

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра систем управления

ЛОКАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИКИ

Методическое пособие
для студентов специальности I–53 01 07 «Информационные технологии
и управление в технических системах»
факультета заочного, вечернего и дистанционного обучения

Содержание

1. Программа курса.....	3
2. Литература.....	5
3. Общие методические указания.....	5
4. Методические указания к изучению разделов программы.....	7
5. Курсовая работа.....	17
6. Приложение.....	22

ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

1. Введение

Общие сведения о локальных автоматических системах. Назначение и место локальных автоматических систем в управлении производственными процессами. Локальные системы как элементы сложных систем автоматического и автоматизированного управления. Классификация локальных автоматических систем и основные функции, выполняемые ими.

2. Основные элементы локальных автоматических систем

2.1. Измерительные элементы и датчики

Первичные (измерительные) преобразователи электрических и неэлектрических величин: перемещения, скорости, ускорения, частоты вращения, температуры, давления, усилия и др.

Вторичные (нормирующие) преобразователи. Преобразователи с унифицированным аналоговым выходным сигналом, работающие по принципу силовой компенсации. Датчики с импульсным и цифровым выходом. Статические и динамические характеристики. Основные требования, предъявляемые датчикам, и соображения по их выбору.

2.2. Исполнительные элементы

Электрические, гидравлические и пневматические исполнительные элементы, их сравнительная характеристика и области применения.

Статические и динамические характеристики исполнительных элементов. Основные требования, предъявляемые к ним. Выбор типа исполнительного элемента по условиям эксплуатации, мощности, быстродействию, габаритам.

2.3. Усилители и преобразователи сигналов

Усилители информационных сигналов. Обеспечение стабильности характеристик. Фазочувствительные выпрямители. Основные типы усилителей мощности и их сравнительная оценка. Статические и динамические характеристики усилителей. Выбор типа усилителя и его согласование с цепью управляющего сигнала и исполнительным элементом.

2.4. Автоматические регуляторы и агрегатные комплексы

Промышленные автоматические регуляторы и их элементы. Приборы системы ГСП. Агрегатный принцип построения. Агрегатные комплексы технических средств, применяемые в локальных системах автоматики. Аппаратура комплексов АКЭСР, «Каскад». Комплекс технических средств для построения локальных информационно–управляющих систем – КТСЛИУС.

3. Анализ объектов управления

Классификация объектов управления. Объекты с непрерывными и дискретными процессами. Возмущения и помехи, действующие на объект управления, их характеристики. Управляющие воздействия и их выбор. Анализ объектов управления и их математическое описание. Методы определения математических моделей. Определение статических и динамических математических моделей аналитическим методом. Экспериментальные методы определе-

ния математических моделей по временным (переходным) и частотным характеристикам.

4. Промышленные системы автоматического регулирования

Основные особенности промышленных объектов и систем регулирования. Особенности расчета и реализации промышленных систем регулирования. Оценка точности регулирования и качества работы в переходных режимах. Выбор закона регулирования и расчет параметров настройки регулятора по заданным требованиям к качеству регулирования. Локальные промышленные системы регулирования как подсистемы централизованного управления.

5. Следящие системы

Функциональные схемы и основные элементы следящих систем. Основные требования и показатели качества работы.

Особенности выбора исполнительного электродвигателя и передаточного числа редуктора в электромеханических следящих системах. Выбор измерителя рассогласования.

Статический расчет следящей системы и определение требуемого порядка астатизма и коэффициента усиления. Ошибки по положению, скорости и ускорению и их связь с параметрами системы.

Анализ динамики следящих систем и синтез параметров корректирующих устройств. Типовые желаемые передаточные функции и частотные характеристики, определение их параметров по заданным требованиям к точности и качеству регулирования. Способы коррекции и методы синтеза корректирующих устройств. Реализация корректирующих устройств.

Методы повышения статической и динамической точности. Двухотсчетные измерители рассогласования. Следящие системы с комбинированным управлением. Частичная инвариантность, условия повышения порядка астатизма. Методы расчета следящих систем с комбинированным управлением.

6. Системы управления электроприводами

Принципы построения систем управления электроприводами. Системы управления электроприводом с одним регулятором. Многоконтурные системы управления, построенные по принципу подчиненного регулирования. Методы расчета систем управления электроприводами. Методика приближенного расчета на технический оптимум. Расчет систем управления электроприводом методом типовых нормированных уравнений.

7. Системы программного управления

Классификация систем программного управления. Программное управление в функции времени. Системы программно-логического управления. Системы циклового, позиционного и контурного программного управления положением. Структурные схемы и основные элементы систем программного управления. Внутренние и внешние запоминающие устройства и их функции. Разработка алгоритмов и программ функционирования. Реализация устройств программного управления с применением микропроцессоров и микроЭВМ.

ЛИТЕРАТУРА

Основная:

1. Солодовников В.В., Плотников В.Н., Яковлев А.В. Основы теории и элементы систем автоматического регулирования. – М.: Машиностроение, 1985.
2. Основы проектирования следящих систем / Под ред. Н.А. Лакоты. – М.: Машиностроение, 1978.
3. Расчет автоматических систем / Под ред. А.В. Фатеева. – М.: Высш.шк., 1973.

Дополнительная:

4. Горбачев А.Д. и др. Проектирование и надежность систем автоматики и телемеханики. –Мн.: Выш.школа, 1981.
5. Ахметжанов А.А., Кочемасов А. Следящие системы и регуляторы. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
6. Михайлов О.П. Автоматизированный электропривод станков и промышленных роботов. – М.: Машиностроение, 1990.
7. Сафонов Ю.М. Электроприводы промышленных роботов. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
8. Красовский А.Я., Хаджинов М.К. Расчет многоконтурных систем управления электроприводами. – Мн., БГУИР, 1996.
9. Наладка средств автоматизации и автоматических систем регулирования: Справочное пособие / Под ред. А.С. Ключева. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
10. Руководство по проектированию систем автоматического управления / Под ред. В.А. Бесекерского. – М.: Высш. шк., 1983.
11. Промышленные приборы и средства автоматизации: Справочник / Под ред. В.В. Черенкова. – Л.: Машиностроение. 1987.
12. Автоматические приборы, регуляторы и вычислительные системы: Справочное пособие / Под ред. Б.Д. Кошарского. – Л.: Машиностроение, 1976.
13. Коровин Б.Г. и др. Системы программного управления промышленными установками и робототехническими комплексами. – Л.: Энергоатомиздат, 1990.

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Целью изучения дисциплины «Локальные системы автоматики» является формирование у студентов знаний и навыков, позволяющих ориентироваться во всем многообразии решаемых задач автоматического управления объектами различной физической природы, а также различными технологическими процессами. Для этого они должны **знать**:

- принципы построения локальных автоматических систем;
- технические средства для их реализации: измерительные элементы и датчики различных физических величин, усилители и преобразователи сигнала;

лов, типовые автоматические регуляторы, исполнительные механизмы и устройства;

- методы анализа автоматических систем;
- способы коррекции и методы синтеза корректирующих устройств.

В процессе изучения дисциплины студенты должны научиться и *уметь*:

- проводить анализ объектов управления и определять их основные статические и динамические характеристики;
- определять математические модели объектов управления, функциональных узлов и элементов автоматических систем;
- проводить анализ точности и качества регулирования в переходных режимах работы;
- синтезировать корректирующие устройства, обеспечивающие заданное качество регулирования;
- самостоятельно применять теоретические положения при решении конкретных задач разработки и проектирования локальных автоматических систем.

Теоретической основой курса являются дисциплины «Теория автоматического управления», «Математические основы теории систем».

Курс тесно связан с дисциплинами «Электроника и микросхемотехника», «Элементы и устройства автоматики».

Курс «Локальные системы автоматики» изучается в 10-м семестре. Основой изучения курса является самостоятельная работа с рекомендованной литературой и выполнение курсовой работы.

В настоящее время отсутствует учебник и учебные пособия, полностью соответствующие программе данной дисциплины. Поэтому рекомендуется несколько источников, чаще всего из основной литературы. Однако изложение некоторых вопросов в основной литературе отсутствует или они более полно изложены в дополнительной литературе. Поэтому для изучения материала дисциплины желательна проработка как основных, так и дополнительных литературных источников.

Очные занятия предполагается проводить по наиболее важным и сложным разделам программы, указанным в таблице.

