

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ

В.С. Марюхненко

ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Проектирование линейных стационарных систем
автоматического регулирования

Учебное пособие

Иркутск 2015

УДК 656.25.621.301 (075.8)
ББК 30
М 30

Рекомендовано к изданию редакционным советом ИрГУПС

Рецензенты:

Е.Г. Солдатенков, главный инженер Службы автоматики и телемеханики Восточно-Сибирской Дирекции инфраструктуры ВСЖД;

В.Т. Черемисин, зав. кафедрой «Подвижной состав железных дорог» Омского ГУПС, доктор технических наук, профессор;

А.П. Шиляков, кандидат технических наук, доцент Омского ГУПС

Марюхненко В.С.

М 30 Теория автоматического управления. Проектирование линейных стационарных систем автоматического регулирования : учеб. пособие / В.С. Марюхненко. – Иркутск : ИрГУПС, 2015. – 124 с.

Пособие предназначено для преподавателей и студентов специальности 190901 «Системы обеспечения движения поездов». Изложены рекомендации по организации и выполнению курсового проекта по учебной дисциплине «Теория автоматического управления».

Содержит основные сведения по методологии и организации технического проектирования, а также из теории линейных стационарных систем автоматического регулирования. Показано единство подходов к разработке таких систем на основе общих принципов и методов проектирования и средств их математического описания. Предложены тематика курсового проектирования (по специализациям) и варианты (индивидуально) «Технического задания».

Приведен анализ линейных стационарных систем автоматического регулирования применительно к управлению электромеханическими, радиотехническими и энергетическими объектами, по синтезу САР с желаемыми показателями качества, а также методика выполнения расчетов и моделирования. Сформулированы требования к оформлению пояснительной записки.

Работа может быть полезна аспирантам и инженерам при разработке действующих динамических систем реального времени с применением автоматического регулирования.

УДК 656 (075.8)
ББК 39я7

© В.С. Марюхненко., 2015
© Иркутский государственный университет
путей сообщения, 2015

СОДЕРЖАНИЕ

Перечень сокращений	5
Предисловие	7
Введение	10
1. Основные положения	12
1.1. Основы технического проектирования	12
1.1.1. Стадии разработки проекта	12
1.1.2. Системное проектирование	14
1.2. Методология проектирования	15
1.2.1. Принципы проектирования	15
1.2.2. Методы проектирования	16
1.3. Организация курсового проектирования	17
1.3.1. Тематика курсовых проектов	17
1.3.2. Выдача задания на проектирование	19
1.3.3. Консультации	19
1.3.4. Текущий контроль выполнения	19
1.3.5. Защита курсового проекта	19
2. Организация выполнения курсового проекта	21
2.1. Уяснение задач и целей курсового проектирования	21
2.2. Организация выполнения курсового проекта	22
2.3. Содержание и объем курсового проекта	23
2.4. Оформление курсовых проектов	24
2.4.1. Оформление графических материалов	25
2.4.2. Оформление пояснительной записки	27
3. Основные сведения из теории линейных стационарных САР и особенности элементов, применяемых для их конструктивного воплощения	29
3.1. Системы стабилизации	29
3.2. Системы слежения	29
3.3. Передаточная функция линейной стационарной САР	30
3.4. Особенности статической САР	33
3.5. Прямые показатели качества и запас устойчивости	34
3.6. Система автоматического регулирования с минимальным набором функ- ционально необходимых элементов (МНЭ)	37
3.6.1. Задающее устройство	38
3.6.2. Сравнивающее устройство	40
3.6.3. Усилительно-преобразующее устройство	41
3.6.4. Исполнительное устройство и датчик обратной связи	43
4. Техническое задание на курсовой проект и основные сведения по элементам исходной САР	45
4.1. Темы курсовых проектов для студентов специализации СОД.2 (Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте)	46
4.1.1. Варианты заданий	46
4.1.2. Исходные данные	46
4.1.3. Требования	47

4.1.4. Особенности исходной САР	47
4.1.5. Объекты регулирования	48
4.1.6. Особенности конструкции и работы электроприводов.....	54
4.1.7. Устройство обратной связи.....	57
4.1.8. Передаточные функции элементов исходной САР.....	58
4.2. Темы курсовых проектов для студентов специализации СОД.3 (Телекоммуникационные системы и сети на железной дороге) и СОД.4 (Радиотехнические системы на железной дороге).....	61
4.2.1. Варианты заданий	61
4.2.2. Исходные данные	62
4.2.3. Требования	63
4.2.4. Особенности системы автоматического захвата и слежения за временным положением измерительных импульсов	64
4.2.5. Особенности системы автоматической подстройки. Частоты генератора синусоидальных колебаний диапазона умеренно высоких частот	69
4.2.6. Передаточные функции элементов систем.....	72
4.3. Тематика курсового проектирования для студентов специализации СОД.1 (Энергоснабжение железных дорог).....	73
4.3.1. Варианты заданий	73
4.3.2. Исходные данные	73
4.3.3. Требования	74
4.3.4. Структура энергоснабжения локомотивов на электрической тяге	74
4.3.5. Структурная схема САР коэффициента мощности	77
5. Содержательное оформление пояснительной записки и методика выполнения расчетов	82
5.1. Введение пояснительной записки	82
5.2. Раздел I пояснительной записки «Анализ исходной САР»	83
5.2.1. Моделирование исходной САР	83
5.2.2. Статический анализ исходной САР	85
5.2.3. Анализ устойчивости исходной САР	87
5.2.4. Анализ компьютерной модели исходной САР	92
5.3. Раздел II пояснительной записки «Синтез линейной стационарной САР с заданными показателями качества»	96
5.3.1. Выбор метода коррекции	96
5.3.2. Алгоритм последовательной коррекции	96
5.3.3. Построение ЛАЧХ желаемой САР	97
5.3.4. Синтез последовательного корректирующего звена	102
5.3.5. Выбор корректирующих цепей. Создание и расчет функциональной и принципиальной схем корректирующего звена	107
5.3.6. Моделирование синтезированной САР	112
5.4. Выводы пояснительной записки	113
Заключение	115
Библиографический список	117
Приложения	120

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

АЗС ПИ	– система автоматического захвата и слежения за временным положением ИИ
АТС	– автоматика, телемеханика и связь
АЦП	– аналого-цифровой преобразователь
АЧХ	– амплитудно-частотная характеристика
БКПЕ	– батарея конденсаторов переменной емкости
ВВ	– высоковольтный выпрямитель
ВЧ	– высоко- (верхне-) частотный
ГЗ	– генератор задержки
ГОСТ	– государственный стандарт
Д	– датчик
Дв	– электродвигатель
Дкд	– декодер
ДМД	– демодулятор
ЕСКД	– единая система конструкторской документации
И	– интегратор
ИИ	– измерительный импульс
ИТП	– импульс точного поиска
ИУ	– исполнительное устройство
ИЭ	– измерительный элемент
Кд	– камнедробилка
Кд	– кодер
КЗ	– корректирующее звено
КП	– курсовой проект
Кп	– воздушный компрессор
КУ	– компенсационное устройство
КЦ1	– корректирующая цепь
ЛАЧХ	– логарифмическая АЧХ
ЛС	– линия связи
ЛУ	– логическое устройство
ЛФЧХ	– логарифмическая ФЧХ
ЛЧХ	– логарифмические частотные характеристики
ЛЭП	– линия электропередачи
МНЭ	– минимальный набор функционально необходимых элементов
Н	– жидкостный насос
НГ ППС	– нормирующий генератор ППС
НГ РПС	– нормирующий генератор РПС
НД	– направление движения
НИ	– нормированный импульс
НИР	– научно-исследовательские работы
НЧ	– низко- (нижне-) частотный
ОКР	– опытно-конструкторские работы
ОУ	– объект управления
П	– согласующий повторитель
ППС	– поздний полустроб слежения

ПРД	–	передатчик
ПС	–	преобразователь сигналов
ПТ	–	подстанция тяговая
ПУ	–	предварительный усилитель
Р	–	редуктор
РВ	–	регулятор выпрямителя
РПС	–	ранний полустроб слежения
РТС	–	радиотехнические системы
САР	–	система автоматического регулирования
САУ	–	система автоматического управления
СИ	–	синхроимпульсы
СУ	–	сравнивающее устройство
СЧ	–	среднечастотный
ТЗ	–	техническое задание
ТОВ	–	трехфазная обмотка возбуждения
ТЭО	–	технико-экономическое обоснование
У _{АПЧ}	–	усилитель АПЧ
УГ	–	управляемый автогенератор
УК	–	усилитель коррекции
УМ	–	усилитель мощности
УО	–	операционный усилитель
УПТ	–	усилитель постоянного тока
УПУ	–	усилительно-преобразовательное устройство
УПЧ	–	усилитель промежуточной частоты
УС	–	устройство сравнения
УЭ	–	управляющий элемент
Ф _{АПЧ}	–	фильтр АПЧ
ФМ	–	фазовая модуляция (манипуляция)
ФНЧ	–	фильтр нижних частот
ФЧХ	–	фазочастотная характеристика
ЦАП	–	цифроаналоговый преобразователь
ЧАПЧ	–	частотная АПЧ
ЧД	–	частотный дискриминатор
ЧТ	–	частотная телеграфия
ЭДС	–	электродвижущая сила
ЭМК	–	электромагнитные колебания
ЭНС	–	энергоснабжение
EWB	–	Electronics Workbench

ПРЕДИСЛОВИЕ

Необходимость всё более широкого применения автоматических систем на производстве и при управлении техническими системами вызвана ограниченностью физических и интеллектуальных возможностей человека по контролю многомерных, быстропротекающих, вредных и монотонных процессов. На определенном этапе развития техники (20-е годы XX века) решение задачи создания средств автоматизации методами интуитивных догадок себя исчерпало. Родилась теория автоматического управления (ТАУ). На основе этой теории разработаны методы создания систем автоматического управления (САУ), которые во многом свободны от недостатков, присущих человеку как управляющему объекту. Необходимость широкого использования САУ привела к развитию их теории и материального воплощения. Современные САУ имеют большое разнообразие по структуре и алгоритмам функционирования. И несмотря на то, что ТАУ получила особенное ускорение в своем развитии в конце в 30-х – 50-х годах XX столетия, она продолжает интенсивно развиваться и в настоящее время.

Целью освоения *учебной дисциплины* «Теория автоматического управления» является формирование у студентов знаний, умений и навыков по общей теории автоматического управления, овладение методами проектирования, обеспечивающими получение эффективных проектных разработок систем автоматического управления на железнодорожном транспорте.

Задачами учебной дисциплины являются изучение основных положений теории автоматического управления, освоение анализа и выполнения расчета систем автоматического регулирования; подготовка к освоению специальных дисциплин, посвященных изучению принципов построения телемеханических и автоматических систем, используемых в пределах станции, железнодорожного участка и сети железных дорог Федерального агентства железнодорожного транспорта.

Учебная дисциплина «Теория автоматического управления» входит в базовую часть профессионального цикла С. 3. Необходимыми условиями для освоения дисциплины «Теория автоматического управления» являются знания теории математического анализа, основ теории операционного анализа, теории функции комплексной переменной, основ теории колебаний, законов электротехники и электроники, умение работать на персональном компьютере, пользоваться операционной системой, основными офисными приложениями, а также владение следующими компетенциями: ОК-1, ОК-2, ОК-6, ОК-7, ОК-8, ПК-1, ПК-2, ПК-3, ПК-9, ПК-10, ПК-12, ПК-19, ПК-23, ПК-24.

Содержание дисциплины «Теория автоматического управления» является оригинальным. Базируется на знаниях по дисциплинам Математика, Физика, Теоретические основы электротехники, Микроэлектроника, Инженерная и компьютерная графика.

Дисциплина «Теория автоматического управления» служит основой для освоения дисциплин «Теоретические основы автоматики и телемеханики», «Автоматика и телемеханика на перегонах», «Станционные системы автоматики и телемеханики», «Современные системы интервального регулирования движения поездов», «Системы контроля параметров подвижного состава на ходу поезда», «Диспетчерская централизация», «Эксплуатационные основы устройств автоматики и телемеханики», а также ряда смежных дисциплин, изучаемых студентами специализаций СОД.1 (Энергоснабжение железных дорог), СОД.2 (Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте), СОД.3 (Телекоммуникационные системы и сети на железной дороге) и СОД.4 (Радиотехнические системы на железной дороге).

Общая **трудоемкость** дисциплины составляет 5 зачетных единиц, 180 часов. Распределение трудоемкости дисциплины по видам занятий и самостоятельной работы студентов приведено в табл. 0.1

Таблица 0.1

Трудоемкость дисциплины ТАУ

<i>Виды аудиторных занятий и самостоятельной работы студента</i>	<i>Трудоемкость в часах</i>
Аудиторные занятия, в т. ч.	72
Лекции	36
Практические занятия	18
Лабораторные занятия	18
Самостоятельная работа студента, в т. ч.	72
– проработка лекционного материала	18
– подготовка к практическим занятиям	18
– подготовка к лабораторным занятиям	30
– подготовка к промежуточной аттестации – зачету	6
– подготовка к промежуточной аттестации – экзамен	36
Итого	180

Процесс освоения дисциплины «Теория автоматического управления» направлен на формирование **компетенций** (табл. 0.2).

В результате освоения дисциплины «Теория автоматического управления» студент должен:

знать:

- общую теорию управления;
- методы измерения и оценки показателей качества систем автоматического управления;

уметь:

- разрабатывать требования к обеспечению безотказности, безопасности и технологической эффективности различных систем автоматики и телемеханики;
- выполнять расчеты технических характеристик систем автоматики;

владеть:

- новейшими инструментами обеспечения качества систем автоматизации и телемеханики на всех этапах их жизненного цикла;
- опытом подбора, систематизации и обобщения информационных материалов (в том числе и патентных) для проектно-конструкторских работ.

При проектировании и эксплуатации таких систем требуется высокий профессионализм, который формируется на основе твердых знаний, подкрепленных практическими умениями и навыками.

Выполнение студентами курсового проекта направлено на формирование компетенций через создание у них устойчивых практических навыков анализа и синтеза линейных стационарных систем автоматического управления.

Таблица 0.2

Формируемые компетенции

<i>Код компетенции</i>	<i>Наименование компетенции</i>
ПК-1	Способность применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования
ПК-2	Способность использовать знания о современной физической картине мира и эволюции Вселенной, пространственно-временных закономерностях, строении вещества для понимания окружающего мира и явлений природы
ПК-10	Способность применять знания в области электротехники и электроники для разработки и внедрения технологических процессов, технологического оборудования и технологической оснастки, средств автоматизации и механизации
ПК-25	Умение использовать информационные технологии при разработке новых устройств систем обеспечения движения поездов, ремонтного оборудования, средств механизации и автоматизации производства
ПК-26	Умение разрабатывать с учетом эстетических, прочностных и экономических параметров технические задания и проекты устройств электроснабжения, железнодорожной автоматики и телемеханики, стационарной и подвижной связи, средств защиты устройств при авариях

Предлагаемое учебное пособие одновременно и методическая основа для организации курсового проектирования, и практическое руководство для выполнения студентами курсового проекта по учебной дисциплине «Теория автоматического управления».

ВВЕДЕНИЕ

Курсовое проектирование по разработке системы автоматического регулирования является заключительным этапом изучения учебной дисциплины «Теория автоматического управления».

В научно-техническом смысле под проектированием понимается процесс разработки проекта. Проект – это комплект документации, предназначенной для создания определённого объекта, его эксплуатации, ремонта и утилизации. Проектирование – длительный процесс и включает этапы от подготовки технического задания до испытания опытных образцов [36].

Техническое проектирование – это самостоятельный творческий процесс, при котором изучаются существующие проектные решения, закономерности их развития и разрабатываются оригинальные схемы и конструкции. Его следует рассматривать как сложный вид работ прикладного характера.

Цель курсового проектирования:

а) систематизировать, углубить и закрепить полученные студентами теоретические знания и практические навыки;

б) научить студентов самостоятельно применять полученные знания для решения комплексных инженерных задач, привить навыки выполнения расчетов, обоснования применяемых решений и выдвигаемых положений;

в) способствовать выработке у студентов навыков самостоятельной работы с учебной, справочной, периодической литературой и руководящими документами.

Работа над курсовым проектом по теории автоматического регулирования позволяет студентам подготовиться к выполнению курсовых проектов по другим дисциплинам и дипломного проекта. Увлеченная творческая работа над проектом значительно расширяет технический кругозор студента. Она позволяет систематизировать и расширить знания не только в области теории автоматического регулирования, но и ряда смежных учебных дисциплин.

Созданию проекта САУ предшествует её анализ и синтез.

В одной из постановок задачи проектирования задаётся определенная часть структурной схемы проектируемой системы. Известными, которые не подлежат изменениям в процессе проектирования, в частности, могут быть:

а) принцип управления;

б) статические и динамические характеристики (которые затем могут уточняться) всех, или, по крайней мере, некоторых элементов структуры САУ, например:

- объекта управления (ОУ);
- исполнительного устройства;
- датчиков и др.

На основании этих исходных (априорных) сведений создается структурная схема исходной или нескорректированной САУ с известными параметрами её функциональных элементов.

Задача синтеза САУ заключается в выборе такой её структуры, параметров, характеристик и способов их реализации, которые при заданных ограничениях наилучшим образом удовлетворяют требованиям, предъявляемым к системе. Один из способов синтеза САУ – применение коррекции.

Коррекция. В такой постановке решение задачи синтеза САУ с желаемыми показателями качества сводится к определению передаточной функции корректирующего устройства, дополнительно включаемого в структуру исходной САУ.

Корректирующее устройство может включаться в канал управления последовательно, параллельно или встречно-параллельно. Вид коррекции предопределяет некоторые особенности синтеза и конструкции корректирующего устройства.

Наиболее простым, наглядным и хорошо разработанным инженерным методом синтеза линейных стационарных САУ является метод последовательной коррекции.

При последовательной коррекции для определения передаточной функции корректирующего устройства используется однозначная связь между переходным процессом в системе и её частотными характеристиками. Что особенно удобно, метод последовательной коррекции позволяет использовать для расчетов логарифмические амплитудно- и фазочастотные характеристики.

Включение корректирующего устройства, рассчитанного по методу логарифмических частотных характеристик, в прямую ветвь преобразует исходную систему таким образом, что показатели качества вновь образованной САУ с коррекцией совпадают с их значениями согласно заданию.

В рамках курсового проектирования преследуются, прежде всего, учебные цели, которые в основном ориентированы на:

- а) практическое применение приобретенных теоретических знаний;
- б) использование при проектировании компьютерных технологий;
- в) совершенствование навыков оформления технических документов.

Синтез САУ осуществляется согласно заданию кафедры «Автоматика, телемеханика и связь». Кафедрой определяется как содержание, так и объем курсового проекта.

1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. ОСНОВЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

1.1.1. Стадии разработки проекта

Стадии проектирования регламентированы стандартами [5, 13]. Для промышленной разработки проектов ГОСТ [13] устанавливает такие стадии:

- техническое задание (ТЗ);
- техническое предложение;
- эскизный проект;
- технический проект;
- разработка конструкторской документации;
- рабочий проект;
- рабочая конструкторская документация.

Техническое задание устанавливает основное назначение разрабатываемого объекта, его технические и тактико-технические характеристики, показатели качества и технико-экономические требования, предписание по выполнению необходимых стадий создания документации и её состав, а также специальные требования к изделию.

Техническое предложение представляет собой совокупность проектных документов, содержащих техническое и технико-экономическое обоснование (ТЭО) целесообразности разработки проекта. Такое заключение дается на основании анализа ТЗ заказчика и различных вариантов возможных решений, их сравнительной оценки с учётом особенностей разрабатываемого и существующих изделий, а также патентных материалов. Согласованное и утвержденное в установленном порядке ТП является основанием для разработки эскизного проекта.

Этапы работы:

- подбор материалов;
- разработка технического предложения (документация с литерой «П»);
- утверждение технического предложения.

Эскизный проект – это совокупность конструкторских документов, которые содержат принципиальные конструктивные решения, дающие общее представление об устройстве и принципе работы изделия, а также параметры и габаритные размеры. Этапы работы:

- разработка проекта с присвоением литеры «Э»;
- изготовление макетов;
- испытание макетов;
- утверждение проекта.

Технический проект – совокупность конструкторских документов, содержащих окончательные технические решения, которые дают полное

представление об устройстве изделия и исходные данные для разработки рабочей документации.

Этапы работы:

- разработка проекта с присвоением литеры «Г»;
- изготовление макетов;
- испытание макетов;
- утверждение проекта.

Технический проект служит основанием для разработки конструкторской документации, которая содержит необходимые данные для изготовления, испытания, приемки и технической эксплуатации изделия.

Рабочий проект включает разработку подробной документации для изготовления опытного образца и последующего его испытания. Испытания проводят в ряд этапов (от заводских до приемо-сдаточных). По результатам испытаний:

- корректируются проектные документы;
- разрабатывается рабочая документация для изготовления установочной серии;
- проводятся испытания установочной серии;
- определяется оснащение производственного процесса основных составных частей изделия.

По результатам этого этапа снова корректируют проектные документы и разрабатывают рабочую документацию для изготовления и испытания головной (контрольной) серии.

На основе документов окончательно отработанных и проверенных в производстве изделий, изготовленных по зафиксированному и полностью оснащённому технологическому процессу, разрабатывают завершающую *рабочую документацию* установившегося производства.

Последовательность выполнения перечисленных стадий образует официальную структуру процесса разработки проектной документации. Стадии создания различных систем регламентируются стандартами, например [10].

Завершает цикл проектных работ этап сертификации. Её назначение – определение уровня качества созданного изделия и подтверждение его соответствия требованиям тех стран, где предполагается его последующая реализация.

Сертификация может быть обязательной или добровольной. Обязательной сертификации подлежат товары, на которые законами или стандартами установлены требования, обеспечивающие безопасность жизни и здоровья потребителей, охрану окружающей среды, предотвращение причинения вреда имуществу потребителя.

Добровольная сертификация проводится по инициативе предприятий. Обычно это делается с целью официального подтверждения характеристик продукции, изготавливаемой предприятием, и, как следствие, повышения доверия к ней у потребителей.

В процессе разработки проектной документации в зависимости от сложности решаемой задачи допускается объединять между собой ряд этапов. Этапы постановки ТЗ и технического проектирования могут входить в цикл научно-исследовательских работ (НИР), а этапы технического предложения и эскизного проектирования – образовывать цикл опытно-конструкторских работ (ОКР).

1.1.2. Системное проектирование

В настоящее время сложность проектируемых объектов возросла настолько, что их воздействие на общество и окружающую среду и в процессе нормальной эксплуатации, и, особенно, в аварийных условиях оказываются существенным условием принятия их к производству. Необходимость учёта этих обстоятельств заставляет вносить изменения в традиционный характер и методологию проектной деятельности. При этом одной из задач при создании объектов является их минимальное отрицательное воздействие на окружение. Для решения задач проектирования в этих условиях сформировалась новая проектная идеология – системное проектирование.

Системное проектирование комплексно решает поставленные задачи. При нём проектируемый объект рассматривается в виде большой системы, т. е. как объект со сложной внутренней структурой, имеющий широкий набор свойств, взаимосвязанный с определенным кругом других объектов и с внешней средой. При системном проектировании учитываются социально-экономические и экологические последствия функционирования проектируемого объекта.

Системное проектирование базируется на наиболее важных выводах системного подхода, а именно:

- а) на учёте истории и перспектив развития:
 - областей науки и техники, на достижениях которых базируются аналоги проектируемого объекта;
 - применения предыдущих аналогов разрабатываемого объекта;
- б) на представлении проектируемого объекта:
 - как системы подсистем, единство частных свойств которых образует качественно новые свойства¹;
 - в качестве подсистемы более сложной системы, в которую, кроме того, входят:
 - внешняя (жизненная) среда;
 - человек, для которого предназначен проектируемый объект и на бытие которого объект будет оказывать воздействие;
- в) на вскрытии ключевых противоречий, препятствующих использо-

¹ См., например, понятия «эмерджентность», «синэргетика».

- ванию существующих объектов для удовлетворения новых потребностей;
- г) на *формировании критерия* соответствия объекта практическим потребностям;
 - д) на разработке нескольких концепций, вариантов, экземпляров разрабатываемых объектов;
 - е) на поиске оптимального варианта результатов проектирования в соответствии с разработанным критерием.

1.2. МЕТОДОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Ценность и практическая значимость результата проектирования – технического проекта в значительной мере определяется его оригинальностью, что требует творческого подхода при его разработке. Одновременно проект должен соответствовать требованиям стоимости, трудозатратам, элементам новизны, минимальной нагрузки на окружающую среду. Поэтому техническое проектирование базируется на определенных принципах и осуществляется определенными методами.

1.2.1. Принципы проектирования

Принципы проектирования устанавливаются на основе обобщения опыта проектирования и закономерностей поиска решений поставленных задач. Основные принципы проектирования следующие.

1) *Принцип прогрессивности* выражается в необходимости разработки такого проектного решения, которое по сравнению с действующими отечественными и зарубежными аналогами обладает хотя бы частичной новизной и оригинальностью, а также может быть реализовано на существующей элементной базе.

2) *Принцип перспективности* отражает необходимость учета перспектив дальнейшего развития и совершенствования разрабатываемого устройства, элементной базы, конструктивного исполнения.

3) *Принцип долговечности* заключается в том, что разрабатываемое проектное решение должно обеспечить безотказную работу устройства в течение гарантийного срока, а также высокую его эффективность при минимальных затратах на эксплуатацию и ремонт.

4) *Принцип экономичности* выражает необходимость разработки экономически эффективных проектных решений, то есть удовлетворение заданных к устройству требований с минимальными затратами.

5) *Принцип экологичности* предполагает разработку такого проектного решения, реализация которого в виде конкретного технического устройства, а также его функционирование и последующая утилизация будет оказывать минимальную нагрузку на организм человека и на окружающую среду.

6) *Принцип нормативности* – это принцип соблюдения требований, узаконенных руководящими документами (ГОСТ, ЕСКД и т. п.).

7) *Принцип комфортности* отражает обеспечение удобства обслуживания разрабатываемого устройства.

Соблюдение принципов проектирования обеспечивает высокое качество и конкурентные преимущества разрабатываемых решений.

1.2.2. Методы проектирования

Принципы проектирования осуществляются при помощи определенных методов. Использование того или иного метода проектирования базируется на:

а) изучении:

- условий работы проектируемого устройства;
- особенностей построения и функционирования существующих аналогов проектируемому устройству;
- причин возникновения существующих проектных решений и их дальнейшее логическое развитие;

б) нахождении аналогов и творческом их развитии при разработке более совершенных решений;

в) определении возможных направлений в разработке новых проектных решений.

Наиболее общими, используемыми при проектировании, следует считать следующие методы:

1) Метод предвидения. На основе всестороннего изучения теории и практики, прошлого опыта и тенденций развития разрабатывается новое проектное решение. Этот метод позволяет использовать перспективы развития и воплотить их в проектных решениях. Использование этого метода подразумевает наличие достаточно разнообразных и надежных исходных данных, проведение точных инженерных расчетов и экспериментальных исследований, наличие определенной базы данных известных решений.

2) Метод аналогии заключается в разработке новых проектных решений на основе использования аналогичных, сходных, совпадающих по некоторым признакам известных проектных решений. Использование этого метода позволяет найти решение поставленной задачи, подсказанное аналогичными ситуациями в других областях.

3) Метод экспериментирования заключается в практической реализации опытных решений, позволяющих проверять правильность предлагаемых решений. Используется этот метод для проверки частных решений.

4) Метод моделирования применяется при разработке проектных решений на основе результатов, полученных на компьютерной (математической) модели и предполагает использование вычислительной техники. Метод моделирования целесообразно применять в тех случаях, когда изучение свойств оригинала невозможно или экономически неэффективно.

Обязательным условием успешного применения этого метода является адекватное математическое описание объекта (оригинала).

Эффективность применения метода математического моделирования выражается в возможности:

- разработки большого количества вариантов проектных решений при относительно небольших затратах времени и материальных средств;
- выбора, путем анализа множества моделей с различными начальными условиями, проектного решения, близкого к оптимальному.

5) Метод сравнения и оптимизации, который заключается в сопоставлении вновь разработанных проектных решений с существующими и определении наилучшего на основе оценки и сравнения нескольких вариантов в соответствии с некоторым критерием.

В практике проектирования редко применяется какой-либо один из методов. Методология проектирования базируется на комбинированном подходе: на основе изучения существующих аналогов и направлений развития техники и технологии создается модель, которая подвергается компьютерной и/или физической экспериментальной проверке. На основе эксперимента модель уточняется и так до совпадения желаемых и реальных показателей качества разрабатываемого устройства. Процесс проектирования – итерационный процесс последовательного приближения.

Наряду с общими методами при проектировании применяются также методы, изучаемые в курсах соответствующих специальных и факультативных дисциплин.

Конкретное применение одного из методов проектирования, или одновременно нескольких, определяется мотивацией студента, творческими способностями и накопленными знаниями, умением работать с литературой, опытом проектирования и способностью накапливать такой опыт.

1.3. ОРГАНИЗАЦИЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

1.3.1. Тематика курсовых проектов

Тематика курсовых проектов соответствует программе учебной дисциплины «Теория автоматического управления» соответствующих специализаций и отражает тенденции в развитии современных систем железнодорожной автоматики и телемеханики, телекоммуникационных систем, систем электроснабжения железнодорожного транспорта. Перечень тем и вариантов курсового проекта утверждается решением кафедры.

Для курсового проектирования студенту предлагается ряд направлений для разработки устойчивой системы автоматического регулирования с заданными показателями качества переходного процесса. В зависимости от специализации разработке подлежат автоматические электромеханические и электрические линейные стационарные системы:

1) для студентов специализации СОД.2 – стабилизации оборотов двигателя электропривода;

2) для студентов СОД.3 и СОД.4:

а) захвата и слежения за временным положением измерительных импульсов (АЗС ПИ);

б) частоты генератора синусоидальных колебаний диапазона умеренно высоких частот;

3) для студентов специализации СОД.1 – регулирования коэффициента мощности в энергоустановках питания объектов железнодорожной инфраструктуры.

Курсовые проекты могут выполняться и по иным, «нестандартным», направлениям. При этом:

- преподаватель может предложить студенту научную работу;
- студент может продолжить ранее начатую научную работу;
- студент может предложить свою тему в соответствии с его научными интересами.

Темы таких, «нестандартных», курсовых проектов утверждаются по мере необходимости на методической комиссии по учебной дисциплине.

К «нестандартным» темам курсовых проектов предъявляются требования:

– предполагаемые трудозатраты на их выполнение – они не превышают $2/3$ объема учебного времени, необходимого на курсовое проектирование;

- предполагаемые результаты должны обладать элементами новизны;
- студент докладывает результаты на научной конференции;
- результаты исследований оформляются как научная статья либо как «Отчет по НИРС» в рамках научно-исследовательской работы студентов с объемом, не превышающим $1/2$ объема «Пояснительной записки» курсового проекта.

Защита результатов исследований производится по индивидуальному графику, но в сроки, установленные для защиты курсовых проектов.

Каждому студенту выдается задание в соответствии с особенностями проектирования систем автоматического управления определенного назначения.

В задании определяются:

- наименование темы;
- исходные данные для курсового проектирования;
- перечень подлежащих разработке вопросов;
- перечень рекомендованной литературы;
- график работы студента над проектом.

Задание подписывается руководителем курсового проекта. Студент расписывается в получении задания на курсовой проект.

1.3.2. Выдача задания на проектирование

Задание на курсовой проект студент получает на самоподготовке за 3–5 дней до начала курсового проектирования. Задания распределяются согласно специализациям и в соответствии с желаниями студентов, что способствует лучшему достижению целей проектирования.

На первом занятии по курсовому проектированию преподаватель в течение двух часов доводит до сведения студентов следующие вопросы:

- цель и задачи учебного проектирования;
- последовательность разработки и состав проекта;
- назначение и содержание основных разделов;
- даты и часы консультаций;
- контрольные сроки готовности отдельных разделов;
- ориентировочные сроки завершения проекта и его защиты.

1.3.3. Консультации

Консультации студент посещает в дни, установленные преподавателем, не реже одного раза в неделю. На консультации студент отчитывается о ходе выполнения проекта, формулирует и задает вопросы, решение которых вызывает затруднения. Вопросы должны быть конкретными и четко сформулированными.

Примечание. На консультациях, как впрочем и при обязательных занятиях, руководитель проекта не обязан подробно излагать решение того или иного вопроса. Он должен указать, в каком направлении и в каких источниках следует студенту искать правильное решение.

1.3.4. Текущий контроль выполнения

В течение времени, отведенного на курсовое проектирование, устанавливается кафедрой 4 контрольных срока. К каждому из контрольных сроков необходимо выполнить очередные 25 % проекта.

Перечень и объем работ, выполняемых к очередному контрольному сроку, определяют совместно преподаватель и студент.

1.3.5. Защита курсового проекта

Результатами курсового проектирования являются:

- 1) чертежи принципиальных, функциональных и структурных схем:
 - исходной САР;
 - корректирующего устройства;
 - разработанной САР;
 - моделей элементов и САР в целом в среде «Electroniks Workbench»;
- 2) пояснительная записка.

Завершенный курсовой проект со сброшюрованной пояснительной запиской и чертежами студент подписывает и сдает руководителю на проверку за 3 дня до защиты. Предварительная проверка проекта является обязательной.

Примечание. При небольшом объеме чертежных работ допускается включение чертежей в пояснительную записку в виде приложения.

Если проект не имеет существенных недостатков, то он возвращается студенту подписанным «К защите», после чего студент готовится к его защите в сроки, согласованные с преподавателем.

При наличии существенных недостатков в оформлении проекта, а также при ошибках в вычислениях, курсовой проект возвращается студенту с письменными замечаниями. После устранения замечаний студент на титульном листе делает отметку об их устранении и проект представляется на повторную проверку.

Защита курсового проекта состоит из 5–8-минутного доклада и ответов на вопросы. В докладе должны быть освещены:

- тема и характеристика задач курсового проекта;
- принятые технические решения и их обоснования;
- выводы по результатам курсового проектирования.

Курсовой проект оценивается по 4-балльной системе.

В ходе защиты оцениваются:

- знания технического задания на курсовое проектирование;
- знания основных теоретических положений, знания которых необходимы для выполнения проекта;
- владение навыками расчетов САР согласно заданной теме курсового проекта.

В докладе и ответах на дополнительные вопросы студент должен доказать, что принятые технические решения обеспечивают показатели качества разработанной САР согласно техническому заданию.

Оценка за курсовой проект учитывает:

- степень самостоятельности студента при работе над проектом;
- знания, показанные при защите курсового проекта;
- наличие и характер замечаний при предварительной проверке;
- качество оформления пояснительной записки и чертежей.

В случае получения неудовлетворительной оценки повторная защита разрешается после доработок или переработки проекта вплоть до проектирования по новой теме.

2. ОРГАНИЗАЦИЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Курсовой проект, как правило, выполняется индивидуально. Но кафедрой может быть принято решение о выполнении одного курсового проекта группой из двух-трех студентов. Коллективное проектирование является интересной, но малораспространенной формой организации курсового проектирования. Особенность коллективного проектирования – в необходимости четкой его организации.

Основанием для проведения коллективного курсового проектирования могут служить:

- перспектива создания рабочего макета;
- новизна технического решения и необходимость патентного поиска и оформления патентных документов на сохранение интеллектуальной собственности;
- особенности технического задания (необходимость большого объема вычислений, разработка нескольких устройств в одной системе и т. п.).

Коллективное проектирование имеет ряд положительных черт, поскольку:

- способствует творческому развитию студентов за счет разработки САР, необходимых для практического применения и более сложных, чем предлагается «стандартным» заданием;
- появляется возможность создания атмосферы соревнования и творческих дискуссий;
- студенты получают более обширные знания за счет взаимного обмена информацией;
- воспитывается чувство взаимной помощи и взаимной ответственности.

Работа над курсовым проектом состоит из нескольких этапов:

- уяснение задач и целей курсового проектирования;
- выполнение собственно курсового проекта;
- защита результатов курсового проектирования, т. е. разработанного технического устройства.

2.1. УЯСНЕНИЕ ЗАДАЧ И ЦЕЛЕЙ КУРСОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Студент при уяснении задач и целей курсового проектирования:

1) Вникает в особенности своего индивидуального задания, при этом он определяет:

- назначение проектируемого устройства;
- место, роль проектируемого устройства и выполняемые им задачи в составе конкретной системы обеспечения транспорта: автоматизации и телемеханики, телекоммуникации, энергоснабжения;
- известные прототипы изделия и отличия от него проектируемого устройства;

- основную и дополнительную литературу, необходимую при разработке курсового проекта.

2) Уточняет совместно с преподавателем:

- объем и контрольные сроки представления промежуточных результатов проектирования, для чего составляет план по этапам работы с включением на каждом этапе не более 10 % от общего объема работы;
- порядок и сроки консультаций;
- ориентировочную дату представления проекта на проверку и его защиты.

Качественное уяснение задач и целей курсового проектирования позволит студенту значительно сократить время выполнения курсового проекта.

2.2. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Проектирование, даже с учебной целью, предполагает усвоение и переработку большого количества информации из многих источников, поэтому методически грамотно будет с самого начала курсового проектирования:

а) настроиться на серьёзную продолжительную интеллектуальную работу;

- возобновить в памяти работу с персональным компьютером и, прежде всего, с текстовым редактором «Word», графическими редакторами «Visio», «Paint», редактором формул, с программами моделирования «Electronics Workbench», «Matcad», «Matlab»;

б) сделать выписки из действующих стандартов по теме проектирования;

в) необходимые сведения для каждого раздела из различных источников, черновики вычислений и пояснений, чертежи и рисунки сохранять в отдельных файлах;

г) имя каждого файла рекомендуется составить из четырех частей:

- аббревиатура КП;
- фамилия студента (полностью);
- номер файла по порядку его разработки;
- сокращенно существо хранимой информации, например:
 - «КП Иванов1 Литер.doc» – список используемой литературы;
 - «КП Иванов2 Прд фнкц.doc» – расчет передаточной функции;
 - «КП Иванов3 Стр сх***.vsd» – чертеж структурной схемы узла ***;

д) все файлы объединить в одну папку «КП Иванов».

Работа над курсовым проектом включает:

1) Анализ исходной линейной стационарной системы автоматического регулирования;

2) Синтез устойчивой САР с заданными показателями качества;

3) Моделирование разработанной САР по её передаточной функции.

При анализе:

а) составляется структурная схема исходной САР в виде различным образом соединенных динамических звеньев, соответствующих элементам функциональной схемы САР;

б) записываются:

- передаточные функции динамических звеньев;
- передаточные функции исходной САР в разомкнутом и замкнутом состоянии;

в) проводится анализ исходной САР:

- статической точности;
- устойчивости;
- динамических показателей качества;
- делаются выводы о необходимости и причинах коррекции САР.

При синтезе:

а) выбирается метод коррекции;

б) определяется передаточная функция корректирующего устройства;

в) разрабатывается, на основании передаточной функции, функциональная и принципиальная схемы корректирующего устройства;

г) разрабатывается функциональная схема САР с заданными показателями качества;

д) записываются выводы о выполненном синтезе САР.

При моделировании для разработанной САР:

а) создается модель в программной среде «Electronics Workbench» «Matlab» или «МВТУ»²;

б) определяются:

- по логарифмическим АЧХ и ФЧХ модели запаса устойчивости;
- по переходной характеристике – прямые показатели качества;

4) Делаются выводы о соответствии показателей качества требованиям задания на курсовое проектирование. Оформляются пояснительная записка и чертежи. Курсовой проект представляется преподавателю для проверки.

2.3. СОДЕРЖАНИЕ И ОБЪЕМ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

По структуре курсовой проект содержит графическую часть и пояснительную записку.

1. Содержанием записки курсового проекта является:

- а) описание устройства и принципа действия исходной САР;
- б) анализ исходной САР;
- в) синтез САР с заданными показателями качества;
- г) обоснование принятых инженерных решений;

² Предпочтение целесообразно отдать программной среде «Electronics Workbench», так как она имеет самый низкий абстрактный уровень и позволяет выполнять виртуальные, но физически интерпретируемые электрические соединения в модельной схеме.

д) моделирование разработанной САР и определение её прямых показателей качества.

Пояснительная записка курсового проекта состоит из следующих пунктов:

а) введение;

б) анализ исходной САР, который включает:

- линеаризацию, в случае необходимости, статических характеристик элементов исходной САР;
- создание математических моделей линейных элементов САР в виде передаточных функций;
- создание структурной схемы САР с учетом вида включения динамических элементов;
- запись передаточных функций САР в разомкнутом и замкнутом состоянии;
- расчет устойчивости исходной САР;
- статический расчет исходной САР;

в) синтез САР с заданными показателями качества согласно пунктам:

- выбор и обоснование метода коррекции исходной САР;
- коррекция исходной САР с целью достижения статической точности разрабатываемой САР не хуже заданной;
- коррекция исходной САР с целью достижения динамических (прямых) показателей точности разрабатываемой САР не хуже заданных;
- создание структурной схемы разрабатываемой САР с учетом включения корректирующих элементов;
- создание принципиальной схемы устройства последовательной коррекции;

г) описание модели разработанной САР, её ЛАЧХ, ЛФЧХ и переходной характеристики. Определение запаса устойчивости и прямых показателей качества;

д) выводы по выполненной работе.

Объем пояснительной записки 25...35 страниц на листах формата А4.

2. Графическая часть проекта должна содержать чертежи функциональных, структурных и принципиальных схем САР (или детально разработанной её части). Объем графической части 1–3 листа формата А4 (размер 210×297 мм).

Курсовое проектирование завершается на стадии начала эскизного проектирования.

2.4. ОФОРМЛЕНИЕ КУРСОВЫХ ПРОЕКТОВ

Курсовые проекты оформляются в соответствии с требованиями стандартов единой системы конструкторской документации (ЕСКД), предъявляемым к конструкторским, текстовым и графическим документам.

2.4.1. Оформление пояснительной записки

Текст записки пишется от руки перьевой или шариковой ручкой черного, синего или фиолетового цвета. Оформляется текст в соответствии с ГОСТ 2.105 – 96 и включает:

- титульный лист (Приложение 1);
- первый лист (Приложение 2) и последующие листы (Приложение 3), которые различаются основными надписями (Приложение 4).

Листы записки брошюруются в тетрадь с обложкой из плотной бумаги, которая оформляется как титульный лист.

Рукописный текст должен быть разборчивым, аккуратно написанным, с высотой строчных букв не менее 2,5 мм. Изложение материала должно быть грамотным в техническом и грамматическом отношениях, четким и сжатым.

Материал записки располагается в следующем порядке:

- 1) задание на курсовой проект;
- 2) текст пояснительной записки структурно состоит из логически законченных блоков информации и включает:
 - а) Содержание;
 - б) Введение;
 - в) Основные разделы пояснительной записки;
 - г) Заключение;
 - д) Список литературы;
 - е) Приложения (включая спецификацию).

Разделы разбиваются на логически законченные подразделы, подразделы – на пункты.

Наименования основных структурных частей пишутся прописными буквами. Техническое задание, Содержание, Введение, Заключение и Список литературы *не нумеруются*.

Разделы имеют порядковые номера, которые обозначаются арабскими цифрами с точкой. Например: «1. Анализ исходной САР».

Наименования подразделов и пунктов пишутся строчными буквами. Нумерация подразделов состоит из двух чисел, разделенных точкой. Например: «2.3. Передаточная функция электродвигателя постоянного тока», где число «2» показывает номер раздела, а число «3» – номер подраздела. В пределах раздела подразделы имеют свои порядковые номера.

Пункты нумеруются тремя числами, разделенными точками. Например: «3.5.7. Модель объекта управления», где 3 – номер раздела, 5 – номер подраздела, 7 – номер пункта.

Наименование разделов записывают симметрично тексту, а подразделов и пунктов – с абзаца.

Страницы пояснительной записки имеют сквозную нумерацию. На титульном листе номер не ставится, но в общее количество страниц он включается.

В тексте и под рисунками не допускается сокращение слов (кроме

установленных ЕСКД). Все аббревиатуры должны быть пояснены в тексте при первом их введении. Например, «...амплитудно-частотная характеристика (АЧХ)...». В дальнейшем можно пользоваться сокращением АЧХ.

Условные буквенные обозначения физических, математических и других величин (например: $I_{\text{вх}}$ – входной ток, $Y_{\text{вых}}$ – комплексная выходная проводимость и т. д.) должны соответствовать общепринятым и сохраняться в пределах всей записки. При написании символов латиницей следует использовать начертание нежирный курсив (шрифт с наклоном). При использовании кириллицы или греческих литер – не жирный, не курсив. Матрицы и векторы обозначать прописными буквами жирным шрифтом, не курсив.

Рекомендуется во введении привести перечень и расшифровку аббревиатур и условных обозначений.

При пояснении расчетов, проводимых в проекте, следует соблюдать следующие правила.

1. Применение формул обосновывается собственными рассуждениями и выводами либо ссылками на литературные источники.

2. Формулы, на которые необходимо сделать ссылки по тексту, нумеруются сквозной нумерацией в пределах всей пояснительной записки. Формула устанавливается по центру страницы, а её номер пишется справа от формулы с выравниванием по правому краю листа.

3. В формуле, согласно которой выполняется расчет, символы с объясняются.

4. Расчеты с использованием размерных единиц во всех случаях, кроме специально оговоренных, выполняются в единицах системы СИ: метрах, килограммах, секундах, вольтах, амперах, омах и т. д.

Пример: «...согласно рекомендациям, изложенным в «Приложении 1», определяется шунтирующее сопротивление R_4

$$R_4 \approx U_{\text{д}}/I, \quad (8)$$

где $U_{\text{д}}$ – действующее напряжение на сопротивлении R_4 ; I – ток, действующее значение тока, который должен протекать через сопротивление R_4 ...».

