

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Быстрый подъем сельского хозяйства нашей страны в современных условиях возможен только на широком применении технических средств, заменяющих и облегчающих труд человека. К ним относятся средства механизации, освобождающие человека от участия в технических операциях производственных процессов, и средства автоматизации, позволяющие освободить человека в операциях контроля и управления параметрами этих процессов.

Современные средства автоматизации с использованием микро-схем, микропроцессоров и мини-ЭВМ позволяют создавать роботы, манипуляторы и системы автоматики, работающие по сложным программам, вплоть до самонастраивающихся в зависимости от цели задания и параметров окружающей среды.

Технические средства и системы автоматизации сельскохозяйственного назначения работают в экстремальных условиях: технологические процессы сложны, многообразны и существенно зависят от сезонных и зональных условий.

Примерной программой дисциплины «Основы автоматики» предусматривается изучение устройства, принципа действия современных технических средств автоматики и их работы в системах автоматического управления.

Дисциплина «Основы автоматики» является дисциплиной базового уровня обучения и представлена в структуре основной профессиональной образовательной программы по специальности в цикле общепрофессиональных дисциплин, изучается на пятом курсе.

При изучении дисциплины необходимы знания по математике, физике, химии, конструкционным и электротехническим материалам, электротехнике, электрическим машинам и аппаратам, электронной технике, технологий и машин сельскохозяйственного производства, умения пользоваться чертежными инструментами, вычислительной техникой, компьютером.

Данная дисциплина является базовой для изучения специальных дисциплин «Электропривод сельскохозяйственных машин», «Электротехнология и электрическое освещение», «Электроснабжение сельского хозяйства», «Автоматизация технологических процессов».

Студенты изучают дисциплину самостоятельно в межсессионный период и в период лабораторно-экзаменационной сессии под руководством преподавателя.

При самостоятельном изучении дисциплины основным руководящим документом для студентов является учебное задание, составленное на основе примерной программы и устанавливающее, какие знания и умения должны быть приобретены студентами в результате изучения той или иной темы, какие задания должны быть выполнены.

К учебному заданию приводится примерный перечень лабораторных работ и практических занятий, который в каждом учебном заведении, как и примерная программа, корректируется в зависимости от местных условий и в соответствии с образовательным стандартом специальности 110302 (3107).

Для самоконтроля в ходе приобретения необходимых знаний и умений в конце каждой темы помещены вопросы, которые представляют собой минимальный объем требований к знаниям студентов по дисциплине и могут быть ими использованы при подготовке к экзамену.

Особое внимание студентов обращается на выполнение контрольной работы. Контрольная работа – это письменный отчет студента-заочника о самостоятельной работе по изучению дисциплины. Контрольная работа содержит 6 заданий, исходные данные для которых представлены в соответствующих таблицах по вариантам.

К выполнению каждой задачи даны методические указания, приведены типовые примеры решения задач, позволяющие студентам самостоятельно справиться с заданием.

В контрольную работу условия задачи переписываются полностью.

Решение задач должны содержать полные расчеты и объяснения. Недопустимо написание только конечных результатов вычислений, следует сначала написать формулу в общем виде, затем подставить в нее числовые значения входящих величин. Все математические действия рекомендуются производить на микрокалькуляторе. При решении задач используются единицы системы «СИ».

Все чертежи, схемы, графики выполняются простым или цветным карандашами, с помощью чертежного инструмента или компьютера. Если графический материал выполняется на отдельном листе, то его надо вшить или вклеить в тетрадь.

Согласно образовательному стандарту по специальности 110302 «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства» в результате изучения дисциплины студент должен

знать:

– элементы и системы автоматики и телемеханики, методы анализа и оценки их надежности и технико-экономической эффективности;

уметь:

– использовать средства автоматики.

Перечень рекомендуемой литературы

- Л-1. Загинайлов В.И., Шеповалова Л.Н. Основы автоматики. – М.: Колос, 2001, 2003.
- Л-2. Бохан Н.И. Средства автоматики и телемеханики. – М.: Агропромиздат, 1992.
- Л-3. Кривонос А. И., Новиков П. Н., Кауфман В. Я. Задачник по контрольно-измерительным приборам и автоматике. – М.: Агропромиздат, 1990.
- Л-4. Колесов Л.В. Основы автоматики. – М.: Колос, 1984.
- Л-5. Мартыненко И. И., Лысенко В. Ф. Проектирование систем автоматики. – М.: ВО «Агропромиздат», 1990.
- Л-6. Черник Г. В. Контрольно-измерительные приборы и автоматика в животноводстве. – М.: Агропромиздат, 1986.
- Л-7. Ключев А.С., Глазов Б.В., Миндин М.Б. Техника чтения схем автоматического управления и технологического контроля. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
- Л-8. Белехов И.П., Четкин А.С. Механизация и автоматизация животноводства. – М.: Агропромиздат, 1991.
- Л-9. Водяников В.Т. Экономическая оценка средств электрификации и автоматизации сельскохозяйственного производства и систем сельской энергетики. – М.: МГАУ им. В.П.Горячкина, 1997.
- Л-10. Справочник инженера-электрика сельскохозяйственного производства. – М.: Информагротех, 1999.
- Л-11. Промышленные приборы и средства автоматизации. Справочник/ Под ред. В.В.Черенкова. – Л.: Машиностроение, 1987.