Таблица

№ п/п	Тема занятий	Количество часов	
		лекции	практические занятия
1.	Математическое описание объектов управления и методы определения математических моделей	2	2
2.	Выбор исполнительного двигателя	2	–
3.	Синтез корректирующих устройств	2	4
4.	Расчет автоматических систем с комбинированным управлением	2	–
ИТОГО		8	6

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ИЗУЧЕНИЮ РАЗДЕЛОВ ПРОГРАММЫ

1. Введение

Локальные автоматические системы являются основой автоматизации производственных процессов. Как и любая система управления, они представляют собой совокупность объекта управления, устройства управления и внешней среды. Действие системы управления направлено на обеспечение работы объекта в заданном режиме с заданными показателями качества при наличии дестабилизирующего влияния внешней среды. Непосредственно с объектом управления взаимодействуют элементы нулевого уровня, включающие в себя датчики и исполнительные механизмы. Измерительная информация с контура нулевого уровня поступает в элементы первого уровня, в качестве которых могут выступать автоматические регуляторы отдельных процессов. Технические средства нулевого и первого уровней иерархии называют локальными ввиду сравнительной ограниченности решаемых ими задач управления, а также их размещения на объектах. Соответственно автоматические системы, состоящие из элементов нулевого и первого уровней иерархии и выполняющие функции регулирования и управления отдельными процессами и агрегатами, называют *локальными системами автоматики*. В иерархии систем управления они занимают нижний уровень и выполняют функции автономной стабилизации и регулирования отдельных технологических переменных, программного и программно–логического управления оборудованием, а также автоматического контроля и измерения. В сложных многоуровневых системах автоматического и автоматизированного управления локальные системы автоматики выполняют функции исполнительных устройств, реализующих воздействия на объект управления.

Приступая к изучению данного курса, необходимо четко представлять назначение и функции, выполняемые локальными системами автоматики, принципы их построения и основные требования, предъявляемые к ним. Следует понимать, что именно локальные системы автоматики осуществляют непосредственное управление объектом и реализуют требуемые управляющие воздействия. Без надежной и качественной работы локальных автоматических систем невозможно реализовать управление сложными технологическими агрегатами и установками, осуществить комплексную автоматизацию технологических процессов.

[1, с. 9 – 33; [2], с. 7 – 30].

Вопросы для самопроверки

1. Какое место в иерархии систем управления занимают локальные автоматические системы?
2. Какие функции выполняют локальные системы автоматики?

3. Из каких функционально необходимых элементов состоят системы автоматического регулирования?
4. Какие системы относятся к локальным системам управления и почему?
5. Как классифицируются локальные системы автоматизации?
6. Что такое следящая система?
7. Какие системы относятся к системам программного и программно-логического управления?
8. Приведите примеры локальных автоматических систем.

2. Основные элементы локальных автоматических систем

При изучении этого раздела необходимо ознакомиться с выпускаемыми промышленностью элементами и устройствами, используемыми для построения автоматических систем: датчиками различных физических величин, усилителями, исполнительными устройствами. Для этих целей промышленностью выпускается ряд приборов и устройств, относящихся к системе ГСП (Государственная система промышленных приборов и средств автоматизации), которые по своему назначению подразделяются на четыре группы:

- устройства получения и первичного преобразования информации;
- устройства передачи информации;
- устройства обработки информации;
- устройства использования информации.

ГСП основана на стандартных внутренних и внешних связях, рациональной структуре и конструктивных формах в блочно-модульном исполнении ее устройств. В изделиях ГСП обеспечивается информационная, функциональная, метрологическая, конструктивная и эксплуатационная совместимость, что позволяет на их основе создавать различные системы автоматического регулирования, используя блочно-модульный принцип построения. Информация по серийно выпускаемым датчикам, регуляторам, агрегатным комплексам приборов содержится в [9, 11, 12].

Требования к функциональным элементам локальных автоматических систем обычно не формулируются, а вытекают из общих требований к системе. Это усложняет задачу их выбора и обоснования, так как необходимо одновременно учитывать многие свойства и показатели, иногда весьма противоречивые. Поэтому особое внимание необходимо уделить изучению основных показателей и характеристик приборов и устройств и четко представлять себе, какие из них являются основными, определяющими в каждой функциональной группе устройств для удовлетворения требований, предъявляемых к системе регулирования в целом. Это позволит технически грамотно и обоснованно выбрать такие элементы, которые наиболее полно удовлетворяют требованиям, предъявляемым к разрабатываемой системе.

[1, с. 303 – 495; 2, с. 78 – 156; 4, с. 27 – 44; 5, с. 14 – 60, 108 – 180; 9, с. 97 – 109; 11; 12].

Вопросы для самопроверки

1. Какие функции выполняют измерительные и нормирующие преобразователи?
2. Поясните принцип действия преобразователей, работающих по принципу силовой компенсации.
3. Какие основные особенности изделий ГСП?
4. Перечислите основные требования, предъявляемые к датчикам.
5. Какие приборы используются в качестве измерителей рассогласования следящих систем?
6. Дайте сравнительную характеристику и назовите области применения электрических, гидравлических и пневматических исполнительных механизмов.
7. Перечислите достоинства и недостатки транзисторных и тиристорных усилителей мощности.
8. Какие основные требования предъявляются к усилителям мощности, предварительным усилителям и преобразователям?
9. Что представляют собой агрегатные комплексы технических средств?
10. По каким параметрам должна обеспечиваться совместимость элементов и устройств для реализации агрегатного принципа построения автоматических систем?
11. Объясните сущность агрегатного принципа построения автоматических систем.

3. Анализ объектов управления

Объекты управления автоматических систем весьма разнообразны как по физической природе, так и по характеру изменения регулируемых величин. В качестве объектов управления могут выступить: двигатель, станок, робот-манипулятор, паровой котел, турбина, печь, аппарат химической промышленности, производственный участок, цех и др. Различны цели управления объектами и требования к качеству регулирования в установившихся и переходных режимах работы.

В любом объекте управления существуют определенные функциональные зависимости выходных величин объекта (регулируемых величин) от управляющих и возмущающих воздействий. Основная задача управления объектом состоит в том, чтобы исходя из целей управления определить оператор (или алгоритм) управления, обеспечивающий заданные требования к качеству регулирования, и синтезировать устройство управления для реализации этого оператора. Для решения этой задачи необходимо выявить возможные способы управления объектом и определить функциональные зависимости между регулируемыми величинами и возможными управляющими воздействиями и возмущениями. Основной задачей анализа объекта управления является получение его математических моделей, т.е. формализованного математического описания процессов, происходящих в объекте, и устанавливающего зависимо-

сти между регулируемымыми переменными управляющими воздействиями и возмущениями.

Математические модели могут быть представлены в различной форме: дифференциальные или операторные уравнения, передаточные функции, структурные схемы и др. При определении математических моделей всегда необходимо учитывать, с одной стороны, противоречивые требования полноты и точности модели, а с другой стороны – ее сложность и громоздкость, удобство пользования. Желательно получить математическую модель, максимально простую и наглядную, описывающую работу объекта с достаточной точностью. Для этого необходимо освоить различные методы определения математических моделей, научиться определять модели аналитически, уметь поставить эксперимент и определить модель по экспериментальным данным, а также оценить адекватность полученной модели реальному объекту.

[1, с. 33 – 41; 2, с. 31 – 68; 3, с. 4 – 42; 4, с. 8 – 26].

Вопросы для самопроверки

1. Что собой представляют объекты управления? Приведите примеры.
2. В чем отличие управляющих и возмущающих воздействий?
3. Из каких соображений выбираются управляющие воздействия?
4. Что такое математические модели и в какой форме они могут быть представлены?
5. Чем отличаются статические и динамические математические модели?
6. Как из динамической математической модели получить статическую?
7. Какие характеристики объекта называются статическими и какие параметры можно по ним определить?
8. Перечислите последовательность действий при аналитическом определении математической модели.
9. Напишите передаточные функции типовых динамических звеньев и изобразите вид их переходных и частотных (амплитудных и фазовых) характеристик.
10. Как определить вид и параметры передаточной функции по амплитудной и фазовой частотным характеристикам?

4. Промышленные системы автоматического регулирования

Любую промышленную систему автоматического регулирования можно представить в виде трех основных элементов: объекта управления (технологического процесса), устройства управления (регулятора) и внешней среды, находящихся во взаимодействии между собой. Регулируемыми переменными в промышленных объектах являются различные физические величины, такие как температура, давление, расход вещества, частота вращения, скорость перемещения, положение, усилие, химический состав, уровень жидких и сыпучих материалов, влажность и др. Несмотря на большое разнообразие промыш-

ленных объектов и локальных систем управления ими? набор алгоритмов функционирования этих систем ограничен, что создало предпосылки к разработке и выпуску промышленностью типовых технических средств, пригодных для использования в различных отраслях промышленности.

Локальные системы управления промышленными объектами строятся по типовым структурам с использованием типовых регуляторов и устройств, серийно выпускаемых промышленностью. В основу построения таких систем заложен агрегатный принцип. Поэтому основной задачей при их разработке и расчете является выбор типа регулятора, определение закона регулирования (одного из типовых, реализуемых регулятором) и расчет параметров его настройки.

Для успешного решения задач автоматизации технологических процессов необходимо знать особенности промышленных объектов, методику выбора закона регулирования и расчета параметров настройки регулятора для различных объектов: статических (с самовыравниванием), астатических, при наличии запаздывания.