Подставляя в формулу (8) известные значения величин напряжения и тока, получаем

$$R_4 \approx U_{\text{д}}/I = 3,8/2 = 1,9 \text{ Ом.}$$

Из стандартного ряда значений резисторов E24 выбирается для включения в схему значение $R_4 = 2,0 \text{ Ом}$ [8].

Результаты повторяющихся расчетов целесообразно сводить в таблицы и интерпретировать графиками.

Вычисления в проекте производятся с точностью до 0,01. Необходимость более высокой точности обосновывается.

При выборе метода расчета и формул в тексте записки следует делать ссылку на источник. Соответственно указанный источник должен быть в списке литературы. Ссылка на источник делается в квадратных

скобках. Например: « ... [7] ...». При необходимости может указываться страница («[8] с. 24») или формула («[6], формула (2.14)»).

Список литературы составляется в порядке, упоминаемом в тексте. В него включаются только те источники, ссылки на которые имеются в тексте записки. В списке литературы указываются: фамилия, инициалы автора, полное название работы, место издания – город полностью (для Москвы и Санкт-Петербурга (Ленинграда) сокращенно – М., С.-Пб. или Л.), издательство и год издания.

Пример ссылки на монографию: 1. Агаханян Т.М. Линейные импульсные усилители, М.: Связь, 1970. – 472 с.

Пример ссылки на периодическое издание: 6. Горбунов Ю.З., Егоров Б.Ю., Медынский А.В. Программное обеспечение задач оптимизации цифровых БИС // Электронная техника. Сер. 3, Микроэлектроника, 1981. Вып. 5. С. 45–54.

Иллюстрации (схемы, графики) именуются рисунками. Нумерация рисунков сквозная в пределах всей пояснительной записки. Пояснения к рисунку дается непосредственно под рисунком. В тексте дается ссылка на рисунок в скобках (рис. 2.3) или без скобок: см. рис. 2.3. Рисунки размещаются сразу же после первого упоминания о них в тексте.

Рисунки выполняются черным карандашом или распечатываются на принтере на таких же листах бумаги, как и текст записки, допускается выполнение рисунков на кальке или миллиметровой бумаге.

Таблицы нумеруются в пределах всей пояснительной записки. Слово «Таблица» пишется в правом верхнем углу над таблицей. На следующей строчке с форматированием по центру записывается название таблицы. На все таблицы должны быть ссылки в тексте. Если в записке только одна таблица, то номер ей не присваивается.

При проведении расчетов на компьютере при помощи оригинальных программ в записке указать:

- формулы, используемые для расчетов;
- структуру алгоритма расчета ;
- распечатку программы расчета.

2.4.2. Оформление графических материалов

Графические материалы выполняются на листах чертежной бумаги формата согласно ГОСТ (2.701 – 84). Рамка и чертеж выполняются линиями толщиной 0,6–1,5 мм (основная линия) в редакторе «Visio» (расширение *.vsd).

В нижнем правом углу вдоль длинной или короткой стороны листа выполняется основная надпись. Рамка основной надписи – основными линиями, а графы рамки – тонкими (см. Приложение 2, Приложение 4).

В графах указываются:

а) в графе 1 – наименование изделия (шрифтом 7), а под ним наименование документа (шрифтом 5);

б) в графе 2 – обозначение документа (шифр): Например, 3.37.1.17.Э3, это означает:

- 3 – номер факультета;
- 37 – номер кафедры;
- 1 – последняя цифра номера группы (например, гр. СОД 2*11*01);
- 17 – номер, под которым фамилия студента находится в классном журнале;
- Э3 (Э2, Э1) – схема принципиальная электрическая (схема функциональная, схема структурная);

в) в графе 3 – обозначение материала детали (заполняется на чертежах детали);

г) в графе 4 – литера «У» (учебный);

д) в графе 5 – масса изделия в килограммах (без указания единицы измерения);

е) в графе 6 – масштаб (на чертежах детали);

ж) в графе 7 – порядковый номер листа;

з) в графе 8 – общее количество листов (заполняется на первом листе);

и) в графе 9 – сокращенное наименование вуза (ИрГУПС);

к) в графе 10 – характер работы по отношению к проекту лиц, его подписавших;

л) в графе 11 – фамилии;

м) в графе 12 – подписи;

н) в графе 13 – даты.

Графы 14...18 не заполняются. Они по решению кафедры могут использоваться для других записей.

Схемы на чертежах должны удовлетворять требованиям ГОСТ [4, 6]. Схемы выполняются с учетом принятых условных обозначений и рекомендованных пропорций. На чертежах действительное пространственное расположение элементов не учитывается. Линии связи, как правило, должны состоять из горизонтальных и вертикальных линий и иметь наименьшее количество изломов и взаимных пересечений. Расстояние между параллельными линиями связи – не менее 3 мм.

Пояснительная записка и чертежи должны быть выполнены, написаны и подписаны автором проекта. Курсовой проект, выполненный без соблюдения вышеперечисленных требований, после проверки преподавателем возвращается студенту для доработки.

Защищенный курсовой проект сдается на кафедру.

3. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ ЛИНЕЙНЫХ СТАЦИОНАРНЫХ САР И ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ИХ КОНСТРУКТИВНОГО ВОПЛОЩЕНИЯ

3.1. СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ



Функционирование САР стабилизации реализуется по принципу замкнутого управления с отрицательной обратной связью (рис. 3.1). Стабилизирующие САР – это такие системы, функционирование которых заключается в поддержании регулируемой величины $y(t)$ постоянной. При работе по отклонению (рис. 3.2, а)

$$x(t) \equiv 0; \quad y(t) \approx y_{\text{ж}} = \text{const}, \quad (3.1)$$

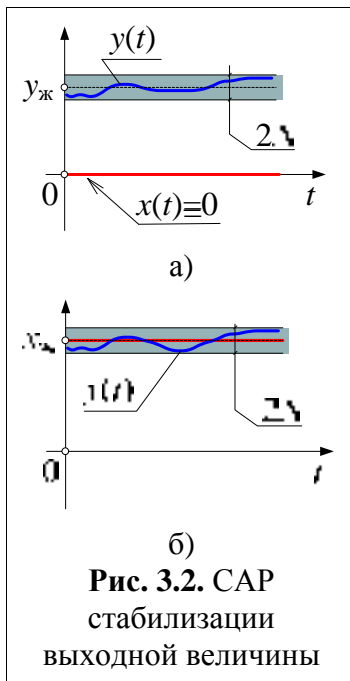
где $y_{\text{ж}}$ – желаемое значение постоянной выходной величины, определяемое назначением конкретной САР; а при работе по ошибке (единичная отрицательная обратная связь) поддерживается выходная величина, равная постоянной входной величине САР (рис. 3.2, б)

$$y(t) = y_0 \approx x_{\text{ж}} = \text{const} \neq 0, \quad (3.2)$$

где 2Δ – диапазон допустимых ошибок регулирования, возникающих из-за действия в САР возмущений.

Примерные равенства в формулах (3.1) и (3.2) отражают факт регулирования с возможной статической ошибкой и действия возмущений.

Системы стабилизации применяются при автоматическом управлении скоростью локомотивов, в управлении электроприводами, во вторичных источниках питания, при создании корабельных и авиационных автопилотов и т. п.



3.2. СИСТЕМЫ СЛЕЖЕНИЯ

Алгоритм функционирования следящих САР реализует принцип замкнутого управления, благодаря чему управляемая величина $y(t)$ непрерывно уравнивается со значениями изменяющейся входной величины (рис. 3.3.)

$$y(t) \approx x(t) = x_{\text{ж}}(t), \quad (3.3)$$

где $x_{\text{ж}}(t)$ – ограниченная, тождественно не равная нулю, функция времени.

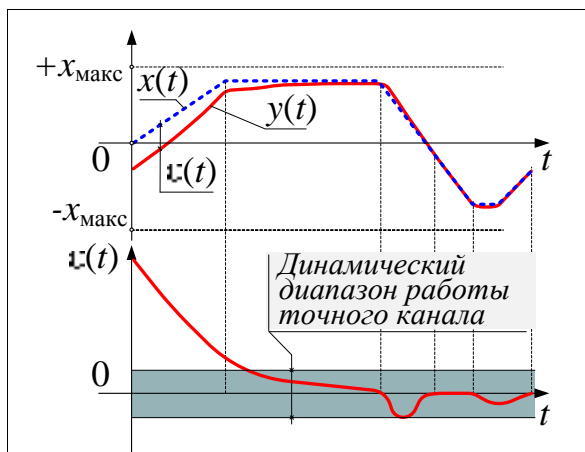


Рис. 3.3. Изменение выходной величины $y(t)$ и ошибки регулирования $e(t)$ следящей САР при изменении входного воздействия $x(t)$

По структурной схеме следящие системы могут быть одно- и двухканальными, простыми и взаимосвязанными, сложными и т. п.

Наиболее распространёнными являются одноканальные и двухканальные следящие системы. Двухканальная САР отличается наличием грубого канала слежения (канал низкой точности) и точного канала слежения, который включается при достижении выходной величиной значения, близкого к возможной погрешности грубого канала.

Следящие системы применяются при дистанционном управлении для

воспроизведения угловых и линейных перемещений органов управления механизмами и машинами. Например, при управлении станками, автомобилями, судами, самолетами, поворотными антеннами, хирургическим инструментом при лапароскопических операциях и т. п.

Во многих случаях слежение является начальным режимом САР стабилизации при установке исходно необходимого фиксированного значения входного сигнала.

3.3. ПЕРЕДАТОЧНАЯ ФУНКЦИЯ ЛИНЕЙНОЙ СТАЦИОНАРНОЙ САР



Рис. 3.4. Линейризация гладкой статической характеристики САР: а) методом секущей; б) методом касательной

Статические характеристики:

..... – реальная; — — линейризованная

Режимом работы САР будем называть характер связи между выходным сигналом $y(t)$ и входным воздействием $x(t)$. Существенно различаются статический и динамический режимы.

Статический режим наступает при входном воздействии $x(t) = X = \text{const}$ и после окончания переходного

процесса при отсутствии возмущений, что соответствует $t \rightarrow \infty$ и $y(t \rightarrow \infty) = Y = \text{const}$. В статическом режиме каждому значению X соответствует значение Y ; паре значений (X, Y) – статический коэффициент передачи:

$$K_{\text{ст}} = Y/X,$$



Рис. 3.5. Типовая статическая характеристика линейной САР

а множеству из N пар значений (X_i, Y_i) , $i = 1, 2, 3, \dots, N$ соответствует график – статическая характеристика (рис. 3.5), описываемая функциональной зависимостью:

$$Y = F(X).$$

САР называется линейной, если статическая характеристика её описывается линейным уравнением (рис. 3.4):

$$Y = F(X) = K_{\text{ст}}X + b,$$

где $b = F(X = 0) = \text{const}$ – начальное значение выходной величины при нулевом входном воздействии.

Нелинейная САР может быть линеаризована вблизи точки (X_0, Y_0) секущей (рис. 1с, а) или касательной (рис. 1с, б), если статическая характеристика её – гладкая³. Линеаризованная статическая характеристика записывается в вариациях:

$$\Delta Y = k_{\text{л}} \Delta X, \quad \Delta Y \in \Delta Y_{\text{л}}; \quad \Delta X \in \Delta X_{\text{л}}; \quad k_{\text{л}} = \Delta Y_{\text{л}} / \Delta X_{\text{л}}.$$

Динамический режим – режим незавершенного переходного процесса. В динамическом режиме САР её входное воздействие $x(t)$ и выходная величина $y(t)$ – функции времени. Математически связь между ними описывается неоднородным дифференциальным уравнением порядка n :

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = \\ = b_m \frac{d^m x(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_2 \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + b_1 \frac{dx(t)}{dt} + b_0 x(t) \end{aligned} \quad (3.4)$$

с известными начальными условиями:

$$\left. \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} \right|_{t=0} = y_{n-1}; \quad \left. \frac{d^{n-2} y(t)}{dt^{n-2}} \right|_{t=0} = y_{n-2}; \quad \dots \quad \left. \frac{d^2 y(t)}{dt^2} \right|_{t=0} = y_2; \quad \left. \frac{dy(t)}{dt} \right|_{t=0} = y_1; \quad y(t)|_{t=0} = y_0. \quad (3.5)$$

Если в формулах (3.5)

$$y_{n-1} = 0; \quad y_{n-2} = 0; \quad \dots \quad y_2 = 0; \quad y_1 = 0; \quad y_0 = 0, \quad (3.6)$$

то начальные условия называются нулевыми.

САР линейная и стационарная, если её дифференциальное уравнение (3.4) имеет постоянные коэффициенты a_i, b_k ($i = 0, 1, 2, \dots, n$; $k = 0, 1, 2, \dots, m$).

Применение преобразования Лапласа к левой и правой частям диффе-

³ Гладкая функция порядка m – это функция, все частные производные которой до порядка m включительно существуют и непрерывны.

⁴ Рассматриваются физически реализуемые САР, для которых выполняется условие $m \leq n$.

ренциального уравнения (3.4) при нулевых начальных условиях (3.6) приводит к выражению (см., например [20]):

$$Y(p)[a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0] = X(p)[b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0], \quad (3.7)$$

где $X(p)$ и $Y(p)$ – прямые преобразования Лапласа соответственно входного воздействия и выходного сигнала:

$$X(p) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-pt} dt; \quad Y(p) = \int_{-\infty}^{+\infty} y(t) e^{-pt} dt; \quad p = \alpha + j\omega; \quad j = \sqrt{-1}; \quad (3.8)$$

α и ω – вещественные переменные;

Из формулы (3.7) следует выражение для передаточной функции САР

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{B(p)}{A(p)}, \quad (3.9)$$

где $A(p)$ и $B(p)$ – полиномы:

$$A(p) = a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0; \quad B(p) = b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0. \quad (3.10)$$

Передаточная функция (3.9) также может быть записана в виде отношений произведений двучленов:

$$W(p) = \frac{\prod_{i=1}^m (p - p_i)}{\prod_{k=1}^n (p - p_k)}, \quad (3.11)$$

где p_i и p_k – соответственно нули и полюса передаточной функции (3.9), суть корни соответственно полиномов числителя и знаменателя

$$b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0 = 0, \quad (3.12)$$

$$a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0 = 0. \quad (3.13)$$

Передаточная функция является исчерпывающей математической моделью линейной стационарной САР. По математическому выражению передаточной функции можно получить временные и частотные характеристики САР, а также разработать подходящую для её синтеза структуру модели – структурную схему.

При анализе структурная (алгоритмическая) схема образуется из функциональной схемы путем абстрагирования от физического вида воздействий, а также конструктивных и принципиальных решений, примененных при создании исходной САР. Каналы (цепи) передачи энергии заменяются линиями связи, а элементы – их математическими моделями, т. е. передаточными функциями.

При синтезе структурная схема составляется на основе известной передаточной функции САР путем поиска соответствия ей структуры соединений передаточных функций динамических звеньев реальных элементов автоматики.

3.4. ОСОБЕННОСТИ СТАТИЧЕСКОЙ САР

Замкнутую САР (см. рис. 3.1) структурно можно свести к САР с единичной отрицательной обратной связью (рис. 3.6), где $W_p(p)$ – передаточная функция разомкнутой системы [20].

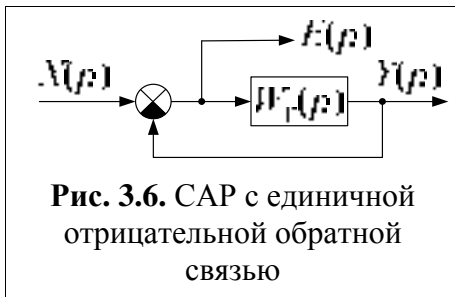


Рис. 3.6. САР с единичной отрицательной обратной связью

САР с единичной обратной связью порядка n статическая, если в полиноме знаменателя

$$A_p(p) = a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0$$

передаточной функции системы в разомкнутом состоянии

$$W_p(p) = B_p(p)/A_p(p) \quad (3.14)$$

свободный член ненулевой: $a_0 \neq 0$.

Пусть линейная САР с единичной обратной связью⁵, которую определили как статическую, до момента времени $t = t_0$ находится в установившемся режиме, который характеризуется:

а) постоянством входной и выходной величин

$$x(t_0 - 0) = X_1; \quad y(t_0 - 0) = Y_1 = K_{ст} X_1; \quad (3.15)$$

где $(t_0 - 0)$ – время, предшествующее моменту t_0 ;

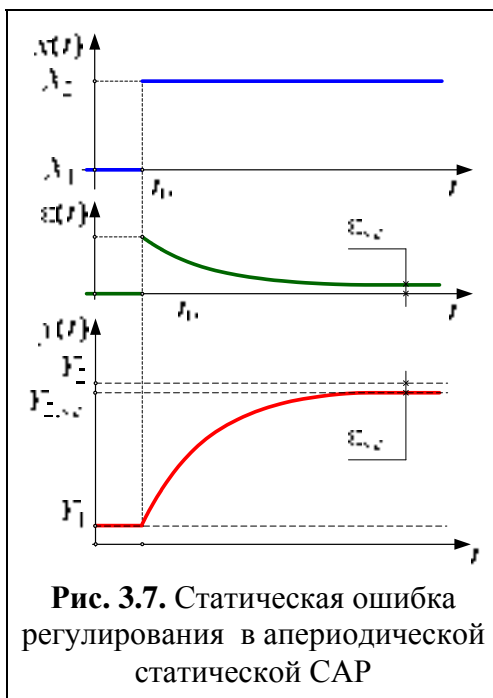


Рис. 3.7. Статическая ошибка регулирования в апериодической статической САР

б) ошибкой регулирования $\epsilon(t_0 - 0) = 0$,

В момент времени $t = t_0$ из статического состояния САР выводится скачкообразным изменением входной величины со значения X_1 до значения $X_2 = \text{const}$. Скачок входного сигнала в момент времени $(t_0 + 0)$, следующий непосредственно за моментом t_0 , вследствие инерционности САР, приводит к скачкообразному изменению ошибки регулирования

$$\epsilon(t_0 + 0) = X_2 - Y_1 \quad (3.16)$$

и, как следствие, к возникновению переходного процесса.

В режиме переходного процесса ошибка регулирования

$$\epsilon(\tau) = X_2 - y(\tau) \quad (3.17)$$

функция времени $\tau = (t_0 + t)$, $0 < t < \infty$.

При этом в контуре замкнутой САР происходят изменения сигналов:

$$\epsilon(\tau) \uparrow \rightarrow y(\tau) \uparrow \rightarrow \epsilon(\tau_+) \downarrow \rightarrow \dots, \quad (3.18)$$

где τ_+ – момент времени, следующий за моментом τ .

⁵ Для САР с единичной отрицательной обратной связью статический коэффициент передачи $K_{ст} = 1$.

Казалось бы, что переходный процесс закончится, в САР наступит статический режим при $\varepsilon = 0$ и, аналогично формулам (3.15), следовало бы записать:

$$x(\tau \rightarrow \infty) = X_2; \quad y(\tau \rightarrow \infty) = Y_2 = K_{\text{ст}} X_2; \quad \varepsilon(\infty) = 0. \quad (3.19),$$

Однако переходный процесс закончится при $\varepsilon \neq 0$, ибо реальный объект управления не может изменить свое состояние при сколь угодно малом изменении входного воздействия, например, из-за действия вездесущего трения. Движение объекта управления возможно лишь при условии, что воздействие превышает тормозящий эффект сил трения. Следовательно, формулы (3.19) для статической САР несправедливы. Для статической САР установившийся режим характеризуется уравнениями (рис. 3.7):

$$x(\infty) = X_2; \quad \varepsilon(\infty) = \varepsilon_{\text{уст}} \neq 0; \quad y(\infty) = Y_{\text{уст}} = (Y_2 - \varepsilon_{\text{уст}}) = K_{\text{ст}} X_2 - \varepsilon_{\text{уст}}. \quad (3.20)$$

Таким образом, в замкнутой статической САР

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon(t) = \varepsilon_{\text{уст}} \neq 0, \quad (3.21)$$

ибо при отсутствии возмущений в динамическом режиме с течением времени происходит изменение выходной величины $y(t)$ в направлении уменьшения сигнала ошибки до установившегося значения.

3.5. ПРЯМЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА И ЗАПАС УСТОЙЧИВОСТИ

Прямые оценки качества систем определяются непосредственно по кривым переходного процесса по управляющему воздействию при неизменной нагрузке (рис. 3.8).

Качество САР оценивается:

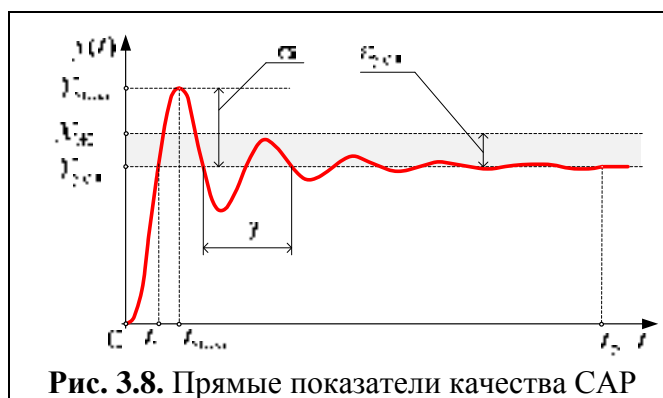


Рис. 3.8. Прямые показатели качества САР

- 1) статической ошибкой регулирования $\varepsilon_{\text{уст}}$;
- 2) временем регулирования t_p ;
- 3) перерегулированием σ ;
- 4) временем нарастания t_n ;
- 5) временем нарастания до достижения первого максимума $t_{\text{макс}}$;
- 6) периодом колебаний T ;
- 7) числом колебаний N за время регулирования.

Статическая ошибка регулирования $\varepsilon_{\text{уст}}$ определяется:

- а) при воздействии на вход САР функции вида $1(t)$ при $t \rightarrow \infty$;
- б) из разложения в степенной ряд преобразованного по Лапласу сигнала ошибки $E(p)$:

$$E(p) = C_0 X(p) + C_1 p X(p) + \frac{1}{2!} C_2 p^2 X(p) + \frac{1}{3!} C_3 p^3 X(p) + \dots, \quad (3.22)$$

где $X(p)$ – преобразованный по Лапласу входной сигнал $x(t)$; C_i , $i = 0, 1, 2, \dots, n$ – коэффициенты ошибок

$$C_0 = W_{xe}(0); C_i = d^i \{W_{xe}(p)\} / dp^i \text{ при } p = 0, \quad (3.23)$$

которые определяются из выражения для передаточной функции замкнутой САР по ошибке

$$W_{xe}(p) = E(p)/X(p). \quad (3.24)$$

Для структуры САР, показанной на рис. 3.8, формула (3.24) имеет вид

$$W_{\varepsilon}(p) = \frac{1}{1 + W_p(p)}. \quad (3.25)$$

Откуда, *абсолютная статическая ошибка* регулирования $\varepsilon_{уст}$ при входном воздействии

$$x(t) = X_{зад} \cdot 1(t), \quad (3.26)$$

где $X_{зад} = \text{const}$; $1(t)$ – функция Хевисайда, определяется из формулы (3.22) на основании предельной теоремы операционного исчисления

$$\begin{aligned} \varepsilon_{уст} &= \lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon(t) = \lim_{p \rightarrow 0} pE(p)_{p=0} = \lim_{p \rightarrow 0} pW_{xe}(p)X(p) = X_{зад} \lim_{p \rightarrow 0} W_{xe}(p) = \\ &= X_{зад} \frac{A(p)}{A(p) + B(p)} = X_{зад} \frac{a_0}{a_0 + b_0} = X_{зад} \frac{1}{1 + b_0/a_0} = X_{зад} \frac{1}{1 + k_p}, \end{aligned} \quad (3.27)$$

где k_p – коэффициент передачи разомкнутой САР.

Статическая *абсолютная* ошибка регулирования (3.27) может быть измерена по переходной характеристике. Величина $\varepsilon_{уст}$ определяется по отклонению установившегося значения выходной величины $Y_{уст}$ от желаемого $X_{ж} = X_{зад}$ на входе, которое должно быть отработано системой регули-

рования до допустимого рассогласования между ними (рис. 3.8).

Статическая *относительная* ошибка регулирования δ_p в *процентах* при входном воздействии $0 < X_{ж} \neq 1$:

$$\delta_p, \% = \frac{\varepsilon_{уст}}{X_{зад}} \cdot 100\% = \frac{1}{1 + k_p} \cdot 100\%, \quad (3.28)$$

или, по переходной характеристике,

$$\delta_p, \% = \frac{X_{зад} - X_{уст}}{X_{зад}} \cdot 100\%.$$

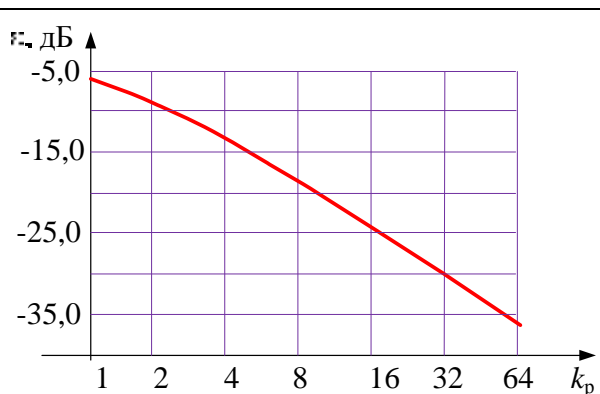


Рис. 3.9. Зависимость статической ошибки регулирования от коэффициента передачи разомкнутой САР

А при $X_{зад} = 1$:

$$\delta_p, \% = \varepsilon_{уст(1)} \cdot 100\% = (1 - X_{уст(1)}) \cdot 100\%, \quad (3.29)$$

где $X_{уст(1)}$ и $\varepsilon_{уст(1)}$ – соответственно установившиеся значения выходной величины САР и статической ошибки при единичном ступенчатом воздействии на её вход.

Статическая относительная ошибка регулирования в децибелах при $X_{зад} = 1$ (см. формулу (3.27)):

$$\delta_p, \text{дБ} = 20 \lg \delta_p = -20 \lg(1 + k_p). \quad (3.30)$$

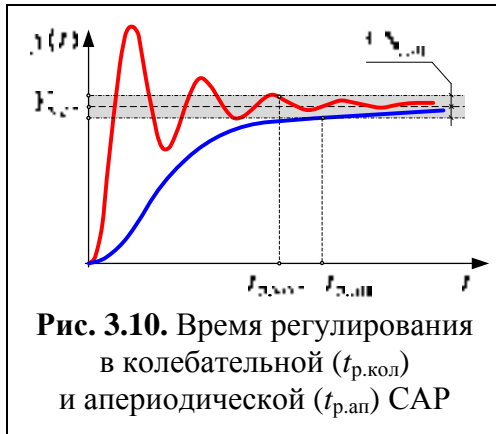


Рис. 3.10. Время регулирования в колебательной ($t_{р,кол}$) и апериодической ($t_{р,ап}$) САР

Как показано на рис. 3.9, с увеличением коэффициента передачи k_p на октаву статическая ошибка уменьшается примерно на 6 дБ.

Время регулирования. В общем случае под временем регулирования t_p понимается временной промежуток, в течение которого выходная величина САР, при воздействии на её вход сигнала вида (3.26), не отличается от значения $Y_{уст}$ более, чем на величину допуска $\Delta_{доп}$ (рис. 3.10). Конечное время ре-

гулирования существенно влияет на динамическую ошибку управления.

Перерегулирование. Перерегулированием характеризуется колебательный переходный процесс. Под перерегулированием понимается максимальное отклонение выходной величины САР от положения равновесия, которое оценивается абсолютным значением (рис. 3.8)

$$\sigma = Y_{\max} - Y_{уст}, \quad (3.31)$$

либо относительным значением в процентах

$$\sigma\% = \frac{X_{\max} - X_{уст}}{X_{уст}} \cdot 100\%. \quad (3.32)$$

От значения σ зависят динамические ошибки регулирования, а также перегрузки исполнительного элемента и объекта управления, которые оказывают существенное влияние на надежность САР.

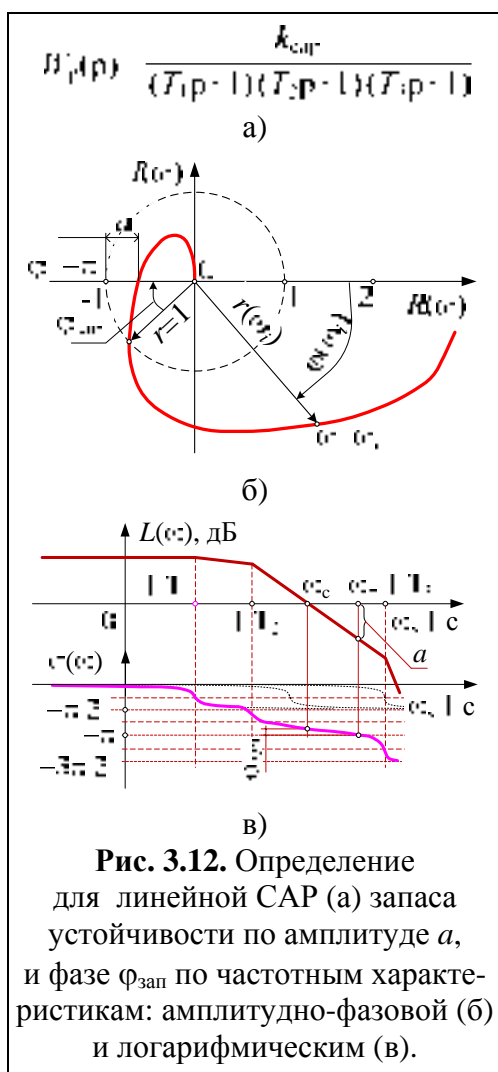
Запас устойчивости. Необходимым требованием к САР является её устойчивость и обеспечение запаса устойчивости.

Для *устойчивой* САР характерно, что если она к моменту t_0 находилась в установившемся состоянии $x(t_0) = X_{уст.0}$, то после воздействия в течение короткого интервала времени $[t_0; (t_0 + \Delta t)]$ (рис. 3.12, а)

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = X_{уст.0} \vee X_{уст.\Delta t},$$



Рис. 3.11. Контрольное воздействие (а) и переходные процессы устойчивой (б) и неустойчивой (в) соответственно при колебательном (кривые 1,3.) и апериодическом (кривые 2,4) переходном процессе



где $x(t)$ – выходной сигнал САР, $X_{\text{уст.}\Delta t}$ – новое установившееся состояние (рис. 3.12, б).

САР *неустойчивая*, если при тех же условиях выходная величина её неограниченно увеличивается по экспоненциальному, либо аperiодическому закону (рис. 3.12, в).

Уменьшение времени регулирования и увеличение перерегулирования устойчивой САР подводит её к границе устойчивости. Диапазон изменений коэффициентов полиномов САР (см. формулы (3.12) и (3.13)), в пределах которого САР остается устойчивой, определяет её запас устойчивости.

При курсовом проектировании следует выполнить оценку запаса устойчивости линейной замкнутой САР согласно критерию Найквиста по амплитудно-фазовой и по логарифмическим амплитудной и фазовой частотным характеристикам в разомкнутом её состоянии. Близость параметров САР к границе устойчивости характеризуется запасом по амплитуде a и по фазе $\varphi_{\text{зап}}$ (рис. 3.12).

3.6. СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ С МИНИМАЛЬНЫМ НАБОРОМ ФУНКЦИОНАЛЬНО НЕОБХОДИМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ (МНЭ)

Обобщенная структура САР с МНЭ включает совокупность функцио-



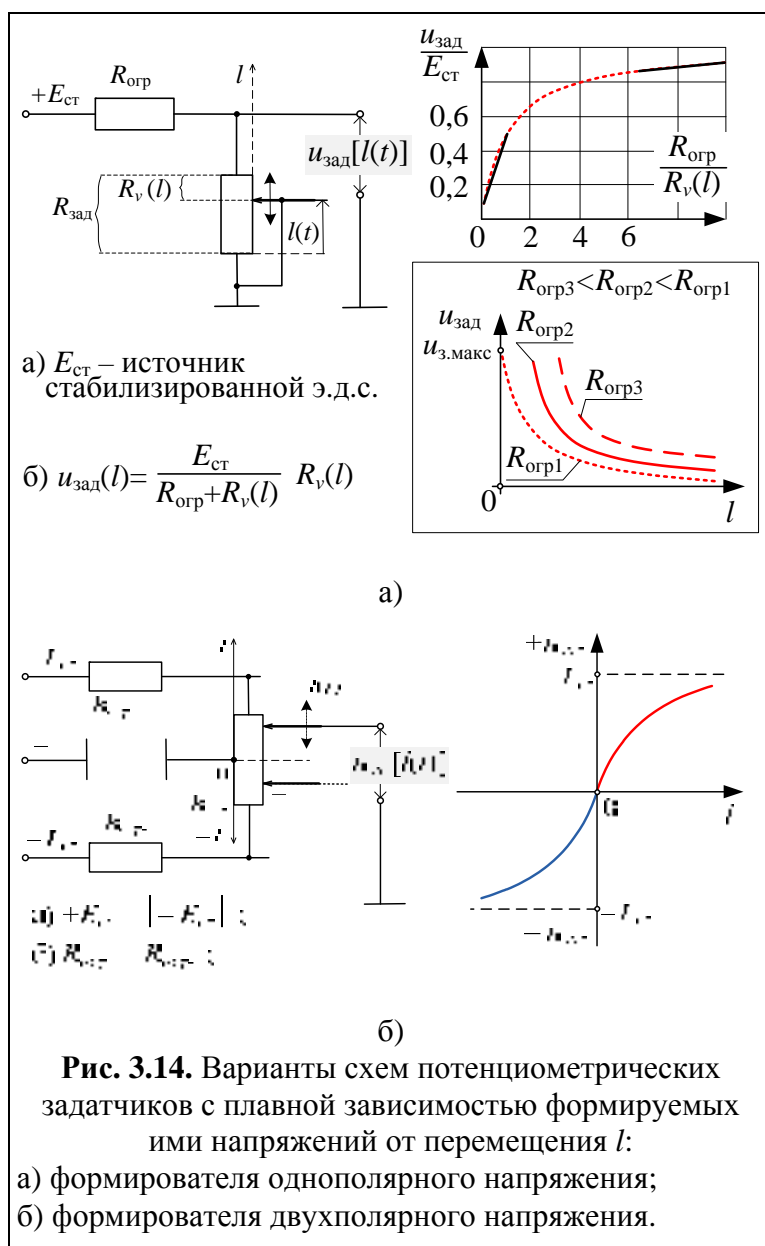
нально связанных устройств и ОУ, в принципе способных решить задачу управления без предъявления требований к его качеству (рис. 3.13).

Содержанием управления ОУ является достижение его движения (в ши-

роком смысле движение ОУ понимается как изменение его состояния). В зависимости от объекта это, например, может быть:

- а) для электродвигателя – механическое вращательное движение ротора;
- б) в аквариуме с регулируемым подогревом – температура воды;
- в) для регулируемого искусственного источника света – освещенность рабочего места;
- г) для автогенератора – частота колебаний;
- д) в химическом реакторе – концентрация реагента.

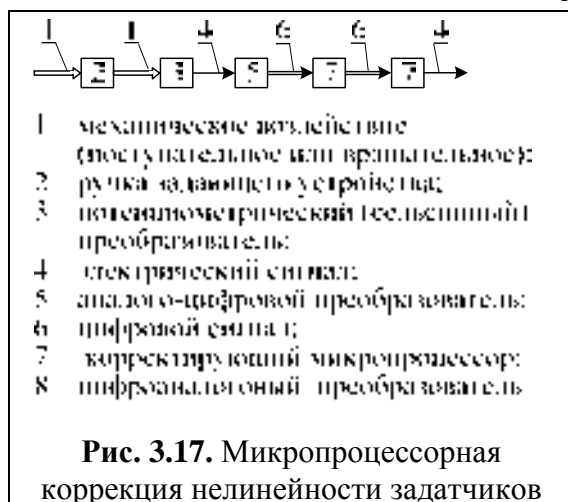
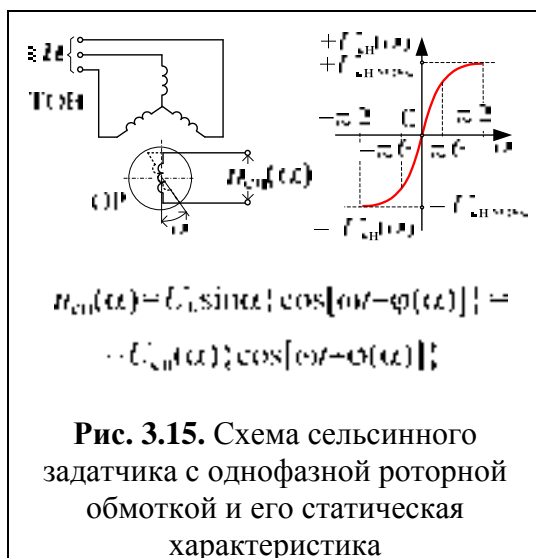
3.6.1. Задающее устройство



Задающее устройство (задатчик) формирует сигнал, определяющий цель управления (желаемый сигнал управления). Это устройство, преобразующее линейное (l) или угловое (α) перемещение органа управления (ручки, ползуна, кноппеля, джойстика, педали), как правило, в электрический сигнал, пропорциональный этому перемещению.

Желаемый сигнал управления представляет собой в системах слежения случайную функцию времени $x_{зад}(t)$, а в системах стабилизации $x_{зад}(t) = X_{зад} = \text{const}$.

Наиболее широкое применение нашли резисторные задатчики постоянного и переменного напряжения (рис. 3.14) и индуктивные (сельсинные) (рис. 3.15) задатчики переменного напряжения.



Сельсин⁶ – это электрическая машина переменного тока, вырабатывающая напряжения, амплитуды и фазы которых определяются угловым положением ротора. Из двух возможных режимов сельсинов – индикаторного и трансформаторного – для задатчика применяется трансформаторный режим.

Самый простой пример схемы сельсина с однофазной обмоткой ротора показан на рис. 3.15 и рис. 3.16. Трехфазная обмотка возбуждения (ТОВ) сельсина представляет собой три пространственно смещенные относительно друг друга под углом 120° катушки, которые расположены на статоре и соединены «звездой», включенная в сеть трехфазного переменного тока (рис. 3.15). На роторе размещена однофазная обмотка. Концы роторной обмотки выведены на контактные кольца.

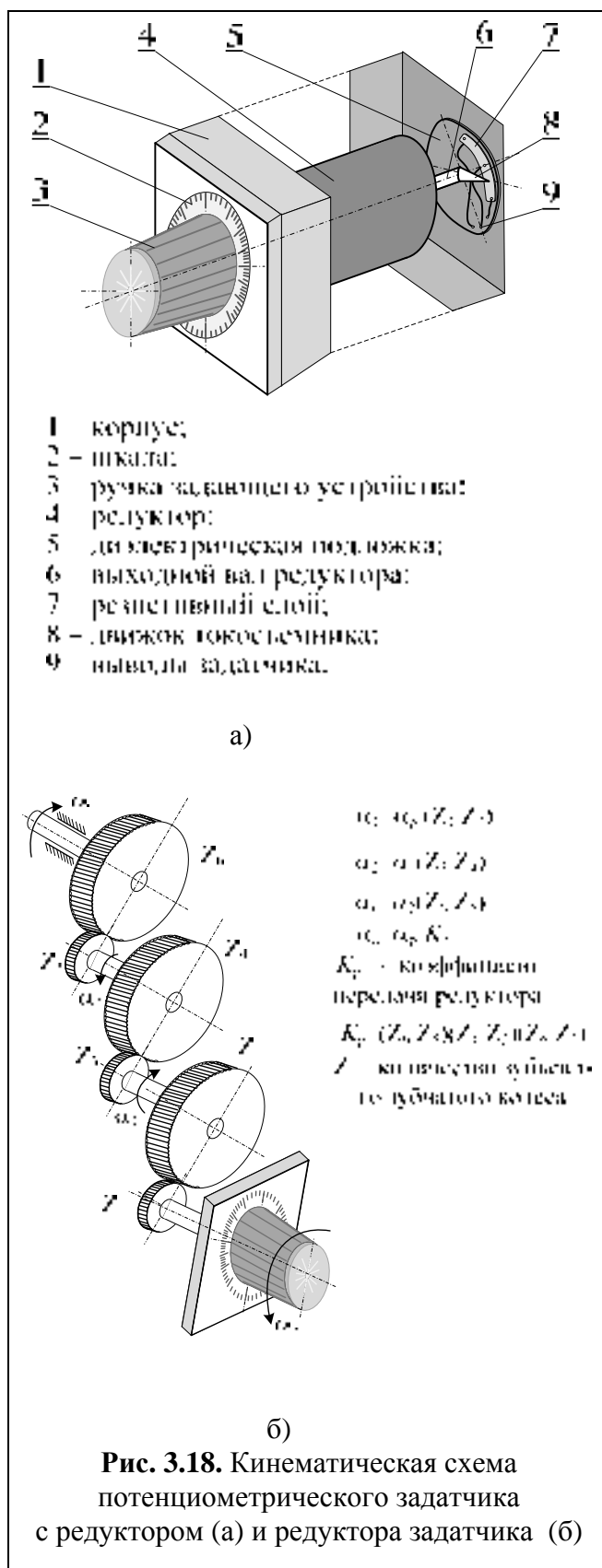
При протекании переменного тока через обмотки возбуждения внутри корпуса статора создаются переменные магнитные потоки.

Этими потоками пересекается обмотка ротора, в которой создается суммарная трансформаторная электродвижущая сила (ЭДС) $u_{\text{сн}}(\alpha)$.

Задатчики, как резисторный, так и сельсинный, обладают нелинейностями статических характеристик соответственно $u_{\text{зад}}(I)$ и $U_{\text{сн}}(\alpha)$. Чтобы уменьшить значимость нелинейности при использовании резисторных и сельсинных задатчиков:

– ограничиваются диапазоны изменения сопротивлений $R_v(I)$ (см. рис. 3.14, а); или углов поворота $[\alpha \leq (\pm\pi/6)]$ ротора сельсина-задатчика, при которых не-

⁶ От англ. слов: self + synchronizing – самосинхронизирующийся.



линейность характеристики не превышает наперед заданную;

– вводится компенсация нелинейности применением профильных каркасов резисторов;

– используются корректирующие микропроцессоры (рис. 3.17);

– между осью ручки задающего воздействия и движком потенциометра (валом сельсина) устанавливается понижающий редуктор (рис. 3.18).

Таким образом, задающее устройство может представлять собой сложную электромеханическую конструкцию, свойства которой важно учитывать при проектировании следящей и/или стабилизирующей САР.

3.6.2. Сравнивающее устройство

Сравнивающее устройство предназначено для формирования сигнала, пропорционального отклонению (сигнала ошибки)

$$\varepsilon(t) = k_{cy}[E_x(t) - E_{oc}(t)], \quad (3.33)$$

где $E_x(t)$, $E_{oc}(t)$ – напряжения, поступающие соответственно от задающего устройства и устройства обратной связи; $k_{cy} = \text{const}$ – коэффициент передачи сравнивающего устройства (рис. 3.19).

К схемам СУ предъявляются требования:

а) высокой чувствительности;

б) высокой линейности ха-

рактеристики при минимальной зоне нечувствительности;

в) малого потребления энергии (следовательно, высокого входного сопротивления $R_{вх.ус}$ по обоим входам);

г) нормального функционирования нагрузки (УПУ), т. е. формировать разностный сигнал требуемой мощности, для чего целесообразно, чтобы схема имела низкое выходное сопротивление $R_{\text{вых. ус}}$.

В системах автоматики применяются механические, электро-механические и электрические устройства сравнения. В качестве сравнивающих устройств могут использоваться аналоговые сумматоры электрических величин, а для механических величин – дифференциальные редукторы, сельсинные пары в трансформаторном режиме [27].



Рис. 3.19. Структура устройства для сравнения электрических напряжений

В САР с обработкой электрических величин в качестве сравнивающих устройств применяются:

- а) схема последовательного включения источников ЭДС (рис. 3.19);
- б) потенциометрический сумматор ЭДС (рис. 3.20, а);
- в) трансформаторный сумматор переменных ЭДС (рис. 3.20, б);
- г) сумматор напряжений на дифференциальном усилителе (рис. 3.20, в);
- д) сумматор напряжений на операционных усилителях (рис. 3.20, д).

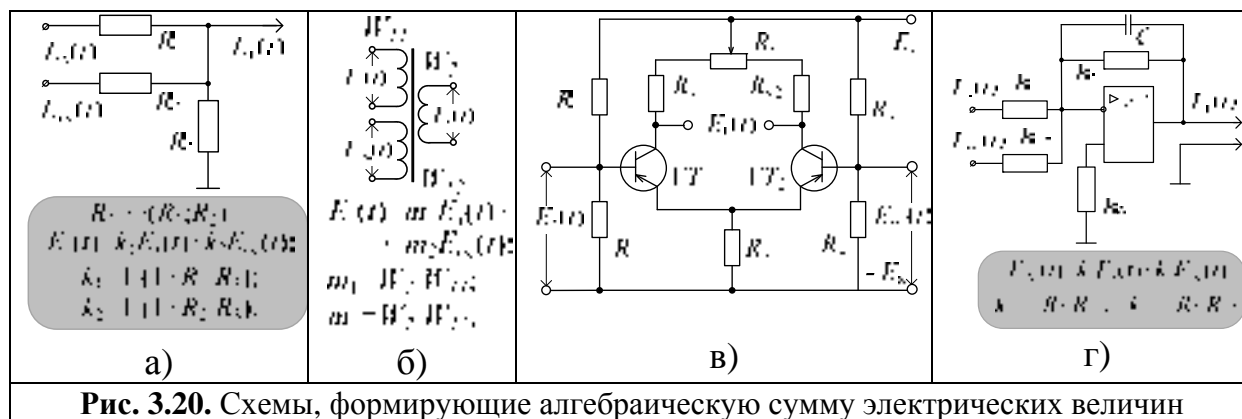


Рис. 3.20. Схемы, формирующие алгебраическую сумму электрических величин

Следует учитывать некоторые особенности практического исполнения приведенных электрических схем и их практического применения. Так, несоблюдение ограничений потенциометрического сумматора (рис. 3.20, а) приводит к возрастанию ошибок регулирования из-за нарушения линейности в уравнении (3.33). С той же целью следует соблюдать режим малого сигнала в трансформаторном сумматоре, что гарантирует непереход магнитопровода в режим насыщения. При подключении сигналов к СУ необходимо убедиться в их противофазности.

