служат:

переключатель периода колебаний 14 (рис.8) на 11 позиций;

переключатель величины масштаба записи колебаний 12, с помощью которого на высоко-частотном конце диапазона масштаб записи колебаний может быть увеличен в 2 раза;

регулятор смещения нулевой линии колебаний, позволяющий совместить нулевую линию с любой точкой статической характеристики объекта;

индикатор работы генератора 15 с нулём посередине шкалы, измеряющий текущее значение сигнала на выходе генератора относительно нулевой линии;

выключатель 16 для прекращения колебаний генератора в любой момент времени с сохранением на выходе генератора достигнутой величины сигнала.

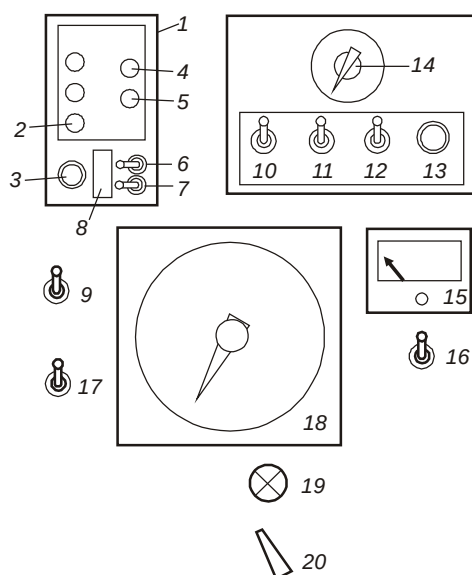


Рис. 8. Размещение элементов АСП на щите управления лабораторной установки:

- 1 - регулятор P25.1;
- 2 - узел k_1 ;
- 3 - ручка задания " $3d_{P25}$ ";
- 4 - установка значения $k_{п-63}$;
- 5 - установка значения $T_{из}$;
- 6 и 7 - переключатель управления и ключ управления станции управления P25.1;
- 8 - ДУП;
- 9 - SA2;
- 10 - включение питания генератора;
- 11 - SA1;
- 12 - переключатель величины сигнала генератора;
- 13 - смещение нулевой линии;
- 14 - переключатель периода колебаний;
- 15 - индикатор работы генератора
- 16 - прекращение колебаний генератора;
- 17 - SA3; 18 - КСПЗ;
- 19 и 20 - сигнальная лампа и выключатель

Для измерения угла фазового сдвига между сигналами на входе и выходе объекта регулирования генератор снабжён схемой, подающей на перо КСПЗ отметку («зарубку»), совпадающую с моментом перехода выходного сигнала генератора через минимальное значение.

Дополнительной функцией лабораторной установки является возможность подключения КСПЗ с помощью переключателя SA3 к датчику положения ДП исполнительного механизма для измерения и записи перемещения последнего.

Все технические данные установки приведены в таблице, закреплённой на щите управления.

3. Программа работы и её выполнение

1). Определить статическую характеристику объекта регулирования по каналу

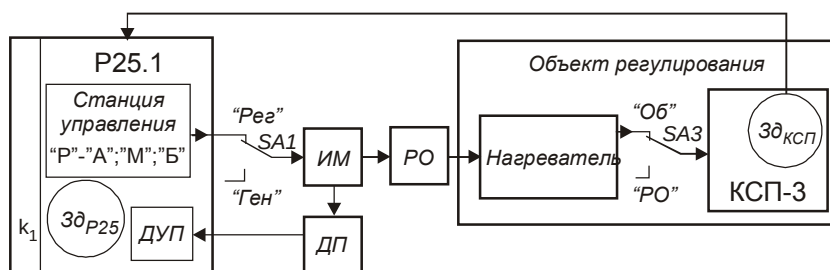


Рис. 9. Схема для получения статической и динамической характеристик объекта регулирования

задания. Для этого собирается схема по рис. 9.