Следует иметь в виду, что реальные законы регулирования, реализуемые регуляторами, отличаются от идеальных. При расчетах передаточную функцию реального регулятора обычно представляют в виде произведения передаточной функции идеального регулятора и балластного звена. Последнее представляет собой аperiodическое звено первого или второго порядка, коэффициент передачи и постоянные времени которого зависят от реализуемого закона регулирования и параметров настройки регулятора.

Для простых объектов, описываемых типовыми передаточными функциями первого и второго порядков, в литературе по промышленным регуляторам приводятся рекомендации, расчетные соотношения, номограммы и графики для определения параметров настройки регулятора, обеспечивающего заданное качество регулирования. Следует познакомиться с ними и уметь ими пользоваться в практических расчетах.

[4, с. 110 – 172; 9, с. 72 – 96].

Вопросы для самопроверки

1. Перечислите основные особенности промышленных объектов.
2. Как реализуются промышленные системы автоматического регулирования?
3. Какие законы регулирования реализуются типовыми промышленными регуляторами?
4. Чем отличаются реально реализуемые законы регулирования от идеальных?
5. Что называется областью нормальной работы (ОНР) регулятора?
6. Как влияет чистое (транспортное) запаздывание на качество регулирования?
7. Какие законы регулирования можно использовать для статических и какие – для астатических объектов?

8. Из каких соображений выбирается закон регулирования?

9. Чем определяется точность регулирования в установившемся режиме работы?

10. Как влияют коэффициент передачи и постоянные времени регулятора на точность и качество регулирования в переходных режимах?

5. Следящие системы

Следящие системы являются наиболее распространенным классом систем автоматического регулирования. В то же время сами они весьма разнообразны и классифицируются по ряду признаков. Наиболее распространенный класс следящих систем – электромеханические, осуществляющие линейные и угловые перемещения различных механизмов. Объектом управления в таких системах является исполнительный двигатель совместно с приводимым в движение механизмом (нагрузкой).

Приступая к изучению этого раздела, необходимо ознакомиться с классификацией следящих систем, изучить основные требования, предъявляемые к ним, и методику выбора основных функциональных элементов: исполнительного двигателя, механической передачи (редуктора), усилительно–преобразовательных элементов, измерителя рассогласования (датчика). Следует иметь в виду, что требования к отдельным функциональным элементам отдельно не формулируются, а вытекают из общих требований к следящей системе и условий ее работы. Это усложняет задачу выбора элементов, которые необходимо рассматривать с позиций их влияния на качественные показатели и характеристики системы. При этом необходимо четко представлять, какие требования и показатели являются основными, доминирующими для каждой функциональной группы элементов, а какие – второстепенными.

Нужно повторить разделы анализа и синтеза автоматических систем из курса «Теория автоматического управления» и научиться применять их на практике. Особое внимание следует уделить приближенным инженерным методам анализа и синтеза, позволяющим, хотя и приближенно, но достаточно просто оценивать точность и качество регулирования в переходных режимах работы.

Точность следящих систем обычно оценивается по установившейся или максимальной ошибке слежения, которая определяется как методической, так и инструментальной ошибкой элементов.

Методическая ошибка зависит от структуры системы, порядка астатизма, закона изменения управляющего и возмущающих воздействий, места их приложения. Эту ошибку можно уменьшать путем изменения структуры системы (повышение порядка астатизма, применение комбинированного управления). Инструментальная ошибка определяется погрешностями элементов системы (погрешность измерителя рассогласования, дрейф нуля усилителя, люфт редуктора и др.). Она не может быть компенсирована применением корректи-

рующих устройств, и борьба с нею должна вестись лишь путем применения более совершенных и точных элементов.

Качество регулирования в переходных режимах работы (быстродействие, характер переходного процесса, величина максимального перерегулирования и другие показатели) зависит от параметров системы (коэффициента усиления, постоянных времени) и может изменяться с помощью корректирующих устройств. Следует изучить достоинства и недостатки различных видов устройств, методы их расчета, возможные схемные реализации в виде пассивных и активных электрических цепей, а также условия согласования с элементами системы.

Одним из наиболее эффективных способов получения высокоточных, прецизионных следящих систем является использование комбинированного управления. Следует изучить вопросы теории инвариантности, уяснить принцип комбинированного управления и возможности его практической реализации. Необходимо изучить методы расчета систем с комбинированным управлением и уметь применять их на практике.

[1, с. 123 – 174; 2, с. 157 – 254; 3, с. 69 – 116; 10, с. 39–61].

Вопросы для самопроверки

1. Какие автоматические системы относятся к следящим?
2. Какой принцип автоматического управления используется в следящих системах?
3. Перечислите и объясните назначение основных функциональных элементов следящей системы.
4. Как определить необходимую мощность исполнительного двигателя для следящей системы?
5. Из каких соображений выбирается передаточное число редуктора?
6. Как проверить правильность выбора исполнительного двигателя?
7. Как проверить двигатель на нагрев?
8. За счет чего повышается точность при использовании двухотсчетных измерителей рассогласования?
9. Для чего нужен грубый отсчет?
10. Какие требования предъявляются к усилителям мощности следящих систем?
11. Приведите сравнительную оценку транзисторных и тиристорных усилителей мощности.
12. Как определить установившуюся методическую ошибку следящей системы?
13. Что такое коэффициенты ошибок и как их определить по передаточной функции по ошибке $K_{eg}(p)$; по ЛАХ разомкнутой системы $L(\omega)$?
14. Какими способами можно повысить точность следящей системы (статическую, динамическую)?

15. Перечислите достоинства последовательных корректирующих устройств и корректирующих обратных связей.
16. В чем заключается принцип комбинированного управления?
17. Какие системы называются инвариантными?
18. Напишите условие абсолютной инвариантности следящей системы с комбинированным управлением.
19. Почему нельзя реализовать условие абсолютной инвариантности?
20. Что такое частичная инвариантность?
21. Как определить вид передаточной функции компенсирующей цепи и ее параметры, обеспечивающие повышение астатизма системы на один порядок, на два порядка?
22. Как влияет комбинированное управление на устойчивость?
23. Какими методами можно рассчитывать системы с комбинированным управлением? В чем их суть?

6. Системы управления электроприводами

Электроприводы являются одним из наиболее распространенных объектов автоматических и автоматизированных систем управления.

Совершенствование технологического оборудования и технологии обработки приводит к повышению требований к точности регулирования частоты вращения и угла поворота (перемещения) при изменении нагрузки в широком диапазоне.

В замкнутых системах автоматического управления электроприводами, содержащих один общий регулятор, повышение качества регулирования достигается за счет введения последовательных корректирующих устройств и корректирующих обратных связей по скорости, ускорению, току якоря (токовая отсечка). Однако получить требуемое высокое качество регулирования в таких системах крайне затруднительно, так как выходной сигнал регулятора зависит сразу от нескольких переменных, что делает практически невозможным регулирование одной переменной независимо от других, усложняет расчет и настройку системы управления.

Современные системы управления электроприводами строятся в виде многоконтурных систем подчиненного регулирования с последовательным включением регуляторов: тока, частоты вращения, положения. При этом задающим сигналом регулятору тока является выходной сигнал регулятора скорости. В свою очередь регулятор скорости получает задание от регулятора положения.

Такое построение системы управления позволяет вести раздельное регулирование переменных и раздельную настройку контуров, начиная с внутреннего токового, что упрощает расчет и настройку системы и позволяет получить высокое качество регулирования.

В литературе по электроприводам расчет параметров настройки регуляторов рекомендуют вести на «технический оптимум», когда каждый контур

стремятся свести к эквиваленту колебательного звена с коэффициентом затухания $\xi = 0,7$. При этом для упрощения расчетов пренебрегают обратной связью по ЭДС двигателя, а при расчете внешних контуров полученные передаточные функции колебательных звеньев для внутренних контуров заменяют передаточными функциями инерционных звеньев первого порядка. Следует уяснить, что эта методика расчета является приближенной, а полученные параметры настройки регуляторов, обеспечивая локальные оптимумы для отдельных контуров, не будут оптимальными для системы в целом.

Лучшие результаты дает методика расчета методом типовых нормированных уравнений, основные положения которой изложены в [8]. Она позволяет произвести расчет систем подчиненного регулирования без дополнительных упрощений, причем рассчитанные параметры настройки регуляторов обеспечивают не локальные оптимумы для отдельных контуров, а глобальный оптимум системы регулирования в соответствии с качественными показателями, определяемыми выбранным нормированным уравнением. Необходимо научиться определять коэффициенты желаемого характеристического уравнения, выбирать законы регулирования и вычислять параметры настройки регуляторов, обеспечивающие получение нужных коэффициентов характеристического уравнения, а следовательно, и заданного качества регулирования.

[6, с. 129 – 147; 7, с. 63 – 78; 8, с. 3 – 26].