3.6.3. Усилительно-преобразующее устройство

УПУ преобразует сигнал ошибки $\varepsilon(t)$ к виду $\varepsilon_{\text{п}}(t)$, при котором может нормально (т. е. согласно требованиям технических условий) функционировать исполнительное устройство.

Преобразование, в широком смысле, может включать:

- 1) усиление сигнала;
- 2) изменение вида сигнала, например, переход от оптического, акустического и т. п. сигнала к электрическому сигналу;
- 3) изменение формы сигнала, например, переход от электрического сигнала с изменением амплитудного качества к сигналу с изменением частотного качества.
- 4) аналого-цифровое и цифроаналоговое преобразования.

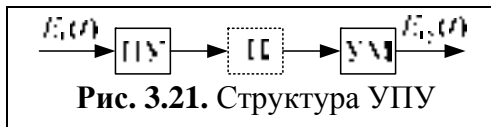


Рис. 3.21. Структура УПУ

Соответственно решаемым задачам структура УПУ, в общем случае, может включать (рис. 3.21): предварительный усилитель ПУ, преобразователи сигналов

П, выходной усилитель – усилитель мощности УМ.

Усилители. ПУ, как правило, – усилитель напряжения. Он предназначен для компенсации потерь сигнала ошибки во входных цепях преобразователя или усилителя мощности. В связи с этим, наряду с коэффициентом усиления напряжения, важный показатель для ПУ – входное сопротивление $R_{\text{вх.пу}}$. Следует добиваться соотношения $R_{\text{вх.ус}} \ll R_{\text{вх.пу}}$ исполнительного устройства. Функционирование ИУ будет соответствовать техническим требованиям, если на него подается номинальное напряжение U_n номинальной мощности P_n . Для постоянного тока справедливо, что УМ должен генерировать сигнал мощности

$$P_{\text{макс}} > P_n = U_n I_n, \quad (3.34)$$

где I_n – ток, при котором ИУ (нагрузка) потребляет сигнал номинальной мощности.

В связи с этим УМ, при согласованных входном $R_{\text{вх.ум}}$ и выходном $R_{\text{вых.ум}}$ сопротивлениях соответственно с ПУ и исполнительным устройством

$$R_{\text{вых.пу}} = R_{\text{вх.ум}}; \quad R_{\text{вых.ум}} = R_{\text{вх.иу}}, \quad (3.35)$$

где $R_{\text{вых.пу}}$ и $R_{\text{вх.иу}}$ – соответственно выходное и входное сопротивления ПУ и ИУ, должен иметь коэффициент усиления

$$K_{p.ум} = P_n / P_{\text{вх}}, \quad (3.36)$$

где $P_{\text{вх}}$ – мощность, развиваемая ПУ на входе усилителя мощности.

Предварительный усилитель строится, как правило, на одном каскаде по схеме с общим эмиттером, а усилитель мощности – по двухтактной схеме с общим эмиттером или с общим коллектором (см. табл. 3.1). При необходимости согласования между ними включается буферный каскад.

Современным решением построения усилительного тракта считается применение для этой цели операционных усилителей [22]. Если объект управления требует мощного управляющего сигнала, то после ПУ включается усилитель мощности (УМ). В качестве УМ может быть применен, например, источник питания, управляемый выходным сигналом ПУ.

Сравнительные характеристики усилителей

Параметр	Схема ОЭ	Схема ОБ	Схема ОК
коэффициент усиления по току	Десятки – сотни	Немного меньше единицы	Десятки – сотни
коэффициент усиления по напряжению	Десятки – сотни	Десятки – сотни	Немного меньше единицы
коэффициент усиления по мощности	Сотни – десятки тысяч	Десятки-сотни	Десятки – сотни
Входное сопротивление	Сотни ом – единицы килоом	Единицы – десятки ом	Десятки – сотни килоом
Выходное сопротивление	Единицы – десятки килоом	Сотни килоом – единицы мегаом	Сотни ом – единицы килоом

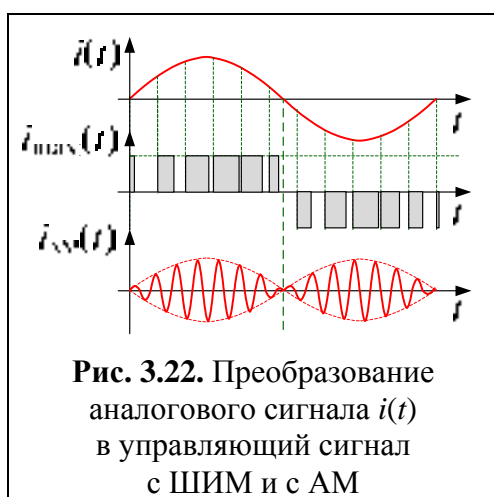


Рис. 3.22. Преобразование аналогового сигнала $i(t)$ в управляющий сигнал с ШИМ и с АМ

Преобразователи. Применяются качественные и информационные преобразователи сигналов. Качественные преобразователи предназначены для преобразования вида электрического сигнала. Например, преобразование медленноменяющегося сигнала в сигнал с широтно-импульсной модуляцией или в переменный сигнал изменяющейся амплитуды (рис. 3.22).

Информационные преобразователи строятся на микропроцессорной основе и применяются для коррекции динамических свойств САР. Их структура включает АЦП, микроконтроллер и ЦАП (см. рис. 3.17).

3.6.4. Исполнительное устройство и датчик обратной связи

Исполнительное устройство – устройство, непосредственно воздействующее на объект управления. Поэтому в зависимости от ОУ исполнительным элементом может быть:

- а) усилитель напряжения или мощности;
- б) электродвигатель;
- в) регулируемый источник электрического напряжения (тока);
- г) p – n переход полупроводникового прибора с управляемой активной либо реактивной проводимостью (база-эмиттер в биполярном транзисторе, варикап и др.).

Датчик обратной связи предназначен для преобразования движения ОУ в электрический сигнал. Он формирует сигнал $y_{oc}(t)$, пропорциональный движению объекта

$$y_{oc}(t) = k_d y(t), \quad (3.37)$$

где k_d – статический коэффициент передачи датчика.

В рамках рассматриваемых САР датчик обратной связи – это устройство электрического или электромеханического принципа действия. Электромеханические датчики обратной связи имеют много общего с задатчиками входных сигналов.

Объект управления. Управляющий сигнал, сформированный из сигнала ошибки рядом устройств, включенными в прямую ветвь САР, поступает для управления объектом. Основные сведения по принципу действия, особенностям статических и динамических свойств объектов управления, для которых проектируется САР, приведены в Техническом задании (согласно специализациям).

4. ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЙ ПРОЕКТ И ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ПО ЭЛЕМЕНТАМ ИСХОДНОЙ САР

Содержание задания на курсовое проектирование определяется программой изучения дисциплины «Теория автоматического управления» и заключается в расчете эскизного проекта линейной замкнутой стационарной статической устойчивой САР стабилизации движения объекта управления с заданными показателями качества при номинальном значении входного сигнала.

Тематика курсового проектирования отличается в зависимости от специализации. Так, для студентов специализации «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте» – это расчет системы автоматической стабилизации скорости вращения электропривода; для студентов специализаций «Телекоммуникационные системы и сети на железной дороге» и «Радиотехнические системы на железной дороге» – расчет автоматических регулировок в радиотехнических системах; для специализации «Энергоснабжение железных дорог» – расчет автоматической регулировки показателей мощности, потребляемой железнодорожными энергетическими установками.

Конкретно вариант задания определяется по трем целым числам, задаваемым преподавателем:

- а) C – условный номер специализации;
- б) Γ – последняя цифра номера группы;
- в) N – порядковый номер студента в классном журнале.

Исходные данные для проектирования:

- объект управления (в зависимости от темы);
- принцип управления – по отклонению;
- структура исходной САР (рис. 4.1);
- уравнения элементов исходной САР;
- показатели качества желаемой САР:
 - в статическом режиме – статическая ошибка регулирования δ ;
 - в динамическом режиме:
 - время регулирования t_p , с;
 - перерегулирование σ , %;
 - запас устойчивости по фазе φ_z , град.

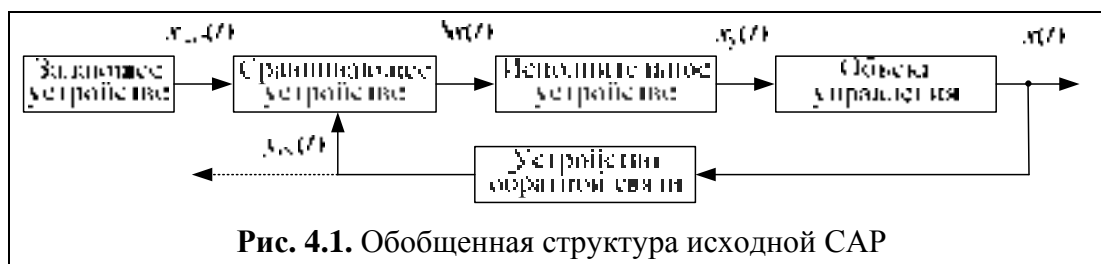


Рис. 4.1. Обобщенная структура исходной САР

4.1. ТЕМЫ КУРСОВЫХ ПРОЕКТОВ ДЛЯ СТУДЕНТОВ СПЕЦИАЛИЗАЦИИ «АВТОМАТИКА И ТЕЛЕМЕХАНИКА НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ»

4.1.1. Варианты заданий

Варианты заданий на курсовое проектирование сведены в табл. 4.1. Для выбора варианта вычислить остаток от деления на три числа N :

$$\mu_3 = N(\text{mod}3).$$

Таблица 4.1

Тема и варианты заданий на курсовое проектирование				
№ п/п	Тема	Объект регулирования		
		$\mu_3 = 0$	$\mu_3 = 1$	$\mu_3 = 2$
1	Расчет линейной стационарной системы автоматического регулирования угловой скорости вращения электропривода объектов промышленного назначения	Воздушный компрессор (Кп)	Жидкостный насос (Н)	Камнедробилка (Кд)

4.1.2. Исходные данные

1. Функциональная схема исходной САР (см. рис. 4.2)
2. Параметры электропривода (см. табл. 4.2 и табл. 4.3)

Таблица 4.2

Параметры электропривода			
№ п/п	Параметр	Обозначение, размерность	Значение согласно техническому заданию
1	Напряжение якоря электродвигат. номинальное	$U_{яц.н}$, В	$=220$
2	Мощность электродвигателя номинальная	P_n , кВт	$1,55 \cdot N$
3	Ток якоря номинальный	I_n , А	$8 \cdot N$
4	Скорость вращ. вала электродвигат., номинальн.	n_n , об/мин	$250 \cdot (\Gamma + 2)$
5	Угловая скор. вращен. вала двигат., номинальная	Ω_n , 1/с	$(\pi n_n)/30$
6	Сопротивление якорной цепи двигателя	$R_{яц}$, Ом	$3,2/N$
7	Индуктивность якорной цепи двигателя	$L_{яц}$, Гн	$\Gamma/(40 \cdot \sqrt{N})$
8	Момент инерции, приведенный к валу двигателя	J , кг·м ²	$\Gamma/(40 \cdot \sqrt{N})$
9	Коэффициент передачи двигателя	$k_{дв}$, рад/(В·с)	$\Omega_n / U_{яц.н}$
10	Коэффициент передачи тиристорного преобразов.	$k_{тп}$, А/В	$30 + \lg(C + \Gamma + N)$
11	Коэффициент редуктора P_m	$k_{рм}$	$1/(1 + \mu_3)$
12	Электромагнитная постоянн. времени якорн. цепи	$T_{яц}$, с	$L_{яц}/R_{яц}$
13	Электромеханическая постоянн. врем. двигателя	$T_{эм}$, с	$k_{дв} J R_{яц}$
14	Постоянная времени объекта управления	T_0 , с	$[(N(\text{mod}3) + 2) T_{эм}]$
15	Коэффициент передачи объекта, датчика	$k_o k_d$, (В·с)/рад	$k_o k_d = 0,1$

Таблица 4.3

Статическая характеристика электродвигателя

№ пп	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_{\text{я}}/U_{\text{ян}}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$n/n_{\text{н}}$	0	0,9	1,3	2,0	2,6	3,3	4,1	5,0	6,2	7,3
№ пп	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$U_{\text{я}}/U_{\text{ян}}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$n/n_{\text{н}}$	8,8	10,0	11,5	13,0	14,4	16,0	18,1	20,0	21,2	21,9

4.1.3. Требования

Система должна обладать желаемыми показателями качества (см. табл. 4.4) при сохранении устойчивости на номинальном режиме и при отклонениях от номинального на $\pm 30\%$ (см. табл. П2).

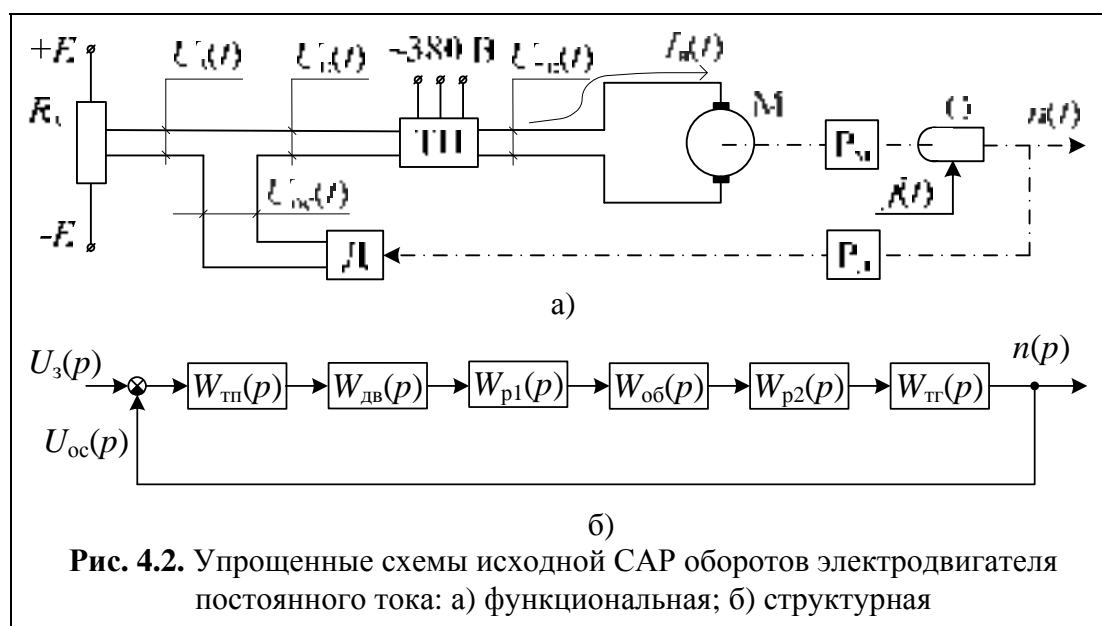
Таблица 4.4

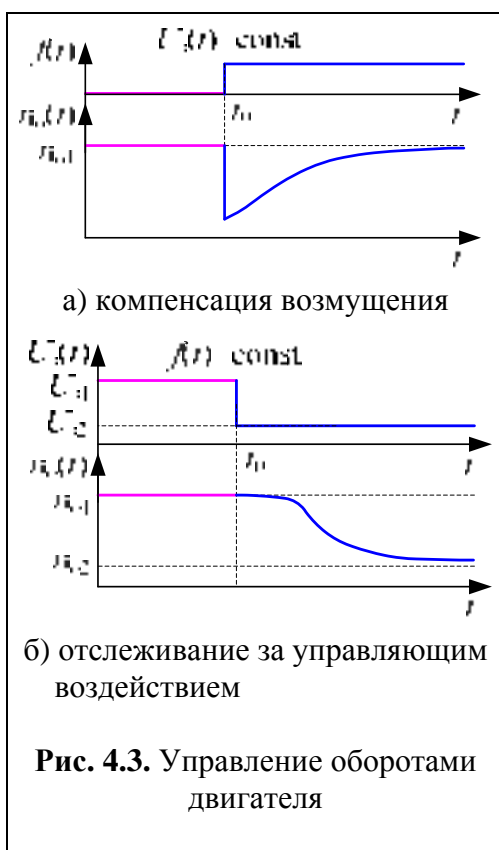
Желаемые показатели качества проектируемой САР

№ пп	Показатель	Желаемое значение	Требование
1	статическая ошибка регулирования δ_p %	$\delta_{\text{ж}} = 0,8 \cdot (C + \Gamma)$	$\delta_p \leq \delta_{\text{ж}}$
2	время регулирования t_p , с	$t_{\text{рж}} = 1,5 \cdot (C + \Gamma)$	$t_p \leq t_{\text{рж}}$
3	перерегулирование %	$\sigma_{\text{ж}} 10 \cdot \log_2(C + \Gamma)$	$\sigma \leq \sigma_{\text{ж}}$

4.1.4. Особенности исходной САР

Функциональная схема (рис. 4.2, а). Функционирование САР оборотов электродвигателя постоянного тока заключается в непрерывном отслеживании выходной величиной (оборотами) $n_o(t)$ за сигналом ошибки $U_{\varepsilon}(t)$. В статическом режиме сигнал ошибки $U_{\varepsilon}(t) = 0$, на выходе тиристорного преобразователя сохраняется постоянное напряжение $U_{\text{тп}}(t) = \text{const}$ и поддерживается постоянный ток якоря $I_{\text{я}}$, благодаря чему обороты вала объекта регулирования $n_o(t) = \text{const}$.





Если из-за действия возмущений или изменения задающего напряжения $U_3(t)$ сигнал ошибки возрастет $[U_\varepsilon \uparrow]$, то начинается динамический процесс, приводящий к установлению $U_\varepsilon(t) \rightarrow 0$ (с учетом статической ошибки регулирования):

$$\dots U_\varepsilon \uparrow \rightarrow n_o(t) \uparrow \rightarrow U_{oc}(t) \uparrow \rightarrow U_\varepsilon \downarrow \rightarrow n_o(t) \downarrow \dots \rightarrow (\text{стабилизация оборотов}).$$

Возмущения компенсируются до возвращения оборотов $n_o(t)$ к почти исходному их значению $n_{o1}(t)$, а изменение задающего напряжения приводит к установке другого значения оборотов $n_{o2}(t)$ (рис. 4.3).

Структурная схема. В структурной (алгоритмической) схеме исходной САР (рис. 4.2, б) для упрощения принято, что контроль выходной величины САР производится по сигналу, снимаемому с датчика обратной связи. Следовательно, исходная – это САР с единичной обратной связью. В

прямой ветви САР сосредоточены последовательно включенные динамические звенья с передаточными функциями, определяемыми согласно (3.9):

- а) объект управления – $W_{об}(p)$;
- б) тиристорный преобразователь – $W_{тп}(p)$;
- в) электродвигатель постоянного тока – $W_{об}(p)$;
- д) редукторы – $W_{p1}(p)$ и $W_{p2}(p)$;
- г) датчик обратной связи (тахогенератор) – $W_{тп}(p)$

и сравнивающее устройство, заданное уравнением в Преобразованиях Лапласа,

$$E(p) = U_3(p) - U_{oc}(p).$$

4.1.5. Объекты регулирования

Компрессор – это устройство, предназначенное для создания избыточного давления воздуха путем нагнетания его в замкнутый объем [36].

По принципу действия и основным конструктивным особенностям компрессоры различают: поршневые, ротационные, центробежные, осевые и струйные.

Компрессоры также подразделяют:

- по роду сжимаемого газа: воздушные, азотные, кислородные и др.;
- по создаваемому давлению: низкого – от 0,3 до 1 Мн/м²; среднего – до 10 Мн/м² и высокого давления – выше Мн/м²;

– по производительности V (обычно $[V] = \text{м}^3/\text{мин}$).

В компрессорах обычно предусматривается автоматическое регулирование производительности в зависимости от расхода сжатого газа для обеспечения постоянного давления в нагнетательном трубопроводе. Простейший из способов регулирования производительности – регулирование изменением частоты вращения вала.

Компрессоры характеризуются частотой оборотов основного вала n и потребляемой мощностью P .

При всем многообразии конструкций компрессоров структурно они состоят из одинаковых элементов (рис. 4.4). Элементом, создающим повышенное давление воздуха, является нагнетатель 17. Нагнетатель приводится в действие путем вращения входного вала 10. На вход нагнетателя входной поток воздуха 1 отбирается через трубопроводы 3, на входе которых установлен (для уменьшения динамического сопротивления потока) диффузор 2 и фильтр предварительной очистки 4.

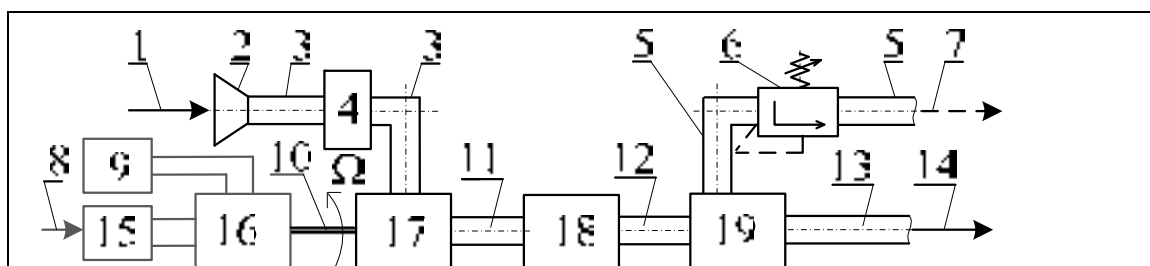


Рис. 4.4. Структура нагнетания воздуха:

- 1 – поток отбираемого воздуха для сжатия
- 2 – диффузор входного трубопровода компрессора
- 3 – входные (впускные) патрубки компрессора
- 4 – входной фильтр очистки воздуха
- 5 – патрубки стравливания избыточного давления
- 6 – предохранительный клапан
- 7 – поток стравливаемого воздуха
- 8 – управляющее воздействие на электропривод
- 9 – устройство электропитания двигателя электропривода
- 10 – выходной вал электропривода и он же приводной (входной) вал компрессора
- 11 – выходной (выпускной) трубопровод нагнетателя
- 12 – выходной (выпускной) трубопровод компрессора
- 13 – выходной (выпускной) трубопровод воздушного компрессора
- 14 – поток сжатого воздуха для использования потребителем
- 15 – устройство управления электроприводом
- 16 – электропривод
- 17 – нагнетатель
- 18 – фильтр очистки воздуха
- 19 – буферная емкость воздуха высокого давления

Прежде чем поступить в буферную (накопительную) емкость 19, сжатый воздух подвергается очистке от масла и абразивных частиц в фильтре 18. Трубопроводы 11, 12, 13 предназначены для подачи потребителю воз-

духа повышенного давления 14. Предохранительный клапан 6 стравливает через патрубки 5 избыток воздуха 7 из буферной емкости 19 и защиты от разрушения при превышении в ней допустимого значения давления.

Жидкостный насос – это машина для напорного перемещения (всасывания, нагнетания, подъема) по трубопроводам жидкостей путем сообщения им механической энергии [13].

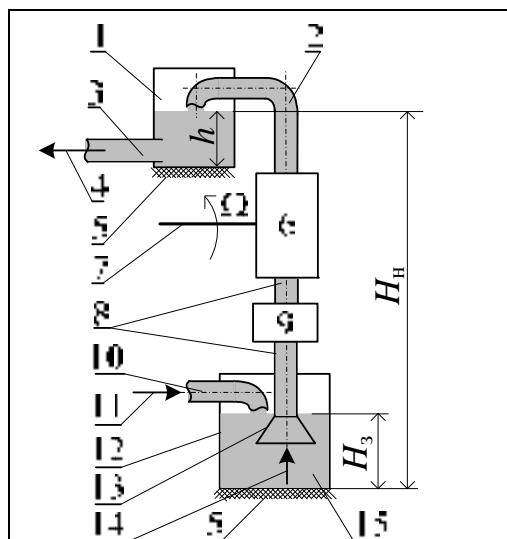


Рис. 4.5. Структура перекачки жидкости:

- 1 – напорный резервуар;
- 2 – отвод насоса;
- 3 – отвод напорного резервуара;
- 4 – направление потока жидкости потребителю;
- 5 – основание напорной (заборной) емкости;
- 6 – рабочая камера насоса;
- 7 – ротор, приводимый во вращение управляемым приводом;
- 8 – подвод жидкости к рабочей камере;
- 9 – входной фильтр;
- 10 – подвод жидкости в заборный резервуар;
- 11 – направление потока жидкости в заборный резервуар;
- 12 – заборный резервуар;
- 13 – диффузор подвода в насос;
- 14 – направление потока жидкости из заборного резервуара;
- 15 – заборная емкость.

Основными параметрами жидкостных насосов являются: производительность, напор, полный напор, кавитационный запас, полезная мощность, мощность на валу, коэффициент полезного действия (рис. 4.5). *Производительность* жидкостного насоса Q – это количество жидкости, проходящей через насос в единицу времени. $[Q] = \text{м}^3/\text{ч}$.

Напор – высота столба подаваемой жидкости, эквивалентная давлению, создаваемому насосом.

Полный напор H определяется высотой, на которую необходимо поднять жидкость из заборного резервуара с давлением жидкости p_3 в напорный резервуар с давлением p_n , и разностью этих давлений для достижения заданной скорости потока на выходе из системы с учетом гидравлического сопротивления коммуникаций

$$H = (p_n - p_3)/\rho g + \Delta h + (V_n^2 - V_3^2)/2g, \quad (4.1)$$

где ρ – плотность жидкости, g ускорение свободного падения, $\Delta h \approx (H_n - H_3)$ – разность высот подключения манометров к резервуарам, V_n – скорость вытекания жидкости из напорного резервуара, V_3 – скорость вытекания жидкости из заборного резервуара.

Кавитационный запас – избыток напора ΔH по сравнению с полным напором H для обеспечения эксплуатации насоса без кавитации⁷.

⁷ **Кавитация** (от лат. cavitas – пустота) – процесс парообразования и последующей конденсации пузырьков воздуха в потоке жидкости, сопровождающийся шумом и гидравлически-

Полезная мощность N_{Π} – мощность, сообщаемая насосом подаваемой жидкости

$$N_{\Pi} = \rho g Q H. \quad (4.2)$$

Мощность на валу N – подводимая от двигателя для обеспечения эксплуатационного режима работы насоса. Отличается от полезной мощности на величину потерь на преодоление гидравлических сопротивлений, внутренних протечек жидкости через зазоры и уплотнения и на трение.

Коэффициент полезного действия (КПД) – это отношение

$$\eta = N_{\Pi}/N. \quad (4.3)$$

Как правило, КПД жидкостных насосов $\eta = 0,6-0,9$.

Конструкции жидкостных насосов так же многообразны, как и компрессоров, хотя по структуре (алгоритму) перекачки жидкости они совпадают (рис. 4.5).

Силовое воздействие на жидкость 15 возникает при вращении ротора (входного вала) 7. Под силовым воздействием в рабочей камере 6 поток жидкости 14 перемещается из заборного резервуара 12 через диффузор 13, входной фильтр 9 и подвод 8 в отвод насоса 2, а из него в накопительный резервуар 1. С отвода 3 поток жидкости 4 поступает потребителю. Поток жидкости 11 восстанавливает требуемый уровень в заборной емкости.

Всё многообразие конструкций жидкостных насосов, в зависимости от принципа действия, укладывается в две большие группы – динамические насосы и насосы объемные.

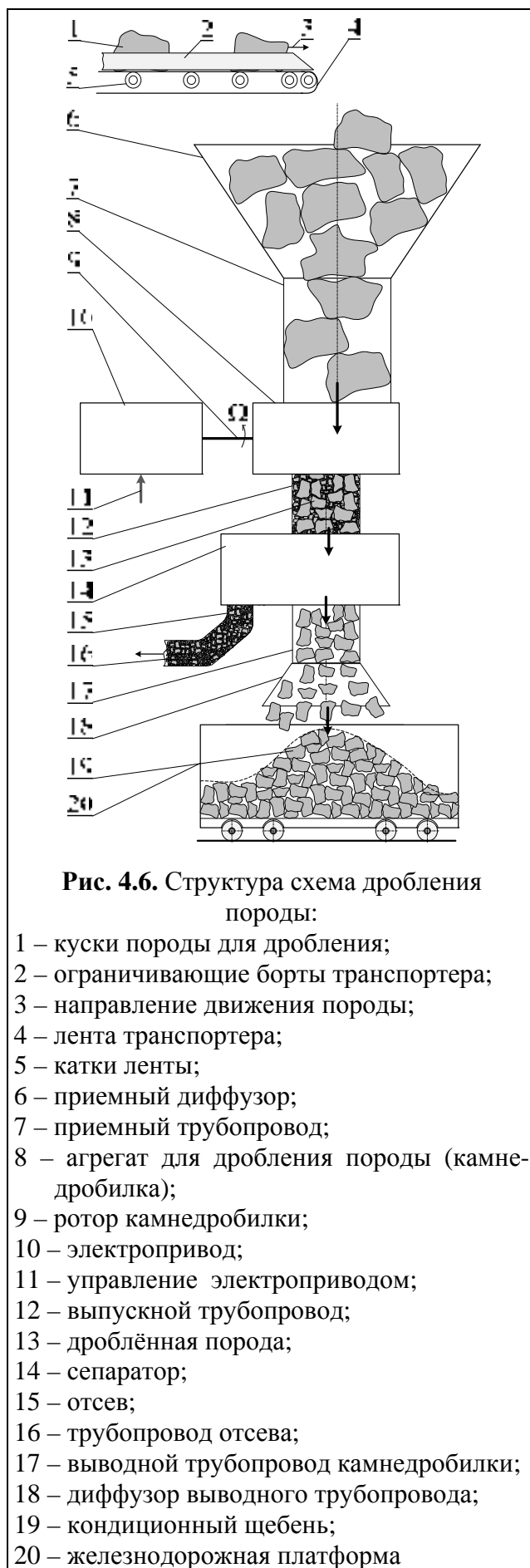
Динамические насосы (ДН) отличаются тем, что рабочая камера насоса 6 имеет *неизменный* в процессе работы объем и постоянно сообщается с его подводом 8 и отводом 2. ДН подразделяются на лопастные: центробежные и осевые; насосы трения: вихревые, струйные, шнековые, дисковые, электромагнитные⁸.

Объемные насосы (ОН) создают разность давлений путем вытеснения жидкости из периодически *изменяющей* объем рабочей камеры насоса 6, которая при помощи клапанов попеременно сообщается с его подводом и отводом. Благодаря вращению ротора 7 жидкость приобретает потенциальную энергию, которая проявляется давлением нагнетания. ОН в зависимости от способа изменения объема рабочей камеры подразделяются на возвратно-поступательные – это поршневые, плунжерные, диафрагмовые; а также крыльчатые и роторные, которые подразделяются на пластинчатые, шестеренчатые и винтовые.

Камнедробилка (КД) – один из видов строительных машин, предна-

ми ударами, образование в жидкости полостей [3]. Явление кавитации ограничивает диапазон скоростей течения жидкостей по кривой в гидротехнических устройствах.

⁸ Электромагнитные насосы применяются для перекачки электропроводных жидкостей – жидких щелочных металлов, электролитов и т. п. Принцип их действия основан на использовании силовых воздействий на проводящие жидкости электрических и магнитных полей.



значенная для дробления каменных материалов. Качество дробления характеризуется размером (зерновым составом), формой зерен, механической прочностью и содержанием вредных примесей полученной смеси. Структура и последовательность дробления породы показаны на рис. 4.6 [4, 10, 11, 34].

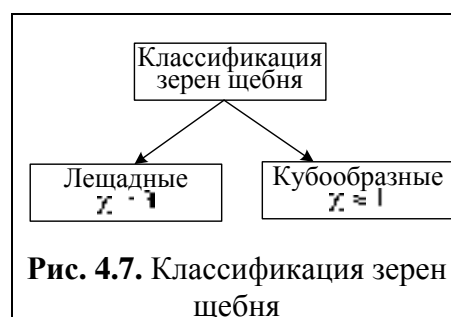
Образованный путем дробления и отсева сыпучий материал с размером зерен не более 150 мм называется щебень.

Форма зерна определяется коэффициентом χ (рис. 4.7):

$$\chi = d_{\text{макс}}/d_{\text{мин}}, \quad (4.3)$$

где $d_{\text{макс}}$ и $d_{\text{мин}}$ – соответственно минимальный и максимальный размеры зерна.

Допускаемые максимальные размеры щебня отличаются в зависимости от назначения, например: $d_{\text{макс}} = 120...150$ мм для создания массивных бетонных сооружений; $d_{\text{макс}} = 5...75$ мм для изготовления бетона для одежды дорог, фундаментов зданий и промышленных агрегатов; $d_{\text{макс}} = 7...25$ мм для устройства оснований и балластирования железнодорожного пути.



Материалы измельчают раздавливанием, разрушением ударом, истиранием, раскалыванием.

Во многих случаях дробление происходит при одновременном действии раздавливания и истирания. Работа камнедробилки характеризуется степенью дробления:

$$I = D_{\text{макс}}/d_{\text{макс}}, \quad (4.4)$$

где $D_{\text{макс}}$ – максимальные размеры наиболее крупных загружаемых в дробилку камней; $d_{\text{макс}}$ – максимальные размеры наиболее крупных зерен, полученных в продукте дробления.

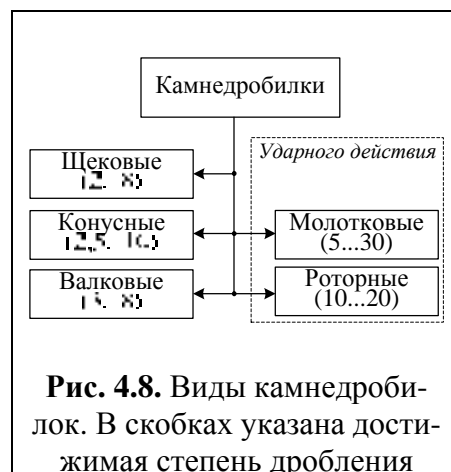
Различные типы дробилок позволяют получить степень дробления, присущую данной конструкции (рис. 4.8). В *щековых дробилках* порода раздавливается между двумя щёками, из которых одна неподвижна, а другая является подвижной – качающейся. Подвижная щека приводится в движение вращающимся эксцентриковым механизмом и попеременно то приближается к неподвижной щеке, то удаляется от неё. При сближении щек находящиеся между ними куски дробимого материала раздавливаются. Крупность максимальных кусков в дроблённом продукте определяется шириной выходной щели между подвижной и неподвижной щёками. Исходный материал поступает в пространство между щёками сверху. Дробленый продукт разгружается снизу при отходе подвижной щеки.

Конусная камнедробилка измельчает материал посредством раздавливания и изгиба при качении внутреннего конуса по материалу, защемленному между поверхностями внутреннего и наружного конуса. Вал с внутренним конусом движется так, что его ось описывает коническую поверхность. При этом образующие внутреннего конуса с одной стороны приближаются к поверхности наружного конуса и дробят материал, а с противоположной – удаляются от него, обеспечивая разгрузку и опускание материала. За один оборот вала этот процесс происходит по всей окружности и непрерывно повторяется, что обеспечивает плавную работу и высокую производительность дробилки.

Валковая дробилка измельчает материал посредством раздавливания и истирания между двумя цилиндрическими поверхностями валков, вращающихся навстречу друг другу.

Валки могут быть цилиндрическими гладкими, рифлеными, зубчатыми, дырчатыми.

При вращении одного из валков с большей скоростью кроме раздавливания происходит также и истирание материала. В случае применения рифленых поверхностей материал испытывает в какой-то мере раскалывающее



действие, а при быстром вращении ребристого вала – действие удара.

Зубчатые валковые дробилки измельчают мягкие материалы путем резания с разрыванием кусков породы на части.

Благодаря различной конструкции рабочих поверхностей валковые дробилки могут применяться:

- 1) для дробления прочных материалов, материалов средней прочности пород и искусственных материалов, а также мягких и вязких материалов;
- 2) в производстве теплоизоляционных материалов;
- 3) для формования гранул и брикетов.

Молотковая дробилка измельчает материал ударом от 2-х до 8-ми молотков (массой до 70 кг каждый), закрепленных на роторе по окружности, вращающихся в одной плоскости. Энергия удара массивных молотков достаточна для дробления кусков породы без образования пылевидных частиц. Молотковые дробилки применяют для дробления пород средней прочности и мягких пород с естественной влажностью не более 10 % (известняк, мергель, гипсовый камень, мел, асбестовая руда, сухая глина, шамот, каменный уголь).

Роторная камнедробилка, как и молотковая, относится к дробилкам ударного типа. Она отличается массивным ротором. В крупных машинах масса ротора достигает 20 т. Вращение ротору сообщается от электродвигателя через клиноременную передачу. Внутри корпуса подвешены отражательные плиты, нижняя часть которых опирается на пружинно-регулирующее устройство, позволяющее регулировать ширину выходной щели, а также пропускать не дробимое тело при его попадании в камеру дробления. Дробление материала осуществляется в результате удара по нему бил и удара кусков об отражательные плиты, чем достигается высокая (10...20) степень дробления.

Наибольшее распространение получили однороторные дробилки малоабразивных материалов средней и малой прочности. Разновидность однороторных дробилок – реверсивные, у которых симметричная камера дробления и они могут работать при различных направлениях вращения ротора.

4.1.6. Особенности конструкции и работы электроприводов

Исполнительным устройством разрабатываемой САР (рис. 4.2) является регулируемый электропривод с непрерывным управлением (рис. 4.9).

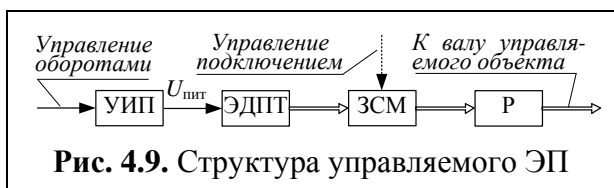


Рис. 4.9. Структура управляемого ЭП

Электропривод (ЭП) состоит из электродвигателя, управляемого источником питания (УИП), защитно-соединительной муфты (ЗСМ) и редуктора (Р) [37].

Электродвигатель представляет собой электромашину, которая выполняет функцию преобразования электрической энергии в механическую

энергию вращения вала. Для регулирования работы воздушного компрессора, жидкостного насоса и камнедробилки применяются двигатели постоянного тока (ЭДПТ).

Недостатки ЭДПТ, а именно дороговизна изготовления и необходимость профилактического обслуживания коллекторно-щёточных узлов, компенсируются их достоинствами. Это, прежде всего, простота управления частотой вращения и линейность механической и регулировочной характеристик.

Конструктивно ЭДПТ состоит из статора (индуктор), ротора (якоря), коллекторно-щеточного узла, проводов подключения. На статоре располагаются, в зависимости от конструкции, или постоянные магниты (в микро-двигателях), или электромагниты с обмотками возбуждения (катушками, наводящими магнитный поток возбуждения). В общем случае *статор* может иметь $2k$, $k = 1; 2; 3; \dots$, основных и добавочных полюсов. Как правило, $k = 1; 2$. Якорь ЭДПТ расположен на *роторе*. Он состоит из нескольких (от двух до десяти и более) катушек, на часть которых, в зависимости от угла поворота ротора относительно статора, одномоментно подаётся питание через коллекторно-щеточный узел. Чем больше число катушек, тем меньше неравномерность коммутируемого коллектором тока $I_{\text{я}}$ и крутящего момента $M_{\text{вр}}$.

Обороты ЭДПТ определяются по формуле:

$$n = (U_{\text{пит}} - I_{\text{я}}R_{\text{я}})/(k_c\Phi), \quad (4.5)$$

где $U_{\text{пит}}$, $I_{\text{я}}$, $R_{\text{я}}$ – соответственно напряжение питания якорной цепи, ток якоря, активное сопротивление в цепи якоря; k_c – постоянный коэффициент, характеризующий особенности конструкции рассматриваемого электродвигателя; Φ – магнитный поток в пространстве статора, пронизывающий обмотки якоря.

Как видно из (4.5), управление оборотами ЭДПТ возможно:

- изменением напряжения питания $U_{\text{пит}}$;
- изменением тока якоря $I_{\text{я}}$;
- изменением магнитного потока Φ , создаваемого обмотками возбуждения.

В мощных ЭДПТ для создания внутри статора магнитного поля применяются электромагниты (обмотки возбуждения). Поэтому эквивалентная электрическая схема ЭДПТ состоит из цепи якоря и цепи возбуждения. Эти цепи представляются как индуктивности ($L_{\text{я}}$ или $L_{\text{в}}$) последовательно включенными активными сопротивлениями потерь ($R_{\text{я}}$ или $R_{\text{в}}$).

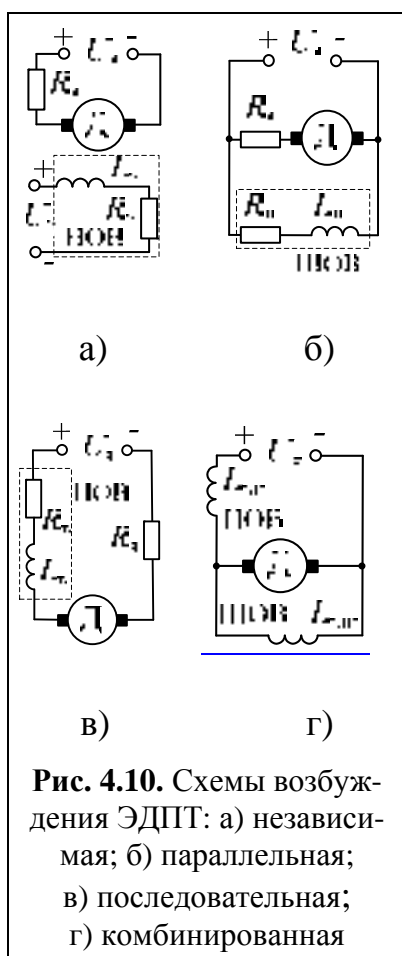


Рис. 4.10. Схемы возбуждения ЭДПТ: а) независимая; б) параллельная; в) последовательная; г) комбинированная

В зависимости от способа включения обмоток возбуждения различаются на:

- а) независимое возбуждение (рис. 4.10, а), при котором обмотка возбуждения (НОВ) запитана от дополнительного источника напряжением $U_{\text{в}}$;
- б) параллельное возбуждение (рис. 4.10, б), при котором обмотка возбуждения (ШОВ) запитана от источника питания цепи якоря, так что $U_{\text{в}} = U_{\text{я}}$, и шунтирует её;
- в) последовательное возбуждение (рис. 4.10, в), с включением обмотки возбуждения (ПОВ) последовательно с цепью якоря, так что $U_{\text{в}} < U_{\text{я}}$;
- г) смешанное возбуждение (рис. 4.10, г).



Рис. 4.11. Управление оборотами ЭДПТ изменением напряжения на якоре

Управление оборотами. Для ЭДПТ с независимым возбуждением скоростная характеристика $n = f(I_{\text{я}})$ имеет вид, определяемый формулой (4.5) (см. рис. 4.11). Ток якоря является функцией момента силы $M_{\text{в}}$, приложенного со стороны нагрузки к валу двигателя. Изменение момента $M_{\text{в}}$ влечет увеличение тока якоря. Например, с увеличением момента уменьшается угловая скорость вращения вала (т. е. количество оборотов за минуту), уменьшается реакция якоря и

увеличивается ток якоря [39].

Скоростная характеристика $n = f(I_{\text{я}})$ при независимом возбуждении называется «жесткой» (рис. 4.11). Горизонтальная штриховая линия, проходящая через т. $(0, n_0)$, – это характеристика некоего идеального двигателя, в котором при изменении нагрузки на валу самостабилизируются обороты. Она называется абсолютно жесткой характеристикой.

В реальном ЭДПТ такой самостабилизации нет. Его скоростная характеристика (сплошная прямая, выходящая из т. $(0, n_0)$) называется естественной механической характеристикой. Её отклонение относительно идеальной называется нежесткостью. Параллельные штриховые прямые – это характеристики, полученные при различных напряжениях на якоре. Следовательно, при одном и том же токе якоря, но при различных напряжениях на якоре, ЭДПТ будет иметь различные угловые скорости вращения ротора. Отсюда следует способ регулирования оборотов двигателя путем изменения напряжения на якоре.

Пусть в установившемся режиме при номинальной нагрузке $M_{\text{н}}$ на валу ЭДПТ в цепи якоря протекает номинальный ток $I_{\text{ян}}$, а его ротор развивает скорость вращения $n_{\text{н}}$. Некоторые возмущения приводят к повышению нагрузки на валу ЭДПТ, так что $M_{\text{в}} > M_{\text{н}}$. Вследствие этого обороты ротора уменьшаются до величины $(n_{\text{н}} - \Delta n)$, а ток якоря увеличивается: $I_{\text{яв}} > I_{\text{ян}}$. Восстановить обороты ЭДПТ до номинальной величины можно увеличив

напряжение на якоре до такого значения $U_{я4}$, при котором скоростная характеристика (пунктирная точечная прямая, параллельная сплошной) проходит через точку с координатами $(I_{яв}, n_n)$. Тем самым обороты приобретают приращение $(+\Delta n)$ и восстанавливается их значение до возмущения.