Примерный перечень рекомендуемых лабораторных работ и практических занятий

Наименование разделов и тем	Индекс работы		Название работы (занятия)
	ЛР	ПЗ	
1	2	3	4
Раздел 1. Общие сведения об автоматике			
Тема 1.2. Статические характеристики элементов автоматики		ПЗ-1	Определение коэффициентов передачи и погрешностей измерения датчика температуры
Тема 1.3. Динамические характеристики элементов автоматики		ПЗ-2	Определение динамических характеристик звеньев и систем автоматики
Тема 1.4. Объекты автоматического управления	ЛР-1		Определение передаточных функций объекта управления
Тема 1.5. Схемы систем автоматики		ПЗ-3	Освоение техники чтения схем автоматики
Раздел 2. Технические средства автоматики			
Тема 2.1. Датчики	ЛР-2		Исследование измерительных преобразователей угловых и линейных перемещений, фотопреобразователей, термодатчиков
Тема 2.3. Релейные элементы автоматики	ЛР-3		Исследование электромагнитных реле, работы реле времени и программных устройств автоматики, работы шаговых искателей
Тема 2.4. Логические устройства автоматики	ЛР-4		Исследование работ релейно-контактных схем, выполняющих логические операции, и работы бесконтактных элементов
		ПЗ-4	Минимизация логических функций: схемы управления на релейно-контактных элементах и бесконтактных элементах
Тема 2.5. Задающие и сравнивающие устройства		ПЗ-5	Анализ работы задающих и сравнивающих устройств автоматики
Тема 2.6. Усилители систем автоматики	ЛР-5		Исследование магнитных усилителей, тиристорной станции управления
Тема 2.7. Исполнительные механизмы и регулирующие органы	ЛР-6		Исследование работы исполнительного механизма
Тема 2.8. Автоматические регуляторы	ЛР-7		Исследование работы двухпозиционного регулятора, определение коэффициента усиления пропорционального регулятора

1	2	3	4
Тема 2.9. Программируемые контроллеры	ЛР-8		Анализ функциональных возможностей и порядка перепрограммирования микропроцессорного контроллера
Раздел 3. Системы телемеханики			
Тема 3.2. Системы телеизмерения, телеуправления и телесигнализации	ЛР-9		Исследование работы систем телеуправления и телесигнализации
Раздел 4. Основы теории автоматического управления			
Тема 4.1. Структурные схемы систем управления и их преобразования		ПЗ-6	Определение динамической характеристики системы автоматического управления
Тема 4.2. Устойчивость автоматических систем		ПЗ-7	Определение устойчивости систем автоматического регулирования
Тема 4.3. Качество работы системы автоматического регулирования	ЛР-10		Определение показателей качества системы автоматического регулирования
Тема 4.4. Нелинейные системы автоматического управления	ЛР-11		Исследование нелинейной системы автоматического регулирования
Тема 4.5. Настройка систем автоматического регулирования	ЛР-12		Настройка системы автоматического управления с пропорционально-интегральным регулятором
Раздел 5. Надежность и технико-экономическая эффективность работы систем автоматики		ПЗ-8	Расчет надежности систем управления

УЧЕБНОЕ ЗАДАНИЕ

Введение

Дисциплина «Основы автоматики», ее значение, задачи, содержание и связь с другими дисциплинами учебного плана.

Краткие исторические сведения о развитии автоматики. Роль русских ученых в становлении автоматики как науки. Значение, особенности и перспективы автоматизации современного сельскохозяйственного производства.

Роль дисциплины в подготовке специалистов.

Задание:

1. Прочитать Л-1, с. 4...6; Л-4, с. 3...4.

Раздел I. Общие сведения об автоматике

Тема 1.1. Понятия, определения, элементы и системы автоматики

Студент должен знать: основные понятия, определения, элементы и системы автоматики.

Задание:

1. Прочитать Л-1, с. 7...18; Л-2, с. 5...33.
2. Законспектировать материал в соответствии с требованиями «знать».
3. Ответить на вопросы для самоконтроля:
 - 3.1. Что называется автоматической системой управления САУ?
 - 3.2. Из каких элементов состоит АУУ?
 - 3.3. Что понимают под объектом управления ОУ?
 - 3.4. Какие различают САУ ТП?
 - 3.5. Что называется автоматической системой регулирования САР?
 - 3.6. Какие САУ относятся к разомкнутым; комбинированным?
 - 3.7. Каково назначение функциональных схем?
 - 3.8. Что понимают под обратной связью в САУ?
 - 3.9. В чем сущность статического и астатического регулирования?