Вопросы для самопроверки

1. Какие системы называются системами подчиненного регулирования?
2. В чем достоинства систем подчиненного регулирования?
3. Какие переходные процессы считаются технически оптимальными?
4. Какова должна быть передаточная функция замкнутой системы для получения технически оптимального переходного процесса?
5. Какие недостатки присущи методу расчета на технический оптимум?
6. Какие уравнения называются нормированными?
7. Как определить коэффициент нормирования?
8. Как вычислить коэффициенты желаемого характеристического уравнения?
9. Как вычислить параметры настройки регуляторов методом типовых нормированных уравнений?

7. Системы программного управления

К системам программного управления (СПУ) относятся такие системы, в которых управляющее воздействие изменяется по заранее заданному закону – программе. Основными составными частями систем программного управления являются: программное устройство, система воспроизведения программы (следящая система) и объект управления.

По способу задания программы СПУ подразделяются на аналоговые и дискретные.

В аналоговых СПУ информация представляет непрерывную функцию времени, что обеспечивает непрерывное воздействие на объект. Формирование программы осуществляется с помощью копиров (кулачков) или в виде записи непрерывных функций времени на программоносителях (магнитных лентах).

В дискретных СПУ управляющая информация записывается в виде ряда дискретных точек, а требуемые промежуточные значения формируются с помощью интерполяторов. Программные устройства таких систем представляют собой цифровую часть системы. Программы записываются на перфолентах, магнитных лентах и дисках, ПЗУ, ППЗУ и других носителях для записи цифровой информации.

Устройства воспроизведения программы в этих СПУ представляют собой высокоточные цифровые или аналоговые следящие системы. Дискретные СПУ получили наибольшее распространение и используются в различных отраслях производства (станки с ЧПУ, автоматические линии, роботы, гибкие производственные модули и др.).

Формирование управляющих воздействий в СПУ может осуществляться в функции времени или в функции координат объекта: положения – цикловые системы, перемещения – позиционные системы, перемещения и его производные (скорости, ускорения) – контурные системы. Последние являются наиболее сложными как с точки зрения алгоритма работы, так и с точки зрения требований, предъявляемых к системе управления. Они нашли широкое применение в станках с ЧПУ, промышленных роботах, ГПМ, ГПС и др.

При изучении этого раздела необходимо усвоить принципы построения систем программного управления, способы формирования и задания управляющих программ, возможные варианты реализации управляющих устройств: с жесткой логикой (NC – numerical control) и гибкой логикой (CNC – computer numerical control).

Разработка алгоритмов функционирования и создание управляющих программ является одним из наиболее трудоемких и ответственных этапов создания СПУ.

Следует изучить правила кодирования управляющей информации для систем ЧПУ и ее записи на программоносителях. Особое внимание следует уделить изучению основных функциональных элементов СПУ, выполняемых ими функций и основных требований, предъявляемых к ним.

[13]

Вопросы для самопроверки

1. Какие автоматические системы относятся к системам программного управления? Приведите примеры.
2. Из каких основных частей состоит любая СПУ?

3. Поясните принцип построения и особенности работы СПУ с управлением по положению (цикловых).
4. Перечислите достоинства и недостатки цикловых СПУ.
5. Какие СПУ называются позиционными?
6. В чем заключаются особенности работы контурных СПУ?
7. В чем отличие датчиков положения от датчиков перемещения?
8. В чем отличие СПУ с постоянной структурой (НС) от систем с программной реализацией алгоритмов управления (СНС)?
9. Что представляют собой внутренние и внешние запоминающие устройства СПУ? Какие функции они выполняют?

КУРСОВАЯ РАБОТА

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИОННАЯ СЛЕДЯЩАЯ СИСТЕМА

1. Исходные данные

Рассчитываемая электромеханическая позиционная следящая система осуществляет линейное или угловое перемещение объекта (производственного механизма), характеризующегося следующими параметрами:

– *при линейном перемещении:*

m_n – масса нагрузки;

F_n – сила сопротивления движению;

ℓ_n – величина перемещения;

V_n – скорость движения;

\dot{V}_n – ускорение движения;

– *при угловом перемещении:*

J_n – момент инерции нагрузки;

M_n – статический момент сопротивления;

Ω_n – угловая скорость движения;

$\dot{\Omega}_n$ – угловое ускорение движения.

Требования к качеству регулирования:

ε_{\max} – максимальная ошибка в режиме движения;

ε_0 – максимальная ошибка в режиме позиционирования (отработки фиксированных перемещений);

σ – максимальное перерегулирование в переходном процессе;

$t_{\text{пп}}$ – время переходного процесса;

M – показатель колебательности.

Параметры нагрузки и требования к качеству регулирования по вариантам задания приведены в табл. 1 и 2. Номер варианта задания определяется суммой двух последних цифр шифра студента.

Таблица 1

№ варианта	Параметры нагрузки					Требования к качеству регулирования				
	m_n , кг	F_n , н	ℓ_n , см	V_n , см/с	\dot{V}_n , см/с ²	ε_{max} , мм	ε_0 , мм	σ , %	$t_{пп}$, с	M
2	50 – 200	50	25	25	40	2,5	0,4	25	0,3	1,3
4	100	45	50	40	45	4	0,5	20	0,4	1,2
6	75 – 150	60	40	20	30	2	0,35	35	0,35	1,4
8	150	80	60	30	20	3	0,5	30	0,5	1,35
10	80	100	120	50	45	5	1,0	40	0,75	1,5
12	60 – 240	150	75	25	35	3,5	0,8	45	0,6	1,6
14	120	200	80	30	20	2,5	0,6	35	0,35	1,4
16	180	300	120	40	65	4	0,8	30	0,4	1,3
18	200	250	100	50	60	3	0,75	35	0,5	1,4

Таблица 2

№ варианта	Параметры нагрузки				Требования к качеству регулирования				
	J_n , кг м ²	M_n , н м	Ω_n , рад/с	$\dot{\Omega}_n$, рад/с ²	ε_{max} , град	ε_0 , град	σ , %	$t_{пп}$, с	M
1	2 – 10	15	1,25	1	1,5	0,3	30	0,5	1,3
3	15	25	1	1,5	2	0,5	20	0,75	1,2
5	5 – 15	20	1,5	1,5	1,25	0,2	25	0,5	1,25
7	25	25	1	0,75	1	0,25	35	1	1,35
9	10 – 40	30	0,75	0,5	1,5	0,4	30	0,75	1,3
11	30	25	1	1	2	0,5	20	0,8	1,2
13	20–50	35	1,2	0,8	1,4	0,6	35	0,6	1,4
15	50	50	0,8	1	1,6	0,45	20	1	1,2
17	15 – 60	45	1,5	1	2	0,7	25	0,75	1,2
19	45	50	1,2	1,5	1,5	0,5	45	0,5	1,5

2. Задание

2.1. Составить функциональную схему и описать принцип действия следящей системы.

2.2. Произвести выбор основных функциональных элементов (исполнительный двигатель с редуктором, усилитель мощности, датчик рассогласования, усилительно-преобразовательные устройства).

2.3. Определить статические и динамические математические модели элементов следящей системы.

2.4. Составить структурную схему и произвести статический расчет.

2.5. Рассчитать динамику системы (оценить качество регулирования) и провести синтез корректирующих устройств (при необходимости коррекции системы).

2.6. Выбрать схемы и рассчитать параметры корректирующих устройств.

2.7. Проверить, удовлетворяет ли скорректированная следящая система требуемому качеству регулирования. Сделать выводы.

3. Методические указания к выполнению курсовой работы

Курсовая работа оформляется в виде пояснительной записки объемом 20...30 страниц и графического материала на 2 листах формата А3. В пояснительной записке должны быть отражены все пункты задания, начиная с принципа действия и кончая анализом скорректированной системы. Материал должен быть изложен последовательно, с необходимыми обоснованиями (особенно при выборе элементов) и ссылками на источники, откуда заимствуются исходные данные, расчетные соотношения и методика расчета. Графический материал должен содержать структурную схему скорректированной системы, принципиальные электрические схемы и частотные характеристики корректирующих устройств, динамические характеристики системы (переходный процесс, частотные характеристики).

При выполнении курсовой работы вначале необходимо на основании анализа параметров нагрузки описать возможный объект управления, назначение и принцип действия следящей системы. Это даст априорную информацию для более обоснованного выбора основных функциональных элементов.

Расчет системы начинается с выбора исполнительного электродвигателя и механической передачи (редуктора). Необходимо обоснованно выбирать тип двигателя (постоянного тока или двухфазный асинхронный), серию (СЛ, МИ, ДПР, МИГ, АДП, ДИД и др.) и типоразмер (мощность). При выборе двигателя следует иметь в виду, что в таблицах исходных данных заданы максимальные значения параметров. Задание массы нагрузки и момента инерции вилок означает, что этот параметр в процессе работы изменяется в указанных пределах. В этом случае расчет должен вестись для наихудшего случая.

Нагрузку с линейным перемещением целесообразно пересчитать в эквивалентную нагрузку с вращательным движением, а в качестве оси приведения принять ось датчика перемещения. На заключительном этапе выбора двигателя и передаточного числа редуктора следует проверить перегрузочную способность двигателя по моменту и его нагрев. Так как в задании приведены только максимальные значения скорости и ускорения движения, то в расчетах можно принять, что следящая система должна обрабатывать гармонический сигнал с указанными максимальными скоростью и ускорением.