Статическую характеристику снимают в режиме управления «Ручное» (переключатель управления 6 на рис. 8), в котором система управления разомкнута. Переключатель 11 SA1 должен быть установлен в положение «Регулятор», переключатель 17 SA3 – в положение «Объект». Исполнительным механизмом управляют ключом управления 7. Входное воздействие осуществляют, устанавливая исполнительный механизм в различные положения (отсчет в долях полного хода по шкале ДУП 8), выходную величину отсчитывают по шкале КСПЗ в единицах температуры или по записи на диаграмме, предварительно проградуировав её в единицах температуры. Коэффициент передачи объекта будет при этом именованной величиной.

По полученным из опыта значениям следует построить график статической характеристики в координатах «Положение вала ИМ в долях полного хода» – «Температура печи в градусах».

На статической характеристике нужно выделить линейную часть и найти середину линейного участка – центр опыта. Определить диапазон изменения входного параметра в пределах линейной части статической характеристики.

2). При той же схеме по рис. 9 определить динамическую характеристику объекта регулирования, выполнив следующие операции:

а) по показаниям ДУП установить вал ИМ в центр опыта в режиме управления «Ручное»;

б) после прекращения изменения температуры объекта изменить скачком положение вала ИМ на $\pm 0,1 \dots 0,15$ полного хода и сделать записи переходного процесса; после расшифровки записей построить график динамической характеристики;

в) согласно п. 1.1 определить параметры приближённых моделей объекта второго и первого порядков с запаздыванием;

г) определить динамические параметры настройки регулятора по формуле (10).

3). Собрав схему по рис. 10, определить АФЧХ объекта регулирования и рассчитать оптимальные параметры настройки ПИ-регулятора, выполнив

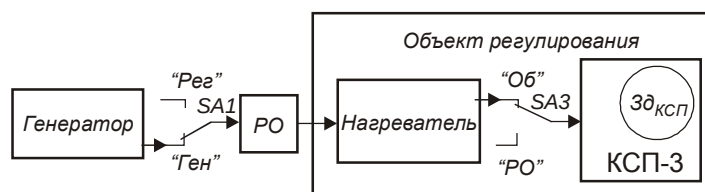


Рис. 10. Схема для получения АФЧХ объекта регулирования

следующие операции.

а) Установить SA1 в положение «Регулятор», SA3 в положение «Объект», переключателем 10 включить питание генератора, поставить переключатель 14 в одно из первых положений (длительные периоды колебаний). Наблюдая колебания генератора по индикатору 15, прекратить переключателем 16 колебания генератора в момент перехода колебаний через нулевую отметку. Переключатель SA1 перевести в положение «Генератор» и регулятором смещения нулевой линии 13 установить выходную величину в центр опыта по окончании переходного процесса.

б) Пустить генератор переключателем 16 и при всех положениях переключателя периода колебаний генератора 14 сделать записи двух-трёх периодов выходной величины. При необходимости на высокочастотном конце диапазона увеличить вдвое амплитуду записи (изменить вдвое масштаб).

в) Обработать регистрограммы, вычислив при каждой частоте амплитуду колебаний выходной величины B и угол фазового сдвига φ , и построить АЧХ, ФЧХ и АФЧХ объекта.

Для построения АФЧХ надо знать отклонение A_0 на нулевой частоте и соответствующую ему величину выходной переменной B_0 (коэффициент передачи объекта $k_{об}$). При этом надо иметь в виду, что амплитуда входных колебаний A_0 одинакова на всех частотах.

Для получения $k_{об}$ надо остановить генератор в момент наибольшего отклонения стрелки индикатора 15 и дождаться окончания переходного процесса (окончания изменения B). Это и будет значение выходной величины B_0 , на которое надо делить амплитуды колебаний B на других частотах, чтобы получить АЧХ, ФЧХ и АФЧХ в относительных величинах.

г) По изложенному в п. 1.3. алгоритму рассчитать оптимальные параметры настройки ПИ-регулятора.

4). Реализовать рассчитанные параметры настройки в АСР в следующих этапах.