Тема 1.2. Статические характеристики элементов и систем автоматики

Студент должен знать: статические характеристики элементов и систем автоматики;

уметь: определять коэффициент передачи и погрешностей измерения датчика температуры.

Задание:

1. Прочитать: Л-1, с. 19...24.
2. Законспектировать материал в соответствии с требованиями «знать», «уметь».
3. Разобрать решение типовой задачи (пример 1.1.) настоящих методических указаний.
4. Решить задачу 1 контрольной работы.
5. Ответить на вопросы для самоконтроля:
 - 5.1. Что называется элементом автоматики?

- 5.2. Что понимают под статической характеристикой элемента автоматики?
- 5.3. Чем САР ТП отличается от САУ ТП?
- 5.4. Как классифицируют САУ по алгоритму функционирования и управляющему воздействию на ОУ?
- 5.5. Какие основные элементы автоматики входят в САР?
- 5.6. Какие формы представления статистических характеристик вы знаете?
- 5.7. Как определяют параметры статических характеристик (передаточные коэффициенты и погрешность измерения) элементов автоматики?

Тема 1.3. Динамические характеристики звеньев и систем автоматики

Студент должен знать: основные динамические характеристики элементов и систем автоматики;

уметь: определять динамические характеристики звеньев и систем автоматики.

Задание:

1. Прочитать: Л-1, с. 24...36.
2. Законспектировать материал в соответствии с требованиями «знать».
3. Дать ответ на вопросы задачи №2 контрольной работы.
4. Ответить на вопросы для самоконтроля:
 - 4.1. Чем динамические характеристики элементов автоматики отличаются от статистических?
 - 4.2. Какие формы представления динамических характеристик вы знаете?
 - 4.3. Какие коэффициенты передачи используют при анализе динамических свойств элементов и систем?
 - 4.4. Что называют динамическим режимом работы элемента автоматики?
 - 4.5. Что понимают под постоянной времени «Т» элемента автоматики при оценке его динамических свойств?
 - 4.6. Как аналитически отображается связь между выходной «у» и входной «х» величинами в динамическом режиме?
 - 4.7. Что понимают под передаточной функцией элемента или системы автоматики?
 - 4.8. Что называют амплитудно-частотной характеристикой элемента или системы автоматики, фазочастотной характеристикой, амплитудно-фазочастотной характеристикой?

Тема 1.4. Объекты автоматического управления

Студент должен знать: основные объекты автоматического управления;

уметь: определять передаточные функции объекта управления.

Задание:

1. Прочитать: Л-1, с. 36...44.

2. Законспектировать материал в соответствии с требованиями «знать».

3. Ответить на вопросы для самоконтроля:

3.1. Что понимают под объектом самоконтроля ОУ?

3.2. Какие ОУ считаются простыми? Какие – сложными?

3.3. В каких режимах оценивают работу объектов управления?

3.4. Что называют аккумулярующей способностью ОУ?

3.5. Что называется самовыравниванием ОУ?

3.6. Какие с.-х. объекты относятся к ОУ с самовыравниванием? – без самовыравнивания?

3.7. Какая зависимость существует между постоянной времени T_0 , коэффициентом самовыравнивания ρ и чувствительностью γ ОУ?

3.8. На чем основывается определение динамических свойств ОУ?

Тема 1.5. Схемы систем автоматизации

Студент должен знать: основные схемы автоматизации;

уметь: читать схемы автоматизации.

Задание:

1. Прочитать: Л-1, с. 44...50; Л-4, с. 20...22; Л-7, с. 102...197.

2. Законспектировать материал в соответствии с требованиями «знать».

3. Ответить на вопросы для самоконтроля:

3.1. Что называют схемой автоматизации?

3.2. Как подразделяются схемы автоматизации?

3.3. Что отражают функциональные структурные схемы?

3.4. Что показывают алгоритмические структурные схемы?

3.5. Что иллюстрируют принципиальные электрические схемы?

3.6. Как подразделяются принципиальные электрические схемы?

Раздел 2. Технические средства автоматизации

Тема 2.1. Датчики

Студент должен знать: назначение, классификацию и структуру датчиков;

уметь: проводить испытание измерительных преобразователей угловых и линейных перемещений, фотопреобразователей, термо-датчиков.

Задание:

1. Прочитать: Л-1, с. 51...94; Л-4, с. 34...70.

2. Законспектировать материал в соответствии с требованиями «знать».

3. Ответить на вопросы для самоконтроля:

3.1. Какие основные группы физических величин определяют состояние различных технологических ОУ в сельскохозяйственном производстве?

3.2. Как подразделяются устройства, входящие в состав датчиков по характеру выполняемой ими функции?