После выбора двигателя следует выбрать тип усилителя мощности (транзисторный, тиристорный, электромашинный и др.) и указать его основные характеристики и требования, которым он должен удовлетворять (выходное напряжение, ток, источник питания, параметры входного сигнала, ограничение выходного тока и др.), т.е. составить техническое задание на его разработку.

Следующий этап – выбор датчика рассогласования. В качестве датчика рассогласования желательно использовать серийно выпускаемые промышленностью индукционные датчики угловых перемещений (сельсины, вращающиеся трансформаторы). При линейном перемещении нагрузки датчик с нагрузкой соединяется через механическую передачу типа винт–гайка или рейка–шестерня таким образом, чтобы максимальное перемещение нагрузки не превышало одного оборота датчика.

На заключительном этапе необходимо выбрать тип предварительного усилителя (транзисторный, операционный, постоянного или переменного тока), демодулятор, сглаживающий фильтр и источник питания всех элементов следящей системы, включая исполнительный двигатель и датчик. Для источника питания необходимо указать параметры по всем выходным цепям (напряжение, ток, частота), считая первичным источником промышленную сеть 220/380 В 50 Гц.

После выбора элементов следует определить их статические и динамические характеристики, передаточные функции, коэффициенты передачи, постоянные времени, зоны линейности характеристик, зону нечувствительности исполнительного двигателя. Постоянную времени фильтра демодулятора следует определить из условия пульсации выходного напряжения не более 5 %. По функциональной схеме и полученным передаточным функциям элементов составляется структурная схема следящей системы, проверяются условия согласования элементов по виду и уровням сигналов, входным и выходным сопротивлениям и уточняются их математические модели.

На следующем этапе производится анализ динамики системы, определяются параметры системы из условий обеспечения заданной точности, проверяется устойчивость, качество регулирования в переходных режимах работы.

При выполнении этих расчетов следует воспользоваться известными методами из курса «Теория автоматического управления». Рекомендуется использовать простой и наглядный метод логарифмических частотных характеристик. Коррекцию системы желательно осуществить корректирующими обратными связями. При высоких требованиях к динамической точности можно применить комбинированное управление по входному сигналу или возмущению (моменту нагрузки). Следует иметь в виду, что комбинированное управление по входному сигналу компенсирует только составляющие ошибки, обусловленные этим сигналом, и не компенсирует ошибку, обусловленную возмущением, а комбинированное управление по возмущению не компенсирует ошибку по входному сигналу.

После определения передаточных функций корректирующих устройств следует выбрать их схемные реализации, места включения и рассчитать их параметры. При расчете параметров необходимо учитывать и выполнять условия согласования по уровням сигналов, входным и выходным сопротивлениям.

На заключительном этапе необходимо убедиться в обеспечении заданного качества регулирования скорректированной системой с учетом реально реализуемых корректирующих устройств. Для этого необходимо оценить ха-

рактер и параметры переходного процесса, воспользовавшись приближенными оценками качества регулирования или по переходной характеристике. Для получения переходной характеристики желательно использовать аналоговое или цифровое моделирование.

Для облегчения задачи выбора основных элементов следящей системы и синтеза корректирующих устройств *в приложении* приведены технические данные некоторых типов электродвигателей, тахогенераторов, сельсинов и вращающихся трансформаторов, а также вспомогательный материал для расчета динамики системы и корректирующих устройств.

**ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ЭЛЕКТРОМАШИНЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ АВТОМАТИКИ**

Таблица 1

Электродвигатели постоянного тока обыкновенного исполнения серии СЛ

№ пп	Тип	$P_{\text{НОМ}}$, Вт	$\omega_{\text{НОМ}}$, рад/с	$U_{\text{НОМ}}$, В	$I_{\text{НОМ}}$, А	$M_{\text{НОМ}}$, Нм	M_{max} , Нм	$J_{\text{дв}} \cdot 10^4$ кг м ²	$R_{\text{я}}$, Ом	$L_{\text{я}}$, мГн	m , кг
1.	СЛ-121	7,5	470	110	0,16	0,014	0,041	0,038	240	130	0,41
2.	СЛ-161	8,6	420	110	0,17	0,02	0,078	0,052	170	125	0,55
3.	СЛ-221	13	377	110	0,25	0,034	0,088	0,137	117	230	1,2
4.	СЛ-261	24	377	110	0,41	0,064	0,196	0,196	51	140	1,4
5.	СЛ-281	26	545	24	2,16	0,049	0,123	0,19	1,15	0,5	1,22
6.	СЛ-321	38	315	110	0,58	0,123	0,3	0,59	25,8	130	2,2
7.	СЛ-361	50	315	110	0,75	0,156	0,392	0,687	20,5	115	2,5
8.	СЛ-369	55	377	110	0,8	0,147	0,44	0,687	15,2	90	2,5
9.	СЛ-521	77	315	110	1,07	0,245	0,637	1,67	8,5	58	3,9
10.	СЛ-521К	20	105	110	0,37	0,196	0,623	1,67	74	360	3,9
11.	СЛ-569	175	377	110	1,96	0,465	0,91	2,65	3,6	30	4,5
12.	СЛ-569К	36	89	110	0,58	0,412	1,00	2,65	40	290	4,5
13.	СЛ-571К	95	230	24	6,15	0,412	0,735	2,65	0,31	2	4,5
14.	СЛ-621	172	250	110	1,08	0,687	1,23	6,62	3,0	35	7,5
15.	СЛ-661	230	250	110	2,66	0,91	1,52	9,17	1,73	25	9,35

Электродвигатели постоянного тока с цилиндрическим проволочным полым якорем серии ДПР

Тип двигателя	$P_{\text{ном}},$ Вт	$\omega_{\text{ном}},$ рад/с	$U_{\text{ном}},$ В	$I_{\text{ном}},$ А	$I_{\text{пуск}},$ А	$I_{\text{хх}},$ А	$M_{\text{ном}},$ мНм	$M_{\text{пуск}},$ мНм	$M_0,$ мНм	$R_{\text{я}} (20^{\circ}\text{C}),$ Ом	$U_{\text{трог}},$ В	Масса, кг
ДПР-2-01	0,95	942	12	0,145	0,9	0,035	1	5	0,22	23	0,8	0,036
ДПР-2-02	0,75	628	12	0,13	0,59	0,03	1,2	3,6	0,2	36,4	0,9	0,036
ДПР-2-06	0,65	628	6	0,23	1	0,063	1	3,2	0,2	10,8	0,6	0,036
ДПР-2-08	0,25	262	6	0,13	0,46	0,025	1	2,4	0,18	24,4	0,7	0,036
ДПР-32-01	1,9	942	27	0,14	1,13	0,05	2	15,5	0,7	37	2,6	0,08
ДПР-32-02	1,6	628	27	0,12	0,66	0,035	2,5	12	0,6	64,6	2,85	0,08
ДПР-32-06	1,25	628	12	0,2	1,46	0,06	2	13,3	0,6	13	1	0,08
ДПР-32-08	0,5	262	12	0,115	0,38	0,03	2	5,5	0,5	52,2	1,65	0,08
ДПР-42-01	4,7	942	27	0,29	3	0,08	5	44	1,1	13	2,1	0,15
ДПР-42-06	3,15	628	12	0,45	3,3	0,106	5	30	0,9	5,4	0,8	0,15
ДПР-42-08	1,3	262	12	0,24	0,92	0,05	5	14,3	0,7	21	1,05	0,15
ДПР-52-01	9,5	942	27	0,53	10	0,1	10	155	1,6	3,65	1,65	0,26
ДПР-52-06	6,3	628	12	0,8	11,7	0,16	10	102	1,4	1,65	0,6	0,26
ДПР-52-08	2,6	262	12	0,36	2,9	0,055	10	64	1,2	6,36	0,7	0,26
ДПР-62-01	19	945	27	1	13	0,18	20	260	3	2,13	1,7	0,41
ДПР-62-06	12,5	628	12	1,5	18,4	0,27	20	225	2,7	0,83	0,55	0,41
ДПР-62-08	5,25	262	12	0,73	4,7	0,11	20	103	2,3	4	0,8	0,41
ДПР-72-02	25,1	628	27	1,35	16,5	0,17	40	460	3,7	1,75	1,6	0,6
ДПР-72-08	10,5	262	12	1,3	10,2	0,15	40	230	3,3	1,77	0,6	0,6