а) Для расчёта уставок регулятора Р25.1, т.е. градуировки органов его настройки, собрать схему по рис. 11 для определения изменения положения ИМ и РО в функции изменения сигнала задания регулятору. Для этого надо:

- установить переключатель 11 SA1 в положение «Регулятор»;
- установить переключатель 9 SA2 в положение «Система разомкнута»;
- установить переключатель 17 SA3 в положение «ИМ»;
- установить постоянную времени демпфирования $T_{дф} = 0$;
- отградуировать шкалу КСПЗ в долях перемещения ИМ, устанавливая ИМ по

показаниям ДУП в начальное и конечное положения в режиме управления «Ручное»;

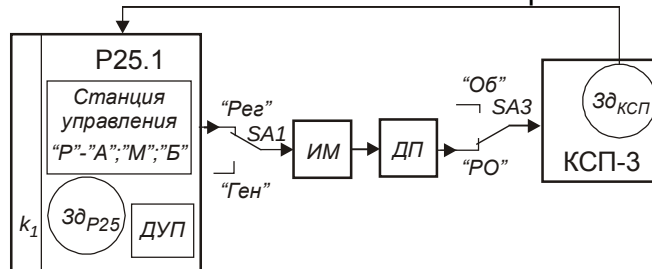


Рис. 11. Схема для градуировки органов настроек регулятора

с помощью задатчика $Зд_{КСП}$ КСПЗ установить указатель задания в положение центра опыта, стрелку ручки 3 «Задание» задатчика $Зд_{Р25}$ Р25.1 поставить на нуль шкалы, в режиме управления «Ручное» поставить ИМ в положение, соответствующее центру опыта, и ручкой «Корректор» Р25.1, выведенной «под шлиц», сбалансировать регулятор;

с помощью ручки 5 установки T_u и кнопочного переключателя Р25.1 задать постоянную времени $T_{из} = 500$ с;

установить ручку 2 узла масштабирования k_1 Р25.1 в положение 1,0, а ручку 4 установки $k_{п-63}$ – последовательно в ходе опытов в требуемые положения;

переключатель режимов работы Р25.1 установить в положение «ПИ-регулирование»;

одновременно переставить стрелку задатчика КСП-3 на +10% и переключателем управления в Р25.1 включить режим «Автоматическое»; Р25.1 отработает рассогласование, и на регистрограмме получится ломаная линия, первый прямолинейный участок которой будет соответствовать пропорциональной и интегральной составляющим переходной характеристики, а второй – только интегральной.

повторить опыт при изменении задания на –10%.

Отношение величины перемещения $РО$ на прямолинейном участке за вычетом интегральной составляющей к величине изменения задания представляет собой коэффициент пропорциональности k_p при заданном положении ручек настройки $k_{п-63}$ и k_1 . Иными словами, k_p и $k_{п-63}$ при $k_1 = 1,0$ связаны соотношением

$$k_p = C k_{п-63},$$

где C – постоянная, которая определяется из проведенного опыта.

Если ручка-указатель $k_{п-63}$ не сбита со своего правильного положения, полученная постоянная C позволяет определять k_p при любом другом положении ручек настройки $k_{п-63}$ и k_1 .

Постоянная времени изодрома $T_{из}$ связана с постоянной времени T_u соотношением

$$T_{из} = C T_u,$$

которое позволяет переградуировать шкалу T_u ручки 5 Р25.1 в единицах времени $T_{из}$.

Если k_p вычисляют как безразмерную величину, перемещение ИМ и изменение задания должны быть безразмерными величинами, C также будет безразмерной

величиной. Если k_p число именованное, C тоже будет именованным. Однако для переградуировки шкалы T_u нужно использовать *только безразмерное значение C* .