3.3. Как подразделяются датчики по характеру изменения выходного сигнала; по физической природе выходного сигнала?

3.4. Какие виды структурных схем датчиков используют в САР?

3.5. Какие физические принципы построения ПИП температуры вы знаете?

3.6. Как устроен датчик давления «Сапфир»?

3.7. В каких датчиках применяются фотоэлектрические ПИП?

3.8. Какие ПИП используют в датчиках уровня?

3.9. Какие датчики состава и свойства вещества вы знаете?

Тема 2.2. Аппаратура управления и защиты схем автоматизации

Студент должен знать: аппаратуру управления и защиты схем автоматизации.

Задание:

1. Прочитать: Л-1, с. 95...96; Л-4, с. 112...122; Л-6, с. 134...143.

2. Законспектировать материал в соответствии с требованиями «знать».

3. Ответить на вопросы для самоконтроля:

3.1. Какая коммутационная аппаратура используется для ручного управления в системах автоматизации; для автоматического управления?

- 3.2. Какие конечные выключатели вы знаете?
- 3.3. Какие аппараты защиты используются в схемах автоматики?
- 3.4. Как расшифровать: ВА14-26-14-10Р-00УЗ; АЕ2011-20Р-00-УЗ; ПМЛ-11-00-УЗ; КС1-11; ПКЕ112-1; ВК200Г-П-УЗ-1; ВПК2-01-1У2?

Тема 2.3. Релейные элементы автоматики

Студент должен **знать**: основные релейные элементы автоматики; **уметь**: исследовать электромагнитные реле автоматики; работу реле времени и программных устройств автоматики, работу шаговых искателей.

Задание:

1. Прочитать: Л-1, с. 96...101.

2. Законспектировать материал в соответствии с требованиями «знать».

3. Ответить на вопросы для самоконтроля:

- 3.1. Что представляет собой реле?
- 3.2. Какие сигналы реле считают входными, какие выходными?
- 3.3. Чем отличаются магнитные системы реле постоянного и переменного токов?
- 3.4. Каковы особенности устройства поляризованных реле?
- 3.5. Объясните принципиальную схему программного реле времени.
- 3.6. Каковы назначение и принцип действия шагового искателя?

Тема 2.4. Логические элементы автоматики

Студент должен **знать**: основные логические устройства автоматики;

уметь: исследовать работу релейно-контактных схем, выполняющих логические операции, и работу бесконтактных логических элементов; проводить минимизацию логических функций, изображать на релейно-контактных элементах схему управления, на бесконтактных элементах – релейно-контактные схемы.

Задание:

1. Прочитать: Л-1, с. 101...114; Л-4, с. 142...148; Л-6, с. 148...155.

2. Законспектировать материал в соответствии с требованиями «знать».

3. Разобрать решение типовой задачи (пример 3) настоящих методических указаний.

4. Решить задачу 3 контрольной работы.

5. Ответить на вопросы для самоконтроля:

- 5.1. Что называется логической функцией?
- 5.2. Как можно выразить логическую функцию?
- 5.3. Какими элементарными функциями можно выразить логическую функцию любой сложности?
- 5.4. Что понимают под «инверсией», «дизъюнкцией», «конъюнкцией»?
- 5.5. Какие основные законы алгебры логики вы знаете?
- 5.6. Дайте определение операциям, реализуемым логическими элементами ИЛИ, И, НЕ, а также ИЛИ-НЕ и И-НЕ.

Тема 2.5. Задающие и сравнивающие устройства автоматики

Студент должен **знать**: виды задающих и сравнивающих устройств;

уметь: анализировать работу задающих и сравнивающих устройств автоматики.

Задание:

1. Прочитать: Л-1, с. 115...118; Л-4, с. 71...75.

2. Законспектировать материал в соответствии с требованиями «знать».

3. Ответить на вопросы для самоконтроля:

- 3.1. Какие устройства используют в электрических схемах в качестве задающих, сравнивающих?
- 3.2. Каково назначение задающего устройства?
- 3.3. Каково назначение сравнивающего устройства?
- 3.4. Как подразделяются задающие и сравнивающие устройства?

Тема 2.6. Усилители систем автоматики

Студент должен **знать**: общие сведения и классификацию усилителей автоматики;

уметь: проводить испытания магнитных усилителей, тиристорной станции управления.

Задание:

1. Прочитать: Л-1, с. 118...125; Л-4, с. 79...99.

2. Законспектировать материал в соответствии с требованиями «знать».

3. Ответить на вопросы для самоконтроля:

- 3.1. Что называется усилительным элементом и каково его назначение?

- 3.2. Перечислите основные требования, предъявляемые к усилителям автоматических систем.
- 3.3. Усилители каких типов вы знаете?
- 3.4. Назовите достоинства и недостатки электронных усилителей.
- 3.5. Каково влияние частоты переменного тока на работу магнитного усилителя?
- 3.6. Как работают гидравлические и пневматические усилители?