Защитно-соединительная муфта (ЗСМ) служит для соединения двух валов – вала ЭДПТ и вала объекта управления (компрессора, насоса или камнедробилки), расположенных на одной оси или под углом друг к другу, а также для защиты двигателя от нагрузки, превышающей допустимую величину момента [7].



Рис. 4.12. Классификация соединительных муфт

Классификация муфт показана на рис. 4.12. Широкое распространение нашли защитные жесткие *фрикционные* муфты. *Жесткая* муфта передает вращательное движение от электродвигателя к объекту без изменения величины угловой скорости [6].

Редуктор – передаточный, как правило, зубчатый механизм, который выполняет функцию преобразования высокой угловой скорости вращения входного вала в более низкую на выходном валу,

повышая при этом вращающий момент. Редуктор характеризуется:

- передаточным отношением

$$k_p = n_{\text{вых}}/n_{\text{вх}} = \Omega_{\text{вых}}/\Omega_{\text{вх}}, \quad (4.6)$$

где $n_{\text{вх}}$ и $n_{\text{вых}}$ – количество оборотов (1/мин), а $\Omega_{\text{вых}}/\Omega_{\text{вх}}$ – угловые скорости (1/с) соответственно ведущего (входного) и ведомого (выходного) валов;

- передаваемой мощностью;
- максимальными оборотами $n_{\text{вх.макс}}$ и $n_{\text{вых.макс}}$ ведущего и ведомого валов;
- коэффициентом полезного действия.

4.1.7. Устройство обратной связи

В электромеханической САР (рис. 4.2) элементом обратной связи служит тахогенератор – электромашина, обороты ротора n которой и генерируемая э.д.с. $E_{\text{тг}}$ в статическом режиме связаны в общем случае нелинейным уравнением

$$E_{\text{тг}} = K_{\text{тг}}(n) \cdot n, \quad (4.7)$$

где $K_{\text{тг}}(n)$ – статический коэффициент передачи тахогенератора (рис. 4.13) Тахогенератор – линейный элемент в пределах изменений оборотов от $n_{\text{мин}}$ до $n_{\text{макс}}$.

4.1.8. Передаточные функции элементов исходной САР

Динамика объектов управления. Рассмотренные объекты управления имеют общие особенности:

– они предназначены для переноса вещества массой m для изменения её потенциальной и/или внутренней энергии;

– они не имеют внутреннего источника энергии и их функционирование обусловлено только расходом энергии внешнего источника, подводимой при помощи ротора;

– их статические характеристики в общем случае нелинейные, так как определяются:

- наличием трения покоя;
- сложной зависимостью потерь в механизмах объекта от массы и скорости перемещения вещества;
- применением, для безопасности эксплуатации, различных видов предохранительных устройств.

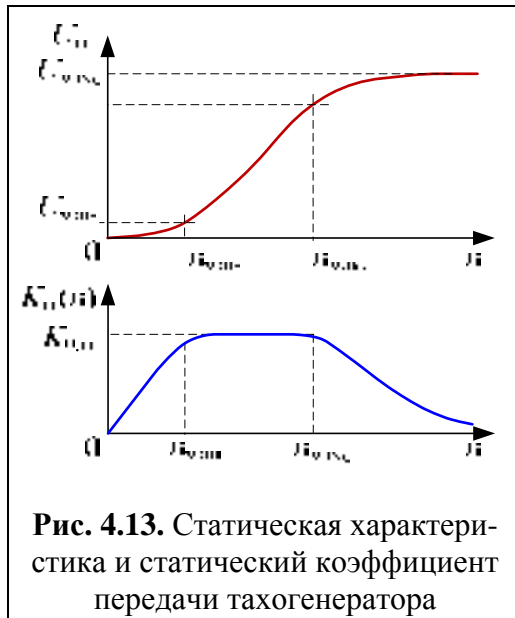


Рис. 4.13. Статическая характеристика и статический коэффициент передачи тахогенератора

Перенос вещества осуществляется силовым воздействием на него, которое преодолевает силы статического и динамического противодействия. При малом переносе⁹ процесс описывается дифференциальным уравнением второго порядка:

$$a_2^2 [d^2 y(t)/dt^2] + a_1 [dy(t)/dt] + a_0 y(t) = b_0 x(t), \quad (4.8)$$

где:

1) в случае прямолинейного переноса:

а) переменные $y(t)$ и $x(t)$ соответственно на выходе и входе объектов имеют смысл линейных перемещений вещества;

б) слагаемые имеют смысл: $\{a_2^2 [d^2 y(t)/dt^2]\}$ – сила инерции; $\{a_1 [dy(t)/dt]\}$ – сила трения, пропорциональная скорости перемещения; $\{a_0 y(t)\}$ – сила трения; $\{b_2 x(t)\}$ – внешняя сила, создаваемая ротором; коэффициенты: a_2^2 – масса; a_1 , a_0 , b_0 – коэффициенты, связывающие линейные перемещения и действующие силы;

⁹ Это одно из упрощений, необходимое для отнесения рассматриваемого объекта к классу линейных.

2) в случае вращательного переноса:

а) переменные $y(t)$ и $x(t)$ соответственно на выходе и входе объектов имеют смысл угловых перемещений вещества;

б) слагаемые соответственно имеют смысл моментов сил: инерции; трения, от внешнего воздействия создаваемого ротором; a_2 – масса; a_1 , a_0 , b_0 – коэффициенты, связывающие угловые перемещения и действующие моменты сил.

Выражение для передаточной функции объекта, описываемого дифференциальным уравнением (4.8):

$$W(p) = k_{об}/[T_1 T_2 p^2 + (T_1 + T_2) p + 1], \quad (4.9)$$

где $k_{об} = b_0/a_0$ – статический коэффициент передачи объекта; T_1 и T_2 – постоянные времени объекта, определяемые из выражений $(T_1 T_2) = a_2^2/a_0$; $(T_1 + T_2) = a_1/a_0$.

Статический коэффициент передачи объект управления $k_{об}$ определяется по его известной статической характеристике (см. п. 3.2.3) [7].

Для применения теории линейных систем автоматического управления реальную статическую характеристику объекта следует линеаризовать. В этом случае

$$k_{об} = \operatorname{tg} \alpha. \quad (4.10)$$

Линеаризацию выполнять с учетом минимизации ошибки определения коэффициента $k_{об}$ в заданном режиме работы.

Постоянные времени объекта управления T_1 и T_2 определяются прежде всего динамическими свойствами (массой) механических подвижных частей конструкции воздушного компрессора, жидкостного насоса или камнедробилки (m_1) и одномоментной массовой загрузкой объекта перемещаемым веществом (m_2). Для конструкции объектов характерно неравенство $m_1 \gg m_2$, что дает основание полагать:

$$T_1 \gg T_2, \quad (4.11)$$

ибо инерционность тем выше, чем больше масса.

На основании выражения (4.11) формула (4.9), в которой $(T_1/T_2) \ll 1$ и $(T_1 + T_2) \approx T_1 = T_{об}$, принимает вид

$$W(p) \approx k_{об}/(T_{об} p + 1). \quad (4.12)$$

Таким образом, в первом приближении объекты управления (воздушный компрессор, жидкостный насос, камнедробилка) представляют собой линейные апериодические звенья с передаточной функцией (4.12).

Передаточная функция ЭДПТ. При небольших отклонениях оборотов от номинальных

$$\delta = \Delta n/n_n \leq 3 \quad (4.13)$$

нелинейность управления ЭДПТ практически не проявляется, движение ротора описывается дифференциальным уравнением (4.8), а передаточная функция имеет вид:

$$W(p) = k_{дв} / [T_{яц} T_{эм} p^2 + T_{эм} p + 1], \quad (4.14)$$

где $k_{дв}$ – статический коэффициент передачи двигателя по каналу «управляемая величина (скорость вращения ротора) – входная величина (напряжение якоря)», $[k_{дв}] = 1/c$:

$$k_{дв} = \pi n_n / 30; \quad (4.15)$$

$T_{яц}$ – постоянная времени якорной цепи, с;

$$T_{яц} = L_{яц} / R_{яц}; \quad (4.16)$$

$T_{эм}$ – электромеханическая постоянная времени двигателя, $[T_{эм}] = c$:

$$T_{эм} = k_{дв}^2 J R_{яц}, \quad (4.17)$$

где J – момент инерции привода, приведенный к ротору двигателя $[J] = \text{кг/м}^2$. При условии, что $4T_{яц} > T_{эм}$, ЭДПТ – колебательное звено с передаточной функцией (4.14). Если же $4T_{яц} < T_{эм}$, то двигатель – апериодическое звено второго порядка с передаточной функцией:

$$W(p) = k_{дв} / [(T_{д1} p + 1)(T_{д2} p + 1)], \quad (4.18)$$

где $T_{д1}$ и $T_{д2}$ – постоянные времени апериодического звена второго порядка:

$$T_{д1, д2} = 0,5 T_{эм} / [(1 \pm \sqrt{1 - 4T_{яц} / T_{эм}})]. \quad (4.19)$$

Из формулы (4.19) следует, что при $4T_{яц} < T_{эм}$ электродвигатель представляет собой апериодическое звено первого порядка с передаточной функцией:

$$W(p) \approx k_{дв} / (0,5 T_{эм} p + 1). \quad (4.20)$$

Таким образом, в зависимости от особенностей конструкции двигателя и влияния привода, ЭДПТ в структуре САР может быть представлен элементарными динамическими звеньями – колебательным, апериодическим второго порядка или апериодическим первого порядка.

Защитно-соединительная муфта. Как динамическое звено жесткая муфта представляет собой пропорциональное звено с коэффициентом передачи $k_{фм} = 1$ в пределах допустимого значения момента на валу ЭДПТ. Если при перегрузке тормозящий момент, приложенный со стороны нагрузки к валу двигателя, превышает $M_{макс}$, то фрикцион проскальзывает, нарушается линейность передачи угловой скорости. Расчет САР следует вести при значениях момента на валу двигателя $0 < M_{дв} < M_{макс}$ (рис. 4.14).

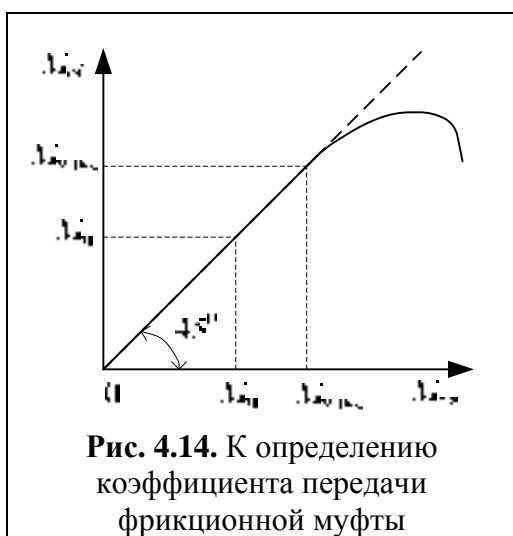


Рис. 4.14. К определению коэффициента передачи фрикционной муфты

Если при перегрузке тормозящий момент, приложенный со стороны нагрузки к валу двигателя, превышает $M_{макс}$, то фрикцион проскальзывает, нарушается линейность передачи угловой скорости. Расчет САР следует вести при значениях момента на валу двигателя $0 < M_{дв} < M_{макс}$ (рис. 4.14).

Редуктор. Для редукторов характерна нелинейность типа «люфт». При условии безреверсного, т. е. одностороннего, вращения люфт практически не оказывает

влияния на работу рассмотренных объектов управления. Поэтому передаточная функция редуктора

$$k_{\text{ред}} = k_p, \quad (4.21)$$

то есть динамическая модель редуктора – пропорциональное звено.

Тахогенератор.

В динамическом режиме при условии линейности ($n \in [n_{\text{мин}}; n_{\text{макс}}]$, рис. 4.13) обороты ротора n и э.д.с. $E_{\text{тг}}$ в связаны дифференциальным уравнением [36]

$$T_{\text{тг}} \frac{dU_{\text{тг}}(t)}{dt} + U_{\text{тг}}(t) = K_{\text{тг}} n(t), \quad (4.22)$$

где $T_{\text{тг}}$ и $K_{\text{тг}}$ – соответственно постоянная времени и коэффициент передачи тахогенератора

$$T_{\text{тг}} = L_{\text{я.тг}} / (R_{\text{я.тг}} + R_{\text{н}}); \quad K_{\text{тг}} = k R_{\text{н}} / (R_{\text{я.тг}} + R_{\text{н}}),$$

где $L_{\text{я.тг}}$ и $R_{\text{я.тг}}$ – соответственно индуктивность и активное сопротивление якоря тахогенератора, k – коэффициент, который зависит от особенностей конструкции тахогенератора, в общем случае есть функция оборотов n .

Из формулы (4.22) следует передаточная функция тахогенератора

$$W_{\text{тг}}(p) = \frac{U_{\text{тг}}(p)}{n(p)} = \frac{K_{\text{тг}}}{T_{\text{тг}} p + 1}. \quad (4.23)$$

При малой постоянной времени апериодическое звено с передаточной функцией (4.23) обладает свойствами пропорционального звена и, соответственно, имеет передаточную функцию $W_{\text{тг}}(p) = K_{\text{тг}}$.

4.2. ТЕМЫ КУРСОВЫХ ПРОЕКТОВ ДЛЯ СТУДЕНТОВ СПЕЦИАЛИЗАЦИЙ «ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И СЕТИ НА ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГЕ» И «РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ НА ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГЕ»

4.2.1. Варианты заданий

Варианты заданий на курсовое проектирование сведены в табл. 4.6.

Таблица 4.6

Темы заданий на курсовое проектирование

<i>№ варианта</i>	<i>Тема</i>	<i>Объект регулирования</i>
1	Расчет линейной стационарной системы автоматического захвата и слежения за временным положением измерительных импульсов (АЗС ПИ)	Интегратор импульсов, формирующий напряжение, пропорциональное их переменной длительности
2	Расчет линейной стационарной системы автоматического подстройки частоты генератора синусоидальных колебаний диапазона умеренно высоких частот	Управляемый генератор синусоидальных колебаний

4.2.2. Исходные данные

I. Вариант 1

1. Функциональная схема исходной САР (рис. 4.22, рис. 4.24, а).
2. Статическая характеристика сравнивающего устройства задана формулой

$$\Delta U_{\Pi} = 0,8 \cdot k_{\text{су.л}} \cdot (U_{\text{РПС}} - U_{\text{ППС}}), \quad (4.24)$$

где $k_{\text{су.л}}$ – статический коэффициент передачи сравнивающего устройства, и табл. 4.7.

Таблица 4.7

Статическая характеристика сравнивающего устройства

№ пп	1	2	3	4	5	6	7
$(U_{\text{РПС}} - U_{\text{ППС}})$, мВ	–20,0	–19,0	–18,0	–17,0	–16,0	–15,0	–14,0
$(\Delta U_{\Pi}/0,8)$, мВ	–9,9	–9,8	–9,9	–9,7	–9,8	–9,7	–9,4

8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
–13,0	–12,0	–11,0	–10,0	–9,0	–8,0	–7,0	–6,0	–5,0	–4,0	–3,0
–9,9	–9,8	–9,4	–9,2	–9,1	–8,9	–8,6	–8,3	–7,4	–7,4	–6,1

19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
–2,0	–1,0	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0
–5,1	–4,0	0,0	4,2	5,6	6,3	7,2	7,6	8,1	8,2	8,7

30	31	33	33	44	35	36	37	38	39	39
9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
9,0	9,3	9,4	9,4	9,5	9,6	9,7	9,7	9,9	9,9	9,9

3. Рабочий участок (в мВ) статической характеристики сравнивающего устройства задан равенствами

$$[|U_{\text{РПС}} - U_{\text{ППС}}|]_{\text{мин}} = [U_{\text{РПС}}(t) - U_{\text{ППС}}(t)]_{\text{макс}} = (\Gamma + 4). \quad (4.25)$$

4. Остальные элементы структурной схемы линейны. Параметры заданы в табл. 4.8.

Таблица 4.8

Параметры элементов структурной схемы (вар. 1)

Параметр	Статический коэффициент передачи дискриминатора	Постоянные времени		
		Интегратора	Двухзвенного ФНЧ	
Обозначение	k_d	$T_{\text{и}}$	$T_{\text{ф1}}$	$T_{\text{ф2}}$
Размерность	В/мкс	мкс	Мкс	Мкс
Формула варианта	$K_d = (N+20)$	$[(N/10+\Gamma)]$	$5,2 \cdot [(N/10+\Gamma)]$	$10,4 \cdot [(N/10+\Gamma)]$

II. Вариант 2

1. Функциональная схема исходной САР (рис. 4.27).
2. Статические характеристики нелинейных элементов:
 - а) частотного дискриминатора формулой

$$U_{\text{чд}}(\Delta f) = 0,8 \sin \Delta f, \quad (4.26)$$

где Δf , кГц – отклонение от переходной частоты $f_{\text{п}} = (500 + \Gamma)$, кГц; $U_{\text{чд}}(\Delta f)$, В – выходное напряжение ЧД;
с рабочим участком, В

$$[|U_{\text{чд}}|]_{\text{мин}} = [U_{\text{чд}}]_{\text{макс}} = 0,1 \cdot (\Gamma + \sqrt{N}). \quad (4.27)$$

3. Остальные элементы структурной схемы линейны. Параметры заданы в табл. 4.9

Таблица 4.9

Параметры элементов структурной схемы (вар.2)

Параметр	Коэффициент усиления УПТ	Постоянные времени		
		Интегратора	УПТ	ФНЧ
Обозначение	$K_{\text{УПТ}}$	$T_{\text{чд}}$	$T_{\text{УПТ}}$	$T_{\text{ФНЧ}}$
Размерность	В/В	с	с	С
Формула варианта	$K_{\text{УПТ}} = \lg(\Gamma + N)$	$10^{-5} \cdot [0,44 \cdot (\Gamma + \sqrt{N})]$	$10^{-4} \cdot [0,72 \cdot (\Gamma + \sqrt{N})]$	$10^{-3} \cdot [0,92 \cdot (\Gamma + \sqrt{N})]$

4.2.3. Требования

Система должна обладать желаемыми показателями качества (см. табл. 4.10, 4.11) при сохранении устойчивости.

Таблица 4.10

Желаемые показатели качества проектируемой САР временного положения измерительных импульсов

№ n/n	Показатель	Желаемое значение	Требование
1	статическая ошибка регулирования $\delta_{\text{р}}$, %	$\delta_{\text{ж}} = 0,8 \cdot (C + \Gamma)$	$\delta_{\text{р}} \leq \delta_{\text{ж}}$
2	время регулирования $t_{\text{р}}$, мкс	$t_{\text{рж}} = 1,5 \cdot (C + \Gamma)$	$t_{\text{р}} \leq t_{\text{рж}}$
3	перерегулирование, %	$\sigma_{\text{ж}} = 10 \cdot \log_2(C + \Gamma)$	$\sigma \leq \sigma_{\text{ж}}$

Таблица 4.11

Желаемые показатели качества проектируемой САР частоты генератора синусоидальных колебаний диапазона умеренно высоких частот

№ n/n	Показатель	Желаемое значение	Требование
1	статическая ошибка регулирования $\delta_{\text{р}}$, %	$\delta_{\text{ж}} = 0,8 \cdot (C + \Gamma)$	$\delta_{\text{р}} \leq \delta_{\text{ж}}$
2	время регулирования $t_{\text{р}}$, мкс	$t_{\text{рж}} = 1,5 \cdot (C + \Gamma)$	$t_{\text{р}} \leq t_{\text{рж}}$
3	перерегулирование, %	$\sigma_{\text{ж}} = 10 \cdot \log_2(C + \Gamma)$	$\sigma \leq \sigma_{\text{ж}}$

4.2.4. Особенности системы автоматического захвата и слежения за временным положением измерительных импульсов

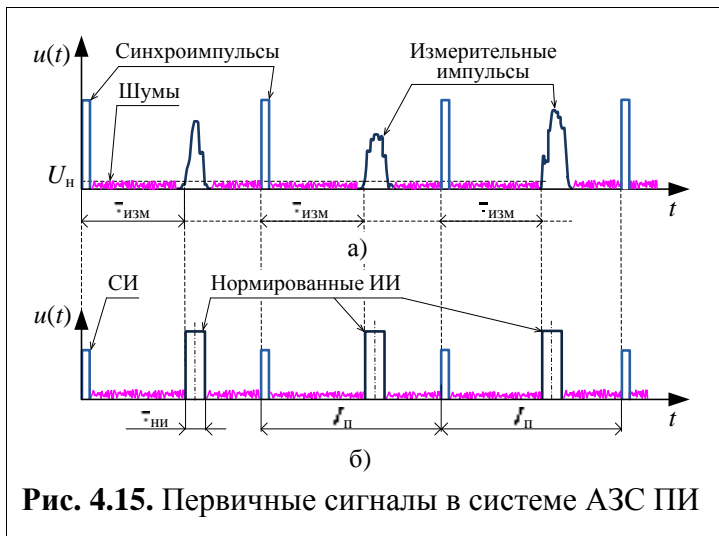


Рис. 4.15. Первичные сигналы в системе АЗС ПИ

тельный импульс (ИИ). Измерительный импульс расположен на временной оси с задержкой $\tau_{\text{изм}}(t)$, измерение которой – задача автомата захвата и слежения (рис. 4.15, а).

Обработка таких сигналов производится в два этапа. Первый этап – обнаружение ИИ. Второй этап – этап измерения текущей задержки $\tau_{\text{изм}}(t)$, который включает захват и сопровождение нормированного ИИ (НИ).

1. На этапе обнаружения:

1. Измерительные импульсы нормируются по длительности и амплитуде согласно уровню нормировки (порогу) U_n (рис. 4.15, б), установленному в зависимости от уровня и вида шумов¹⁰ и в соответствии с критерием обнаружения¹¹.

2. Выполняется грубый поиск измерительного импульса в последовательности:

а) генератор многоканального обнаружителя, запускаемый СИ, формирует параллельную (n -канальную) последовательность прямоугольных импульсов – стробов, перекрывающих период повторения синхроимпульсов (рис. 4.16, а, б);

б) с выхода каждого канала строб поступает на n схем разрешения &, на вторые входы которых поступает НИ (рис. 4.17);

¹⁰ Обычно рассматривается работа измерителя на фоне аддитивного белого гауссовского шума.

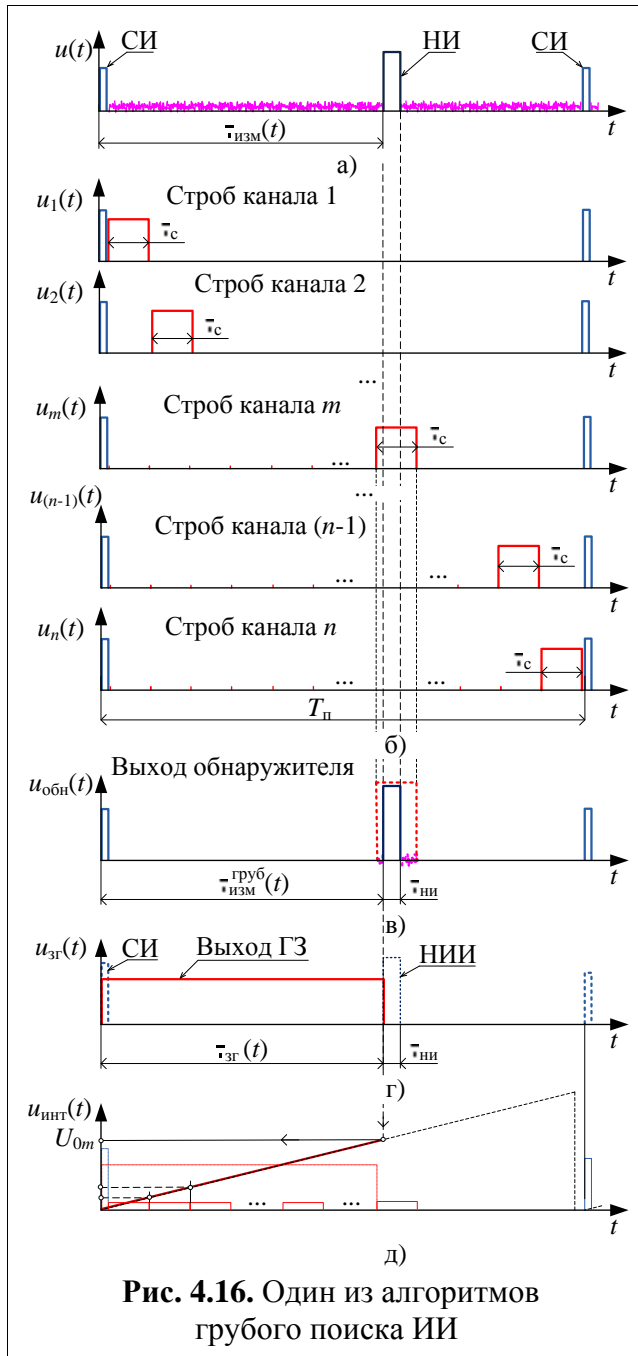
¹¹ В радиолокации, как правило, применяются:

а) критерий $\{\max [P_{\text{по}} / P_{\text{лт}}]\}$;

б) критерий $\{\min [P_{\text{лт}} / P_{\text{по}}]\}$,

где соответственно $P_{\text{по}}$ и $P_{\text{лт}}$ – вероятности правильного обнаружения и вероятности ложной тревоги.

Автоматический поиск, захват и сопровождение измерительных импульсов используется в системах обработки сигналов радиолокации, телеметрии, в импульсных системах фазовой автоподстройки частоты и др. [30]. Принцип действия таких систем основан на обработке временного промежутка между синхроимпульсами (СИ), в течение которого существует измери-



в) в том канале (например в m -ом), в котором происходит временное совпадение строба и измерительного импульса, формируется выходной сигнал обнаружителя $U_{обн}(t)$ (рис. 4.16, в);

г) из-за действия шумов и помех (рис. 4.15, а) могут возбуждаться выходы нескольких каналов обнаружителя, поэтому канал под номером m выбирается решающим устройством согласно заданному критерию обнаружения.

3. Формируется начальное управляющее напряжение АЗС ПИ, для чего:

а) генератор задержки (ГЗ) переводится синхроимпульсом из состояния «0» (условно) в состояние «1» (рис. 4);

б) передним фронтом строба m -го канала ГЗ из состояния «1» в состояние «0», – на выходе ГЗ формируется (рис. 4.16, г) прямоугольный импульс длительностью

$$\tau_{гз}(m) = (m-1)\tau_c \approx \tau_{изм}^{груб}(t); \quad (4.28)$$

в) прямоугольный импульс ГЗ подвергается интегрированию при нулевом начальном условии, так что на выходе интегратора образуется напряжение

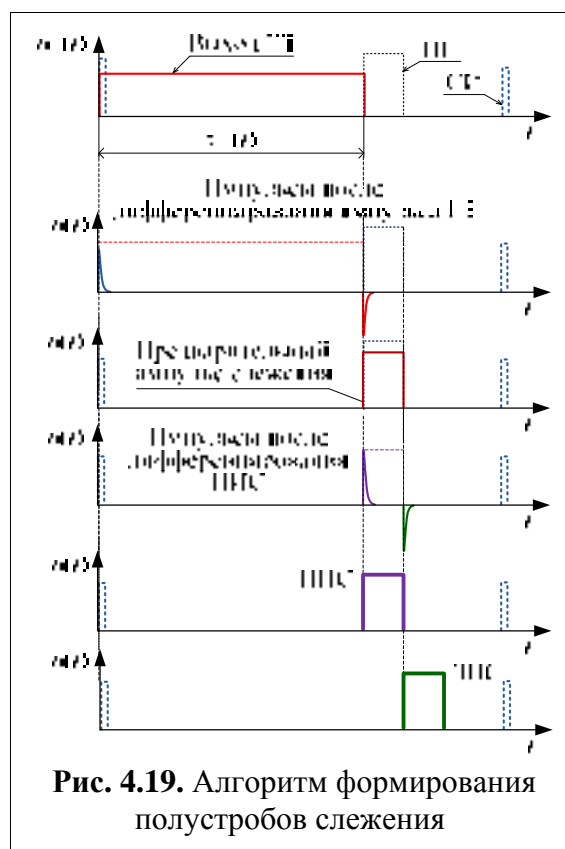
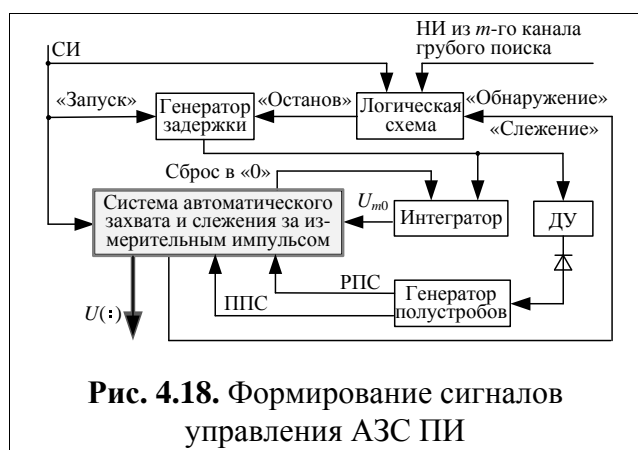
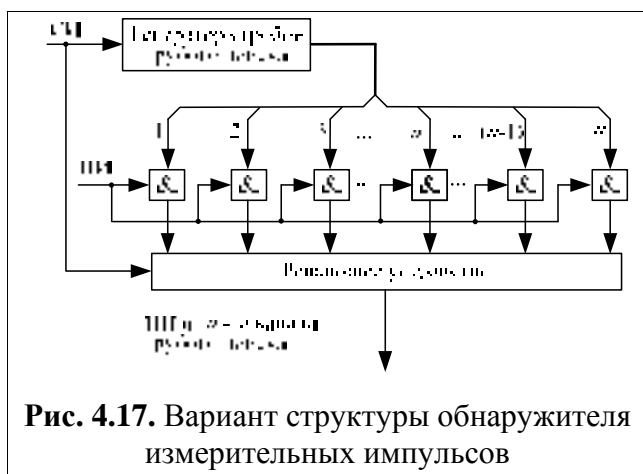
$$u_{инт}(t) = \begin{cases} k_{и} \int_0^{\tau_{гз}} dt = k_{и} t, & \text{при } 0 < t < \tau_{гз}; \\ 0, & \text{при } t > \tau_{гз}, \end{cases} \quad (4.29)$$

где $k_{и}$ – коэффициент передачи интегратора (рис. 4.16, д);

г) интегратор останавливается в момент времени $\tau_{гз}(m)$ стробом поиска под номером m , в результате чего на его выходе фиксируется постоянное напряжение

$$U_{0m} = k_{и} \tau_{гз}(m), \quad (4.30)$$

которое является начальным условием работы интеграторов системы АЗС ПИ.



2. На этапе измерения текущей задержки $\tau_{изм}(t)$ НИ:

1) Реализуется алгоритм формирования раннего (РПС) и позднего (ППС), длительностью $\tau_{ппс} \approx \tau_{ни}$, полусторбов слежения, для чего:

а) выходной импульс ГЗ дифференцируется в дифференцирующем устройстве (ДУ), в результате чего образуется пара (положительный+отрицательный) импульсов с временной расстановкой $\tau_{ГЗ}(m)$;

б) отрицательным импульсом запускается генератор полусторбов (рис. 4.18, рис. 4.19), который формирует пару связанных между собой и нормированных по амплитуде импульсных сигналов – РПС и ППС длительностью примерно $\tau_{ни}$ согласно последовательности операций:

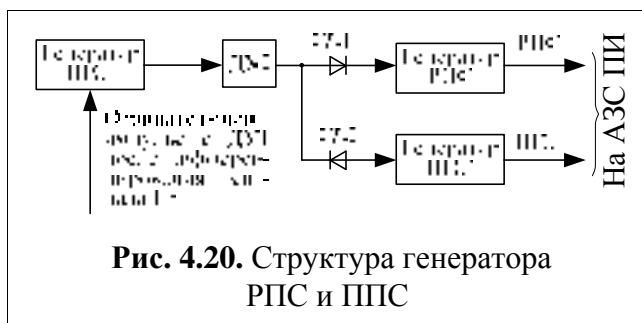
– вначале формируется короткий прямоугольный предварительный импульс слежения (ПИС) длительностью $\tau_{ппс} \approx \tau_{ни}$;

– ПИС дифференцируется, в результате чего формируется пара (положительный+отрицательный) импульсов;

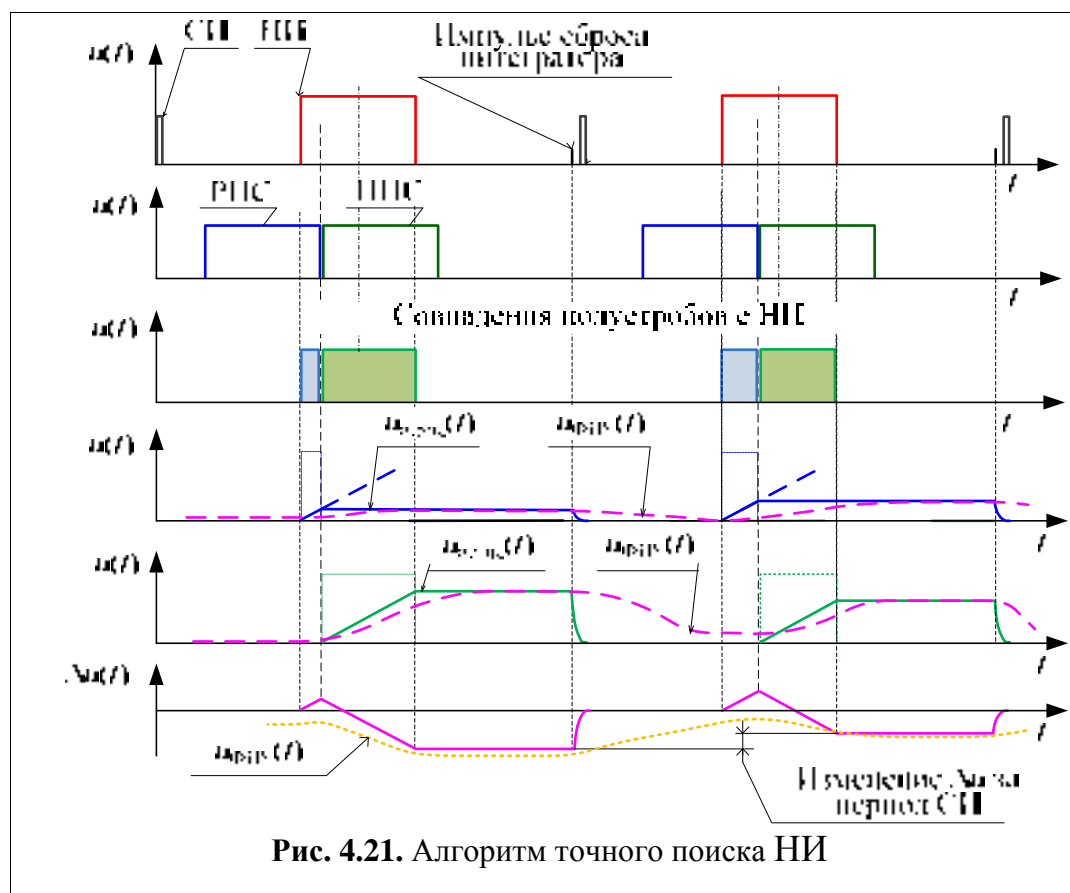
– положительным импульсом запускается генератор РПС, на выходе которого формируется РПС длительностью $\tau_{ппс} \approx \tau_{ни}$;

– отрицательным импульсом запускается генератор ППС, на выходе которого формируется ППС длительностью $\tau_{ппс} \approx \tau_{ни}$, задержанный относительно РПС на время $\tau_{ни}$.

Таким образом, генераторы НГ РПС и НГ ППС формируют пару связанных между собой нормированных по амплитуде импульсных сигналов.



ние во времени с каждым из полустробиов и таким образом формируются два импульса точного поиска (ИТП) (в общем случае различной длительности);



б) ИТП подвергаются интегрированию в интеграторах $I_{РПС}$ и $I_{ППС}$, на выходах которых по окончании действия импульсов создаются неимпульсные, но медленно меняющиеся напряжения $U_{РПС}(t)$ и $U_{ППС}(t)$, пропорциональные длительности совпадений РПС и ППС с НИ, при этом разность напряжений

$$\Delta U_{\pi}(t) = [U_{РПС}(t) - U_{ППС}(t)] \quad (4.31)$$

пропорциональна отклонению от центра НИ соответственно заднего и переднего фронтов РПС и ППС;

г) после усиления и дополнительного сглаживания фильтром нижних

частот (ФНЧ) регулирующее напряжение $\Delta U_{\phi}(t)$ поступает на генератор полустробов для изменения длительности положения ПИС таким образом, чтобы разность напряжений

$$\Delta U_{\phi}(t) = k_{\phi} \Delta U_{\pi}(t) = 0, \quad (4.32),$$

где $\Delta U_{\phi}(t)$ – напряжение, создаваемое разностным узлом с коэффициентом передачи k_{ϕ} из напряжений $U_{\text{РПС}}(t)$ и $U_{\text{ППС}}(t)$;

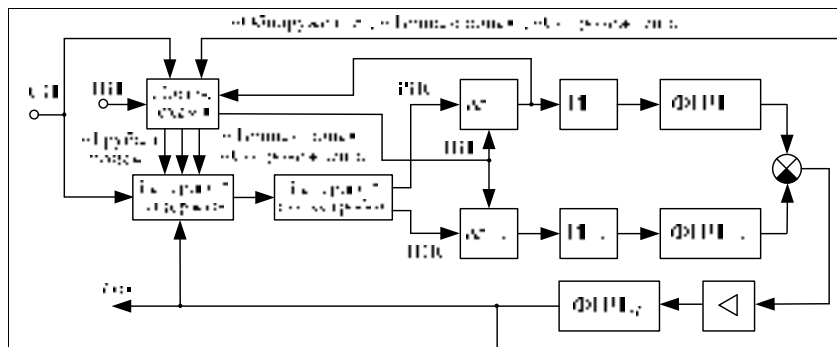


Рис. 4.22. Алгоритмическая структура автоматической системы точного поиска, захвата и сопровождения НИ

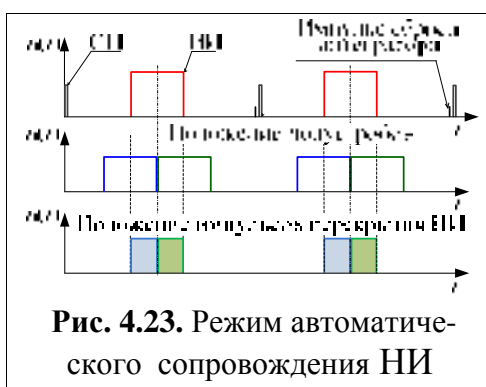


Рис. 4.23. Режим автоматического сопровождения НИ

д) при выполнении условия (4.32) точный поиск заканчивается, происходит захват искомого импульса, полустробы улавливаются симметрично относительно середины НИ, происходит непрерывное слежение полустробами за положением его центра (рис. 4.23).

Как следует из рассмотренного алгоритма функционирования АЗС ПИ, структура которого изображена на рис. 4.24,

между временным положением НИ и напряжением на выходе интегратора импульса ГЗ существует однозначная связь.

Проектированию подлежит непрерывная линейная стационарная автоматическая система захвата и сопровождения НИ (рис. 4.24) при детерминированных воздействиях, удовлетворяющая показателям качества, заданным техническим заданием (см. табл. 4.10).

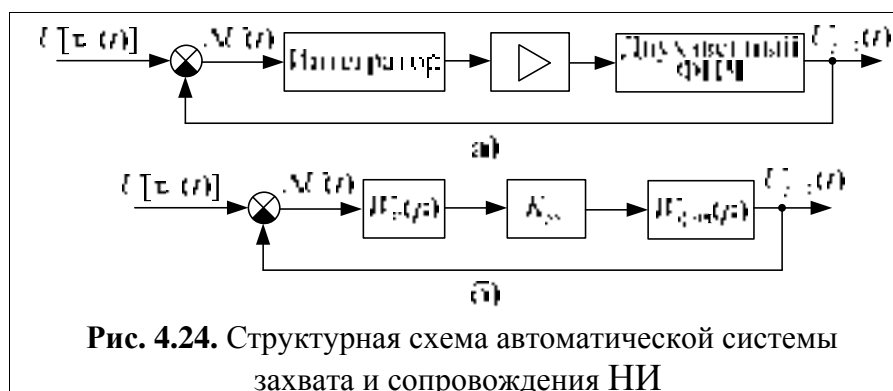


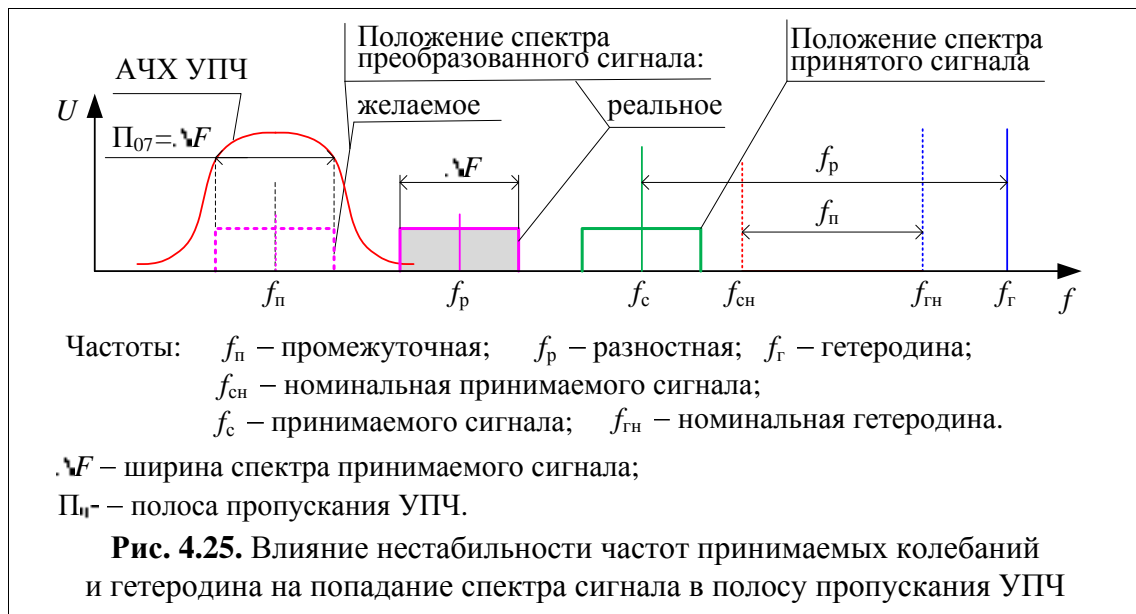
Рис. 4.24. Структурная схема автоматической системы захвата и сопровождения НИ

4.2.5. Особенности системы автоматической подстройки частоты генератора синусоидальных колебаний диапазона умеренно высоких частот

Актуальность построения систем АПЧ. Необходимость применения в радиотехнических устройствах автоматической подстройки частоты (АПЧ) показана на примере особенностей приема сигналов супергетеродинным приемником [21].

Точность попадания спектра принимаемого сигнала в полосу пропускания усилителя промежуточной частоты УПЧ определяется (рис. 4.25):

- а) стабильностью частоты гетеродина приемника f_{Γ} ;
- б) стабильностью несущей частоты принимаемого сигнала f_c ;
- в) стабильностью частотных характеристик УПЧ и, в частности, квазирезонансной (центральной) частоты амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) f_{Π} .



Стабильность *несущей частоты* сигнала зависит от стабильности работы передатчика и доплеровского сдвига частот.

Как правило, характеристика УПЧ, а также несущая частота принимаемого сигнала менее подвержены изменениям на коротких промежутках времени, чем частота гетеродина, поэтому оказывают и меньшее влияние на качество приема.

Указанные нестабильности являются суть случайными функциями времени, следовательно, изменяются быстро и хаотично. В этих условиях нормальный прием сигнала в течение времени, необходимого для его обработки, невозможен. Поэтому задача устойчивого приема может быть эффективно решена с применением АПЧ – автоматической системы слежения (подстройки) отклонения разностной частоты f_p

$$|f_c - f_{\Gamma}| = f_p \quad (4.33)$$

от квазирезонансной частоты УПЧ f_{Π} .



В уравнении (4.32) регулируемой величиной служит частота гетеродина. В результате работы системы АПЧ путем изменения частоты гетеродина поддерживается динамическое равенство

$$f_p = f_n. \quad (4.34)$$

В общем случае подстройка гетеродина или иного управляемого автогенератора (УГ) производится по следующему правилу (рис. 4.26): система АПЧ формирует управляющий сигнал, пропорциональный отклонению текущего значения частоты гетеродина $f_{тг}$ от желаемого $f_{ж}$: $U_y(f_{тг} - f_{ж})$, которое воздействует на управляемый параметр резонансного контура УГ так, чтобы изменение частоты $f_{тг}$ приводило бы к уменьшению разности $(f_{тг} - f_{ж})$. Модуль управляющего сигнала U_y содержит информацию о величине, а знак – о направлении отклонения частоты УГ от желаемого значения.

Следовательно, признаком остановки регулирования является примерное равенство $f_{тг} \approx f_{ж}$, что соответствует малому, в пределах зоны нечувствительности АПЧ, значению управляющего напряжения $U_y \approx 0$. То есть, такая система – статическая.