б) Собрать АСР температурой печи по рис. 12, для чего:

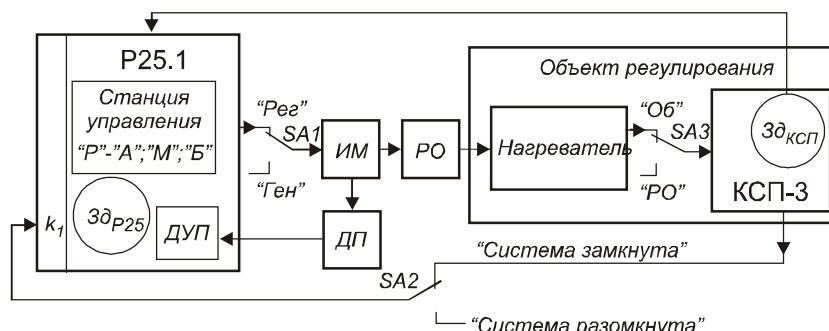


Рис. 12. Схема для исследования поведения системы автоматического регулирования при различных настройках регулятора

установить $SA1$ в положение «Регулятор»; $SA2$ – в положение «Система замкнута»; $SA3$ – в положение «Объект»;

сбалансировать регулятор в центре опыта.

в) Установить рассчитанные ранее двумя методами значения оптимальных параметров настройки на шкалах P25.1 и получить регистрограммы переходного процесса при увеличении и уменьшении задания регулятору. Изменение задания производить задатчиком КСПЗ.

г) Реализовав алгоритм Циглера и Никольса, через параметры критического режима вычислить и реализовать параметры динамической настройки регулятора, получить регистрограммы переходных процессов как описано выше.

5). Построить по регистрограммам графики переходных процессов в АСР и вычислить по ним прямые показатели качества.

6). Сравнить полученные результаты с ожидавшимися и объяснить причины расхождения, если последние есть. Сделать объективные выводы о трудоёмкости использованных методов расчета параметров настройки и близости к результатам, полученным в опытах.

4. Оформление отчёта

Отчёт должен содержать:

- 1) краткое содержание теоретического введения;
- 2) подробное описание хода работы по мере выполнения отдельных этапов;
- 3) статические и динамические характеристики объекта регулирования;
- 4) все геометрические построения к расчету оптимальных параметров настройки регулятора;
- 5) необходимые расчёты;
- 6) регистрограммы всех этапов и результаты их анализа;
- 7) градуировки органов управления P25.1;
- 8) графики переходных процессов, результаты их анализа;

9) выводы по отдельным этапам и по работе в целом.

Контрольные вопросы

1. Аппроксимировать переходную характеристику реального объекта с S-образной переходной характеристикой моделью второго порядка.
2. Как правильно провести график модели первого порядка при известной переходной характеристике реального объекта?
3. Написать передаточную функцию модели первого порядка.
4. Как определить оптимальные параметры настройки ПИ-регулятора, если использована модель первого порядка?
5. Как по годографу АФЧХ объекта определить критическое значение коэффициента передачи П-регулятора?
6. Как по годографу АФЧХ объекта регулирования определить статическую ошибку П-регулятора при критическом коэффициенте передачи регулятора?
7. Как построить АФЧХ разомкнутой системы с ПИ-регулятором по АФЧХ объекта?
8. Изложить алгоритм определения оптимальных динамических настроек ПИ-регулятора по АФЧХ объекта.
9. Определить прямые показатели качества переходного процесса по каналу задания.
10. Как проградуировать шкалу $k_{п-63}$ Р25.1, включенного в систему автоматического регулирования?
11. Как отградуировать шкалу T_u Р25.1 в единицах $T_{уз}$?
12. Изложить алгоритм Циглера и Никольса для определения параметров динамической настройки П- и ПИ-регуляторов.