Тема 2.7. Исполнительные механизмы и регулирующие органы

Студент должен знать классификацию и назначение исполнительных механизмов и регулирующих органов;

уметь: проводить исследование работы исполнительного механизма.

Задание:

1. Прочитать: Л-1, с. 125...131; Л-4, с. 105...124; Л-6, с. 127...134.

2. Законспектировать материал в соответствии с требованиями «знать».

3. Ответить на вопросы для самоконтроля:

- 3.1. Каково назначение исполнительного механизма?
- 3.2. Объясните функциональную схему электродвигательного исполнительного механизма.
- 3.3. Объясните принципиальную схему включения исполнительного механизма типа ИМ.
- 3.4. Объясните устройство и принцип действия импульсного трехфазного электродвигателя.
- 3.5. Объясните принцип действия поршневого гидравлического серводвигателя.

Тема 2.8. Автоматические регуляторы

Студент должен знать: виды и устройство автоматических регуляторов;

уметь: проводить исследование работы двухпозиционного регулятора, определять коэффициент усиления пропорционального регулятора.

Задание:

1. Прочитать: Л-1, с. 131...139; Л-4, с. 159...165; Л-6, с. 110...127.

2. Законспектировать материал в соответствии с требованиями «знать».

3. Ответить на вопросы для самоконтроля:

- 3.1. Как классифицируют автоматические регуляторы?

- 3.2. Какова основная функция регуляторов?
- 3.3. Чем определяется выбор автоматических регуляторов?
- 3.4. При каких значениях отношения τ_0/T_0 рекомендуется применять позиционные регуляторы; регуляторы непрерывного действия?
- 3.5. Какими соображениями руководствуются при выборе закона регулирования?

Тема 2.9. Программируемые контроллеры

Студент должен знать: основные понятия, назначение и функции программируемых контроллеров;

уметь: проводить анализ функциональных возможностей и порядка перепрограммирования микропроцессорного контроллера.

Задание:

1. Прочитать: Л-1, с. 139...141; Л-6, с. 195...200.

2. Законспектировать материал в соответствии с требованиями «знать».

3. Ответить на вопросы для самоконтроля:

- 3.1. Каковы преимущества программируемых контроллеров по сравнению с традиционными релейно-контактными устройствами, по сравнению с ЭВМ?
- 3.2. Что входит в состав программируемого контроллера?
- 3.3. На чем основан принцип действия ПК?
- 3.4. Как производится программирование ПК?
- 3.5. Какие примеры использования программируемых контроллеров в сельскохозяйственном производстве вы знаете?

Тема 2.10. Источники питания и стабилизаторы автоматики

Студент должен знать: источники питания и стабилизаторы автоматики.

Задание:

1. Прочитать: Л-1, с. 142...144.

2. Законспектировать материал в соответствии с требованиями «знать».

3. Ответить на вопросы самоконтроля:

- 3.1. Каково назначение источников питания и стабилизаторов в системах автоматики?
- 3.2. Как классифицируются источники питания?
- 3.3. Какие элементы используют в электрических параметрических стабилизаторах?
- 3.4. Для чего применяют пневматические и гидравлические стабилизаторы?

Раздел 3. Системы телемеханики

Тема 3.1. Принципы построения систем телемеханики

Студент должен знать: основные принципы построения систем телемеханики;

Задание:

1. Прочитать: Л-1, с.146...148.

2. Законспектировать материал в соответствии с требованиями «знать».

3. Ответить на вопросы для самоконтроля:

- 3.1. Каково назначение систем телемеханики?
- 3.2. Как подразделяются системы телемеханики?
- 3.3. Каковы основные элементы системы телемеханики?
- 3.4. Какие способы разделения сигналов используют в системах телемеханики?

Тема 3.2. Системы телеизмерения, телеуправления и телесигнализации

Студент должен знать: основные системы телеизмерения, телеуправления и телесигнализации;

уметь: исследовать работу систем телеуправления и телесигнализации.

Задание:

1. Прочитать: Л-1, с.148...151.

2. Законспектировать материал в соответствии с требованиями «знать».

3. Ответить на вопросы для самоконтроля:

- 3.1. Каково назначения систем телеизмерения (ТИ)?
- 3.2. Какие системы ТИ вы знаете?
- 3.3. Какие системы используются для измерения величин ОУ на больших расстояниях?
- 3.4. Каково назначение систем телеуправления ТУ и телесигнализации ТС?
- 3.5. Какие виды управления применяют в системах ТУ и ТС?
- 3.6. Какие сигналы получают при работе систем ТС?

Раздел 4. Основы теории автоматического управления

Тема 4.1. Структурные схемы систем управления и их преобразование

Студент должен знать: основные структурные схемы систем управления и их преобразование;

уметь: определять динамическую характеристику системы автоматического управления.