Управление частотой УГ может быть электронное и электромеханическое. При электронном управлении частотой параметры резонансной системы генератора изменяются непосредственно под воздействием электрического напряжения (тока). При электромеханическом управлении частотой происходит преобразование управляющего напряжения в механическое движение и изменение её резонансной частоты путем изменения механических размеров реактивных элементов.

Система АПЧ в целом характеризуется [21]: полосой схватывания (захвата); остаточной расстройкой; полосой удержания; коэффициентом автоподстройки; скоростью изменения частоты подстраиваемого генератора; параметрами переходного процесса.

Полосой схватывания называется интервал частот вокруг требуемой частоты настройки, в пределах которого система включается в режим автоподстройки, если предварительно она *не находилась* в режиме подстройки. При попадании частоты подстраиваемого генератора в полосу схватывания происходит непрерывное уменьшение текущей расстройки генератора относительно требуемого значения частоты генерируемых колебаний. Чтобы система АПЧ начала работать, необходимо установить исходное значение частоты управляемого генератора в пределах полосы схватывания.

Под *остаточной расстройкой* понимается ошибка в установлении частоты регулируемого генератора относительно требуемого значения. Остаточная ошибка определяется после окончания переходного процесса в системе АПЧ.

Полоса удержания характеризует способность системы АПЧ сохранять работоспособность при скачкообразном изменении частоты генерато-

ра. Это интервал частот вокруг требуемой частоты настройки, в котором выполняется эффективная подстройка, если предварительно система АПЧ *находилась* в режиме автоподстройки.

Коэффициентом автоподстройки называется отношение ошибки настройки УГ при отключенной АПЧ к остаточной расстройке при включенной АПЧ.

Скорость изменения частоты подстраиваемого генератора характеризует работу электромеханических систем АПЧ. Этот параметр показывает изменение частоты генератора за единицу времени под воздействием управляющего напряжения.

Структура и принцип построения ЧАПЧ. Частотная АПЧ является статической САР. Она отличается тем, что измеряется и регулируется частота. В функциональной структуре АПЧ следует выделить (рис. 4.27): измерительный элемент (ИЭ), усилитель АПЧ ($У_{АПЧ}$), фильтр АПЧ ($\Phi_{АПЧ}$), управляющий элемент (УЭ).

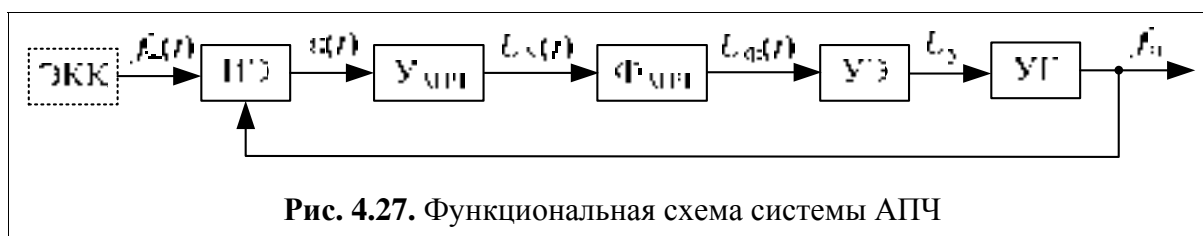


Рис. 4.27. Функциональная схема системы АПЧ

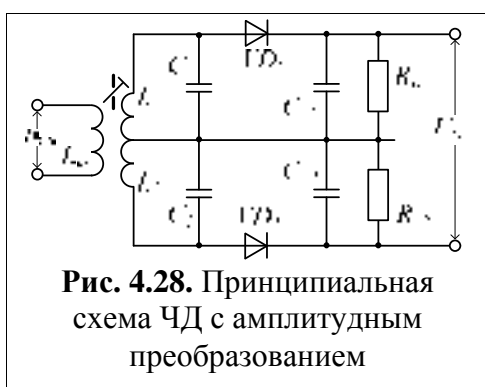


Рис. 4.28. Принципиальная схема ЧД с амплитудным преобразованием

В системе ЧАПЧ измерительный элемент – частотный дискриминатор (ЧД) – вырабатывает напряжение, пропорциональное отклонению текущей частоты колебаний УГ $f_{тг}$ от некоторой переходной частоты $f_{пер}$. ЧД может быть построен по принципу амплитудного (рис. 4.28), фазового и импульсного преобразования сигнала. Статическая характеристика *амплитудного* ЧД в пределах раствора детекторной

характеристики Π_d (рис. 4.29) аппроксимируется линейным уравнением

$$U_{чд} \approx K_{чд} (f_{тг} - f_{пер}). \quad (4.35)$$

Усилитель АПЧ ($У_{АПЧ}$) – усилитель постоянного тока (УПТ), предназначенный для повышения чувствительности системы и для уменьшения статической ошибки настройки.

Фильтр АПЧ ($\Phi_{АПЧ}$) – фильтр нижних частот, подавляющий быстрые кратковременные изменения частоты входного сигнала.



Рис. 4.29. Статическая характеристика ЧД с амплитудным преобразованием

Управляющий элемент (УЭ) под воздействием управляющего напряжения изменяет частоту колебаний УГ. При варикапной подстройке [21] скорость изменения частоты резонансного контура определяется временем рассасывания паразитных зарядов p - n переходов транзистора и варикапа.

4.2.6. Передаточные функции элементов систем

Вариант 1. В структуру системы АЗС ПИ входят динамические звенья, преобразующие длительности импульсов в напряжение и фильтрующие элементы. Поэтому на этапе точного поиска, захвата и слежения АЗС ПИ может быть представлена замкнутой линейной системой автоматического слежения и стабилизации (рис. 4.24, а). В прямой ветви такой системы включены (рис. 4.24, б): а) реальный интегратор

$$W_{\text{и}}(p) = 1/(T_{\text{и}}p + 1); \quad (4.36)$$

б) пропорциональное звено, определяющее коэффициент передачи временного дискриминатора

$$W_{\text{пр}}(p) = K_{\text{д}}; \quad (4.37)$$

в) двухзвенный ФНЧ

$$W_{\text{фнч}}(p) = 1/[(T_{\text{ф1}}p + 1)(T_{\text{ф2}}p + 1)]. \quad (4.38)$$

Проектированию подлежит непрерывная линейная стационарная автоматическая система слежения и стабилизации полустробов за НИ (рис. 4.24, б) при детерминированных воздействиях, удовлетворяющая показателям качества, заданным техническим заданием.

Вариант 2. В динамическую структуру системы АПЧ входят: частотный дискриминатор, УПТ, фильтр АПЧ, управляющий элемент с УГ.

Динамические свойства ЧД определяются балансно включенными амплитудными детекторами $VD_1, R_{\text{н1}}, C_{\text{н1}}$ и $VD_2, R_{\text{н2}}, C_{\text{н2}}$, которые являются инерционными звеньями. Поэтому передаточная функция амплитудного ЧД

$$W_{\text{чд}}(p) = K_{\text{чд}}/(T_{\text{чд}}p + 1), \quad (4.39)$$

где $K_{\text{чд}}$ – коэффициент передачи, $T_{\text{чд}}$ – постоянная времени частотного дискриминатора, p – комплексная переменная.

УПТ вводит искажения на верхних частотах, из-за чего возможно его влияние на устойчивость замкнутой системы стабилизации частоты. В связи с этим УПТ также следует считать апериодическим звеном с коэффициентом передачи $K_{\text{упт}}$ и постоянной времени $T_{\text{упт}}$

$$W_{\text{упт}}(p) = K_{\text{упт}}/(T_{\text{упт}}p + 1). \quad (4.40)$$

Фильтр АПЧ ($\Phi_{\text{апч}}$) – фильтр нижних частот с постоянной времени $T_{\text{апч}}$. Поэтому его передаточная функция:

$$W_{\text{фнч}}(p) = 1/(T_{\text{фнч}}p + 1). \quad (4.41)$$

Управляющий элемент (УЭ) – варикап [21] – влияет инерционными свойствами p - n перехода на скорость изменения частоты резонансного контура. Поэтому его в динамике изменения частоты следует рассматривать совместно с усилительным прибором управляемого генератора, и их можно считать единым пропорциональным звеном с коэффициентом передачи $K_{УГ}$.

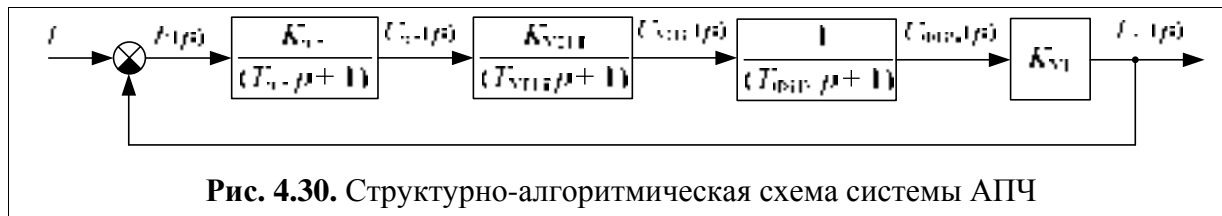


Рис. 4.30. Структурно-алгоритмическая схема системы АПЧ

Таким образом, функциональной схеме (рис. 4.27) соответствует структурно-алгоритмическая схема системы АПЧ, приведенная на рис. 4.30.

Проектированию подлежит непрерывная линейная стационарная автоматическая система стабилизации частоты УГ (рис. 4.30) при детерминированных воздействиях, удовлетворяющая показателям качества, заданым техническим заданием (см. табл. 4.11).

4.3. ТЕМАТИКА КУРСОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДЛЯ СТУДЕНТОВ СПЕЦИАЛИЗАЦИИ «ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ»

4.3.1. Варианты заданий

Задание на курсовое проектирование сформулировано в табл. 4.12.

Таблица 4.12

Тема задания на курсовое проектирование

№ варианта	Тема	Объект регулирования
1	Расчет системы автоматической регулировки коэффициента мощности в энергоустановках питания объектов железнодорожной инфраструктуры.	Батарея конденсаторов переменной (управляемой) емкости в установке компенсации реактивной мощности системы тягового электроснабжения

Цель регулирования – снижение потерь при электропитании подвижного локомотива за счет автоматического регулирования коэффициента мощности ($\cos \varphi$) системы потребления электрической энергии [25].

4.3.2. Исходные данные

1. Функциональная схема исходной САР (см. рис. 4.36).
2. Статический коэффициент передачи эквивалентного контура

$$k_{\varphi} \cdot k_{C\varphi,л} \cdot k_{\alpha C} = \sqrt{N} / \Gamma. \quad (4.42)$$

3. Параметры динамических элементов структурной схемы приведены в табл. 4.13.

Таблица 4.13

Параметры динамических элементов структурной схемы

Параметр	Коэффициент передачи			Постоянные времени и степень затухания		
	ПУ	УМ	ИМ	УМ	ИМ	
Обозначение	$k_{пу}$	$k_{ум}$	$k_{им}$	$T_{ум}$	ξ	$T_{им}$
Размерность	В/В	ВТ/В	Дж	с	-	с
Формула варианта	$4,2 \cdot (\Gamma + \sqrt{N})$	$2,5 \cdot (\Gamma + \sqrt{N})$	$0,2 \cdot (\Gamma + \sqrt{N})$	$0,24 \cdot (\Gamma + \sqrt{N})$	$\sqrt{N} / 4$	$0,92 \cdot (\Gamma + \sqrt{N})$

4.3.3. Требования

Система должна обладать желаемыми показателями качества (см. табл. 4.14) при сохранении.

Таблица 4.14

Желаемые показатели качества проектируемой САР

№ n/n	Показатель	Желаемое значение	Требование
1	статическая ошибка регулирования δ_p , %	$\delta_{ж} = 0,5 \cdot (C + \Gamma)$	$\delta_p \leq \delta_{ж}$
2	время регулирования t_p , с	$t_{рж} = 1,5 \cdot (C + \Gamma)$	$t_p \leq t_{рж}$
3	Перерегулирование, %	$\sigma_{ж} = 10 \cdot \log_2(C + \Gamma)$	$\sigma \leq \sigma_{ж}$

4.3.4. Структура энергоснабжения локомотивов на электрической тяге

Энергоснабжение локомотивов на электрической тяге (электровозов)

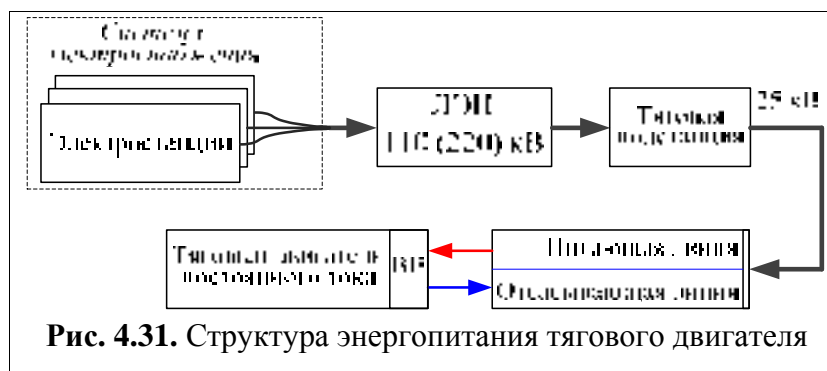


Рис. 4.31. Структура энергоснабжения тягового двигателя

представляет собой систему, которая включает (рис. 4.31):

а) группу электростанций различных типов, объединенных по принципу резервирования;

б) систему линий

передачи электроэнергии переменного тока (ЛЭП) напряжением $U_{лэп} = 110$ кВ (220 кВ), частотой 50 Гц;

в) тяговую подстанцию, предназначенную для преобразования напряжения $U_{лэп}$ в напряжение $U_{кн} = 25$ кВ (контактное напряжение);

г) питающую и отсасывающую линии, предназначенные для подачи напряжения $U_{кн}$ для питания двигателя электровоза, осуществляемого через высоковольтный выпрямитель (ВВ).

Таким образом, тяговая подстанция понижает напряжение, подводимое ЛЭП, и распределяет электрическую энергию по участкам контактной

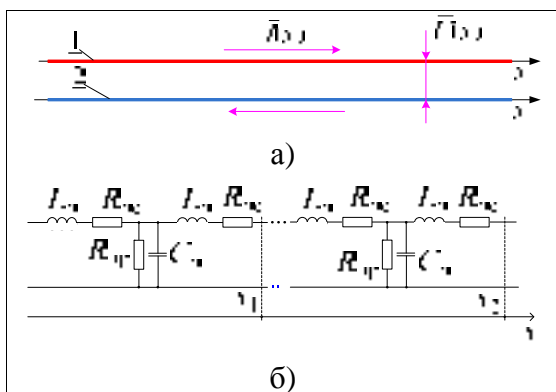


Рис. 4.32. Питающая (1) и отсасывающая (2) линии (а) и схема замещения (б) контактной сети с распределенными погонными: индуктивностью $L_{\text{п}}$, емкостью $C_{\text{п}}$, активными сопротивлениями линий $R_{\text{пс}}$ и утечки $R_{\text{пр}}$

сети. В курсовом проекте рассматривается ситуация, когда одна тяговая подстанция обслуживает один участок.

На каждом участке образуется замкнутый контур тягового тока: тяговая подстанция (ТП) – питающая линия (контактный провод) – рельс – отсасывающая линия – первичная обмотка тягового трансформатора (на электровозе) – ТП. Контактная сеть представляет собой электрическую цепь с распределенными параметрами (рис. 4.32).

Для контактной и отсасывающей цепей значения погонных соответственно: индуктивностей $L_{\text{кс}} = (1,02–1,3) \cdot 10^{-3}$ Гн/км, $L_{\text{отс}} = 3 \cdot 10^{-3}$ Гн/км;

сопротивлений $R_{\text{кс}} = 4 \cdot 10^{-3}$ Ом/км, $R_{\text{рельс}} = 7 \cdot 10^{-3}$ Ом/км [18, 19, 24].

Погонную емкость $C_{\text{п}}$, образованную контактным проводом и отсасывающей линией, рассчитываем по формуле емкости для плоского прямоугольного конденсатора

$$C_{\text{п}} = (\epsilon_0 \epsilon S)/d, \quad (4.43)$$

где $S = ab$ – площадь перекрытия проводящих плоскостей, $(\epsilon_0 \epsilon S)/d$, $a = 0,013$ м и $b = 1000$ м – стороны фигуры (прямоугольника) перекрытия; $\epsilon_0 = 8,854187817 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая проницаемость вакуума; $\epsilon = 1,00574$ – диэлектрическая проницаемость воздуха; $d = 6$ м – расстояние между поверхностями (между контактным проводом и полотном железной дороги).

Вычисления по формуле (4.43) дают результат

$$C_{\text{п}} = (8,854187817 \cdot 10^{-12} \cdot 1,00574 \cdot 0,013 \cdot 1000)/6 \approx 2 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/км.}$$

Погонная емкость контактного провода относительно полотна железной дороги $C_{\text{п}} = 2 \cdot 10^{-12}$ Ф/км.

Для оценки влияния погонной емкости $C_{\text{п}}$ – параметры схемы замещения (рис. 4.33, а) на расстоянии x от начала контактного провода:

$$\left. \begin{aligned} R(x) &= 11x \cdot 10^{-3} \text{ Ом;} \\ L(x) &= 1,1x \cdot 10^{-3} \text{ Гн;} \\ C_{\text{п}}(x) &= 2x \cdot 10^{-12} \text{ Ф/км.} \end{aligned} \right\} \quad (4.44)$$

При условии, что контактная сеть питается синусоидальным напряжением $\bar{U}_{\text{кс}}$ промышленной частоты $F_{\text{п}} = 50$ Гц, или $\Omega_{\text{п}} = 2\pi F_{\text{п}} = 100\pi$ 1/с, в контактном проводе (при наличии нагрузки) протекает в общем случае *несинусоидальный* ток. Искажения тока вызваны нелинейностью преобразований при ШИМ для питания электродвигателя локомотива, а также не-

линейными эффектами в трансформаторах питания и дроссель-трансформаторах отсасывающей линии.

На основной гармонике $F_{\Pi} = 50$ Гц отношения модулей активного $R(x)$ и индуктивного $L(x)$ сопротивлений к емкостному сопротивлению потерь $C_{\Pi}(x)$ контактного провода

$$\left. \begin{aligned} \frac{R(x)}{X_{C_{\Pi}}(x)} &= \frac{x \cdot 11 \cdot 10^{-3}}{1/(2\pi \cdot 50 \cdot x \cdot 2 \cdot 10^{-12})} \approx 1,75x^2 \cdot 10^{-7}; \\ \frac{X_L(x)}{X_{C_{\Pi}}(x)} &= \frac{2\pi \cdot 50 \cdot x \cdot 1,1 \cdot 10^{-3}}{1/(2\pi \cdot 50 \cdot x \cdot 2 \cdot 10^{-12})} \approx 2,17x^2 \cdot 10^{-10}, \end{aligned} \right\} \quad (4.45)$$

которые показывают, что и отношение $[R(x)/X_{C_{\Pi}}(x)] \ll 1$, и отношение $[X_L(x)/X_{C_{\Pi}}(x)] \ll 1$. Следовательно, паразитная емкость C_{Π} мало сказывается на потреблении тока электровозом, и схема замещения рис. 4.33, а упрощается до показанной на рис. 4.33, б. Это справедливо и для гармоник высокого порядка.

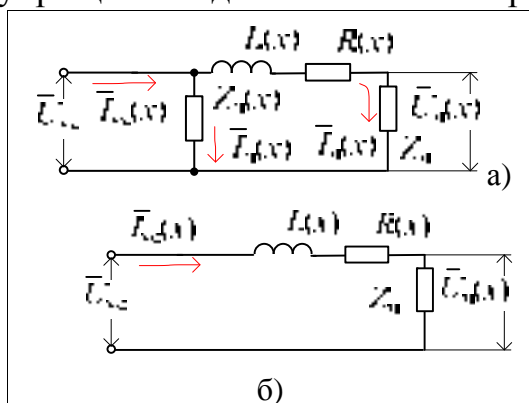


Рис. 4.33. Преобразованные схемы замещения контактной сети с нагрузкой с учетом (а) и без учета (б) погонной емкости и сопротивления утечки

Вектор тока основной гармоники в контактном проводе

$$\bar{I}_{\text{кc}}(x) = I(x) \cdot \exp[j\omega_{\Pi}t + \varphi(x)], \quad (4.46)$$

где $\varphi(x)$ – угол сдвига фаз между напряжением на контактной сети $\bar{U}_{\text{кc}}(x)$ и током $\bar{I}_{\text{кc}}(x)$ в контактном проводе, который, благодаря индуктивной нагрузке, имеет положительный знак. Движение электровоза из точки с координатой $x = x_1$ в точку $x = x_2$ сопровождается изменением фазы между вектором тока $\bar{I}_{\text{кc}}(x)$ и вектором напряжения $\bar{U}_{\text{кc}}(x)$ с φ_1 на φ_2 (см. рис. 4.34).

Активная мощность, потребляемая тяговым электродвигателем

$$P = U_{\text{д}} I_{\text{д}} \cos \varphi, \quad (4.47)$$

где $U_{\text{д}}$, $I_{\text{д}}$ – соответственно действующие значения напряжения и тока.

По ходу движения поезда (с увеличением координаты x) угол φ увеличивается. Следовательно, соответственно формуле (4.47), ухудшается экономичность использования электрической энергии.

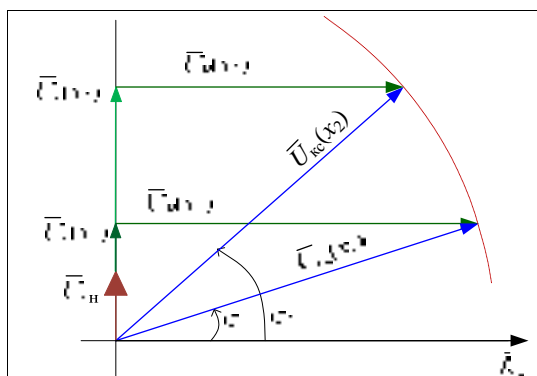


Рис. 4.34. Векторная диаграмма напряжений в различных точках (x_1, x_2) участка контактной электрической сети переменного тока

Для увеличения коэффициента мощности *предложено* на входе контактной сети включить шунтирующий компенсационный конденсатор переменной емкости C_k (рис. 4.35) [25]. Конденсатор C_k и распределенная индуктивность $[L(x) + L_H]$ образуют параллельный колебательный контур. На резонансной частоте ω_0

$$\omega_0 = \{\sqrt{C_k[L(x) + L_H]}\}^{-1} \quad (4.48)$$

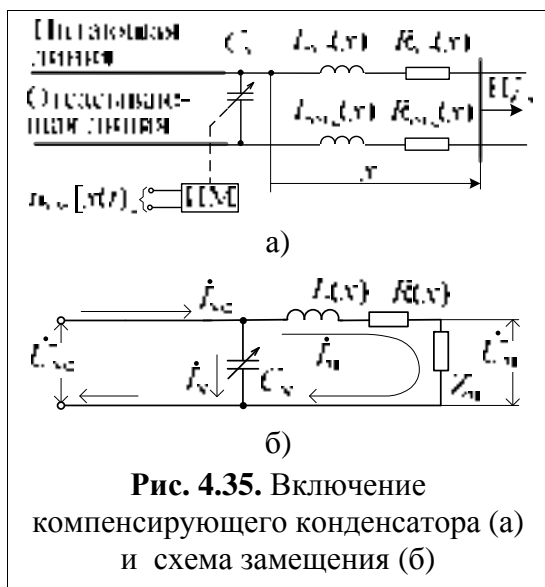


Рис. 4.35. Включение компенсирующего конденсатора (а) и схема замещения (б)

контур обладает свойствами цепи без реактивных сопротивлений.

При $x = 0$ компенсирующая емкость C_k устанавливается такой, чтобы

$$C_k(x = 0) = (L_H \omega_{\Pi}^2)^{-1}. \quad (4.49)$$

Движение поезда в сторону увеличения координаты x вызывает увеличение распределенной индуктивности. Следовательно, в точке $x > 0$ для поддержания режима, близкого к резонансу, необходимо изменить емкость C_k таким образом, чтобы

$$C_k(x > 0) = \{[L_H + L_H(x)]\omega_{\Pi}^2\}^{-1}. \quad (4.50)$$

Целесообразно емкость компенсационного конденсатора менять автоматически, без участия человека-оператора. Для этого создается автоматическая система компенсации реактивного сопротивления, которая путем регулирования емкости конденсатора C_k вносит дополнительный (компенсационный) сдвиг фазы между током и напряжением на выходе ТП таким образом, что

$$[\cos \varphi(x)]_T \approx [\cos \varphi]_d, \quad (4.51)$$

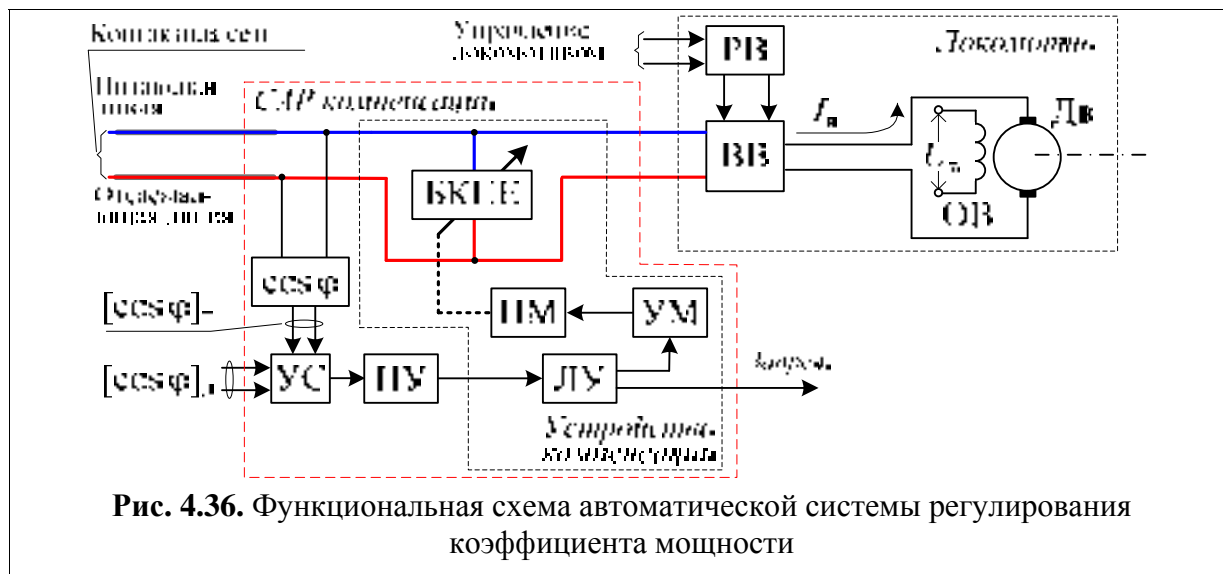
где $[\cos \varphi(x)]_T$ – текущее, соответствующее координате x , значение коэффициента мощности; $[\cos \varphi]_d = (0,92 \div 0,95)$ допустимая величина коэффициента мощности [25].

4.3.5. Структурная схема САР коэффициента мощности

Структурная схема САР создается на основе её функциональной схемы. Функциональная схема САР коэффициента мощности (рис. 4.36) строится в соответствии с рекомендациями (см. [25]) по замкнутой схеме стабилизации выходной величины на основе схемы энергоснабжения (рис. 4.31) и с учетом рис. 4.32 и рис. 4.33.

Однофазное переменное контактное напряжение с номиналом напряжения 25 кВ, предназначенное для создания тяговых усилий электровоза, поступает через токосъемник на высоковольтный выпрямитель ВВ, управляемый регулятором РВ. В выпрямителе ВВ питающее напряжение

преобразуется в последовательность импульсов одной полярности с широтно-импульсной модуляцией, которые поступают на якорь электродвигателя Дв. За счет протекания тока через обмотку якоря двигателя и создания магнитного поля обмоткой возбуждения электродвигатель приводится во вращение.



Контактное напряжение прибором-измерителем $[\cos\varphi]_T$ подвергается контролю на величину текущего коэффициента мощности. Прибор включается на выходе ТП и формирует постоянное напряжение, пропорциональное текущему значению $\cos\varphi$.

$$U_\varphi(t) = k_\varphi \cos\varphi(t), \quad (4.52)$$

где k_φ – статический коэффициент передачи измерителя коэффициента мощности.

Напряжение (4.52) поступает на первый вход устройства сравнения (УС), на второй вход которого поступает напряжение $U_{\varphi.зад} = \text{const}$, пропорциональное фиксированному (наперед заданному) допустимому значению коэффициента мощности. На выходе УС образуется сигнал ошибки

$$\varepsilon_\varphi(t) = U_\varphi(t) - U_{\varphi.зад}. \quad (4.53)$$

Предварительный усилитель ПУ предназначен для компенсации потерь полезного сигнала при последующих обработках. С выхода ПУ усиленный сигнал в $k_{пул}$ раз

$$U_\varepsilon(t) = k_{пул} \varepsilon(t) \quad (4.54)$$

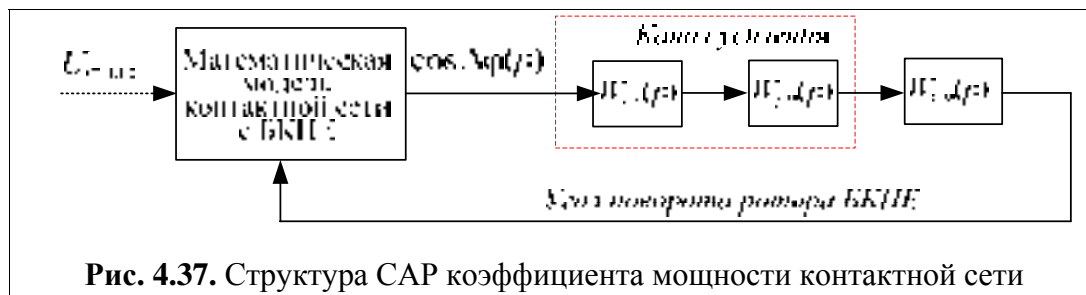
приходит на логическое устройство (ЛУ), функционирующее согласно неравенству

$$1 > \varepsilon(t) \geq 0, \quad (4.55)$$

что соответствует тому, что коэффициент мощности неотрицателен и не превышает 1. Если условие (4.55) выполняется, то сохраняется нормальное функционирование САР. В противном случае формируется команда «за-

прет», согласно которой подстройка коэффициента прекращается и сигнализируется неисправность системы регулирования.

Дальнейшее нормальное функционирование САР заключается в том, что после окончного усиления в усилителе мощности (УМ) исполнительный механизм (электропривод) под действием напряжения УМ путем поворота ротора привода изменяет емкость батареи конденсаторов переменной емкости (БКПЕ) в сторону уменьшения угла φ , т. е. достижения результата, чтобы $(\cos.\varphi)_T \rightarrow (\cos.\varphi)_D$.



Структурная схема. При создании структурной (алгоритмической) схемы САР реальные элементы заменяются их моделями с сохранением информационных связей между ними. Для линейных элементов – это передаточные функции $W(p)$, для нелинейных – дифференциальные или алгебраические уравнения (рис. 4.37). Далее вводятся ограничения, что позволяет упростить структурную схему, и производится, если возможно, линеаризация и запись передаточных функций.

Особенности САР и её элементов.

1. А) *Эквивалентный колебательный контур.* Контактная сеть с БКПЕ образуют параллельный колебательный контур. Вблизи резонансной частоты фазочастотная характеристика колебательного контура описывается примерно линейной функцией (рис. 4.38), так что приращение фазы

$$\Delta\varphi \approx k_{C\varphi} \Delta C_K, \quad (4.56)$$

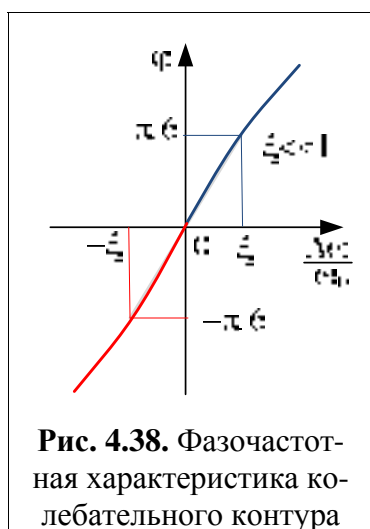
где $k_{C\varphi}$ – коэффициент передачи колебательного контура по переменным: входная величина – изменение емкости ΔC_K , выходная величина – изменение фазы $\Delta\varphi$.

Соответственно формуле (4.56) изменение коэффициента мощности

$$\cos.\Delta\varphi = \cos(k_{C\varphi} \Delta C_K). \quad (4.57)$$

При малых отклонениях от резонанса формула (4.57) упрощается (рис. 4.39)

$$\cos.\Delta\varphi = 1 - 2\sin^2[(k_{C\varphi} \Delta C_K)/2] \approx 1 - (k_{C\varphi} \Delta C_K)^2. \quad (4.58)$$



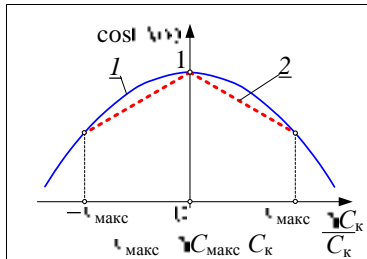


Рис. 4.39. Зависимость коэффициента мощности от емкости компенсирующего конденсатора

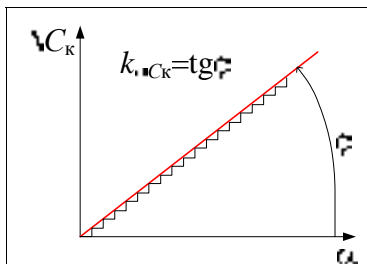


Рис. 4.40. Зависимость приращения емкости компенсирующего конденсатора от угла поворота выходного вала исполнительного механизма

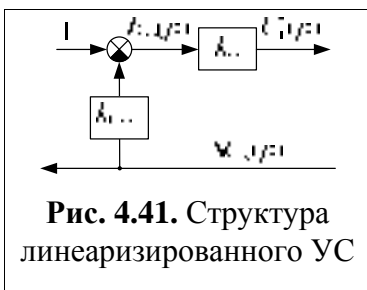


Рис. 4.41. Структура линейризованного УС

Б) *Управление емкостью БКПЕ.* Изменение емкости ΔC_k осуществляется переключением конденсаторов в БКПЕ при помощи электропривода (исполнительного механизма). Выходная величина электропривода – угол поворота выходного вала α , и он же входная величина управления емкостью ΔC_k . Конденсаторы блока компенсации высоковольтные, поэтому конструктивно изменение ΔC_k целесообразно выполнять под- или отключением конденсаторов батареи. Характеристика изменения емкости ΔC_k от угла α ступенчато дискретно-ступенчатая, которую, при небольших «ступеньках» можно линеаризовать, вводя коэффициент передачи $k_{\alpha C_k}$ по переменным угол α – емкость ΔC_k (рис. 4.40).

В) *Вывод.* Эквивалентный колебательный контур (рис. 4.35) как динамический элемент представляет собой:

1) по каналу угол поворота ИМ – изменение емкости представляет собой линеаризованное пропорциональное звено с коэффициентом передачи $k_{\alpha C_k}$;

2) по каналу емкость C_k – коэффициент мощности выполняет математическую операцию определения отклонения от нуля фазового угла (рис. 4.35), при изменении распределенной индуктивности (рис. 4.35, б). При малых отклонениях ΔC_k ¹²:

а) представляет собой безынерционное нелинейное звено;

б) имеет коэффициент передачи, зависящий от

параметра ΔC_k , что говорит о нелинейности устройства сравнения (рис. 4.39). Характеристика (4.58) гладкая, поэтому она может быть линеаризована:

$$\cos \Delta \varphi \approx |1 - k_{\varphi \Delta C_k} \Delta C_k|, \quad \Delta C_k \in [0; \Delta C_{\text{макс}}], \quad (4.59)$$

где $\Delta C_{\text{макс}}$ – максимально допустимое изменение емкости компенсации на линеаризуемом интервале.

Структура, соответствующая линеаризации (4.59) с учетом (4.52), включает вычитающий сумматор и пропорциональные звенья (см. рис. 4.41).

¹² Малыми считаем такие отклонения ΔC_k , которые приводят к незначительному изменению текущей резонансной частоты ω_0 , так что $|\omega_0 - \omega_n| \ll \omega_n$.

2. Предварительный усилитель ПУ при рассмотрении динамики процесса заменяется пропорциональным звеном с коэффициентом передачи $k_{пу}$.

3. Усилитель мощности (УМ) для питания электропривода – однотактный транзисторный [22]. Нагрузкой транзистора служит индуктивность якоря электродвигателя привода. Индуктивность трансформаторной нагрузки совместно с паразитными межвитковыми и межслойными и межвитковыми емкостями образует паразитный колебательный контур. Благодаря этому УМ обладает передаточной функцией второго порядка, которая описывается выражением

$$W_{ум}(p) = \frac{k_{ум}}{T_{ум}^2 p^2 + 2\xi_{ум} T_{ум} p + 1}, \quad (4.60)$$

где $k_{ум}$, $T_{ум}$, $\xi_{ум}$ – соответственно статический коэффициент передачи, постоянная времени и степень колебательности усилителя мощности.

4. Исполнительный механизм в основе своей имеет электропривод с редуктором. Электродвигатель, за счет большой индуктивности и массивности ротора по углу поворота вала, обладает свойством динамического запаздывания. Передаточная функция исполнительного механизма:

$$W_{им}(p) = \frac{k_{им}}{T_{им} p + 1}, \quad (4.61)$$

где $k_{им}$ и $T_{им}$ – соответственно статический коэффициент передачи и постоянная времени исполнительного механизма.

Таким образом, рассматриваемую САР, с учетом замечания п. 1Б, по классификации можно привести к классу непрерывных нелинейных систем. Гладкость функций преобразований сигналов элементами позволяет её линеаризовать. В результате образуется структурная схема САР коэффициента мощности энергии, потребляемой контактной сетью, для которой доступны методы анализа и синтеза линейных стационарных систем (рис. 4.42).

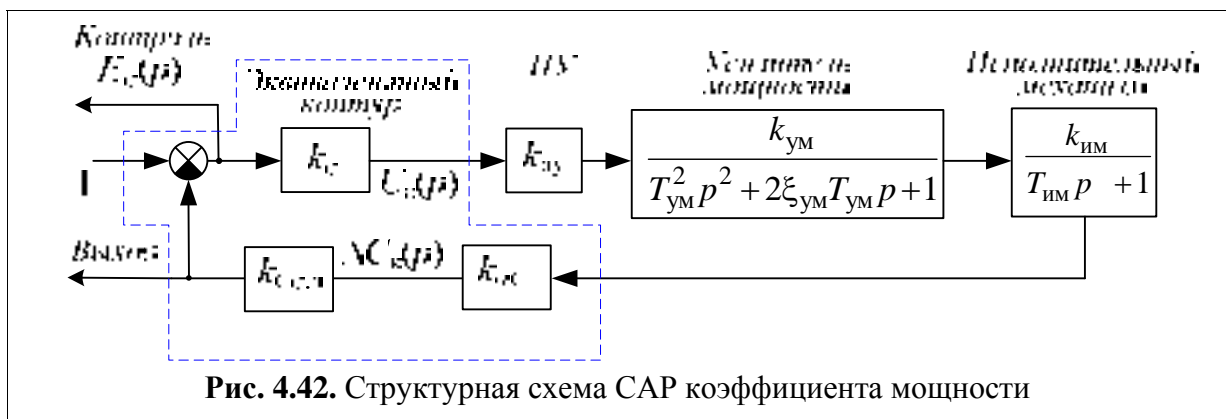


Рис. 4.42. Структурная схема САР коэффициента мощности

Проектированию подлежит непрерывная линейная стационарная автоматическая система регулирования коэффициента мощности энергии (рис. 4.42) при детерминированных воздействиях, удовлетворяющая показателям качества, заданным техническим заданием (см. табл. 4.14)

5. СОДЕРЖАТЕЛЬНОЕ ОФОРМЛЕНИЕ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ И МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЕТОВ

Выполнение курсового проекта должно основываться на общем порядке, изложенном в разделе 2. Здесь предлагаются методические рекомендации для написания «Пояснительной записки», выполнения расчетов, построения графиков, создания схем и моделей при анализе исходной САР, и при синтезе САР с показателями качества согласно требованиям Технического задания.

Разрабатываемые вопросы студентом конкретизируются согласно техническому заданию и в соответствии с темой курсового проекта (см. раздел 4).

5.1. ВВЕДЕНИЕ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ

«Введение» – это важная часть письменного отчёта о любой выполненной работе. И хотя объем «Введения» не должен превышать одной-двух страниц, студенты часто испытывают затруднения в его написании, затрудняясь перед выбором его структуры и полноты изложения.

«Введение» должно быть таким, чтобы читатель мог сложить общее впечатление о направлении работы. При написании «Введения» следует ясно изложить отдельные его взаимосвязанные части (абзацы). Каждая часть должна быть убедительным доказательством важности содержания названия курсового проекта.

Во «Введении» автор знакомит читателя с доказательствами актуальности разрабатываемой темы. Для этого излагаются основные сведения о назначении и краткому принципу действия объекта управления. Показывается, ссылаясь на авторитетные источники: почему следует создавать автоматическую систему для его управления; какие ограничения психических, физиологических и физических возможностей человека не позволяют добиться желаемого, в соответствии с заданием, качества технологического процесса.

Желательно показать личный интерес студента в разработке темы. Например, в форме поставленных для разрешения вопросов.

На основании вывода об актуальности и применения САР конкретного технологического процесса автор разъясняет необходимость разработки устойчивой системы с желаемыми, т. е. с требуемыми согласно техническому заданию, показателями качества, представляет краткие сведения о её структуре, принципе построения и функционирования.

Во «Введении» автору целесообразно указать на результаты других авторов. Важно как перечислить специалистов в этой области техники, ссылаясь на их публикации, так и показать отличие или особенности вашего решения задачи синтеза САР. Например, широкое применение компьютерного моделирования.

Автору важно показать, со ссылкой на источники, свое представление о перспективах применения результатов проектирования.

Окончание «Введения» должно быть посвящено формулировке цели и задач курсового проектирования с учетом названия темы проекта.

5.2. РАЗДЕЛ I ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ «АНАЛИЗ ИСХОДНОЙ САР»

Анализ исходной САР проводится на основе её функциональной схемы варианта задания. В качестве примера далее будет рассмотрена САР оборотов электродвигателя электропривода механического объекта управления (рис. 5.1).

Цель анализа – определение качественных показателей и принципиальной возможности применения рассматриваемой САР для решения задачи управления заданным объектом.

Анализ включает: обоснование линейности и стационарности исследуемой САР; построение математической модели САР; определение свойств в статическом и динамическом режиме.

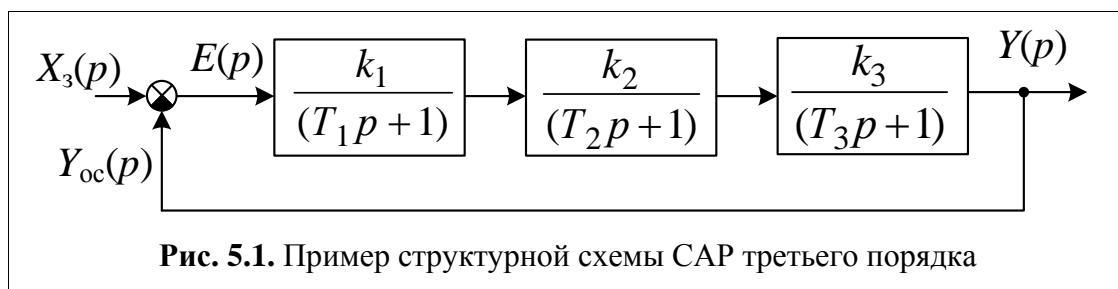
5.2.1. Моделирование исходной САР

Математическое моделирование исходной САР включает:

- а) линеаризацию статических характеристик динамических звеньев и САР в целом (см. п. 3.3);
- б) создание, на основе функциональной схемы исходной САР, структурной схемы (см. п. 4);
- в) запись и упрощение передаточных функций элементов САР;
- г) запись передаточной функции САР в разомкнутом и замкнутом состоянии (см. пример);
- д) создание структуры модели САР в одной из доступных компьютерных программных сред¹³ и моделирование её на компьютере.

Пример. Для структурной схемы САР с единичной обратной связью (рис. 5.1) известны передаточные функции всех элементов, т. е. статические коэффициенты передачи k_i , и постоянные времени T_i , $i = 1, 2, 3$, так что:

$$k_1 = 0,5; \quad k_2 = 2,0; \quad k_3 = 4,0; \quad T_1 = 0,5 \text{ с}; \quad T_2 = 3,0 \text{ с}; \quad T_3 = 20,0 \text{ с}. \quad (5.1)$$



¹³ Предлагается предпочтение отдать программной среде «Electronics WorkBench».

Тогда передаточная функция прямой ветви (при единичной ООС она же – передаточная функция разомкнутой системы) имеет вид:

$$W_p(p) = \frac{K_{p.исх}}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)}, \quad (5.2)$$

где $K_{p.исх} = 4,0$ – статический коэффициент передачи разомкнутой исходной САР.