Библиографический список

1. Ключев А.С. Автоматическое регулирование: Учебник. М.: Высш. шк., 1986, 351 с.
2. Оппельт В. Основы автоматического регулирования. М. – Л.: Госэнергоиздат, 1960, 606с.
3. Теория автоматического управления. Под ред. А.В. Нетушила. Учеб. для вузов. Изд. 2-е, доп. и перераб. М.: Высш. шк., 1976, 400 с.
4. Лукас В.А. Расчет настроечных параметров автоматических систем управления типовыми промышленными объектами. Учеб. пособие. Свердловск, изд. СГИ им. В.В. Вахрушева, 1987, 92с.
5. Малафеев С.И., Малафеев А.А. Основы автоматики и системы автоматического управления: учебник.- М.: ИЦ Академия, 2010. – 383 с.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Автоматический регулятор** 13
Активный токовый сигнал управления 41
Амплитудно-частотная характеристика 14, 92
Амплитудно-фазочастотная характеристика 14, 92, 104
Апериодический процесс регулирования 76
- Балластное звено** 30, 31
- Вероятность безотказной работы** 21
Возмущение 70, 75, 78, 80
Вольтметр фазочувствительный 46
Время регулирования 69, 76
Входная величина 77
Выпрямитель фазочувствительный 18
Выходная величина 77
- Гармонический анализ сигнала** 91
Граничный апериодический процесс 69
Граница устойчивости 70
График (оформление) 7
- Датчик** 13, 85
Демпфирование 29, 84, 110
Динамическая характеристика 12, 103
Дифференциальный манометр 23, 64
Дифференциально-трансформаторный преобразователь 17, 44
Дифференцирование графическое 66
Дифференцирующее звено идеальное 19
-- коэффициент передачи 32
-- реальное 34
Длительность переходного процесса 68, 106
Доверительная вероятность 9
Доверительный интервал 10
- Задающий элемент (задатчик)** 13, 42, 84
Закон регулирования 77, 69
Запаздывание объекта 12, 69, 77, 101
Звено апериодическое 18, 20, 38, 102
-- безынерционное 16, 18
-- дифференцирующее 19
-- запаздывания 102
-- интегрирующее 22
-- пропорциональное 25
Зона возврата 7, 82
-- нечувствительности 3, 82, 86
-- пропорциональности 25
- Измерительный элемент (датчик)** 13
Измеритель рассогласования 13, 17
Измерительный преобразователь 15
Индуктивный преобразователь 17
Интегральный регулятор 25
-- закон регулирования 25, 77
-- передаточная функция 26, 32
-- постоянная времени интегрирования 26, 27
Изодромный регулятор 26
-- передаточная функция 26
-- канала обратной связи 33, 34, 35
Исключающая блокировка 22
Исполнительный механизм 21, 55
-- электрический 21
-- многооборотный 22
-- однооборотный 55
-- схемы включения 22
-- пусковое устройство 22, 55, 84
Исполнительный элемент 13
Исполнительные устройства 21
- Качество процесса регулирования** 69, 75
Конечный выключатель 22, 58
- Корректирующие элементы 13
Коэффициент передачи объекта 11, 72
-- дифференциальный 11
Коэффициент передачи элемента 14, 73, 93
Кривая разгона 12, 78
Кривые градуировки шкал 7
Критерий Рейнольдса 64
- Максимальное динамическое отклонение** 68, 76
Манометр водяной двухтрубный 20
Межсистемный преобразователь 15
Метод частотного анализа 91, 98
Метод характеристик разгона 90
Метод экспоненциальных возмущений 93
Механический преобразователь 15
Милливольтметр автоматический 21
Мост сопротивлений автоматический 21
- Номинальная статическая характеристика** 20
Нормирующий преобразователь 15
- Объект управления** 11, 101
Определение настроек ПИ-регулятора 100
Оси координат 7
Оформление отчёта 7
Ошибка регулирования 25
- Пассивный сигнал управления** 23
Передаточная функция И-регулятора 26, 32
-- исполнительного механизма 31, 82
-- П-регулятора 25
-- ПИ-регулятора 26, 33
-- ПИД-регулятора 28, 35
Перерегулирование 68, 76
Площадь проходного сечения регулирующего органа 24
Поворотная заслонка регулирующая 23
Показатели качества регулирования 68, 106
Показатель тепловой инерции 20
Порог отпускания 37, 82
Постоянная времени дифференцирования 27
-- изодрома 26, 104
-- интегрирования 26
-- исполнительного механизма 31
-- объекта 12, 68, 75, 77, 101, 102
-- предварения 28
Потенциометр автоматический 20
Потери на трение по Фаннингу 64
Преобразователь измерительный 15
-- индуктивный 17
-- межсистемный 15
-- механический 15
-- первичный 13
-- трансформаторный 17
-- унифицированный 46
-- электромагнитный 17
Пропорциональный регулятор (П-регулятор) 25
-- временная характеристика 31
-- закон регулирования 25, 69
-- канал обратной связи 31
-- структурная схема 31
Пропорционально-интегральный регулятор (ПИ-регулятор)
-- идеальный 26, 90
-- передаточная функция 26
-- реальный 32
-- структурные схемы 31
-- балластное звено 29, 30, 31, 33
-- передаточная функция 26, 34
-- канала обратной связи 33, 34, 35
Пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор (ПИД-регулятор) 28
-- передаточная функция 28