Задание:

1. Прочитать: Л-1, с. 152...157, Л-4 с. 166...205.

2. Законспектировать материал в соответствии с требованиями «знать».

3. Ответить на вопросы для самоконтроля:

- 3.1. Что называется структурной схемой САУ?
- 3.2. Какие различают типы соединения динамических звеньев САУ?
- 3.3. Какую схему обратной связи называют единичной?
- 3.4. Какая САУ называется одноконтурной; многоконтурной?

Тема 4.2. Устойчивость автоматических систем

Студент должен знать: условия и виды устойчивости автоматических систем;

уметь: определять устойчивость систем автоматического регулирования.

Задание:

1. Прочитать: Л-1, с. 157...166; Л4, с. 206...217.

2. Законспектировать материал в соответствии с требованиями «знать».

3. Изучить методические указания к решению задачи №5 и разобрать решение типовых задач (примеры 5.1; 5.2; 5.3).

4. Решить задачу №5.

5. Ответить на вопросы для самоконтроля:

- 5.1. Что называют устойчивостью САУ?
- 5.2. Какие критерии устойчивости вы знаете?
- 5.3. В чем сущность метода оценки устойчивости автоматических систем А. М. Ляпунова?
- 5.4. В чем сущность критерия А. В. Михайлова?
- 5.5. Что такое запас устойчивости и как он определяется по модулю и фазе?

Тема 4.3. Качество работы системы автоматического управления

Студент должен знать: основные показатели качества работы системы автоматического управления;

уметь: определять показатели качества системы автоматического регулирования.

Задание:

1. Прочитать: Л-1, с. 166...175; Л-4, с. 218...237.
2. Законспектировать материал в соответствии с требованиями «знать».
3. Ответить на вопросы для самоконтроля:
 - 3.1. Назовите основные показатели качества переходных процессов и дайте их характеристику.
 - 3.2. Какие методы построения переходных процессов применяются на практике?
 - 3.3. Назовите косвенные оценки качества переходных процессов.
 - 3.4. Какими установившимися ошибками характеризуется САУ?
 - 3.5. Какие существуют методы определения этих ошибок?
 - 3.6. Что понимают под косвенными показателями качества переходного процесса: корневыми, частотными, интегральными?

Тема 4.4. Нелинейные системы автоматического управления

Студент должен знать: нелинейные системы автоматического управления;

уметь: исследовать нелинейную систему автоматического регулирования.

Задание:

1. Прочитать: Л-1, с. 175...180; Л-4, с. 238...252.
2. Законспектировать материал в соответствии с требованиями «знать».
3. Ответить на вопросы для самоконтроля:
 - 3.1. Когда САУ считают нелинейной?
 - 3.2. Назовите основные методы исследования нелинейных систем.
 - 3.3. Каковы основные свойства фазовых траекторий?
 - 3.4. При каких условиях переходной процесс нелинейной системы будет устойчивым?
 - 3.5. Назовите условия возникновения устойчивых автоколебаний в нелинейной системе.

Тема 4.5. Настройка систем автоматического регулирования

Студент должен знать: способы настройки систем автоматического регулирования;

уметь: настраивать системы автоматического управления с пропорционально-интегральным регулятором.

Задание:

1. Прочитать: Л-1, с. 180...182; Л-2, с. 226...254; Л-5, с. 116...148.
2. Законспектировать материал в соответствии с требованиями «знать».
3. Ответить на вопросы для самоконтроля:
 - 3.1. Приведите структурные схемы П, И, ПИ и ПИД-регуляторов.
 - 3.2. Какие параметры настройки имеет П-регулятор, И-регулятор, ПИ-регулятор, ПИД-регулятор?
 - 3.3. Какие существуют методы определения параметров настройки регуляторов?
 - 3.4. На какие типовые переходные процессы настраивают параметры регуляторов?
 - 3.5. Что необходимо обеспечить для качественного управления объектами?

Раздел 5. Надежность и технико-экономическая эффективность работы систем автоматики

Студент должен знать: основные понятия о надежности и технико-экономической эффективности работы систем автоматики;

уметь: проводить расчет надежности систем управления.

Задание:

1. Прочитать: Л-1, с. 183...190; Л-4, с. 275...280.
2. Законспектировать материал в соответствии с требованиями «знать».
3. Изучить методические указания к задаче №6 и разобрать решение типовой задачи (пример 6).
4. Решить задачу №6 контрольной работы.
5. Ответить на вопросы для самоконтроля:
 - 5.1. Перечислите виды отказов.
 - 5.2. Как можно определить вероятность безотказной работы САУ?
 - 5.3. На какие участки подразделяют зависимость интенсивности отказов во времени?
 - 5.4. Какие типы структурных схем существуют с точки зрения надежности?
 - 5.5. Каковы основные показатели экономической эффективности автоматизации технологических процессов сельскохозяйственного производства?
 - 5.6. Как подсчитываются приведенные затраты на автоматизацию?