Таблица 3

Электродвигатели постоянного тока с гладким якорем

Тип двигателя	$P_{\text{ном}}$, Вт	$\omega_{\text{ном}}$, рад/с	$U_{\text{ном}}$, В	$I_{\text{ном}}$, А	$M_{\text{ном}}$, Н м	M_{max} , Н м	$J_{\text{дв}} \cdot 10^4$, кг м ²	$R_{\text{я}}$, Ом	$T_{\text{м}}$, мс	Масса, кг	Возбуждение	Охлаждение
МИГ–90А	90	315	27	4,5	0,286	2,82	0,2	1,1	5,1	6	П.М.	Естеств.
МИГ–180А	180	315	27	8,9	0,573	4,35	0,39	0,56	4,0	9	«	«
МИГ–400А	400	315	60	8,3	1,275	12,1	1,6	0,98	5,9	15	«	«
МИГ–600А	600	315	110	6,3	1,910	23,8	4,3	1,75	6,7	20	«	«
МИГ–10Б	10	590	12	1,4	0,016	0,055	0,0025	—	5,5	0,35	«	«
МИГ–25Б	25	590	12	3,2	0,040	0,167	0,0068	—	5,0	0,65	«	«
МИГ–60Б	60	590	27	3,0	0,095	0,57	0,036	—	5,5	1,5	«	«
МИГ–90Б	90	590	27	4,1	0,143	1,35	0,079	—	4,5	2,0	«	«
ПГ–0,12	120	315	24	—	0,38	3,8	0,3	—	3,9	6,5	«	«
ПГ–0,25	250	315	24	—	0,80	8,0	0,95	—	3,2	13	«	«
ПГ–0,55	550	315	36	—	1,74	17,4	2,9	—	4,0	20	«	«
ПГ–1	1000	315	60	—	3,16	31,6	5,75	—	5,5	44	ЭЛ.М.	Принуд.
ПГ–2	2000	315	110	—	6,35	63,5	18,7	—	4,5	59	«	«
ПГ–4	4000	315	220	—	12,7	127	70,0	—	5,5	99	«	«
ПГ–6	6000	315	220	—	19,0	190	115	—	6,1	138	«	«

Двухфазные асинхронные электродвигатели с полым ротором

Тип двигателя	f , Гц	$P_{\text{ном}}$, Вт	$\omega_{\text{ном}}$, рад/с	ω_0 , рад/с	$M_{\text{ном}}$, Н·м	$M_{\text{пуск}}$, Н·м	$J_{\text{дв}} \cdot 10^4$, кг·м ²	$T_{\text{м}}$, мс	m , кг	Обмотка управления		Обмотка возбуждения		
										U_{max} , В	$I_{\text{ном}}$, А	$U_{\text{ном}}$, В	$I_{\text{ном}}$, А	$C_{\text{в}}$, мкФ
АДП-1	500	3,7	942	1310	3,9	5,4	0,785	48	0,75	35	0,15	120	0,36	0,3
АДП-120	400	2,4	420	524	5,9	9,8	—	—	0,65	110	0,18	110	0,3	0,25
АДП-123	400	4,1	420	524	9,8	13,7	0,785	—	0,55	120	0,18	110	0,18	0,3
АДП-123Б	400	8,9	628	733	14,2	16,7	0,785	—	0,55	110	0,22	110	0,27	0,5
АДП-262	50	9,5	194	277	49	88	1,67	5,5	1,6	125	0,58	110	0,23	2,5
АДП-263	500	24	628	920	39	58	1,67	32	1,6	165	0,37	52	0,78	1,4
АДП-263А	500	27,8	628	900	44	64	1,86	25	1,6	270	0,51	36	1,38	3,9
АДП-362	50	19	200	277	93	167	3,93	6	2,6	120	0,65	110	0,6	6,5
АДП-363	500	35	628	900	56	69	3,93	50	2,6	120	1,2	110	0,55	6,6
АДП-363А	500	46,4	628	900	73,5	83,4	4,83	51	2,7	240	0,65	36	2,0	6,6
АДП-562	50	41	210	277	196	343	12,75	—	—	160	0,73	110	0,88	11,0
АДП-563А	500	62	628	900	98	118	11,75	82	5,7	240	0,9	36	3,6	14,4
ДИД-0,1ТА	400	0,1	—	1360	0,147	0,255	0,022	90	0,025	30	0,07	36	0,08	—
ДИД-0,5ТА	400	0,5	1016	1465	0,34	0,68	0,044	90	0,05	30	0,11	36	0,15	—
ДИД-0,6ТА	400	0,6	—	1675	0,64	1,18	0,074	50	0,06	30	0,1	36	0,155	—
ДИД-1ТА	400	1	1036	1885	0,88	1,56	0,069	38	0,11	30	0,12	36	0,25	—
ДИД-2ТА	400	2	1130	1885	1,76	3,33	0,088	32	0,16	30	0,23	36	0,4	—
ДИД-3ТА	400	3	607	838	5,5	9,8	0,235	26	0,35	30	0,4	36	0,7	—
ДИД-5ТА	400	5	508	628	11,8	21,6	2,45	52	0,72	30	0,48	36	1,2	—
ДИД-10ТА	400	10	—	1050	14,7	27,5	3,63	50	1,0	30	0,75	36	1,4	—

Таблица 5

Тахогенераторы постоянного тока

Тип	ω_{\max} , рад/с	$U_{\text{ВОЗБ}}$, В	$I_{\text{ВОЗБ}}$, А	$K_{\text{ТГ}}$, В/рад с	$I_{\text{ЯМАХ}}$, А	Амплитуд. погрешность, %	$J_{\text{Я}} \cdot 10^6$, кг·м ²	Габариты		Масса, кг
								D , мм	l , мм	
ТГ-1	115	27	—	0,067	0,01	—	—	85	120	1,85
ТГ-2	250	27	0,3	0,2	0,02	1	—	70	104	0,78
ТГ-3	420	27	0,3	0,16	0,1	—	—	50	110	0,5
ТГП-1	735	—	—	0,067	0,1	0,5	—	33	66,5	0,15
ТГП-3	940	—	—	0,04	—	0,5	—	25	46	—
ТД-1	157	110	—	0,47	—	—	—	50	86	—
ТД-101	157	110	0,065	0,22	0,1	0,5	5,7	50	96	0,7
ТД-102	157	110	0,065	0,52	0,1	0,5	5,7	50	96	0,7
ТД-103	157	110	0,06	1,05	0,1	0,5	17,9	50	96	0,7
ТД-103ПМ	105	—	—	0,95	0,1	0,5	17,9	—	—	—
ТГ-041	315	50	0,045	0,175	0,22	—	—	109	74	0,96
ТГ-04	315	110	—	0,175	0,022	—	—	—	—	0,92
СЛ-121	365	110	0,05	0,175	0,1	—	4,5	50	82	0,44
СЛ-161	365	110	0,05	0,19	0,1	—	4,8	50	94	0,49
СЛ-221	387	110	0,05	0,24	0,2	—	12,5	70	104	0,9
СЛ-261	377	110	0,08	0,24	0,2	—	18,0	70	115	1,25

Малогобаритные сельсины

Тип	Назначение	Частота сети, Гц	Напряжение питания, В	Потребляемый ток, А	Максимальное напряжение синхрон., В	Погрешность следования, угл. мин	Асимметрия нулевых точек, угл. мин	Наружн. диаметр, мм	Масса, кг
НД-414	СД	50	110	0,6	55; 152	—	±15	62	1,18
НС-404	СПИ	50	110	0,33	50	±45...90	—	62	0,8
СС-405	СПТ	50	110	0,13	53	±20	—	62	0,8
БС-405	СПТ	50	110	0,09	34	±18...45	—	62	1,2
БС-404	СПИ	50	110	0,4	52	±45...150	—	62	1,3
НД-204	СД	400	110	0,35	100	—	±15	45	0,34
БД-160А	СД	400	110	0,3	100	—	±2,5	45	0,42
БС-155А	СПТ	400	110	0,15	100	±5...30	—	45	0,33
БС-151А	СПИ	400	100	0,3	100	±45...90	—	45	0,47
СГ-1	СД	400	36	0,115	41	—	±12	37	0,14
СТ-1	СПТ	400	36	0,035	31	±20	±12	37	0,14
СД-1	СДД	400	41	0,07	38	±30	—	37	0,14
СГСМ-1А	СД	400	115	0,08	58	±18...25	—	36	0,15
СДСМ-1А	СДД	400	58	0,27	58	±60	—	36	0,2
СМСМ-1	СПТ	400	115	0,08	58	±30...60	—	36	0,15
СБ-32-1ВП	СПТ	400	36	0,02	21	±10...30	±10	32	0,16
СБ-20-1ВП	СПТ	400	36	0,012	11	±10...30	±8	20	0,07