— — — балластного звена 35

Пропускная способность 61
Пропускная характеристика 61

Распределение Стюдента 9

Рассогласование 82

Расход регулирующей среды 23, 62
— вещества 63

Резистивный элемент 16

Регулирующая поворотная заслонка 23, 63

Регулирующий орган 23, 64, 67

Регулирующее устройство интегральное 25

— — пропорциональное 24

— — пропорционально-интегральное 26

— — с импульсным выходным сигналом 37

— — структурная схема 13

Регулятор автоматический 13

— астатический 26, 27, 29

— статический 24, 28

Регуляторы линейные 24

— — балластное звено 29, 30, 31, 35

— — коэффициент передачи 25, 89, 110

Релейный элемент 68

— — зона нечувствительности 37, 82

— — зона возврата 37

Релейно-импульсный регулятор 36, 82

— — время первого включения 40, 85, 91

— — зона возврата 37, 82

— — зона нечувствительности 37, 82, 85

— — коммутатор выходного напряжения 84

— — передаточная функция канала обратной связи 38, 82

— — скользящий режим 36, 93

— — скорость связи 39, 90, 91

— — время импульса 36, 38, 83, 85

— — время паузы 36, 38, 83

— — коэффициент заполнения импульсов 36, 39

— — средняя скорость исполнительного механизма 36

— — эквивалентная скорость исполнительного механизма 36

Рисунки (оформление) 8

Ручная перестановка 25

Сельсины 18, 49

— индикаторный режим работы 51

— трансформаторный режим работы 50

Среднее арифметическое 8, 47

— квадратичное 8

Скорость связи 39, 90

Случайная погрешность 8

Средняя квадратичная ошибка 8, 48

Статическая характеристика 14, 80, 87

Степень затухания 106

Таблица (оформление) 8

Тахогенератор 18, 78

Температурный коэффициент сопротивления 19

Терморезистор 19

Типовые оптимальные процессы регулирования 69

Усилитель безынерционный 30

Усилительно-преобразовательный элемент 84

Условный коэффициент сопротивления линии 23, 62

Условный проход 61

Устройство задающее токовое 41

Управляющее воздействие 11

Фазочастотная характеристика 13

Характеристика амплитудно-фазочастотная 14

— динамическая 12

— пропускная 61

— разгона 12

— статическая 14

— фазочастотная 14

Частота гармонических колебаний 14, 45

Чувствительность потенциометрического преобразователя 16

Шиббер 23, 65

Электромагнитный преобразователь 16

Элемент потенциометрический 15

— сравнения 13

— усилительно-преобразовательный 84

Учебное текстовое электронное издание

Артамонов Юрий Спиридонович

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ

Лабораторный практикум

Издается полностью в авторской редакции

1,28 Мб

1 электрон. опт. диск

г. Магнитогорск, 2014 год

ФГБОУ ВПО «МГТУ»

Адрес: 455000, Россия, Челябинская область, г. Магнитогорск,
пр. Ленина 38

ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»
Кафедра автоматизированных систем управления
Центр электронных образовательных ресурсов и
дистанционных образовательных технологий
e-mail: ceor_dot@mail.ru