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА

Контрольная работа содержит 6 задач. Номер варианта определяется последней цифрой шифра, за исключением задачи №2, где вариант определяется по двум последним цифрам шифра.

Задача 1. Статическая характеристика $R = f(\Theta)$ датчика температуры (термистора) изображена на рис. 1.1. (с. 32) настоящих методических указаний.

Требуется:

1. Изобразить графически статистическую характеристику датчика температуры $R_T = f(\Theta)$.

2. По зависимости $R_T = f(\Theta)$ в диапазоне согласно своему варианту (табл. 1.) определить все коэффициенты передачи, приняв в качестве номинальных средние значения диапазона.

3. Определить значения сопротивления датчика температура R_∞ при $\Theta \rightarrow \infty$, коэффициента B , характеризующего термочувствительность резистора.

4. Записать аналитическое выражение статической характеристики датчика $R_a = f(\Theta)$.

5. Для заданного диапазона (трех его точек) определить погрешности измерения, приняв за расчетные значения сопротивления термистора, определенные графически (R_T).

Таблица 1.

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Диапазон температуры, °С	20...40	30...50	40...50	50...70	60...80	70...90	80...100	90...100	50...70	70...90

Задача 2. Дать определение, пояснить назначение, принцип действия, устройство, указать тип динамического звена, привести схему и примеры применения элементов САУ. Наименования элементов САУ приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Вариант по двум последним цифрам шифра	Наименование элементов САУ	Литература
1	2	3
01; 26; 51; 76	Индуктивные и дифференциально-трансформаторные первичные измерительные преобразователи (ПИП) датчиков перемещений	Л-1, с. 51...55; 55...57 Л-10,
02; 27; 52; 77	Контактные и потенциометрические ПИП датчиков перемещений	Л-1, с. 51...55; 55...57
03; 28; 53; 78	Фотометрические ПИП датчиков перемещений. Датчики вращения с фотодиодами	Л-1, с. 51...55; 59...61
04; 29; 54; 79	Индукционные датчики вращения и датчики вращения с герконом. Датчики угла поворота	Л-1, с. 51...55; 61...63
05; 30; 55; 80	Датчики давления	Л-1, с. 51...55; 63...69 Л-10, с. 221...222
06; 31; 56; 81	Датчики веса	Л-1, с. 51...55; 69...71
07; 32; 57; 82	Датчики уровня жидкости	Л-1, с. 51...55; 71...73 Л-10, с. 222
08; 33; 58; 83	Датчики уровня сыпучих материалов	Л-1, с. 51...55; 73...75 Л-10, с. 222
09; 34; 59; 84	Датчики температуры контактные и dilatометрические	Л-1, с. 51...55; 75...78
10; 35; 60; 85	Датчики температуры манометрические	Л-1, с. 51...55; 78...79 Л-11, с. 37...39
11; 36; 61; 86	Датчики температуры термоэлектрические	Л-1, с. 51...55; 79...82 Л-10, с. 216...217
12; 37; 62; 87	Расходомеры с сужающим устройством и ротометрические расходомеры	Л-1, с. 51...55; 82...84 Л-10, с. 221 Л-11, с. 132...142
13; 38; 63; 88	Тахометрические, электромагнитные и ультразвуковые расходомеры	Л-1, с. 51...55; 84...86 Л-10, с. 221 Л-11, с. 186...197, 200...203
14; 39; 64; 89	Датчики влажности воздуха	Л-1, с. 51...55; 86...89 Л-10, с. 217...220
15; 40; 65; 90	Датчики относительной влажности твердых и сыпучих материалов	Л-1, с. 51...55; 89...90 Л-10, с. 220
16; 41; 66; 91	Датчики плотности жидких продуктов. Датчики концентрации растворов	Л-1, с. 51...55; 91
17; 42; 67; 92	Датчики концентрации водородных ионов (рН-метры)	Л-1, с. 51...55; 92...93 Л-11, с. 280

1	2	3
18; 43; 68; 93	Датчики состава газа	Л-1, с. 91...
19; 44; 69; 94	Электрические и электронные тахометры	Л-11, с. 336...340
20; 45; 70; 95	Датчики-реле контроля пламени	Л-11, с. 471...477
21; 46; 71; 96	Электрические исполнительные механизмы типа МЭО, МЭМ	Л-1, с. 125...126 Л-10, с. 222...223 Л-11, с. 716...725
22; 47; 72; 97	Электромагнитные исполнительные механизмы	Л-1, с. 125; 127...130
23; 48; 73; 98	Электронные регуляторы температуры типов ТМ и ТЭ	Л-1, с. 131...137 Л-11, с. 483, 487...488
24; 49; 74; 99	Электронные регуляторы температуры типа РТ	Л-1, с. 131...137 Л-10, с. 222 Л-11, с. 483, 488...489
25; 50; 75; 00	Программируемый микропроцессорный контролер (ремиконт)	Л-11, с. 528...533

Задача 3. По заданной структурной формуле контактной схемы начертить соответствующую ей схему включения реле Р и, преобразовав ее, найти эквивалентную упрощенную. Начертить схему, соответствующую упрощенной формуле. Структурную формулу для своего варианта взять из таблицы 3.