Таблица 7

Вращающиеся трансформаторы и редуктосины

Тип	Назначение	Напряжение питания, В	Входное сопротивление хол. хода, Ом	Погрешность в ТДП, угл. мин	Погрешность отбражения синусн. завис., %	Асимметрия нулевых точек, угл. мин	Диаметр каркаса, мм	Масса, кг
СКТ-220-1	ТДП	36	1700-2770	$\pm 10 \dots 20$	$\pm 0,2 \dots 0,35$	$\pm 5 \dots 10$	20	0,04
БСКТ-220-1	ТДП	36	380-1200	$\pm 20 \dots 30$	$\pm 0,2 \dots 0,5$	$\pm 7 \dots 17$	20	0,07
СКТ-225-2	ТДП	36	1330-5100	$\pm 5 \dots 10$	$\pm 0,1 \dots 0,2$	$\pm 2,5 \dots 5$	25	0,09
3ВТ-2ТВ	СКВТ	12; 27	200-800	$\pm 5 \dots 10$	$\pm 0,05 \dots 0,2$	$\pm 2 \dots 7$	25	0,115
2,5 ВТ	СКВТ	12; 27; 40	200-2000	—	$\pm 0,05 \dots 0,1$	$\pm 1,67 \dots 3,33$	25	0,12
МВТ-2	СКВТ	30	500-2000	$\pm 6 \dots 10$	$\pm 0,02 \dots 0,1$	$\pm 1 \dots 3,5$	38	0,35
ВТ-3А	СКВТ	60; 110, 220	900-15000	—	$\pm 0,06 \dots 0,2$	$\pm 1,5 \dots 6$	45	0,5
ВТ-5	СКВТ, ТДП	40; 60	200-2000	± 3	$\pm 0,02 \dots 0,06$	$\pm 0,5 \dots 1,5$	50	0,68
5БВТ	СКВТ, ТДП	27; 40	200-450	$\pm 1 \dots 4$	$\pm 0,02 \dots 0,1$	$\pm 0,67 \dots 3,33$	50	0,81
ВТП-6	ТДП	40	—	$\pm 5 \dots 10$	—	—	—	0,065
СКТ-265	СКВТ, ТДП	36	—	$\pm 10 \dots 30$	$\pm 0,05 \dots 0,2$	—	—	0,17
СКТ-64-65	ТДП	36	—	± 1	—	—	65	0,180
БСКТ-12865	ТДП	36	—	$\pm 0,5$	—	—	65	0,195

Связь между показателем колебательности и качеством регулирования

M	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7
$\sigma, \%$	13,8	20,3	26,5	32,2	37,2	40,7	44,6
$\omega_0 T_{\text{ПП}}$	7,75	6,3	5,58	5,6	5,45	6,1	7,25
$\gamma(\omega_c)$	54	49	46	42	39	36	34

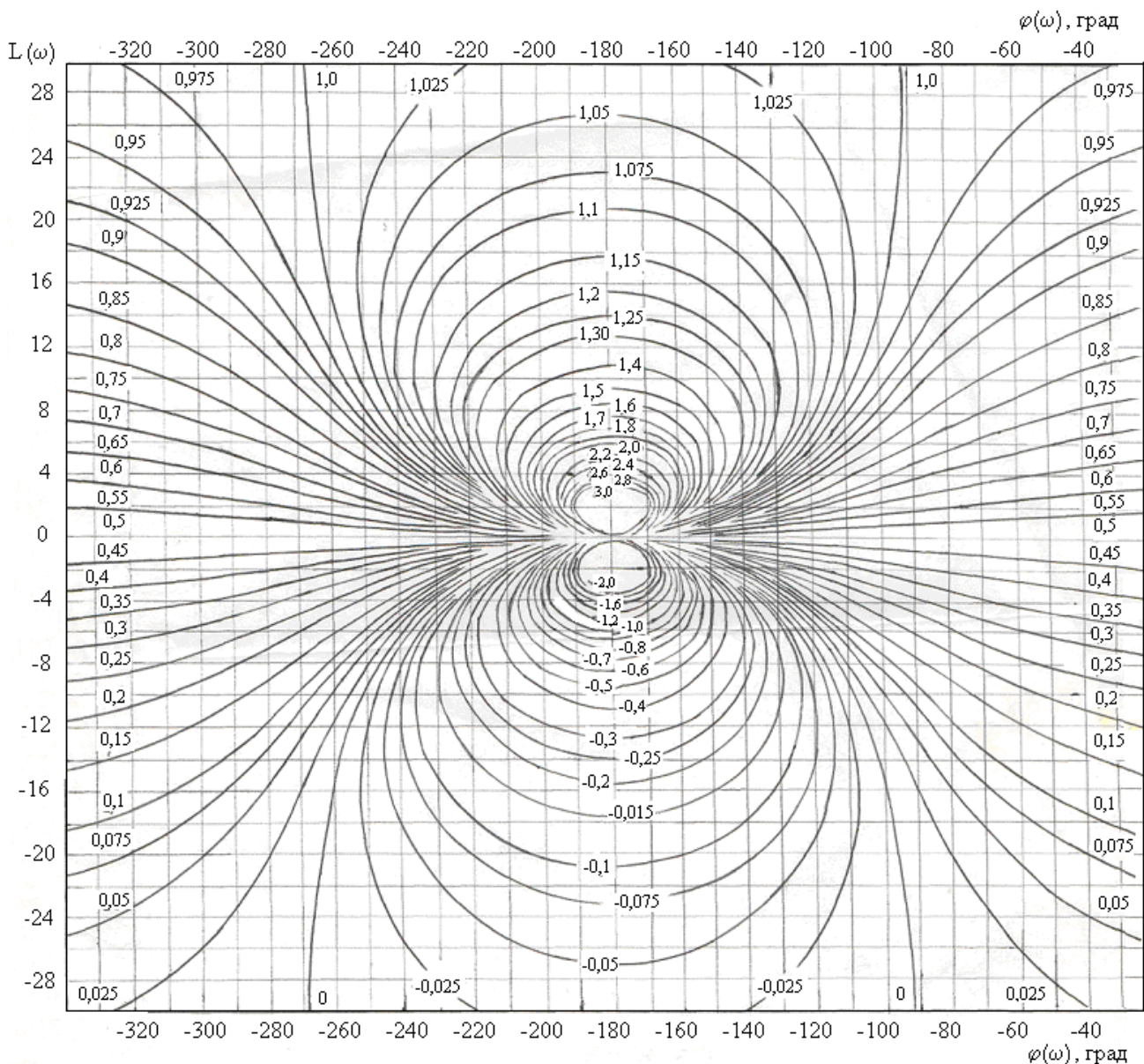


Рис. 1. Номограмма замыкания для вещественной частотной характеристики $P(\omega)$