Для определения передаточной функции замкнутой системы запишем:

$$\begin{aligned} W_3(p) &= \frac{W_p(p)}{1 + W_p(p)} = \frac{\frac{K_{p.исх}}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)}}{1 + \frac{K_{p.исх}}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)}} = \\ &= \frac{K_{p.исх}}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3 p + 1) + K_{p.исх}} = \end{aligned} \quad (5.3)$$

$$= \frac{K_{p.исх}}{a_3^{(p)} p^3 + a_2^{(p)} p^2 + a_1^{(p)} p + 1 + K_{p.исх}} = \frac{K_{з.исх}}{a_3^{(3)} p^3 + a_2^{(3)} p^2 + a_1^{(3)} p + 1}, \quad (5.4)$$

где $K_{з.исх}$ – статический коэффициент передачи замкнутой исходной САР

$$K_{з.исх} = \frac{K_{p.исх}}{1 + K_{p.исх}}; \quad (5.5)$$

$a_i^{(p)}$, $i = 1, 2, 3$ – коэффициенты полинома знаменателя передаточной функции исходной САР в разомкнутом состоянии:

$$a_0^{(p)} = 1; \quad a_1^{(p)} = T_1 + T_2 + T_3; \quad a_2^{(p)} = T_1 T_2 + T_2 T_3 + T_1 T_3; \quad a_3^{(p)} = T_1 T_2 T_3; \quad (5.6)$$

$a_i^{(3)}$, $i = 1, 2, 3$ – коэффициенты полинома знаменателя передаточной функции исходной САР в замкнутом состоянии:

$$a_{исх.i}^{(3)} = \frac{a_i^{(p)}}{1 + K_{p.исх}}. \quad (5.7)$$

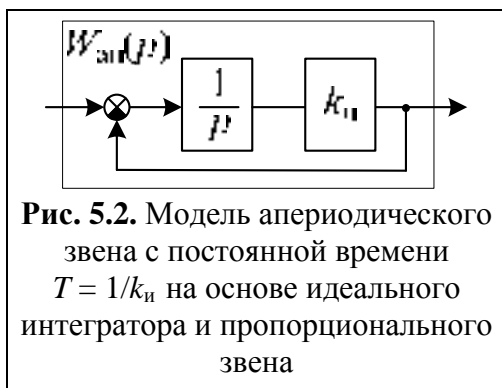
С учетом условия (5.1) и формул (5.3) – (5.7) передаточная функция замкнутой САР:

$$W_3(p) = \frac{0,8}{6p^3 + 12,3p^2 + 4,7p + 1}. \quad (5.8)$$

Для создания компьютерной модели необходимо взять за основу удобную запись передаточной функции. При этом окажутся доступны различные возможности программной среды «Electronics WorkBench». Так, например, формулы (5.2) и (5.3) позволяют воспользоваться структурным

аналогом исходной САР. Для этого сначала, на основе интегратора (базовый элемент), создается модель аperiodического звена (рис. 5.2). Затем аperiodические звенья «размножаются» в количестве трех штук с постоянными времени (5.1), т. е. с коэффициентами передачи пропорциональных звеньев в модели (рис. 5.2) соответственно:

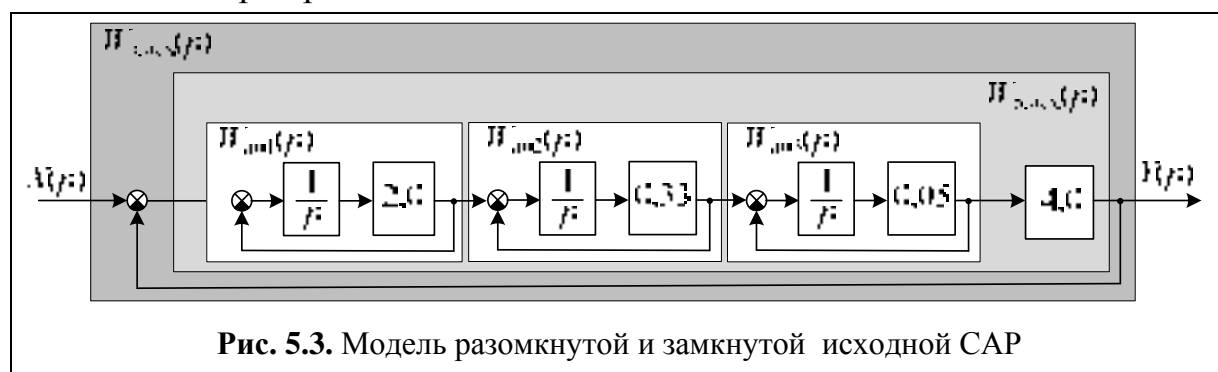
$$k_{1и} = 2,0 \text{ с}; \quad k_{2и} = 0,33 \text{ с}; \quad k_{3и} = 0,05 \text{ с}. \quad (5.9)$$



Последовательное соединение пропорционального $K_{р.исх}$ и трех аperiodических звеньев с коэффициентами (5.9) образует разомкнутую САР. Включением единичной ООС реализуется модель замкнутой САР (рис. 5.3).

Надо отметить, что для одной и той же САР может быть построено несколько компьютерных моделей. Структура компьютерной модели зависит от выбора базового

элемента, используемого для реализации передаточной функции, от разбивки моделируемой системы на динамические звенья и от личных предпочтений автора проекта.



5.2.2. Статический анализ исходной САР

Статический анализ выполняется с целью определения соответствия статической ошибки регулирования исходной САР требованиям «Технического задания».

Статическая ошибка регулирования определяется при работе реальной САР в пределах линейного участка статической характеристики, т. е. после линеаризации системы. Относительная статическая ошибка регулирования исходной САР [20]:

$$\delta_{исх} = 1/(1 + K_{р.исх}). \quad (5.10)$$

Учитывая условие (5.1) для конкретного примера (рис. 5.3),

$$\delta_{исх} = 1/(1 + k_1 k_2 k_3) = 1/(1 + 4) = 0,20. \quad \delta_{исх} = 0,20.$$

Или в процентах

$$\delta_{исх} \% = \delta_{исх} \cdot 100 \% = 0,20 \cdot 100 \% = 20 \%. \quad \delta_{исх} \% = 20 \%.$$

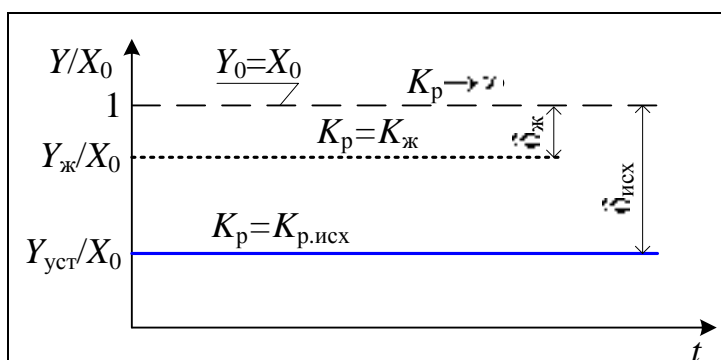


Рис. 5.3. Зависимость статической ошибки регулирования δ от коэффициента передачи:
 $X_0 = \text{const}$ – входное воздействие;
 $Y_{\text{уст}} = \text{const}$ – выходная величина САР при $K_p = K_{\text{исх}}$;
 $Y_{\text{ж}} = \text{const}$ – выходная величина САР при $K_p = K_{\text{ж}}$;
 K_p – статический коэффициент передачи разомкнутой САР;
 $K_{\text{исх}}, K_{\text{ж}}$ – статический коэффициент передачи соответственно исходной САР с ошибкой регулирования $\delta_{\text{исх}}$, и САР желаемой ошибкой регулирования $\delta_{\text{ж}}$

Как следует из формулы (5.10), каждому значению коэффициента передачи разомкнутой статической САР соответствует единственное значение статической ошибки регулирования (рис. 5.4). С увеличением коэффициента передачи K_p относительная статическая ошибка δ уменьшается.

Желаемому значению статической ошибки $\delta_{\text{ж}}$ соответствует коэффициент $K_{\text{р.ж}}$. Согласно формуле (5.10):

$$K_{\text{р.ж}} = (1 - \delta_{\text{ж}}) / \delta_{\text{ж}}. \quad (5.11)$$

Следовательно, если $\delta_{\text{ж}, \%} = 1 \%$, то используя (5.11):

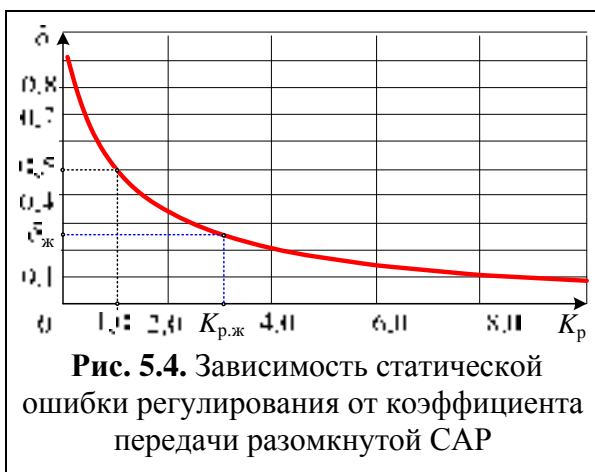


Рис. 5.4. Зависимость статической ошибки регулирования от коэффициента передачи разомкнутой САР

$$K_{\text{р.ж}} = (1 - \delta_{\text{ж}}) / \delta_{\text{ж}} = (1 - 0,01) / 0,01 = 99.$$

При коэффициенте передачи разомкнутой САР $K_{\text{р.ж}} = 99$ статическая ошибка регулирования будет не больше 0,01 (или 1 % от входного постоянного воздействия).

Противоречие, которое возникает при $\delta_{\text{ж}} < \delta_{\text{исх}}$, т. е. между желаемой статической ошибкой регулирования и статической ошибкой регулирования исходной САР, устраняется последовательным включением

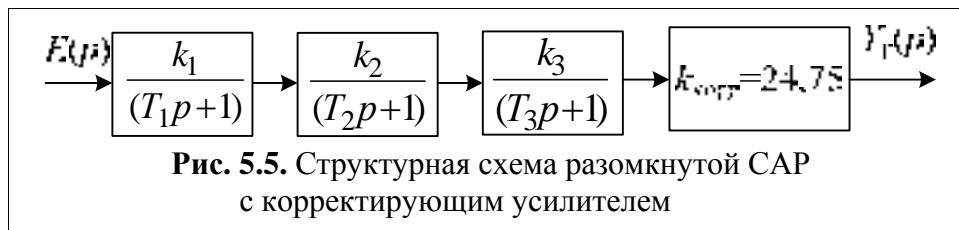
дополнительного (корректирующего) усилителя (пропорционального звена) с коэффициентом усиления $k_{\text{корр}}$:

$$k_{\text{корр}} = K_{\text{р.ж}} / K_{\text{р.исх}}. \quad (5.12)$$

Для выбранного примера – подстановкой в (5.12) значений $K_{\text{р.ж}} = 99$ и $K_{\text{р.исх}} = 4$:

$$k_{\text{корр}} = K_{\text{р.ж}} / K_{\text{р.исх}} = 99 / 4 = 24,75.$$

Таким образом, для улучшения статической точности регулирования САР с $\delta_{\text{исх}, \%} = 71 \%$ до $\delta_{\text{ж}, \%} = 1 \%$ необходимо в прямую ветвь включить пропорциональное звено – усилитель с коэффициентом усиления $k_{\text{корр}} = 24,75$ (рис. 5.5).



5.2.3. Анализ устойчивости исходной САР

Общие сведения. Устойчивость САР наглядно определяется по её переходной характеристике $h(t)$. Сходящийся переходный процесс

$$\lim_{t \rightarrow \infty} h(t) = h_{уст} = \text{const}, \quad - \quad (5.13)$$

признак устойчивой САР.

Переходную характеристику можно определить (при нулевых начальных условиях и при воздействии $x(t) = 1(t)$) либо решением дифференциального уравнения САР (3.1), либо экспериментальной проверкой.

Применение обоих способов исследования устойчивости имеет существенные ограничения:

- сложность поиска решения дифференциального уравнения, если его порядок больше двух;
- не всегда возможно практическое исследование реальной САР.

Поэтому устойчивость САР определяют по косвенным признакам. Например, практическому исследованию подвергается не сама САР, а её какая-либо модель. Результаты исследования могут быть достоверны, естественно, только при адекватности модели оригиналу.

Теоретические способы исследования устойчивости САР основываются на замене решения дифференциального уравнения (3.1) проверкой на соответствие некоторых признаков (критериев устойчивости) исследуемой САР таким же признакам заведомо устойчивой САР. Наиболее широко применяемые критерии:

- аналитический критерий Рауса – Гурвица, – устойчивость САР определяется по анализу коэффициентов характеристического многочлена замкнутой системы $A(p)$ (3.7);
- графоаналитический критерий Найквиста – для его применения необходимо построение амплитудно-фазовой частотной характеристики разомкнутой САР [20].

Самый удобный для практического исследования САР, устойчивой в разомкнутом состоянии, – логарифмический критерий. Логарифмический критерий устойчивости по сути есть модифицированный критерий Найквиста. Он основан на определении устойчивости САР по логарифмическим амплитудной (ЛАЧХ) и фазовой (ЛФЧХ) частотным характеристикам разомкнутой САР.

Логарифмический критерий устойчивости гласит, что САР, устойчивая в разомкнутом состоянии, останется устойчивой и в замкнутом состоянии, если выполняется условие:

$$\omega_{\pi} > \omega_{\text{ср}}, \quad (5.14)$$

где ω_{π} – частота, на которой фазовая характеристика (ЛФХ) пересекает линию $\varphi = -\pi$; $\omega_{\text{ср}}$ – частота, на которой логарифмическая амплитудная характеристика (ЛАЧХ) пересекает линию 0 дБ (частота среза).

Применение логарифмического критерия устойчивости для САР с передаточной функцией (5.2) при условиях (5.1) требует выполнения следующих операций:

1) на координатной плоскости построить оси с логарифмическим масштабом (см. п. 4.4 в [20]);

2) по передаточной функции (5.2) выделить сомножители, соответствующие передаточным функциям элементарных динамических звеньев (см. п. 3.2.1 и п. 3.3 в [20]);

3) построить ЛАЧХ и ЛФХ динамических звеньев (см. п. 4.7.8 и п. 3.3 в [20]), геометрическим суммированием ЛЧХ динамических звеньев построить ЛАЧХ и ЛФХ САР в целом;

4) сделать выводы – определить устойчивость и запас устойчивости исследуемой САР.

Реализация предложенного алгоритма требует детализации по каждому пункту.

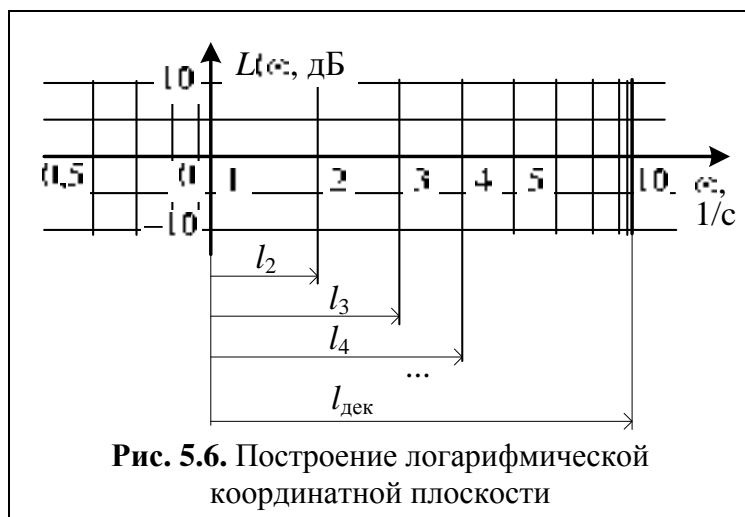


Рис. 5.6. Построение логарифмической координатной плоскости

1) *Построение координатной логарифмической плоскости.* Координатная плоскость образуется (рис. 5.6): а) вертикальной осью $L(\omega)$, дБ

$$L(\omega) = \lg|W(j\omega)|, \quad (5.15)$$

где $|W(j\omega)|$ – модуль комплексного коэффициента передачи САР;

б) горизонтальной осью $\lg(\omega)$, где $[\omega] = 1/\text{с}$.

Вертикальная ось $L(\omega)$ с учетом максимального значения коэффициента передачи (он, в данном случае, равен статическому) равномерно разбивается на отрезки с удобным масштабом отсчета логарифмического коэффициента передачи, например, через 1 дБ, 2 дБ, через 5 дБ или 10 дБ.

Горизонтальная ось $\lg(\omega)$ равномерно разбивается на отрезки длиной $l_{\text{дек}}$ (в мм или см) с удобным масштабом отсчета декад, т. е. изменений частоты в 10 раз. Масштаб должен выбираться таким, чтобы в пределах чертежа было не менее четырех декад.

В пределах каждой декады определяются отрезки

$$l_2 = l_{\text{дек}} \lg 2; \quad l_3 = l_{\text{дек}} \lg 3; \quad l_4 = l_{\text{дек}} \lg 4; \quad \dots \quad l_8 = l_{\text{дек}} \lg 8; \quad l_9 = l_{\text{дек}} \lg 9, \quad (5.16)$$

соответствующие частотам декады.

2) *Выделение элементарных динамических звеньев.* Формула (5.2) представляется в виде произведения

$$\begin{aligned} W_p(p) &= \frac{K_{\text{р.исх}}}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)} = K_{\text{р.исх}} \cdot \frac{1}{(T_1 p + 1)} \cdot \frac{1}{(T_2 p + 1)} \cdot \frac{1}{(T_3 p + 1)} = \\ &= 4,0 \cdot \frac{1}{(20p + 1)} \cdot \frac{1}{(3p + 1)} \cdot \frac{1}{(0,5p + 1)}. \end{aligned} \quad (5.17)$$

Из (5.14) следует, что исходная САР может быть представлена последовательно включенными динамическими звеньями: пропорциональным и тремя апериодическими.

3) *Построение ЛАЧХ и ЛФХ исходной САР.*

Представление передаточной функции САР в виде (5.17) позволяет использовать свойство операции логарифмирования: заменять произведения чисел, или функций суммой их логарифмов. Благодаря этому логарифмические частотные характеристики САР (5.17) образуются сложением частотных характеристик пропорционального и трех апериодических динамических звеньев [20, п. 4.7] (рис. 5.6).

1. Построение асимптотических ЛЧХ апериодических звеньев включает операции (рис. 5.7):

а) выписываются частоты сопряжения

$$\omega_{c1} = 1/T_1 = 1/20 = 0,05 \text{ 1/с}; \quad \omega_{c2} = 1/T_2 = 1/3 = 0,33 \text{ 1/с}; \quad \omega_{c3} = 1/0,5 = 2,0 \text{ 1/с};$$

б) для каждого звена строятся графики ЛАЧХ, состоящие из отрезков прямых:

- горизонтального на уровне 0 дБ;
- наклонного со спадом на -20 дБ/дек,
- сопряженных в точке с координатами $[0, \omega_{ci}]$, $i = 1, 2, 3$;

в) для каждого звена строятся графики ЛФЧХ, для чего:

- на частоте ω_{ci} , $i = 1, 2, 3$ откладывается фаза $(-\pi/4)$;
- на фазо-частотной координатной плоскости из точки с координатами $[\omega_{ci}, (-\pi/4)]$, $i = 1, 2, 3$ проводятся графики по закону арктангенса, асимптотически приближаясь через \pm декаду: в области нижних частот к фазе $\varphi = 0$, а в области верхних частот – к фазе $\varphi = (-\pi/2)$.

2. Построение ЛАЧХ и ЛФЧХ пропорционального звена:

а) для построения ЛАЧХ отложить на оси $L(\omega)$ значение

$$K_{\text{р.исх, дБ}} = 20 \lg K_{\text{р.исх}};$$

б) на уровне $K_{\text{р.исх, дБ}}$ провести отрезок прямой – график $L(\omega) = K_{\text{р.исх, дБ}}$;

в) фазовая характеристика совпадает с линией графика $\varphi(\omega) = 0$.

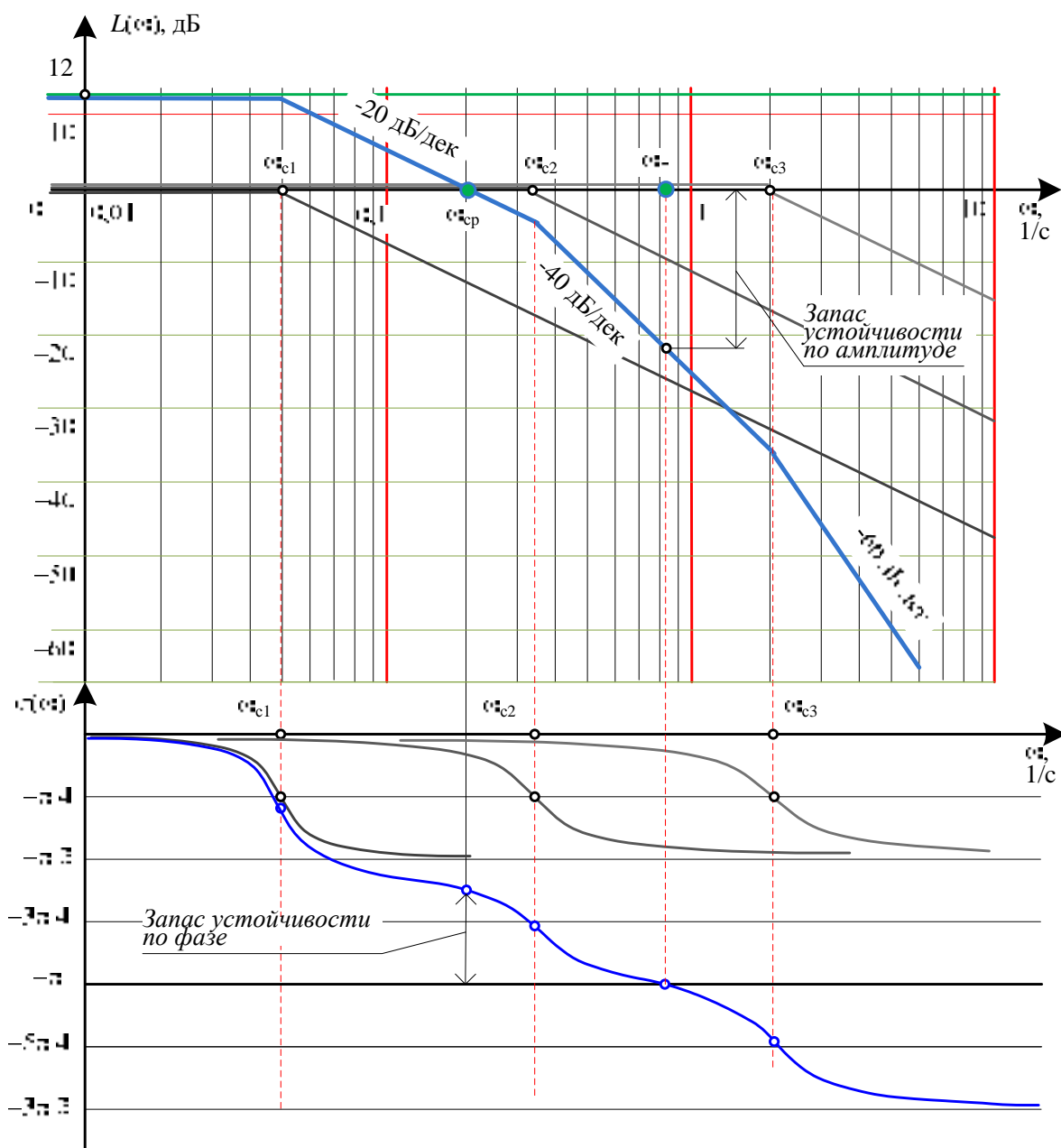


Рис. 5.7. Построение логарифмических амплитудночастотной $L(\omega)$ и фазочастотной $\varphi(\omega)$ характеристик и определение устойчивости по логарифмическому критерию

4) *Выводы.* Исследуемая САР устойчива. Запас устойчивости исходной САР:

- по амплитуде $L_{\text{зап}} \approx 21$ дБ;
- по фазе $\Delta\varphi_{\text{зап}} \approx 5\pi/8$, или примерно 67° .

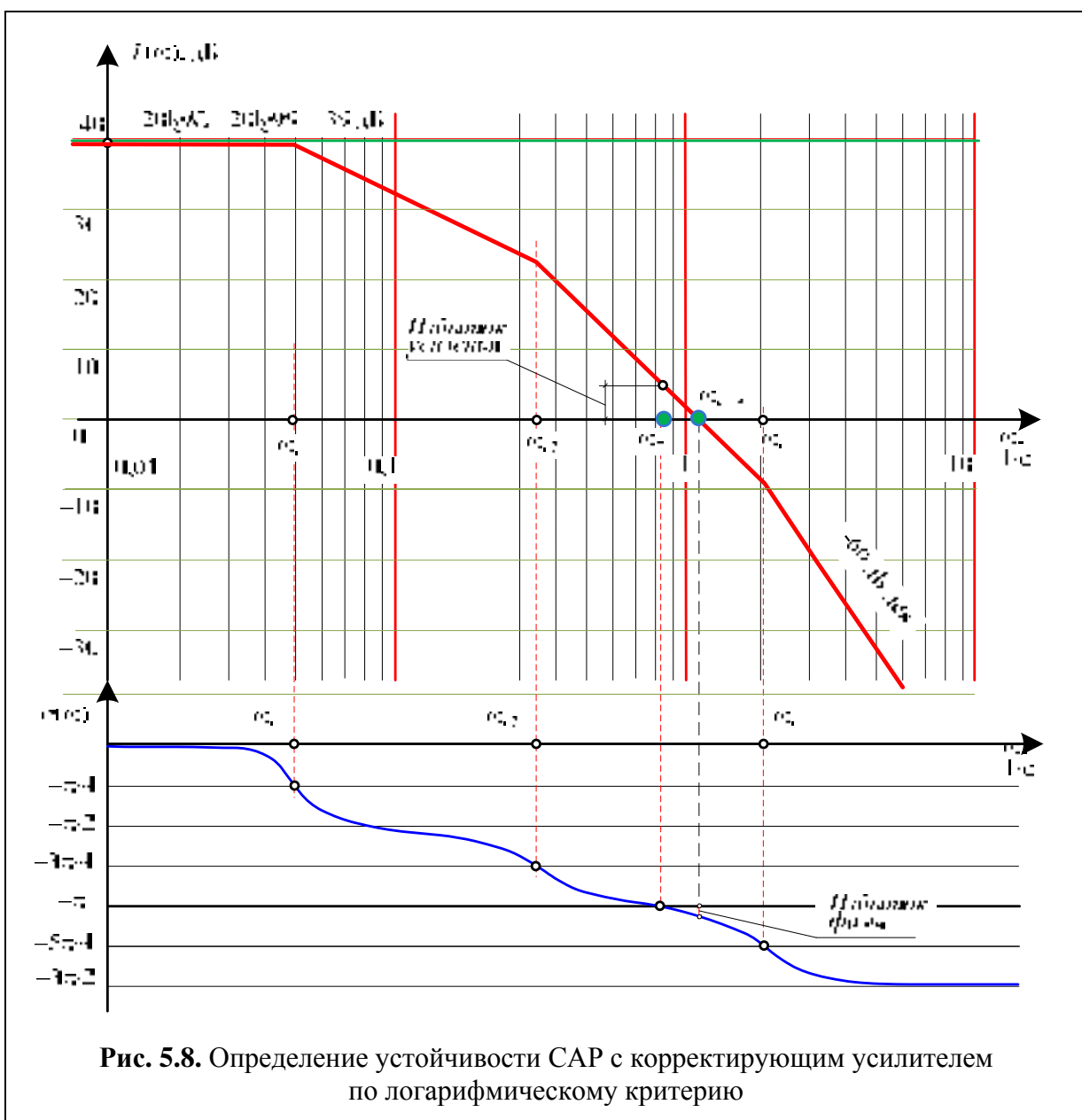
Устойчивость исходной САР с дополнительным усилителем. Применение корректирующего усилителя в САР не приводит к изменению её структурной схемы, но меняется статический коэффициент передачи, так что передаточная функция (5.17) изменяется к виду

$$W_p^*(p) = \frac{K_{p.ж}}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)} = K_{p.ж} \cdot \frac{1}{(T_1 p + 1)} \cdot \frac{1}{(T_2 p + 1)} \cdot \frac{1}{(T_3 p + 1)} =$$

$$= 99,0 \cdot \frac{1}{(0,3 p + 1)} \cdot \frac{1}{(5 p + 1)} \cdot \frac{1}{(20 p + 1)}. \quad (5.18)$$

Для определения устойчивости вновь полученной САР проводится исследование согласно рассмотренному логарифмическому критерию. Обращаем внимание на то, что вид динамических звеньев не изменился. Следовательно, фазочастотная характеристика также не изменилась.

Изменение коэффициента передачи приводит к изменению ординаты каждой точки ЛАЧХ. Амплитудная характеристика смещается параллельно самой себе в соответствии с изменившимся коэффициентом передачи (рис. 5.8). Из построенных графиков следует: вновь образовавшаяся, путем



включения в прямую ветвь пропорционального звена с коэффициентом передачи $k_{\text{корр}} = 24,75$, САР неустойчива, так как не выполняется условие (5.14). Об этом свидетельствует избыток усиления ~ 5 дБ на частоте ω_{π} и избыток фазы $\sim 10^\circ$ на частоте $\omega_{\text{ср}}$.

Таким образом, при последующем проектировании следует иметь ввиду, что наряду с достижением требуемых показателей качества необходимо добиваться и устойчивости САР.

5.2.4. Анализ компьютерной модели исходной САР

Построение компьютерной модели САР в программной среде EWB (рис. 5.9) адаптировано к интуитивному восприятию схемы. Модель САР строится прямой сборкой схемы путем «вытаскивания» из верхней панели меню программного продукта необходимых для этого элементов: сумматоров, интеграторов, усилителей (пропорциональных звеньев), узлов и контрольных приборов.

Соединения выполняются «проводом», который «тянется» за курсором, если предварительно левой кнопкой «мыши» щелкнуть при наведении курсора на клемму (обозначено на проводе точкой, узлом, а на приборе окружностью). На динамических элементах клеммой считается обрез вывода. При двойном щелчке по прибору или элементу открывается окно, в котором можно устанавливать необходимые для исследований параметры.

Для определения качества САР создаются условия для получения переходной характеристики. С этой целью ко входу САР подключается генератор, работающий в режиме создания постоянного напряжения размахом 1 В. Режим генерирования переменной составляющей выключен установкой амплитуды, равной нулю. При включении схемы постоянное напряжение генератора поступает на вход САР, чем имитируется подача функции $1(t)$.

К выходу САР подключается осциллограф, регистрирующий изменение выходного напряжения во времени при подаче на вход сигнала в виде функции $1(t)$, т. е. переходную характеристику. По переходной характеристике $h(t)$ определяются основные показатели качества САР (рис. 5.10).

Включение дополнительного, предназначенного для улучшения статической точности регулирования, усилителя (рис. 5.11) приводит к нарушению устойчивости САР (рис. 5.12) и невозможности применения её по назначению.

Коррекция – самый мощный инструмент реализации как собственно задачи синтеза, так и решений, принятых в п.1 и 2. Коррекция предполагает некий алгоритм определения передаточной функции корректирующего звена, необходимого для достижения целей проектирования.

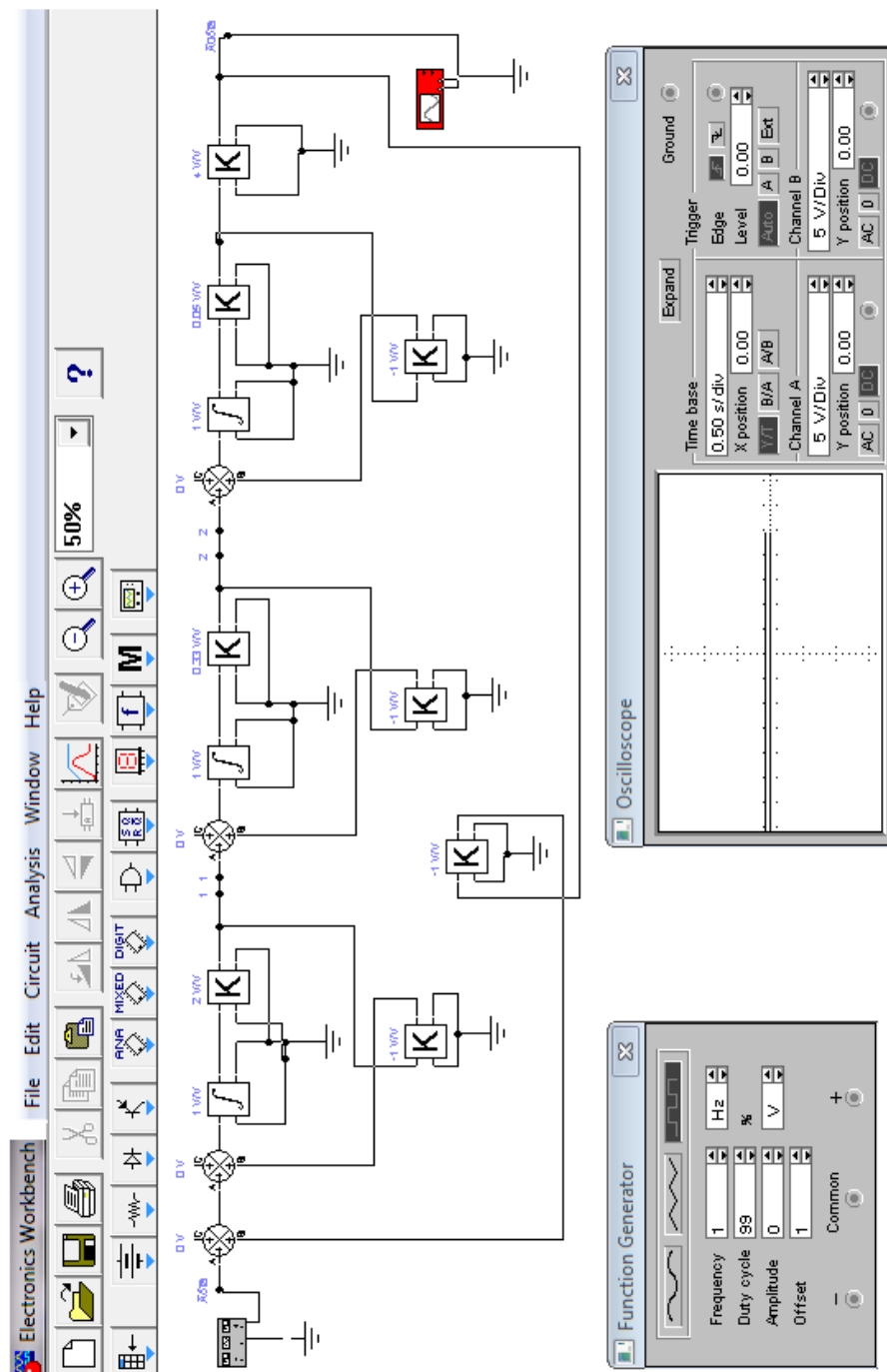
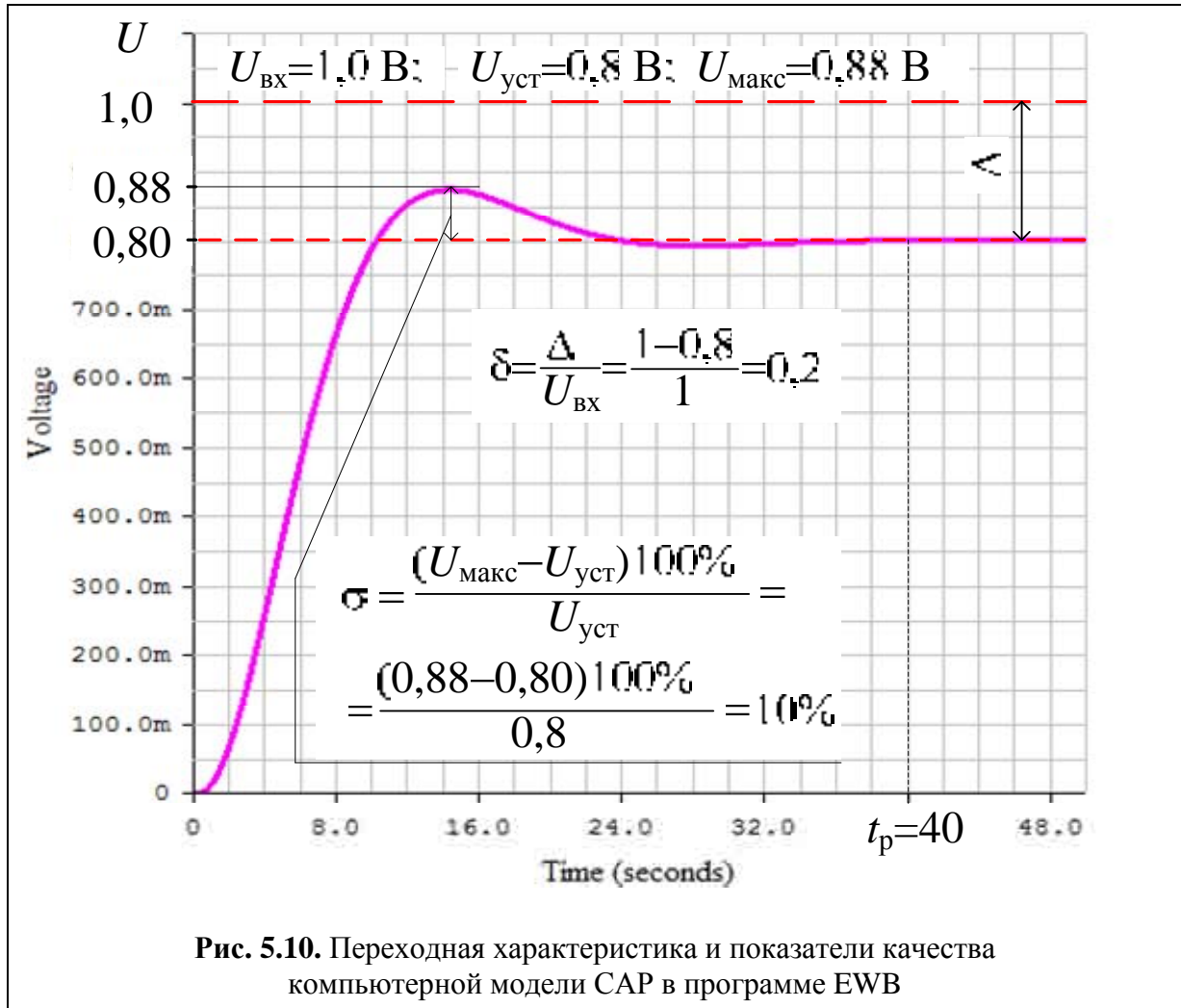


Рис. 5.9. Схема компьютерной модели в программе EWB

В зависимости от места включения корректирующего звена различают последовательную, параллельную и встречно-последовательную коррекцию [20, стр. 117]. Наиболее широко, как отмечалось, применяется последовательная коррекция.



Последовательная коррекция заключается в том, что корректирующее звено с передаточной функцией $W_{корр}(p)$ включается в прямую ветвь последовательно другим звеньям из МНЭ. При этом образуется новая система с передаточной функцией

$$W_{р.ж}(p) = W_{корр}(p) \cdot W_{р.исх}(p), \quad (5.19)$$

откуда

$$W_{корр}(p) = \frac{W_{р.исх}(p)}{W_{р.ж}(p)}. \quad (5.20)$$

В формуле (5.19) известны передаточные функции разомкнутых желаемой и исходной САР. Деление передаточных функций (5.20) соответствует вычитанию логарифмических частотных характеристик. Таким образом определяются ЛЧХ, а по последним восстанавливается передаточная функция корректирующего звена.

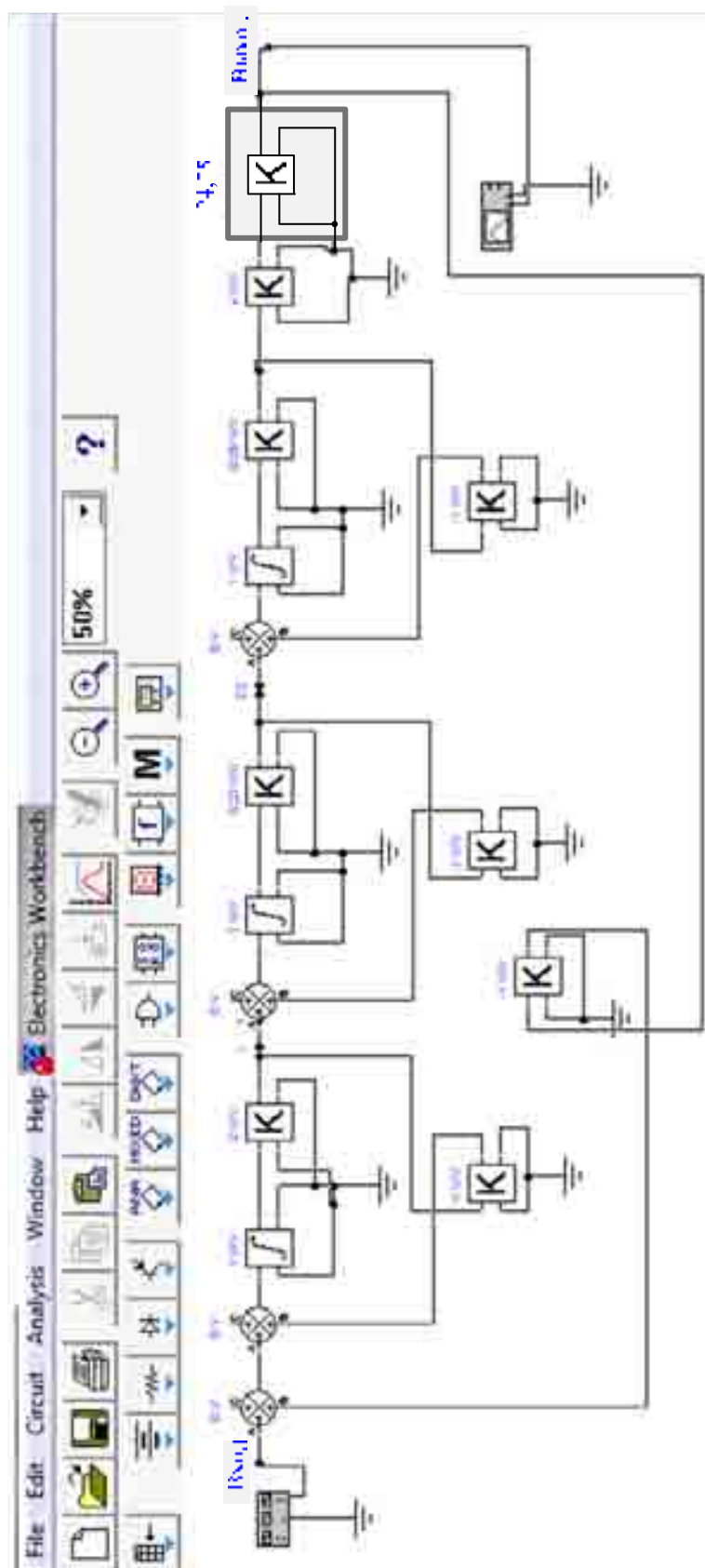
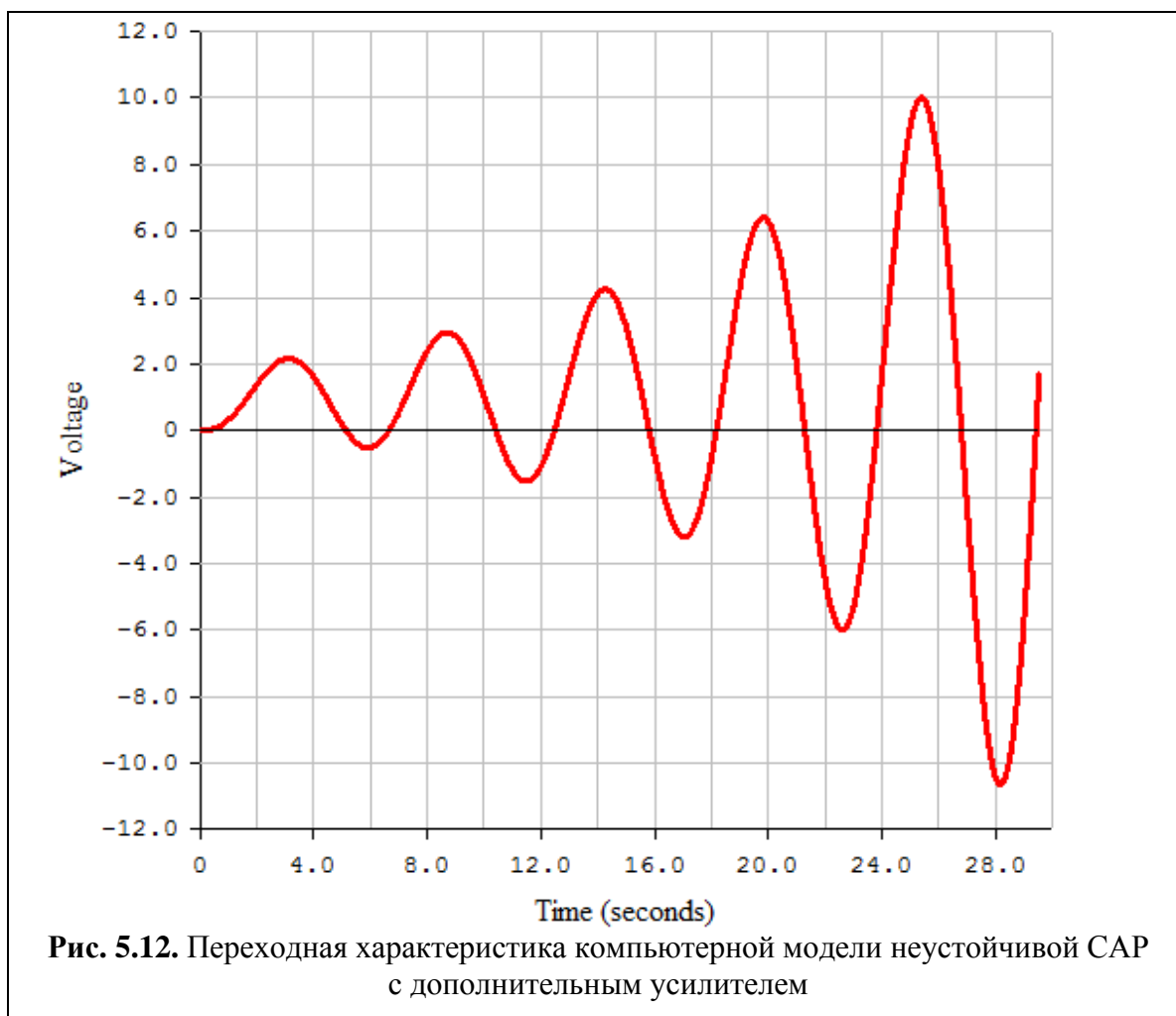


Рис. 5.11. Структурная схема компьютерной модели САР с дополнительным усилителем в программе EWB



5.3. РАЗДЕЛ II ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ «СИНТЕЗ ЛИНЕЙНОЙ СТАЦИОНАРНОЙ САР С ЗАДАНЫМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ КАЧЕСТВА»

5.3.1. Выбор метода коррекции

При проектировании линейной стационарной САР всегда решается задача поиска передаточной функции, обеспечивающей желаемые, изложенные Техническим заданием, показатели качества. Желаемого результата можно добиться:

- 1) путем поиска коэффициентов многочленов числителя и знаменателя передаточной функции (см. формулу 3.18 в [20]);
- 2) поиском такого закона управления, при котором бы происходила «компенсация» ошибок регулирования в переходном режиме благодаря предвидению их появления;
- 3) введением дополнительных динамических звеньев (коррекция).