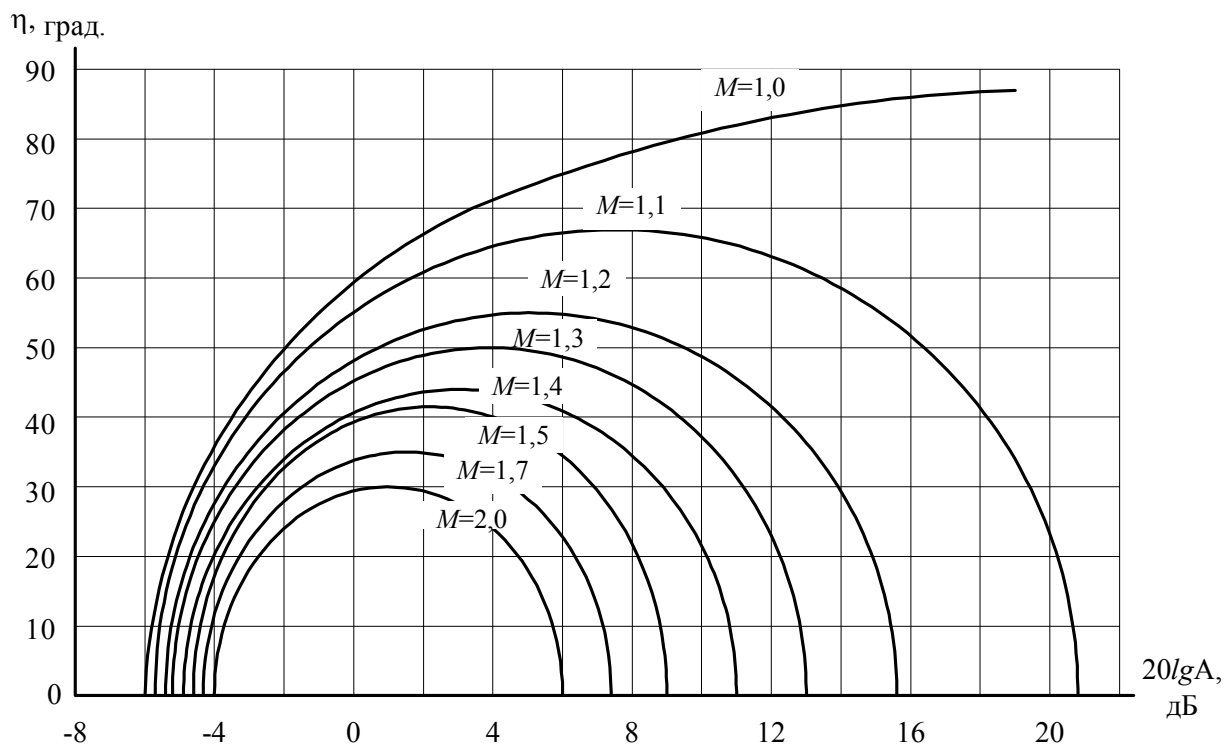


Рис. 2. Запретные области для фазовой характеристики

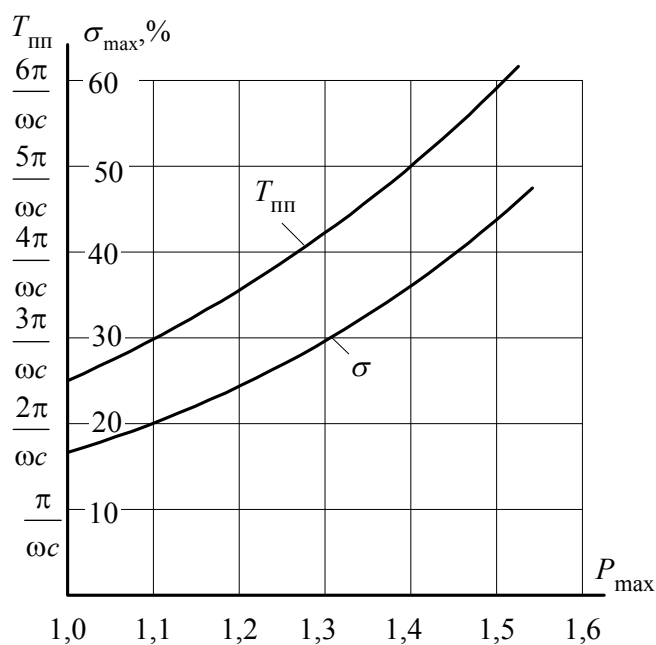


Рис. 3. Зависимость показателей качества от P_{max}

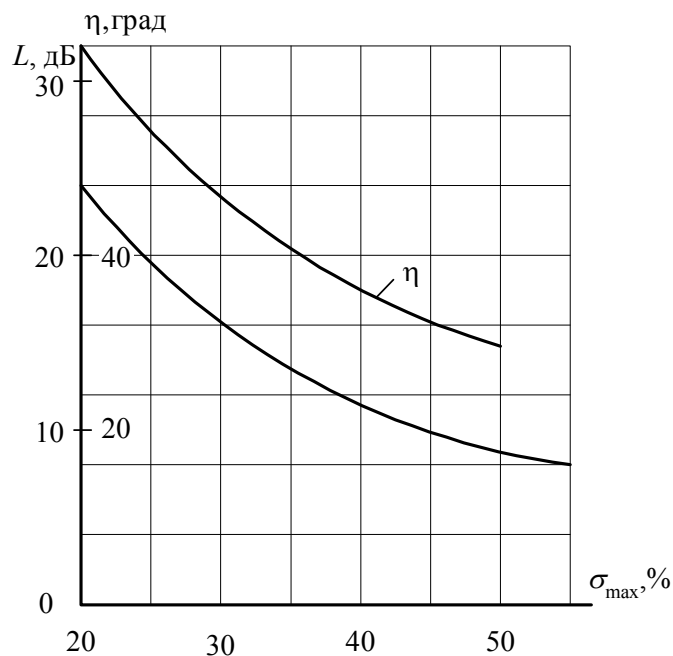
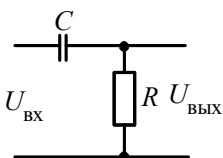
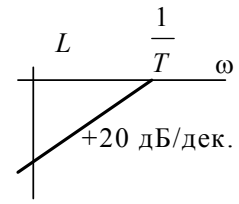
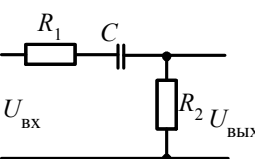
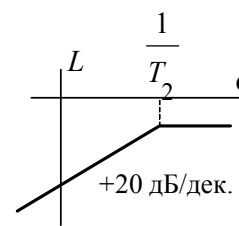
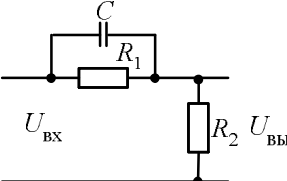
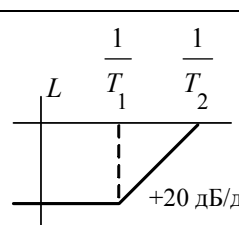
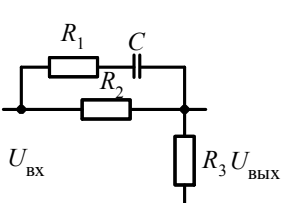
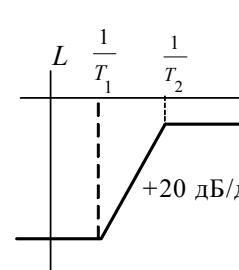
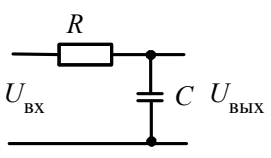
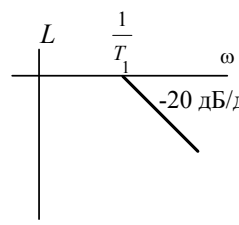
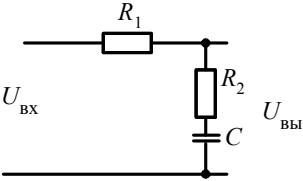
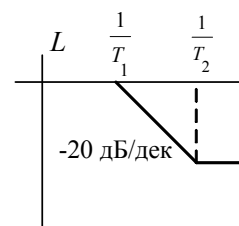


Рис. 4. Зависимость запасов по модулю и фазе от максимального перерегулирования σ

Пассивные корректирующие контуры

Схема контура	Передаточная функция	ЛАХ контура
	$K(P) = \frac{TP}{1 + TP} \quad T = RC$ $K(0) = 0 \quad K(\infty) = 1$	
	$K(P) = \frac{T_1 P}{1 + T_2 P} \quad T_2 = (R_1 + R_2)C$ $T_1 = R_2 C \quad K(0) = 0 \quad K(\infty) = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$	
	$K(P) = K \frac{1 + T_1 P}{1 + T_2 P} \quad T_1 = R_1 C \quad T_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} C$ $K = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad K(0) = K \quad K(\infty) = 1$	
	$K(P) = K \frac{1 + T_1 P}{1 + T_2 P} \quad K = \frac{R_3}{R_2 + R_3}$ $T_1 = (R_1 + R_2)C \quad T_2 = \frac{R_3 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}}{R_2 + R_3} T_1$ $K(0) = K \quad K(\infty) = \frac{R_3}{R_3 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}}$	
	$K(P) = \frac{1}{1 + TP} \quad T = RC$ $K(0) = 1 \quad K(\infty) = 0$	
	$K(P) = \frac{1 + T_2 P}{1 + T_1 P} \quad T_1 = (R_1 + R_2)C$ $T_2 = R_2 C \quad K(0) = 1 \quad K(\infty) = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$	

	$K(P) = R \frac{1 + T_2 P}{1 + T_1 P} \quad K = \frac{R_3}{R_1 + R_3} \quad T_2 = R_2 C$ $T_1 = (R_2 + \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3}) C \quad K(0) = K$ $K(\infty) = \frac{R_2 R_3}{R_1 (R_2 + R_3) + R_2 R_3}$	
	$K(P) = \frac{T_1 T_2 P^2 + (T_1 + T_2) P + 1}{T_1 T_2 P^2 + [T_2 (1 + \frac{R_1}{R_2}) + T_1] P + 1}$ $K(0) = 1 \quad K(\infty) = 1 \quad T_2 = R_2 C_2 \quad T_1 = R_1 C_1$	
	$K(P) = \frac{T_1 T_2 P^2 + (T_1 + T_2) P + 1}{T_1 T_2 P^2 + [T_2 (1 + \frac{R_1}{R_2}) + T_1] P + \frac{1}{K}}$ $K = \frac{R_1 + R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \quad K(0) = K \quad K(\infty) = 1$ $T_2 = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} C_2 \quad T_1 = (R_1 + R_2) C_1$	
	$K(P) = \frac{T_1 T_2 P^2 + (T_1 + T_2) P + 1}{T_1 T_2 \left[1 + \frac{R_1 R_2}{R_3 (R_1 + R_2)} \right] P^2 \left[T_2 (1 + \frac{R_2}{R_3}) + T_1 \right] P + 1}$ $K = \frac{R_1 + R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \quad K(0) = K \quad K(\infty) = 1$ $T_2 = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} C_2 \quad T_1 = (R_1 + R_2) C_1$	
	$K_1(P) = \frac{U_{BЫX}(P)}{U_{BХ}(P)} = \frac{K_1 T_1 P}{1 + T_1 P}$ $K_1 = \frac{U_{BЫX}}{U_{BХ}} = K_{TP}$ $K_2(P) = \frac{U_{BЫX}(P)}{i_{BХ}(P)} = K_2 T_1 P$ $K_2 = \frac{U_{BЫX}}{U_{BХ}} R_1 = K_{TP} R_1 \quad T_1 = \frac{L_1}{R_1}$	