5.3.2. Алгоритм последовательной коррекции

При осуществлении последовательной коррекции методом ЛЧХ:

1) Строится координатная плоскость ЛЧХ, для чего выбирается масштаб и определяется цена деления¹⁴ по оси частот и оси коэффициента передачи.

2) Наносятся ранее построенные ЛЧХ исходной САР с дополнительным, включенным по результатам статического расчета, усилителем.

3) Исходя из желаемых, заданных Техническим заданием, показателей качества строится ЛАЧХ проектируемой САР.

4) Определяется ЛАЧХ корректирующего звена геометрическим вычитанием

$$L_{\text{корр}}(\omega) = L_{\text{ж}}(\omega) - L_{\text{исх}}(\omega). \quad (5.21)$$

5) Записывается передаточная функция $W_{\text{корр}}(p)$.

6) Выбирается корректирующая цепь согласно табл. 5.1.

7) Создается функциональная схема корректирующего звена.

8) Создается принципиальная схема корректирующего звена.

9) Создается компьютерная модель корректирующего звена.

10) Создается принципиальная (или функциональная) схема скорректированной САР.

11) Создается компьютерная модель разработанной, с корректирующим звеном, САР.

12) Снимается переходная характеристика разработанной САР, определяются её показатели качества и соответствие их желаемым. Делаются выводы.

5.3.3. Построение ЛАЧХ желаемой САР

Желаемая ЛАЧХ строится исходя из необходимости обеспечения желаемых показателей качества, а именно:

- статической ошибки;
- динамических показателей качества;
- перерегулирование $\sigma \leq \sigma_{\text{зад}}$;
- время регулирования $t_p \leq t_{p,\text{зад}}$.

График желаемой ЛАЧХ разбивается на 3 участка: низкочастотный, среднечастотный, высокочастотный.

Низкочастотный участок. Построение участка нижних частот (НЧ) производится из условия заданной точности работы САУ в установившемся режиме. Для *статических* систем участок НЧ (рис. 5.13) *горизонтален* и определяется, с учетом корректирующего усилителя, уравнением

$$L_{\text{нч}}(\omega) = 20\lg K_{p,\text{исх}} + 20\lg k_{\text{корр}} = 20\lg K_{p,\text{ж}}. \quad (5.22)$$

¹⁴ Целесообразно для построения ЛЧХ использовать листы миллиметровой бумаги.

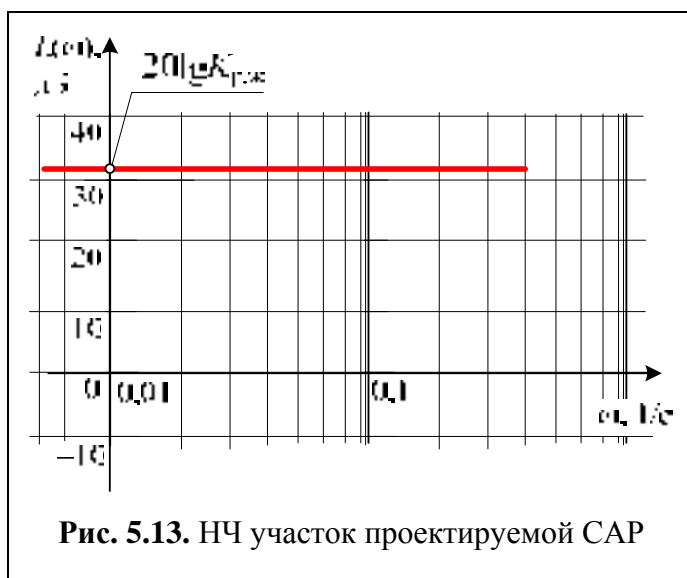


Рис. 5.13. НЧ участок проектируемой САР

Участок НЧ продлевается:
а) в сторону понижения частоты без ограничений;

б) в сторону повышения частоты до первой сопрягающей частоты $\omega_{ж.с.1}$, которая определяется верхнечастотной частью среднечастотного участка.

Среднечастотный участок. Проектирование среднечастотного (СЧ) участка ЛАЧХ – сложный и ответственный этап синтеза САР.

Алгоритм проектирования основан на однозначной связи между параметрами переходного процесса $h(t)$ САР и параметрами среднечастотного участка ЛАЧХ $L(\omega)$, которыми являются:

$$\Delta\omega \geq \begin{cases} \frac{18}{\sigma} \text{ дек}, & 20\% < \sigma < 40\% \\ 1 \text{ дек}, & \sigma < 20\% \end{cases}, \quad \Delta L \geq \begin{cases} \frac{360}{\sigma} \text{ дБ}, & 20\% < \sigma < 40\% \\ 18 \text{ дБ}, & \sigma < 20\% \end{cases};$$

- наклон ЛАЧХ;
- частота среза $\omega_{ж.ср}$;
- границы СЧ участка – левая (низкочастотная) ($+\Delta L$) и правая (высокочастотная) ($-\Delta L$).

Наклон. Опытом проектирования установлено [29], что на средних частотах ЛАЧХ должна проходить под наклоном -20дБ/дек влево и вправо от желаемой частоты среза $\omega_{ж.ср}$ (рис. 5.14).

Желаемая частота среза $\omega_{ж.ср}$ и границы СЧ участка $\pm\Delta L$ определяются по методике, которая основана на взаимосвязи параметров желаемой действительной частотной характеристики (ДЧХ) замкнутой проектируемой системы с параметрами её переходной характеристики (методика В.В. Солодовникова).

Согласно номограммам В.В. Солодовникова:

1) определяется частота среза, для чего:

а) по номограмме рис. 5.15 для заданного техническим заданием значения перерегулирования σ_m определяется отношение p_m ;

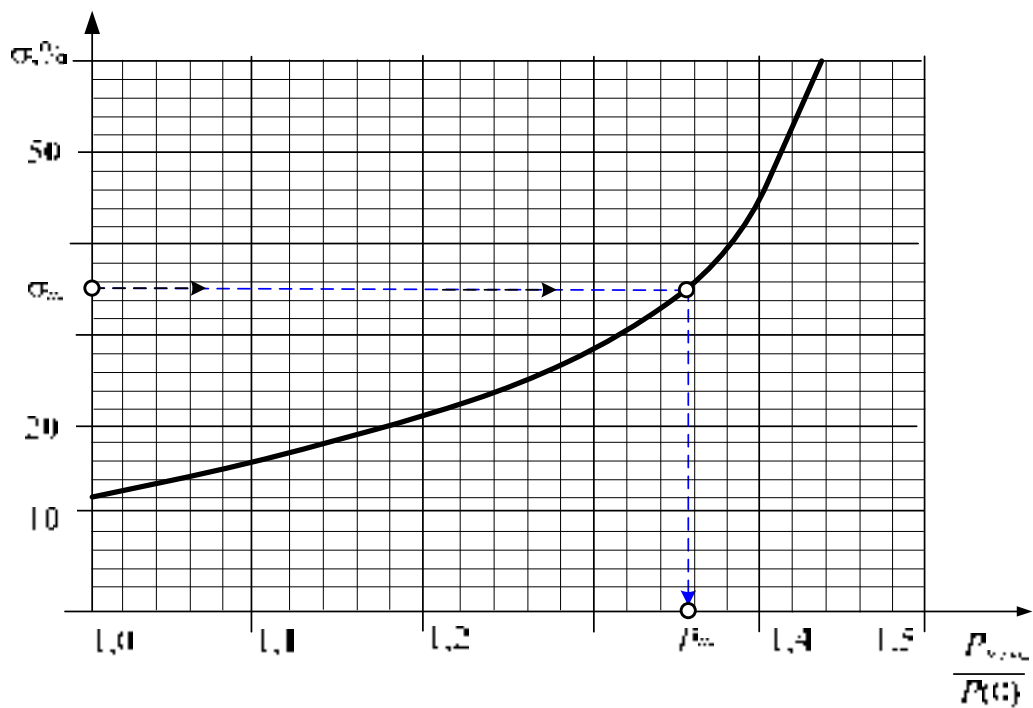


Рис. 5.15. Нормированная номограмма В.В.Солодовникова зависимости перерегулирования $\sigma\%$ от максимума ДЧХ $P_{\text{макс}}$

б) по номограмме рис. 5.16 по отношению p_m определяется величина коэффициента k_m в формуле

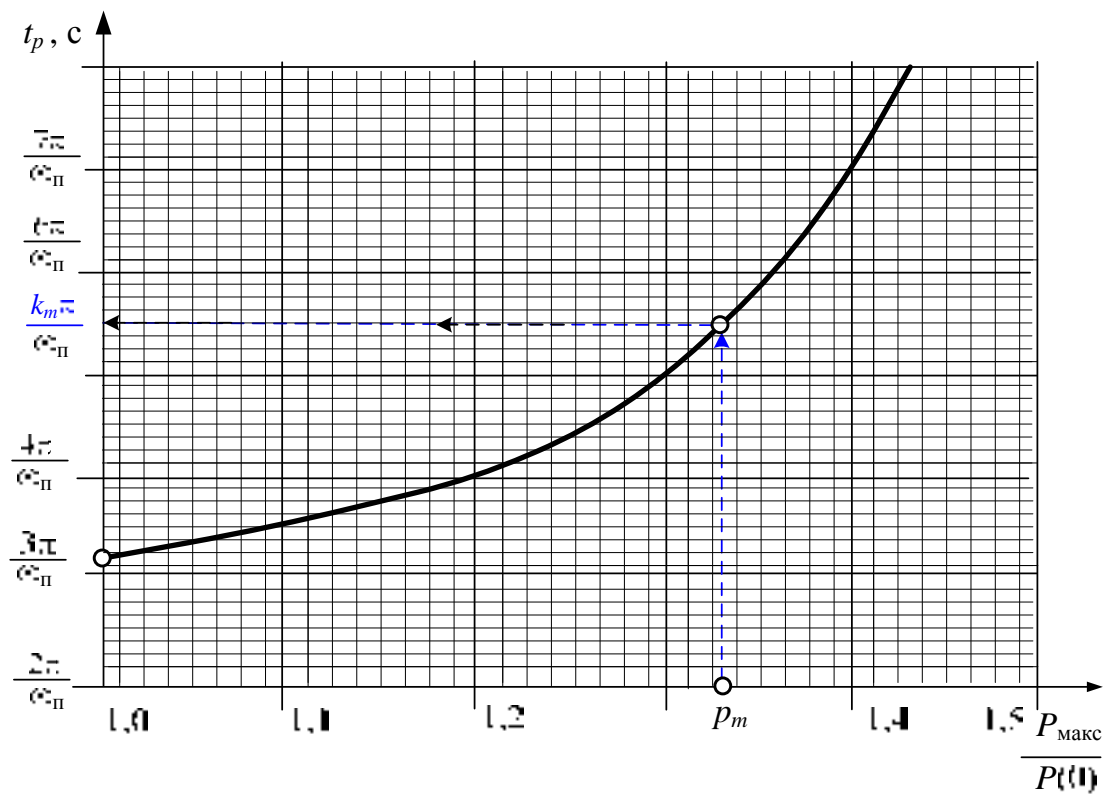


Рис. 5.16. Нормированная номограмма В.В.Солодовникова зависимости времени регулирования t_p от максимума ДЧХ $P_{\text{макс}}$

$$t_p = (k_m \pi) / \omega_n,$$

где t_p – время регулирования, связанное, в соответствии с техническим заданием с желаемым $t_{рж}$ значением времени регулирования, логическими соотношениями:

$$\text{а) } t_p \leq t_{рж}; \quad \text{б) } t_p \geq t_{рж};$$

ω_n – частотный интервал положительности действительной частотной характеристики САР;

в) вычисляется частотный интервал положительности:

$$\text{– при логическом соотношении а): } \omega_n \geq (k_m \pi) / t_{рж};$$

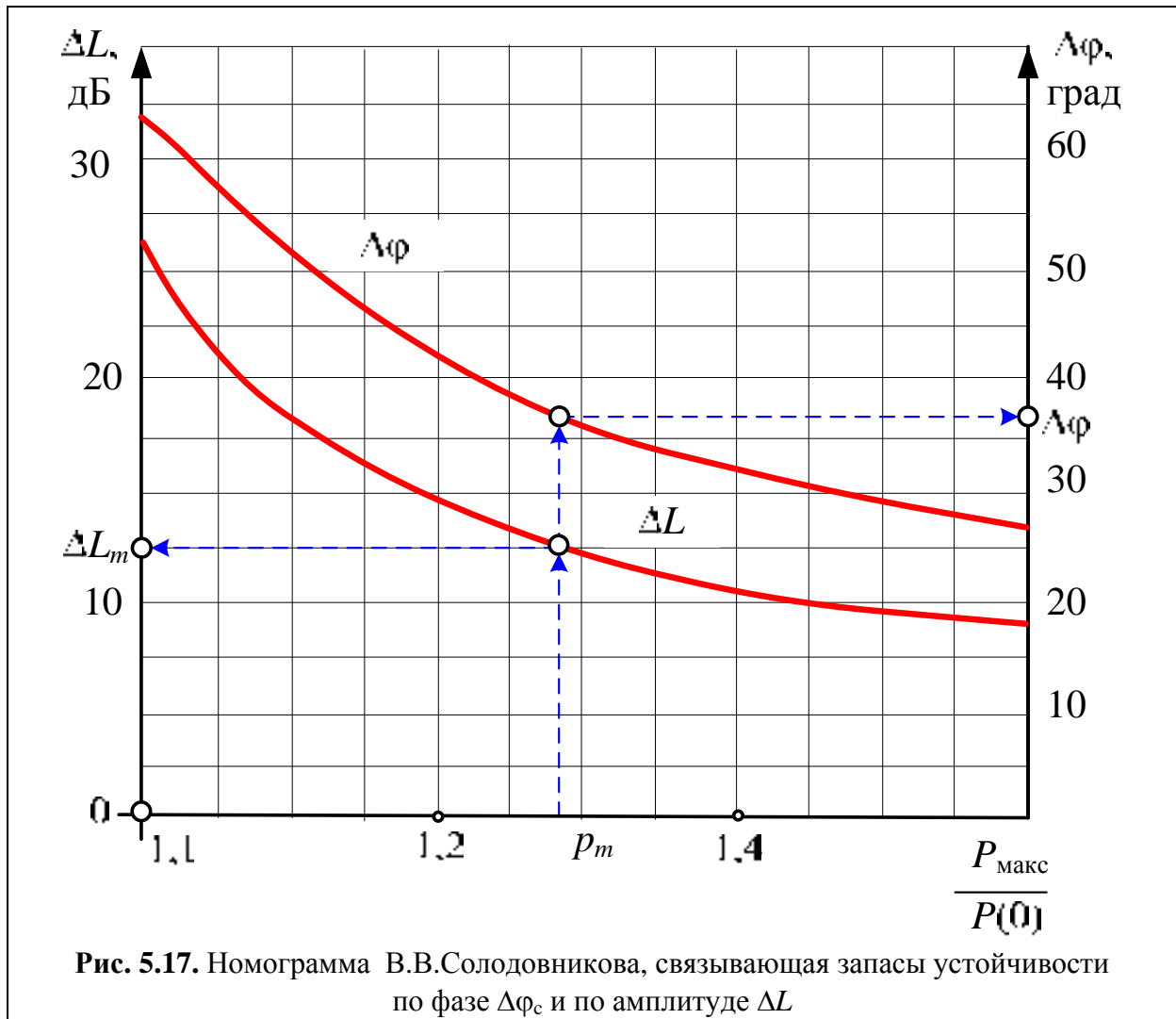
$$\text{– при логическом соотношении б): } \omega_n \leq (k_m \pi) / t_{рж};$$

г) выбирается желаемая частота среза:

$$\omega_{ср} = (0,6 \dots 0,9) \omega_n.$$

2) Обеспечивается желаемый запас устойчивости САР для чего:

а) по заданному запасу устойчивости по фазе $\Delta\varphi_{сж}$ по рис. 5.17 устанавливается запас по модулю $\Delta L_{зап}$;

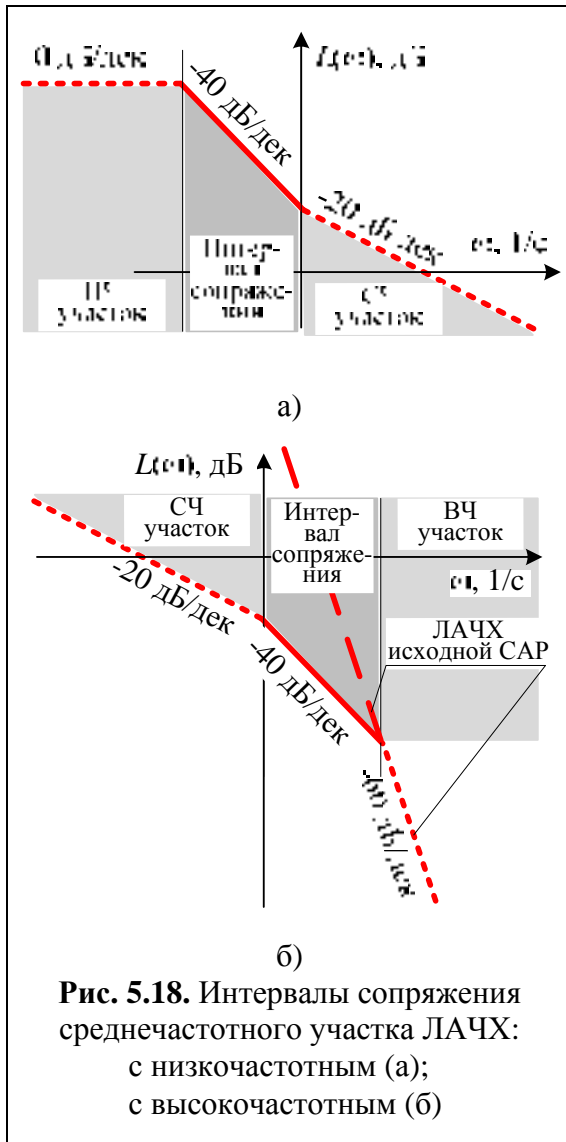


б) на поле графиков ЛАЧХ проводятся линии $\pm\Delta L_{зап}$, ограничивающие среднечастотный участок по усилению;

в) под наклоном -20 дБ/дек через точку с координатами $(\omega_{\text{ср}}; 0)$ проводится отрезок прямой до пересечения с линиями $\pm \Delta L_{\text{зап}}$.

Примечание. Если Техническим заданием не установлен желаемый запас устойчивости по фазе, то он рассчитывается по значению перерегулирования σ , %:

$$\Delta\varphi_{\text{сж}} = \arcsin[1 - (\sigma/100)].$$



Высокочастотный участок ограничивается частотой $\omega \approx (6 \div 10)\omega_{\text{ср}}$ и может в принципе иметь любой наклон ...больше $|-20|$ дБ/дек. Этот участок не влияет существенно на переходный процесс, поэтому во внимание не принимается. Однако для упрощения корректирующего устройства стараются максимально приблизить, вплоть до совпадения, высокочастотный участок ЛАЧХ разрабатываемой САР с ЛАЧХ исходной системы.

Сопряжение СЧ участка ЛАЧХ желаемой САР – это способ стыковки его с НЧ и ВЧ участками. Для этого вводятся области частот, называемые интервалами сопряжения. ЛАЧХ статических САР на интервалах сопряжения имеют отрезки, выходящие из концов СЧ участка под наклоном $(-40$ дБ/дек) и заканчивающиеся точкой пересечения с НЧ и ВЧ участками ЛАЧХ (рис. 5.18).

Вывод. В результате выполненных действий спроектирована ЛАЧХ САР с желаемыми показателями качества, а именно с соответствующими ТЗ статической ошибкой, временем регулирования и перерегулированием при обеспечении запаса устойчивости по амплитуде и по фазе (рис. 5.19).

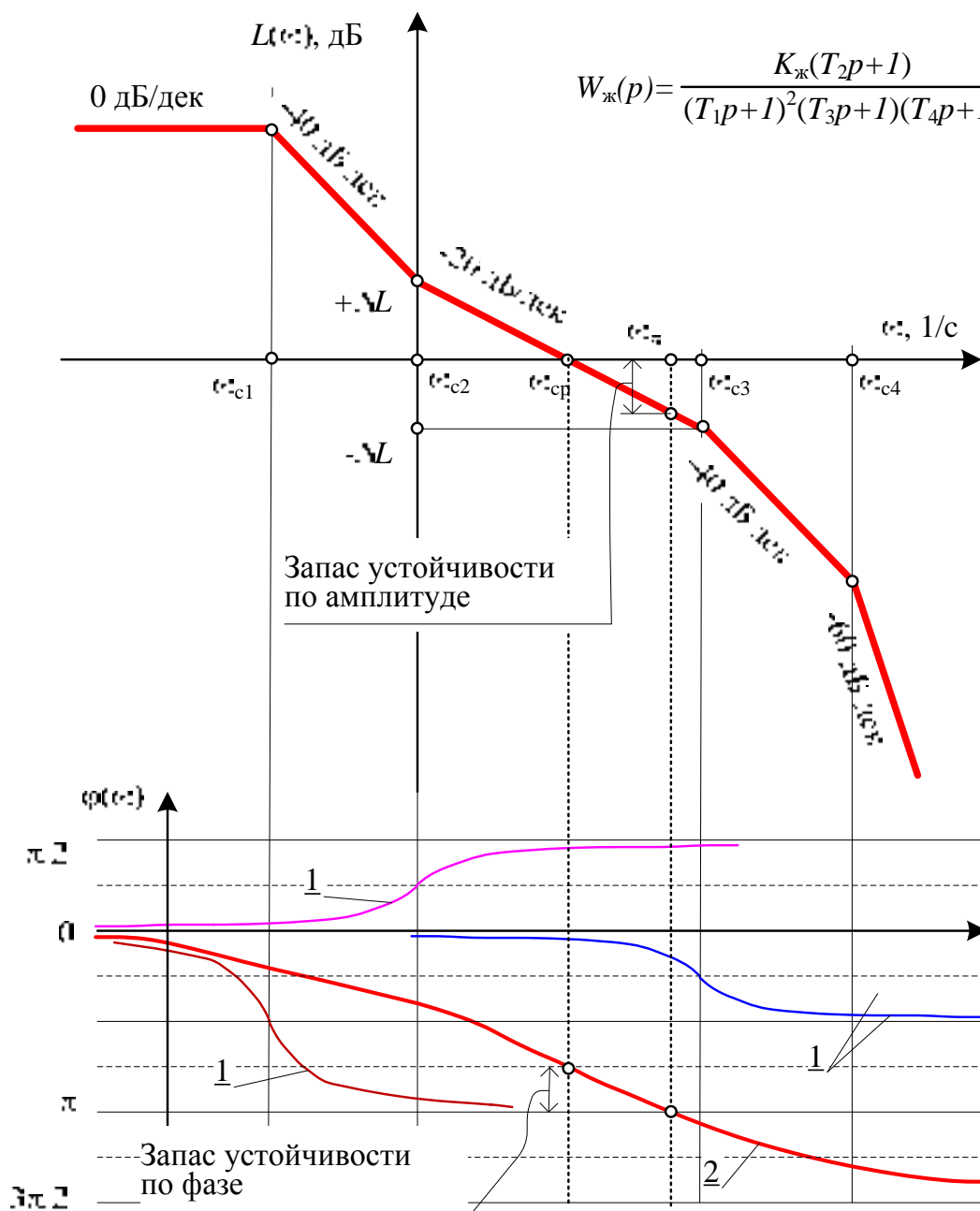


Рис. 5.19. Передаточная функция, ЛАЧХ и ЛФЧХ типичной статической САР с желаемыми показателями качества

5.3.4. Синтез последовательного корректирующего звена

Синтез последовательного корректирующего звена включает построение ЛАЧХ корректирующего звена и запись его передаточной функции.

Построение ЛАЧХ корректирующего звена – это геометрическая реализация уравнения (5.21)¹⁵. На одной координатной плоскости строятся ЛАЧХ исходной САР с корректирующим усилителем $L_{исх}(\omega)$ (см. п. 5.2.4, рис. 5.7) и ЛАЧХ САР с желаемыми показателями качества $L_ж(\omega)$ (см.

п. 5.4.3, рис. 5.18). В результате геометрического вычитания образуется график $L_{\text{корр}}(\omega)$ – ЛАЧХ корректирующего устройства (см. рис. 5.19).

1. В общем случае вычитание графиков $[L_{\text{ж}}(\omega) - L_{\text{исх}}(\omega)]$, построенных на одной координатной плоскости и в одном масштабе **М**, производится согласно правилу:

– на фиксированной частоте $0 < \omega_j < \infty$ записываются значения $L_{\text{ж}}(\omega_j)$ и $L_{\text{исх}}(\omega_j)$;

– результат вычитания

$$[L_{\text{ж}}(\omega_j) - L_{\text{исх}}(\omega_j)] = L_{\text{корр}}(\omega_j) \quad (5.26)$$

– значение логарифмического коэффициента передачи корректирующего звена на частоте ω_j .

Пара чисел ω_j и $L_{\text{корр}}(\omega_j)$ – координаты точки на координатной плоскости в масштабе **М**. При дискретном изменении частоты ω_j от $\omega_j \rightarrow 0$ до $\omega_j \rightarrow \infty$ образуется таблица значений функции $L_{\text{корр}}(\omega)$.

График, построенный согласно данным этой таблицы – суть ЛАЧХ $L_{\text{корр}}(\omega)$ корректирующего звена.

2. Так как графики ЛАЧХ кусочно-линейные, то проще и быстрее построить график корректирующего звена (5.21), применяя следующую методику.

1) Частоты сопряжения на графиках ЛАЧХ $L_{\text{исх}}(\omega)$ и $L_{\text{ж}}(\omega)$ (например, см. рис. 5.19) записываются в порядке возрастания подряд в одну строку:

$$[\omega_{21}, \omega_{22}, \omega_{11}, \omega_{12}, \omega_{23}, \omega_{13}, \omega_{24}]; \quad (5.27)$$

2) Весь частотный диапазон разбивается на следующие друг за другом интервалы, границы которых – частоты из строки (5.27).

$$\begin{aligned} & \{[0; \omega_{21}], [\omega_{21}; \omega_{22}], [\omega_{22}; \omega_{11}], [\omega_{11}; \omega_{12}], [\omega_{12}; \omega_{23}], \\ & [\omega_{23}; \omega_{13}], [\omega_{13}; \omega_{24}], [\omega_{24}; \infty[]\}. \end{aligned} \quad (5.28)$$

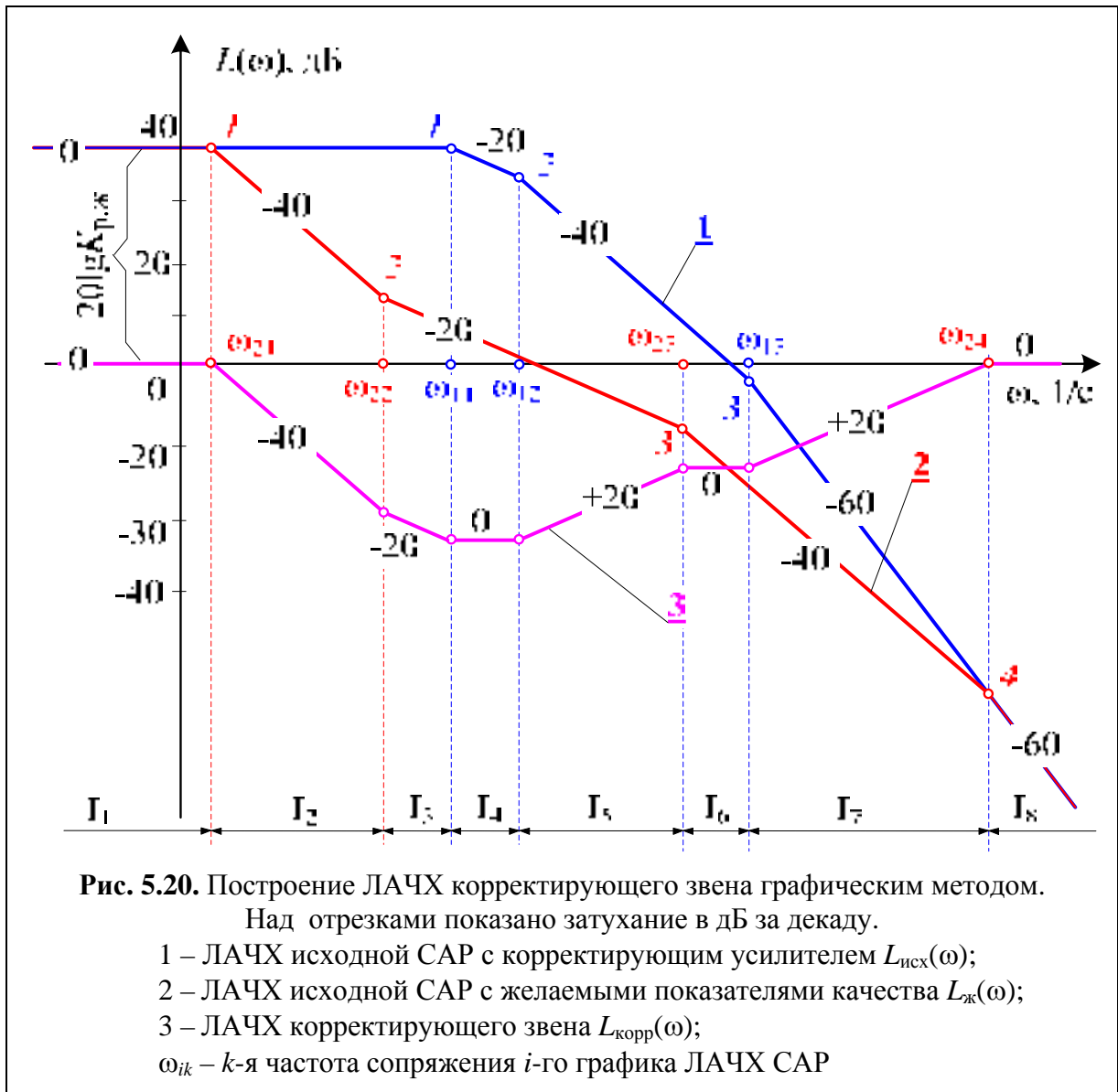
Интервалы (5.28) обозначаются I_i , где индекс $i = 1$ соответствует самому низкочастотному интервалу. Каждый последующий интервал в обозначении прибавляет 1 и записывается строка интервалов (см. рис. 5.20, рис. 5.21):

$$[I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6, I_7, I_8]. \quad (5.29)$$

3) Анализируется каждый интервал.

Если на интервале I_i (5.29) наклоны $L_{\text{исх}}(\omega)$ и $L_{\text{ж}}(\omega)$ равны, то на этом интервале наклон ЛАЧХ корректирующего звена равен нулю.

Если на интервале I_i наклоны $L_{\text{исх}}(\omega)$ и $L_{\text{ж}}(\omega)$ различны, то на этом интервале наклон ЛАЧХ корректирующего звена определяется алгебраическим вычитанием наклонов. Таким образом, по наклонам отрезков ЛАЧХ на каждом из интервалов строится график ЛАЧХ корректирующего устройства в целом.



Запись передаточной функции корректирующего звена. Для записи передаточной функции корректирующего звена необходимо:

1) Выполнить вычисления постоянных времени, которые целесообразно записать в виде строки:

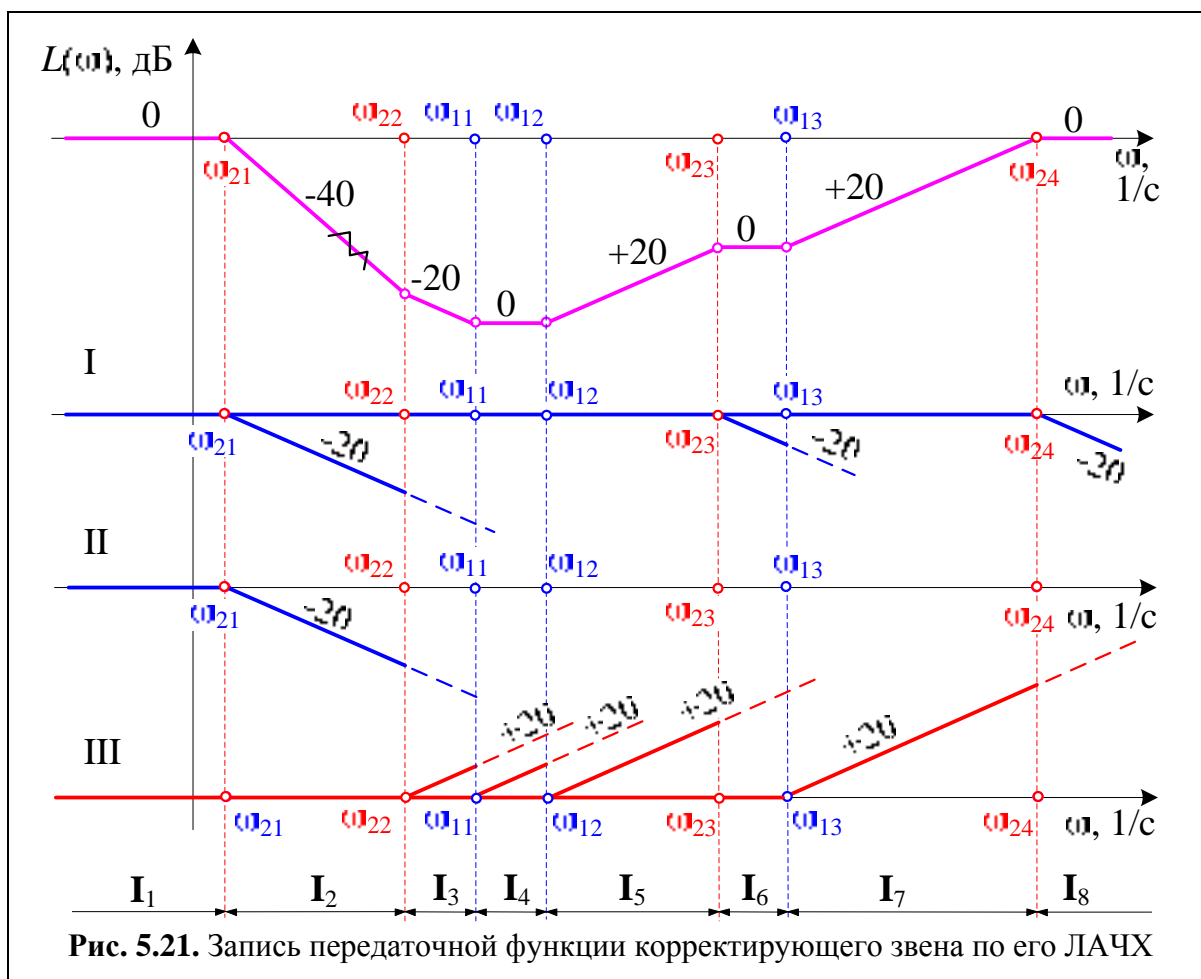
$$[T_{21}, T_{22}, T_{11}, T_{12}, T_{23}, T_{13}, T_{24}] , \quad (5.30)$$

где

$$T_{21} = 1/\omega_{21}; T_{22} = 1/\omega_{22}; T_{11} = 1/\omega_{11}; T_{12} = 1/\omega_{12}; T_{23} = 1/\omega_{23}; T_{13} = 1/\omega_{13}; T_{24} = 1/\omega_{24}. \quad (5.31)$$

2) Подготовить график ЛАЧХ корректирующего звена (рис. 5.20), для чего:

а) рядом с каждым отрезком ЛАЧХ проставить скорость спада (подъема) характеристики в дБ/дек;



б) следуя по частотной оси от нуля в сторону увеличения частоты, анализировать поведение графика после каждого его излома на частотах сопряжения:

- если на частоте сопряжения ω_{ik} происходит излом графика *по* направлению движения стрелки часов (на графике – вниз), то значение частоты ω_{ik} следует записать *под* осью частот;
- если на частоте сопряжения ω_{ik} происходит излом графика *против* направления движения стрелки часов (на графике – вверх), то частоту ω_{ik} записать *над* осью частот;

в) под графиком ЛАЧХ подготовить 3÷5 систем координат для изображения групп графиков, сумма которых образует ЛАЧХ корректирующего устройства. Каждая группа будет включать только графики, скорость изменения которых –20 дБ/дек или +20 дБ/дек;

г) провести на частотной оси через точки, соответствующие частотам сопряжения, сквозные, через все графики, вертикальные линии.

3) Изобразить группы составляющих графиков, для чего:

- а) на ЛАЧХ корректирующего звена отметить отрезки с крутизной – 40 дБ/дек или +40 дБ/дек;

- б) изобразить группу **А** составляющих графиков, для чего:
- на частотной оси группы **А** из каждой частоты сопряжения, надписанной *под* осью частот, провести луч под наклоном -20 дБ/дек;
 - продолжать проводить сплошную линию до пересечения её с ближайшей вертикальной штриховой линией справа;
 - за штриховой линией изобразить штриховое небольшое продолжение луча;
- в) изобразить группу **В** графиков, для чего вернуться к началу отрезков со скоростью изменения -40 дБ/дек, в точке сопряжения проанализировать изменение графика:
- если на частоте сопряжения происходит изменение крутизны на -20 дБ/дек, то на данной частоте больше операции с графиками не производятся;
 - если на частоте сопряжения происходит изменение крутизны на -40 дБ/дек, то из этой частоты сопряжения частот следует провести луч под наклоном -20 дБ/дек;
- г) изобразить группу **С** составляющих графиков, для чего из каждой частоты сопряжения, надписанной *над* осью частот, провести луч под наклоном $+20$ дБ/дек и далее повторить операции согласно п. а);
- д) если на ЛАЧХ корректирующего звена есть отрезки с крутизной $+40$ дБ/дек, то изобразить группу графиков **Д** и выполнить анализ и построение аналогично п. в);
- е) группы графиков **Е** и т. д. (отрезки с крутизной более чем ± 40 дБ/дек) при курсовом проектировании, как правило, строить нет необходимости, но в случае появления таковой действовать следует аналогично п. б), в) и г).

4) Написать сомножители – передаточные функции элементарных динамических звеньев, включение которых по отдельности дает изломы ЛАЧХ в точках сопряжения, обозначенных арабскими цифрами (шрифт – курсив):

- а) из группы графиков **А** – аperiodические звенья:

$$W_1(p) = \frac{1}{T_{21}p + 1}; \quad W_6(p) = \frac{1}{T_{23}p + 1}; \quad W_8(p) = \frac{1}{T_{24}p + 1}; \quad (5.32)$$

- б) из группы графиков **В** – аperiodическое звено:

$$W_2(p) = \frac{1}{T_{21}p + 1}; \quad (5.33)$$

- в) из группы графиков **С** – форсирующие звенья первого порядка:

$$W_3(p) = T_{22}p + 1; \quad W_4(p) = T_{11}p + 1; \quad W_5(p) = T_{12}p + 1; \quad W_7(p) = T_{13}p + 1. \quad (5.34)$$

Система, образовавшаяся в результате последовательного включения динамических звеньев, имеет передаточную функцию, равную произведе-

нию передаточных функций звеньев. Следовательно, передаточная функция корректирующего устройства равна произведению передаточных функций динамических звеньев (5.30–5.31):

$$W_{\text{корр}}(p) = W_1(p) \cdot W_6(p) \cdot W_8(p) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p) \cdot W_4(p) \cdot W_5(p) \cdot W_7(p) = \\ = \frac{(T_{22}p + 1) \cdot (T_{11}p + 1) \cdot (T_{12}p + 1) \cdot (T_{13}p + 1)}{(T_{21}p + 1)^2 \cdot (T_{23}p + 1) \cdot (T_{24}p + 1)}. \quad (5.35)$$

Самопроверка. Необходимое условие правильности формулы (5.35) – равенство степеней полиномов числителя и знаменателя.

5.3.5. Выбор корректирующих цепей. Создание и расчет функциональной и принципиальной схем корректирующего звена

Выбор корректирующей цепи. Коррекция исходной САР реализуется последовательным включением электрической цепи, имеющей передаточную функцию (5.35). Как правило, относительно простая электрическая цепь имеет передаточную функцию и характеристики, не совпадающие с желаемой (5.35). Для разрешения этого противоречия желаемую передаточную функцию корректирующего звена разбивают на несколько сомножителей:

$$W_{\text{корр}}(p) = W_{\text{кц}1}(p) \cdot W_{\text{кц}2}(p) \cdot \dots \cdot W_{\text{кц}N}(p), \quad (5.36)$$

где $W_{\text{кц}i}(p)$ – передаточная функция i -й ($i = 1, 2, \dots, N$) физически реализуемой в виде электрической схемы корректирующей цепи; N – количество корректирующих цепей.

Формуле (5.36) соответствует схема последовательного включения N четырехполюсников с передаточными функциями $W_{\text{кц}i}(p)$ (рис. 5.22).

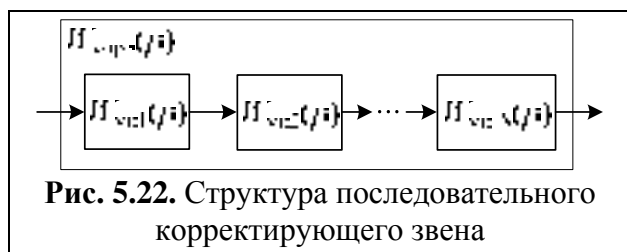


Рис. 5.22. Структура последовательного корректирующего звена

К технической реализации передаточной функции корректирующего звена предъявляются требования высокой точности воспроизведения частотных характеристик и приемлемая (невысокая) стоимость. Этим требованиям в большей или

меньшей степени соответствуют пассивные [17] или активные [35] электрические цепи. Пассивные цепи при низкой стоимости имеют: худшее приближение реальных характеристик от ожидаемых расчетных; большой разброс параметров из-за технологического несовершенства элементов; потери сигнала, которые, особенно при цепочечном включении нескольких цепей, могут оказаться неприемлемыми.

Активные цепи способны компенсировать потери и позволяют получить более высокую точность воспроизведения передаточной функции, но имеют более высокую стоимость и требуют квалифицированного подхода при проектировании, производстве и в эксплуатации.

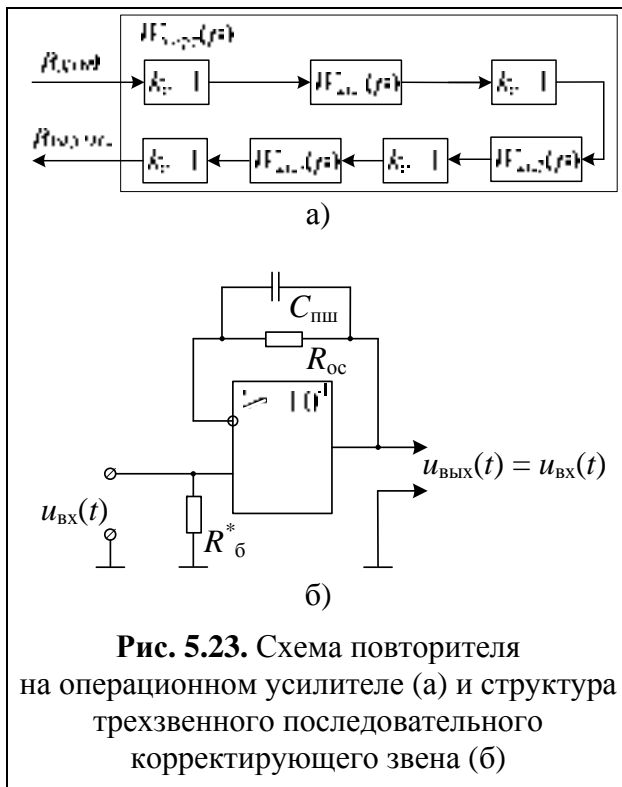


Рис. 5.23. Схема повторителя на операционном усилителе (а) и структура трехзвенного последовательного корректирующего звена (б)

Оптимальным (по критерию сочетания простоты и минимальной цены при приемлемых характеристиках) является подход, при котором корректирующее звено реализуется пассивной электрической цепью, отделенной для согласования характеристик от других элементов повторителем на операционном усилителе (ОУ) (рис. 5.23, а). Повторитель на ОУ (рис. 5.23, б) обладает высоким входным сопротивлением (не оказывает шунтирующего действия на предыдущий каскад), малым выходным сопротивлением (максимум выходного напряжения отдаётся в нагрузку), равномерную АЧХ и линейную ФЧХ в широком диапазоне частот (не вносит дина-

мические искажения).

При необходимости в источниках [1, 3, 17, 28] можно найти сведения по широкому кругу пассивных схем коррекции. В табл. 5.1 приведены схемы, передаточные функции и характеристики корректирующих электрических цепей, наиболее часто применяющихся при выполнении курсового проекта.

Функциональная схема. Для синтеза принципиальной схемы корректирующего звена, реализующей передаточную функцию (5.35) по структуре, показанной на рис. 5.23, а, $W_{\text{корр}}(p)$ записывается в виде двух-трех сомножителей. Например, пусть:

$$W_{\text{корр}}(p) = W_{\text{корр.1}}(p)W_{\text{корр.2}}(p), \quad (5.37)$$

где

$$W_{\text{корр.1}}(p) = \frac{(T_{22}p + 1) \cdot (T_{11}p + 1)}{(T_{21}p + 1) \cdot (T_{23}p + 1)}, \quad W_{\text{корр.2}}(p) = \frac{(T_{12}p + 1) \cdot (T_{13}p + 1)}{(T_{21}p + 1) \cdot (T_{24}p + 1)}. \quad (5.38)$$

Тогда для реализации передаточных функций (5.35) и (5.36) можно выбрать, например, интегро-дифференцирующую корректирующую цепь (см. табл. 5.1, схема № 3). При этом условии структура корректирующего звена (рис. 5.23) содержит две корректирующих цепи. Этой структуре соответствует функциональная схема корректирующего устройства САР, показанная на рис. 5.24. Корректирующее устройство состоит из корректирующего звена (КЗ), усилителя коррекции УК, согласующего повторителя П1.

В структуру последовательного КЗ, кроме корректирующих цепей КЦ1 и КЦ2, следует включить:

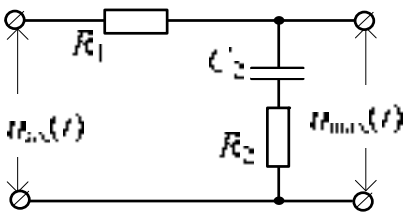
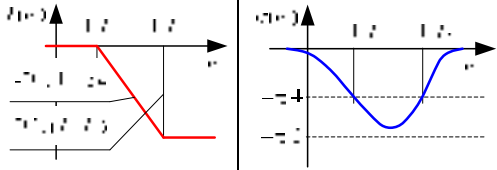
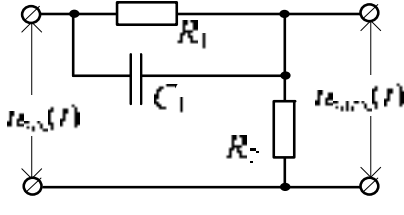
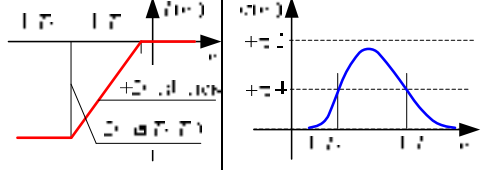
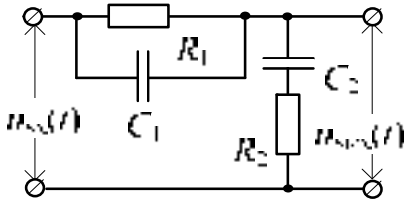
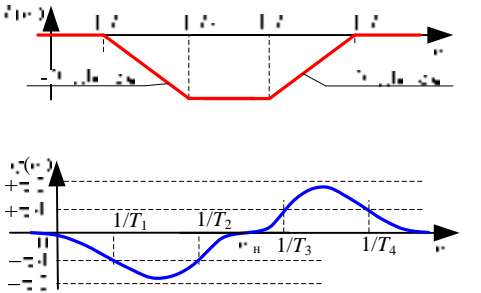
- а) повторитель ПЗ, согласующий между собой КЦ1 и КЦ2;
- б) повторитель П2 для согласования УК с КЦ1;
- в) повторитель П1 для согласования УК с устройством сравнения;
- г) повторитель П4 для согласования КЦ2 с тиристорным преобразователем.

Принципиальная схема. Принципиальная схема корректирующего устройства образуется заменой на функциональной схеме условных обозначений элементов: усилителя, повторителей, корректирующих цепей соответственно принципиальными схемами и их соединением (рис. 5.25).

Формулы расчета принципиальных схем приведены в табл.5.1. Эти формулы выписываются для каждой корректирующей цепи. Например, для выбранных двух интегро-дифференцирующих схем, следует записать две системы уравнений вида:

Таблица 5.1

Схемы и характеристики корректирующих RC-цепей

№ пп	Схема корректирующей RC-цепи	Передаточная функция	Логарифмические частотные характеристики
1	 <p>Пропорционально-интегрирующая</p>	$W_{\text{пн}}(p) = \frac{T_2 p + 1}{T_1 p + 1};$ $T_2 = R_2 C_2;$ $T_1 = (1 + R_1 / R_2) T_2.$	
2	 <p>Форсирующая</p>	$W_{\text{ф}}(p) = k_{\text{ф}} \frac{T_2 p + 1}{T_1 p + 1};$ $T_2 = R_1 C_1;$ $T_1 = T_2 / (1 + R_1 / R_2);$ $k_{\text{ф}} = T_1 / T_2.$	
3	 <p>Интегриро-дифференцирующая</p>	$W_{\text{ид}}(p) = \frac{(T_2 p + 1)}{(T_1 p + 1)} \times \frac{(T_3 p + 1)}{(T_4 p + 1)};$ $T_2 = R_2 C_2; \quad T_3 = R_1 C_1$ $T_1 = T_2 \alpha; \quad T_4 = T_3 \alpha;$ $\alpha = (R_1 + R_2) / R_2;$ $\omega_n^2 = (T_2 T_3)^{-1} = (T_1 T_4)$	

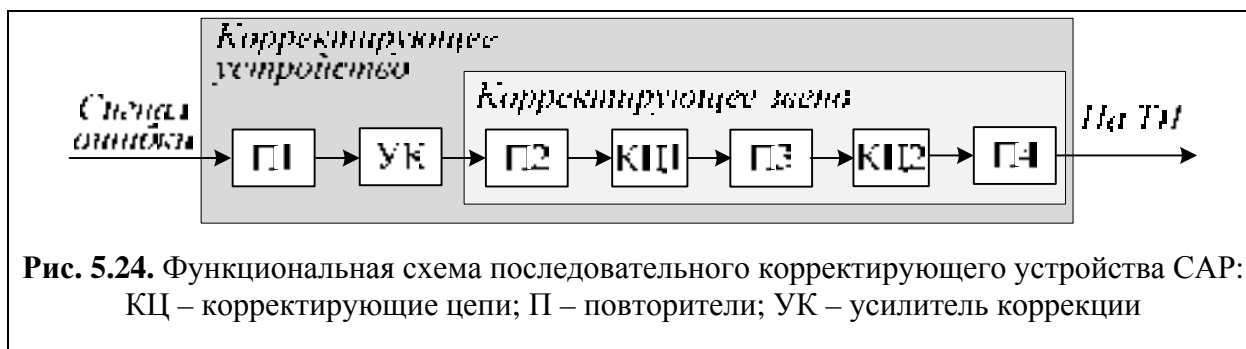


Рис. 5.24. Функциональная схема последовательного корректирующего устройства САР: КЦ – корректирующие цепи; П – повторители; УК – усилитель коррекции

$$\begin{cases} T_2 = R_2 C_2 \\ T_3 = R_1 C_1 \\ T_1 = T_2 \alpha \\ T_3 = T_4 \alpha \\ \alpha = (R_1 + R_2) / R_2 \end{cases} \quad (5.39)$$

Независимые неизвестные в системе (5.37) – это R_1, R_2, C_1, C_2 . Постоянные времени определяются требованиями коррекции – известные величины.

Пример. Пусть $T_1=20,0$ с; $T_2=10,0$ с; $T_3=3,0$ с; $T_4=1,5$ с.

Тогда: $\alpha = T_1/T_2=20,0/10,0=2,0$; откуда $R_1 = R_2$, и $R_1 = T_3/C_1$, $C_2 = T_2/R_1$.

Таким образом, попытка решить систему уравнений (5.37) наталкивается на трудность, которая связана с тем, что независимых переменных осталось три, а уравнений два. Из физических соображений задаемся величиной емкости одного конденсатора: пусть $C_1=1$ мкФ, Тогда

$$R_1 = R_2 = T_3/C_1 = 3,0/(10^{-6}) = 3,0 \cdot 10^6 \text{ Ом}, \quad (5.40a)$$

$$C_2 = T_2/R_1 = 10,0/(3,0 \cdot 10^6) = 3,3 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}. \quad (5.40б)$$

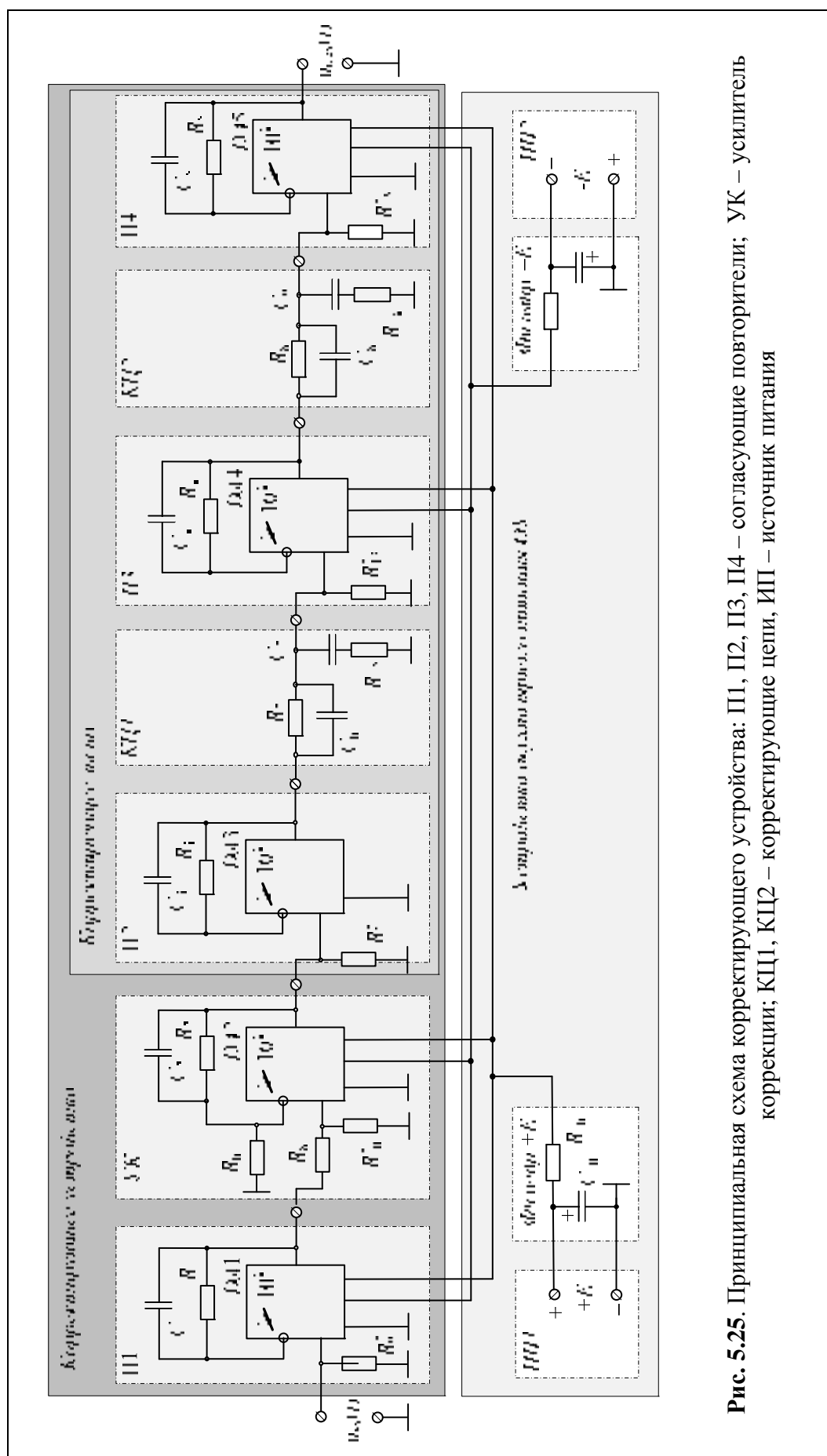
Формально расчет закончен. Однако анализ этих результатов показывает, что номиналы резисторов оказались слишком большие (мегаомные), из-за чего токи через них будут настолько малые, что сравнимы с потерями и шумами. Так как номиналы резисторов и конденсаторов находятся в обратной зависимости, то уменьшения сопротивления резисторов на порядок возможно при таком же относительном увеличении емкостей. Несмотря на то, что емкость ~ 3 мкФ довольно большая (по радиотехническим меркам), всё же существуют в широком доступе конденсаторы с емкостью на два порядка больше.

$$C_1 = T_3/R_1 = 3,0/(145,0 \cdot 10^3) = 206,90 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}. \quad (5.40в)$$

Полученные результаты (5.40в) и (5.40г) для практики приемлемы.

Следует учитывать, что все решения системы должны быть положительны, иначе это противоречит физическому существованию электрической цепи.

Расчет следует проводить в системе СИ и с точностью до 0,01. Значения номиналов сопротивлений резисторов и емкостей конденсаторов сле-



дует выбирать из ряда стандартных значений¹⁵ с минимальными отклонениями от расчетных [8, 12]. После этого оформляется спецификация принципиальной схемы корректирующего устройства (рис. 5.25).

Примечание. Обязательному расчету подвергаются только корректирующие цепи. Остальные элементы могут быть выбраны по рекомендациям учебных и справочных пособий (например [23, 28]) .

5.3.6. Моделирование синтезированной САР

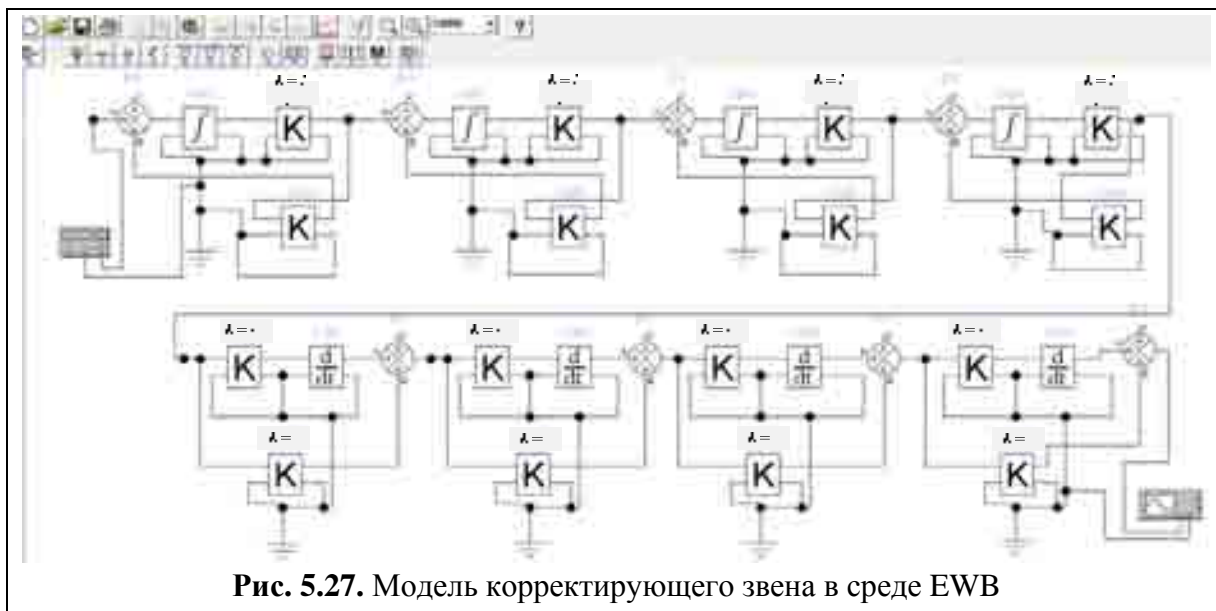
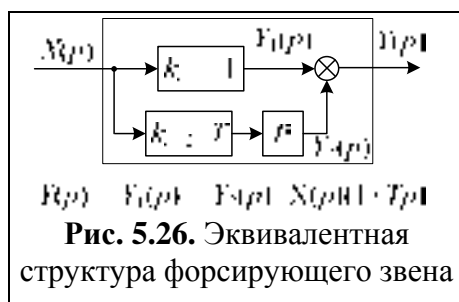
Модель корректирующего устройства. Модель корректирующего устройства строится, в основном, по таким же правилам, по которым ранее было показано построение в программе «EWB» исходной модели САР (см. п. 5.2.4).

Особенность построения модели корректирующего устройства – в необходимости моделирования форсирующих звеньев (см. формулы (5.35), (5.36)). Структура форсирующего звена с передаточной функцией

$$W_{\Phi}(p) = Tp + 1 \quad (5.38)$$

содержит две параллельно включенные ветви, состоящие из (рис. 5.26):

- а) пропорционального звена с коэффициентом передачи $k_{\text{пр1}} = 1$;
- б) последовательно соединенные звенья: дифференцирующее $W_{\text{д}}(p) = p$ и пропорциональное $k_{\text{пр2}} = T$.



¹⁵ Номиналы сопротивлений резисторов, ёмкости конденсаторов, индуктивности катушек индуктивности для слаботочных цепей не могут выбираться произвольно. Стандартом определены специальные ряды номиналов. Например, ряды E6, E12, E24, отличающиеся знаменателем геометрической прогрессии, параметры которой определены в [26].

Модель корректирующего форсирующего звена в среде «EWB» (рис. 5.27) создается на основе рис. 5.26 с применением методики, ранее рассмотренной в п. 5.2.1.

Модель разработанной (скорректированной) САР в программе «EWB» создается путем последовательного включения (рис. 5.28):

Поэтому, считая результаты (5.40а, 5.40б) неприемлемыми, задаём исходное значение емкости конденсатора $C_2 = 69 \cdot 10^{-6}$ Ф. Тогда:

$$R_1 = R_2 = T_2/C_2 = 10,0/(69 \cdot 10^{-6}) = 145,00 \cdot 10^3 \text{ Ом}, \quad (5.40в)$$

а) модели исходной САР;

б) пропорционального звена с коэффициентом передачи, равным коэффициенту усиления корректирующего усилителя;

в) модели корректирующего звена.

При исследовании переходной и частотной характеристик модели разработанной САР, определяем соответствие её показателей качества желаемым, т. е. по сути оцениваем результат проектирования.

Примечание. После проверки переходной характеристики модели разработанной САР возможно несоответствие времени регулирования и перерегулирования желаемым значениям. В этом случае, последовательным приближением повторяя действия по выбору желаемой частоты среза, достигается компромиссное значение решения.

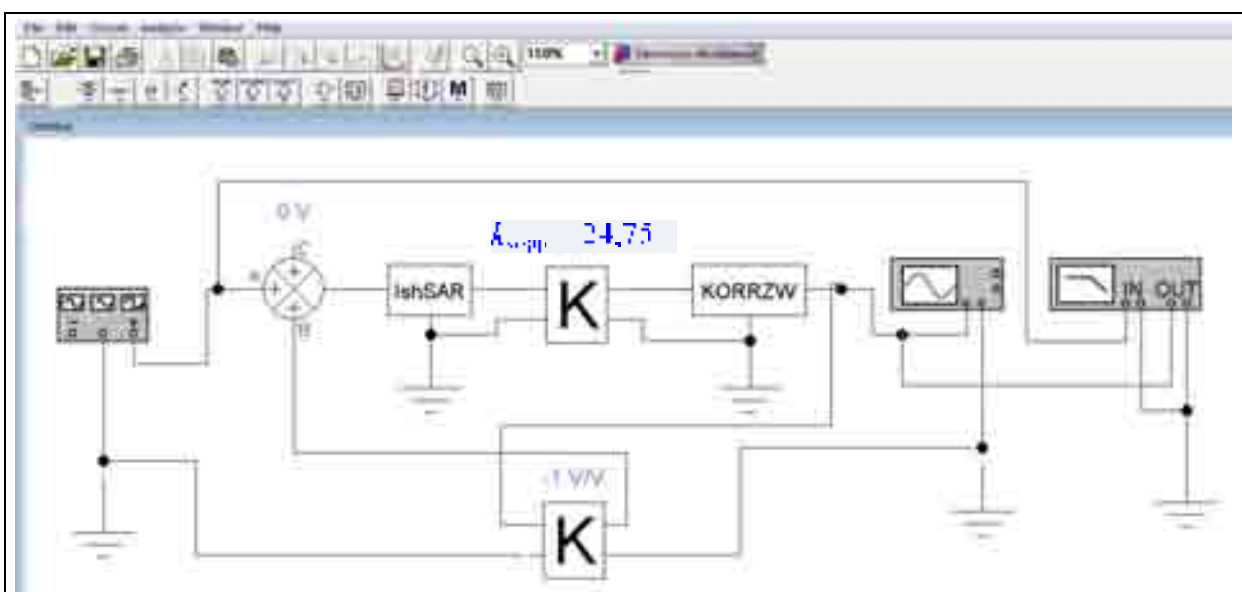


Рис. 5.28. Схема для определения характеристик разработанной САР на основе модели в среде «EWB»: «IshSAR» – модель исходной САР; «KORRZW» – модель корректирующего усилителя; $k_{\text{корр}}$ – коэффициент передачи корректирующего усилителя

5.4. ВЫВОДЫ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ

«Выводы» – неотъемлемая часть письменного отчёта о выполненной работе. Несмотря на небольшой, не более одной страницы, объем, важ-

ность этой заключительной части курсового проектирования трудно переоценить. Если во «Введении» автор знакомил с общей постановкой задачи курсового проектирования, то в «Выводах» подводится итог выполненной работы.

Изложение «Выводов» должно быть таким, чтобы читатель после знакомства с ним смог уяснить основные сведения о результатах проектирования.

С этой целью автор проекта (студент) конспективно, перечисляя в повествовательной форме основные разделы Пояснительной записки, излагает полученные результаты, степень их соответствия Техническому заданию, причины несоответствия (если они есть). При этом перечисляются принятые технические решения с кратким обоснованием их необходимости. Обосновываются степень достоверности и ограничения результатов расчетов. Предлагается авторский взгляд на перспективы реализации разработанной системы и её практического применения.

«Выводы» должны заканчиваться формулировкой тезиса о том, что в целом разработанная САР соответствует требованиям Технического задания. При наличии несоответствия следует указать ограничения на её применение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Уважаемый студент! Если Вы начали читать в этом учебном пособии заключение, следовательно, с большой долей вероятности, перед Вами уже лежит пояснительная записка курсового проекта. Двадцать пять – тридцать страниц рукописного текста – это результаты Вашего напряженного интеллектуального труда. Ваша интеллектуальная собственность, гордость, и ценность.

Вы впервые за время обучения в университете прошли путь от незнания основ учебной дисциплины до разработки на её базе системы, обладающей необходимыми для практики качествами. Вы создали документ – пояснительную записку с чертежами, – который является необходимым и обязательным для создания системы автоматического регулирования конкретного назначения.

Вы прошли трудные этапы уяснения задания, анализа исходной системы, синтеза системы согласно техническому заданию с выполнением расчетов и моделирования. Произвели поиск недостающих знаний и данных по теме проектирования в учебной, специальной технической и периодической литературе. Завершили творческий процесс создания нового технического объекта, и, возможно, с разработкой оригинальных решений.

Работая над курсовым проектом, Вы систематизировали и расширили знания, необходимые для решения конкретной конструкторской задачи; обогатили свою память многими дополнительными сведениями. Многие из дополнительно Вами изученного непосредственно в проекте осталось без применения. Но и эти как бы неиспользованные сведения, сведения, которые не вошли в пояснительную записку проекта, представляют ценность. Ценность их в том, что добыли Вы их исходя из собственного интереса, и они обязательно проявит себя в том или ином виде при решении других технических задач.

В процессе напряженного творческого труда над курсовым проектом, несмотря на то, что проект учебный, Вы решали задачи одновременно нескольких специалистов-конструкторов. Это Вам позволило приобрести новый, системно-организационный опыт технического творчества.

Результаты курсового проектирования подтверждают, что Вы практически освоили методологию решения технических задач. Комплекс Ваших знаний по учебной дисциплине и приобретенный опыт разработ-

ки достаточны для создания нового технического объекта в рамках выбранной специальности. Пока на учебном примере в виде курсового проекта, но он стал Вам первой ступенью. С неё Вы видите дальше и больше.

Вы утвердились в своей способности решать практические инженерные задачи, и в то же время Вы сформировали понимание сложности и противоречивости труда инженера-конструктора, понимание необходимости постоянного совершенствования теоретических знаний и расширения опыта их практического применения. В чем, автор уверен, Вас ожидают всемерные свершения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Ваганов В.Б., Кривицкий Б.Х. Основы автоматики радиоэлектронного оборудования. – Киев : КВВАИУ, 1983. – 367 с.
- 2 Воков Д.П., Николаев С.Н. Повышение качества строительных машин. – М. : Стройиздат, 1984. – 168 с.
- 3 Воронов А.А. Теория автоматического управления: в 2 ч. – 2-е изд, перераб. и доп. Ч.1. Теория линейных систем автоматического управления. – М. : Высш. шк., 1986. – 307 с.
- 4 ГОСТ 2.702-2011. Правила выполнения схем. Введен впервые 07.09.1975 г. Введен 01.01.2012 – М. : Межгосударственный стандарт, 2011.
- 5 ГОСТ Р 15.201-2000. Система разработки и постановки продукции на производство. Продукция производственно-технического назначения. Порядок разработки и постановки продукции на производство. Введен впервые 01.01.2001. – М. : Стандартинформ, 2011.
- 6 ГОСТ 15622-96: Муфты предохранительные фрикционные. Параметры, конструкция и размеры. Введен 2000-07-01. – М. : Межгосударственный стандарт, 2013.
- 7 ГОСТ Р 50371-92: Муфты механические общемашиностроительного применения. Термины и определения. Введен впервые 1993-07-01. – М. : Государственный стандарт российской федерации, 1992.
- 8 ГОСТ 28884-90. Ряды предпочтительных значений для резисторов и конденсаторов. Введен 01.01.1992 – М. : Межгосударственный стандарт, 1990.
- 9 ГОСТ 2.120-73. ЕСКД. Технический проект (с Изменениями № 1–5). Введен впервые 1974-01-01. Введен 1993-07-01. – М. : Межгосударственный стандарт, 1992.
- 10 ГОСТ 34.601-90. Автоматизированные системы. Стадии создания. Введен впервые 01.01.1992г. – М. : Государственный стандарт Союза ССР, 1990.
- 11 ГОСТ 2.701-84. Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению. Взамен ГОСТ 2.701-76. Введен 01.07.1985. – М. : Государственный стандарт Союза ССР, 1984.
- 12 ГОСТ 8032-84. Предпочтительные числа и ряды предпочтительных чисел. Введен впервые 01.07.85. – М. : Государственный комитет СССР по стандартам, 1984 г.
- 13 ГОСТ 2.103-68. Единая система конструкторской документации. Стадии разработки. Основные положения. Введен впервые 01.01.1971; введ. 2012. – М. : Стандартинформ, 2011.
- 14 Груздев В.Б. Пуск в работу питательного электронасоса после ремонта. [Электронный ресурс] – Режим доступа:

- <http://www.bestreferat.ru/referat-218642.html>
- 15 *Волков Д.П.* и др. Строительные машины : учеб. для вузов. / под ред. Д.П. Волкова. – М. : Высш. шк., 1988. – 319 с.
 - 16 *Домбровский Н.Г., Гальперин М.И.* Строительные машины. – М. : Высш. шк., 1985. – 387 с.
 - 17 *Зайцев Г.Ф.* Теория автоматического управления и регулирования. – К. : Высшая школа, 1989, – 431с.
 - 18 *Залесова О.В., Якубович М.В.* Расчет наведенного напряжения на отключенной ЛЭП с помощью программы FEMM / Труды Кольского научного центра РАН №1(4). Энергетика. Выпуск 2, 2011. –153 с. – С. 37–42.
 - 19 *Костин Н.А., Саблин О.И.* Коэффициент мощности электроподвижного состава постоянного тока. Електротехніка і Електромеханіка. – 2005. – № 1. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.kpi.kharkov.ua/archive>
 - 20 *Марюхненко В.С.* Основы теории систем автоматического управления : учеб. пособие. – Иркутск : ИрГУПС, 2008. – 188 с.
 - 21 *Марюхненко В.С.* Радиоприемные устройства. Часть 1 : учеб. пособие. – Иркутск : ИВАИИ, 2001. – 531 с.
 - 22 *Марюхненко В.С.* Транзисторные схемы аналоговой обработки сигналов и активные фильтры : Учебное пособие. – Иркутск : ИВВАИУ, 1998. – 381 с.
 - 23 Отечественные ОУ. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.radioman-portal.ru/sprav/pp/oa/>
 - 24 Порядок расчета и выбора уставок защиты тяговой сети постоянного тока. Организация сотрудничества железных дорог (ОСЖД). I издание. Разработано экспертами Комиссии ОСЖД по инфраструктуре и подвижному составу, 3–5 сентября 2013 г. Комитет ОСЖД, г. Варшава. Утверждено совещанием Комиссии ОСЖД по инфраструктуре и подвижному составу, 28–31 октября 2013 г. Комитет ОСЖД, г. Варшава. Дата вступления в силу: 31 октября 2013 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://osjd.org/dbmm/download?vp=51&load=y&col_id=2066&id=1607.
 - 25 Проект рекомендаций по компенсации реактивной мощности в системах тягового электроснабжения. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.eleco.ru/lib1/docs/recomendations/recomend2.html>.
 - 26 *Рождественский В.В.* Кавитация. – Л. : Судостроение, 1977. – 248 с.
 - 27 *Ицкович С.М.* Технология заполнителей бетона. – М., 1991 г. – 273 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sgm-eng.ru>
 - 28 *Скворцов В.Г.* Расчет корректирующих цепей и фильтров систем автоматического регулирования и управления. – СПб. : Судостроение, 2002. – 224 с.

- 29 *Солодовников В.В.* Теория автоматического регулирования. Книга 1. Математическое описание, анализ устойчивости и качества систем автоматического регулирования. – М. : Машиностроение, 1967. – 770 с.
- 30 Справочник по радиолокации : под ред. М. Скольника. – Нью-Йорк, 1970 : пер. с англ. (в четырех томах) / под общей ред. К.Н. Трофимова. Том 3. Радиолокационные устройства и системы / под. ред. А.С. Винницкого. – М. : Сов. Радио, 1978. – 528с.
- 31 *Турута Е.Ф.* Усилители мощности низкой частоты – интегральные микросхемы. – М. : ДМК Пресс, 2003. – 200 с. – (Справочник). [Электронный ресурс]. – Режим доступа:
<http://opac.mpei.ru/notices/index/IdNotice:66386/Source:default>
- 32 Устройства измерения параметров технологических процессов. [Электронный ресурс]. – Режим доступа:
<http://byxap7.narod.ru/RIM/T-401/autp/7.htm>.
- 33 Устройство, типы и применение воздушных компрессоров. [Электронный ресурс]. – Режим доступа:
http://promplace.ru/article_single.php?arc=16.
- 34 *Фиделев А.С., Чубук Ю.Ф.* Строительные машины. – К. : Вища шк. 1977. – 356 с.
- 35 *Хоровиц П., Хилл У.* Искусство схемотехники : пер. с англ. – 4-е изд., перераб. и доп. В трех томах. Том 1. – М. : Мир, 1993. – 415 с.
- 36 *Хорошев А.Н.* Введение в управление проектированием механических систем : учеб. пособие для втузов / А.Н. Хорошев. [Электронный ресурс]. – [1999]. – 372 с. – Режим доступа:
<http://opac.mpei.ru/notices/index/IdNotice:38301/Source:default>
- 37 *Чиликин М.Г., Сандлер А.С.* Общий курс электропривода. – М. : Энергоиздат, 1981. – 576 с.
- 38 *Шаманов В.И.* Проектирование и расчет системы автоматического регулирования. Методические указания к курсовому проекту по дисциплине «Теоретические основы автоматики и телемеханики» для студентов специальности 210100 (АТС). – Иркутск. : ИрГУПС, 2001. – 28 с.
- 39 Электродвигатели постоянного тока. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://electricalschool.info/main/drugoe/387-jelektrodvigateli-postojannogo-toka.html>.

Титульный лист пояснительной записки

The diagram shows a title page template with the following dimensions and layout:

- Overall dimensions:** 210 (width) x 297 (height).
- Top margins:** 20 (left), 5 (inner left), 10 (outer left).
- Right margins:** 5 (inner right), 5 (outer right).
- Bottom margin:** 10 (inner bottom), 40 (outer bottom).

Text content:

Министерство транспорта Российской Федерации
 Федеральное агентство железнодорожного транспорта
 ГОУ ВПО «Иркутский государственный университет путей сообщения»
 Факультет «Системы обеспечения транспорта»

Кафедра
 "Автоматика, телемеханика и связь"

К защите

 Дата

 Подпись руководителя

КУРСОВОЙ ПРОЕКТ
по дисциплине «Теория автоматического управления»

Тема: Проектирование и расчет системы автоматического регулирования оборотов двигателя электропривода жидкостного насоса

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
 КП XXX.XXX.XXX-XXX-XXПЗ

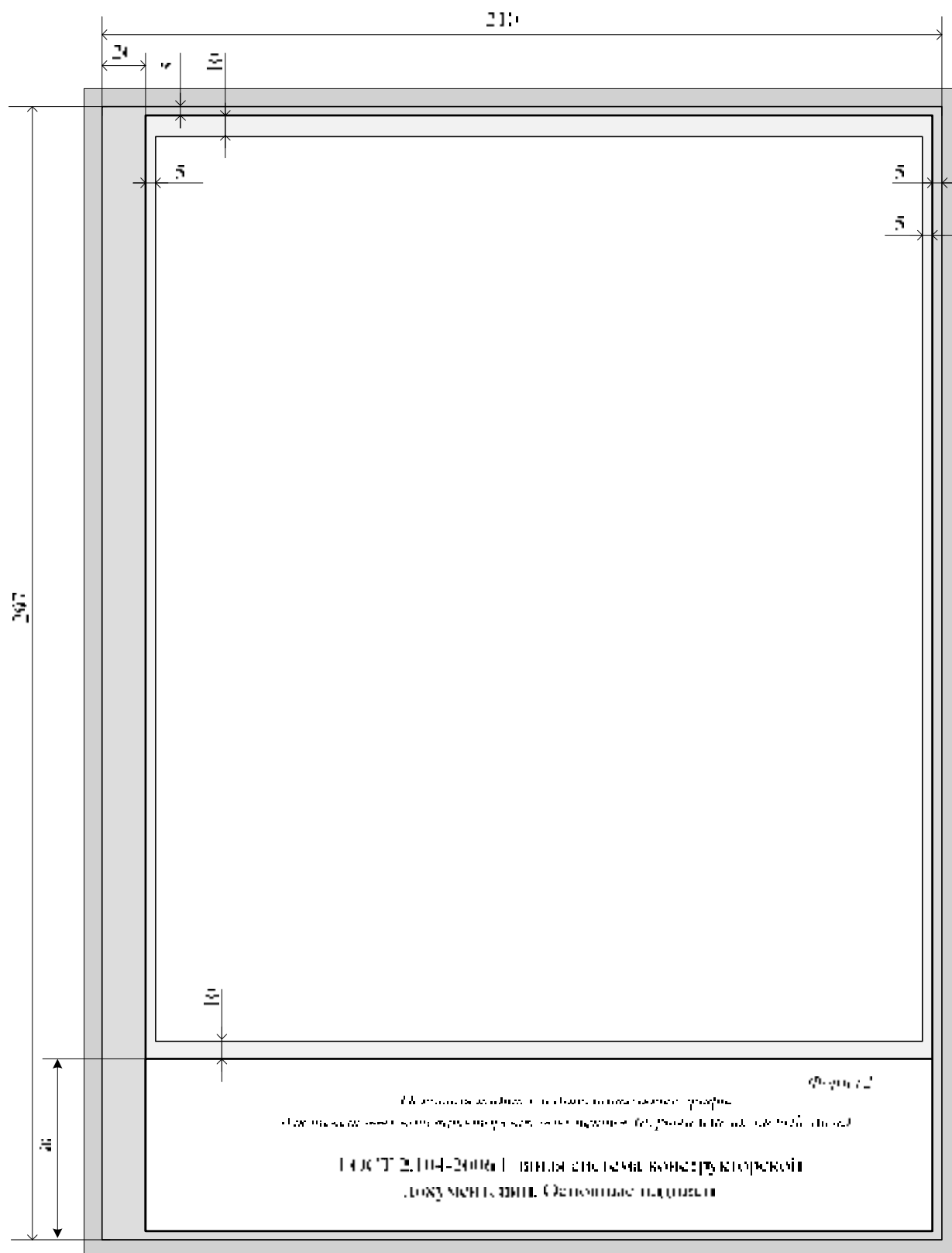
Выполнил: студент Сухомлинов А. Ф.
 дата подпись

Руководитель: (ученая степень, звание, фамилия И.О.)

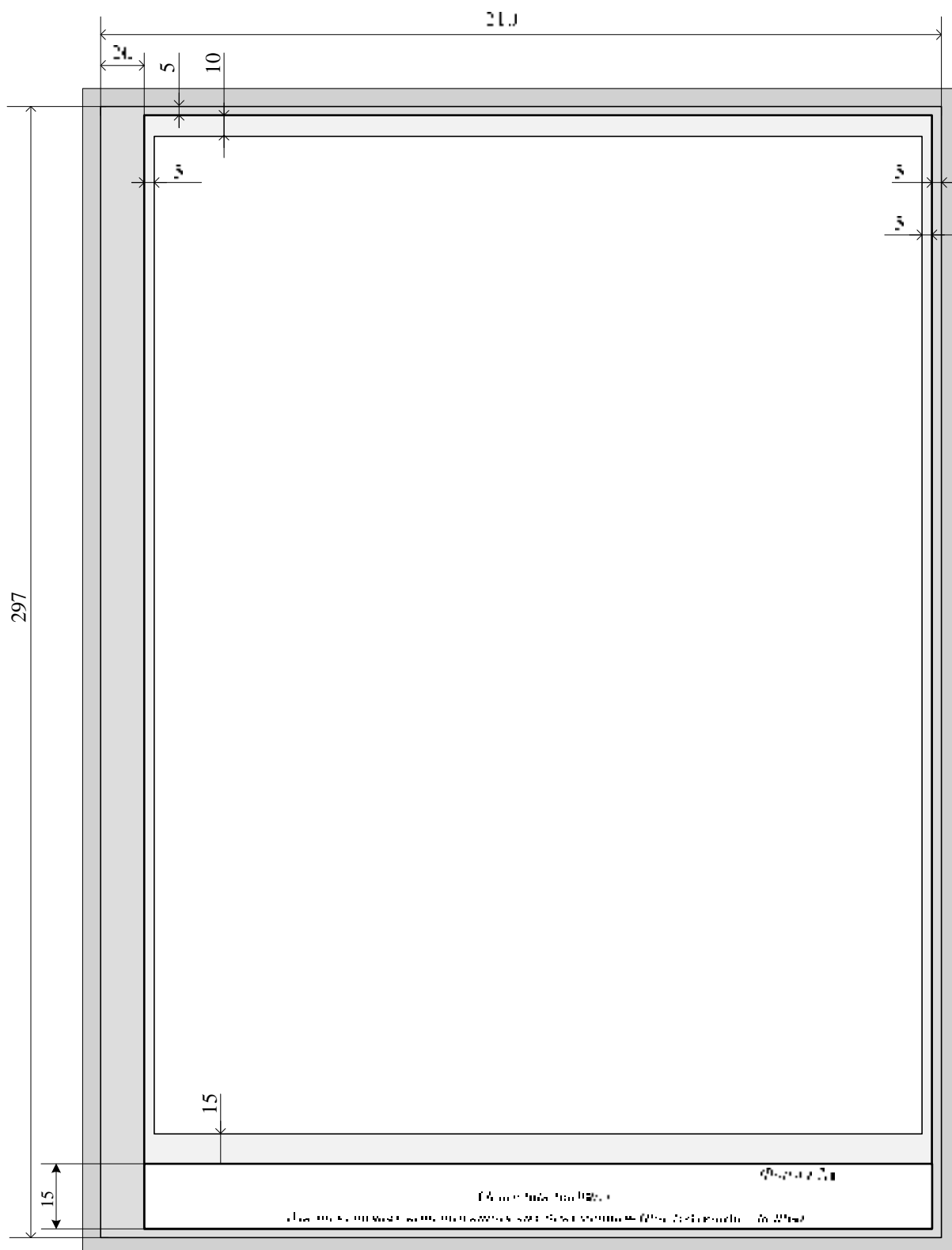
Иркутск
 20xx г.

Приложение 2

Первый лист текста пояснительной записки



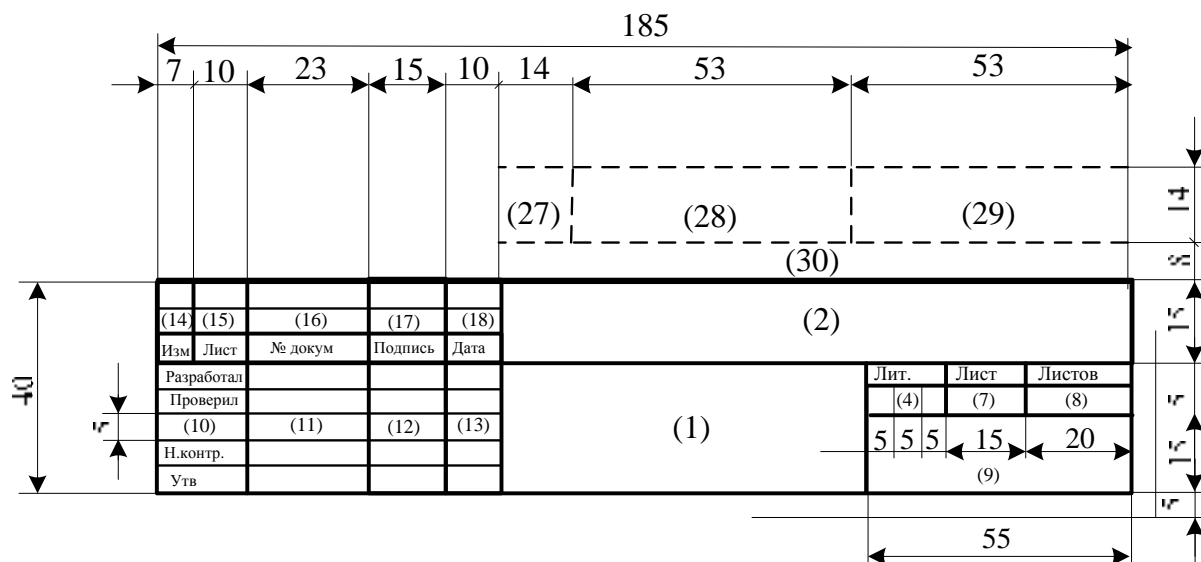
Последующие листы пояснительной записки



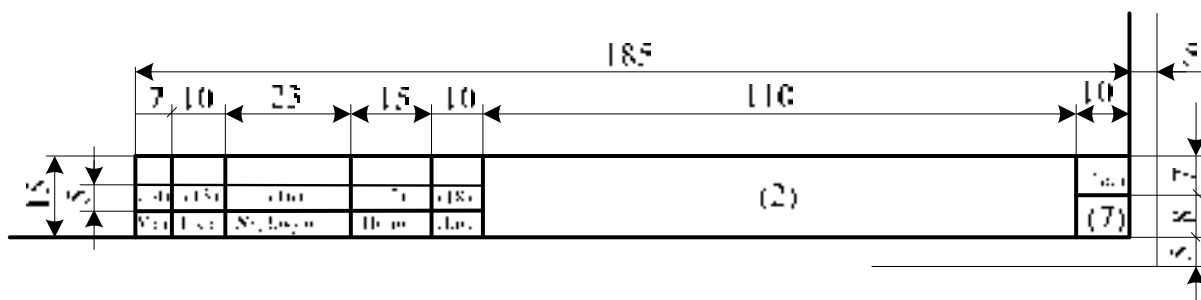
Приложение 4

Основные надписи на листах пояснительной записки.

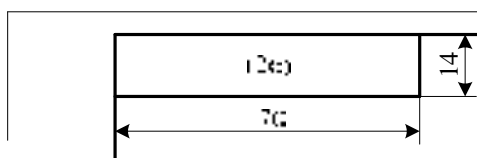
Форма 2 и форма 2а



а) Основная надпись форма 2



б) Основная надпись форма 2а



в) Дополнительная графа

Учебное издание

Марюхненко Виктор Сергеевич

ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Проектирование линейных стационарных систем
автоматического регулирования

Учебное пособие

Редактор *М.Н. Щербакова*
Компьютерная верстка *В.С. Марюхненко*

Подписано в печать 20.04.2015.
Формат 60×84 ¹/₁₆. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 7,75. Уч.-изд. л. 8,47.
План 2015 г. Тираж 250 экз. Заказ

Типография ИрГУПС, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15