Таблица 3.

Вариант	Структурная формула контактной схемы
1	$F = [(a + b) \cdot (a + c) \cdot (b + c) + a\bar{c}] \cdot P$
2	$F = (a\bar{b}c + a\bar{b}c + a\bar{b}c + a\bar{b}c) \cdot P$
3	$F = [a\bar{b} + c + (a + b)c + da] \cdot P$
4	$F = [(a + b + \bar{c})(a\bar{b} + a\bar{c}) + a\bar{b}] \cdot P$
5	$F = [(a + b + c + d)(\bar{a} + \bar{b} + c + d)] \cdot P$
6	$F = (a\bar{b}c + a\bar{b}c + a\bar{b}c + a\bar{b}c) \cdot P$
7	$F = [(a + bc)(b + \bar{c})] \cdot P$
8	$F = [(a + b + c)bc + bd] \cdot P$
9	$F = [(a + b + c)bc + bd] \cdot P$
0	$F = [(a\bar{b} + a\bar{b} + a\bar{b})bc + d(c + b)] \cdot P$

Задача 4. Составить схему на логических элементах, эквивалентную по своему действию упрощенной контактной, полученной в задаче 3 согласно своему варианту для двух случаев: на логических элементах базиса «и», «или», «не» и базиса «и-не».

Для каждого случая составить таблицы истинности.

Задача 5. По заданному характеристическому уравнению определить устойчивость системы автоматического управления (САУ) по двум критериям: Гурвица и Михайлова. Характеристические уравнения САУ по вариантам представлены в таблице 5.

Таблица 5.

Вариант	Характеристическое уравнение САУ
1	$5p^3 + 2p^2 + 5p + 4 = 0$
2	$10p^3 + 2p^2 + 4p + 7 = 0$
3	$0,001p^3 + 0,25p^2 + 1,8p + 245 = 0$
4	$3p^4 + 7p^3 + 4p^2 + 2p + 1 = 0$
5	$2p^4 + 5p^3 + 10p^2 + p + 4 = 0$
6	$5p^3 + 2p^2 - 3p + 1 = 0$
7	$p^3 + p^2 + 2p + 1 = 0$
8	$3p^3 + 2p^2 + p + 1 = 0$
9	$4p^3 + 3p + 1 = 0$
0	$p^3 + 10p^2 + p + 2 = 0$

Задача 6. Для электрической схемы управления объектом заданная вероятность безотказной работы $P_3(t)$. Срок нормальной эксплуатации t (час). Коэффициент, учитывающий влияние окружающей среды для стационарных установок в сельском хозяйстве, $k = 10$. Требуется определить действительную вероятность безотказной работы. Данные для решения задачи для своего варианта даны в таблице 6.

Таблица 6.

Вариант	Наименование объекта	Номер рисунка	Заданная вероятность безотказной работы, $P_3(t)$	Срок нормальной эксплуатации, t час
0	Защита УВТЗ-1М	6.0	0,96	10000
1	Устройство РУД-05-УЗ	6.1	0,96	10000
2	Схема пуска АД	6.2	0,95	1500
3	Водонапорная башня	6.3	0,5	3000
4	Двухагрегатная насосная установка	6.4	0,5	3000
5	Станция управления «Климатика-1»	6.5	0,95	10000
6	Поточная линия приготовления корнеклубнеплодов	6.6	0,5	1500
7	Подача пиломатериала	6.7	0,7	3000
8	Бункер активного вентилирования	6.8	0,7	1500
9	Ультразвуковой генератор	6.9	0,96	10000

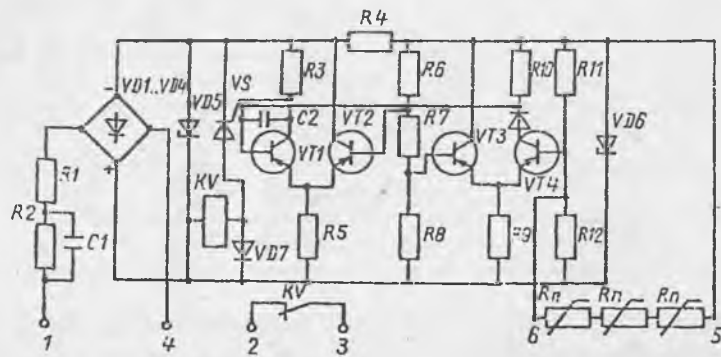


Рис. 6.0. Принципиальная электрическая схема универсальной встроенной температурной защиты УВТЗ-1М

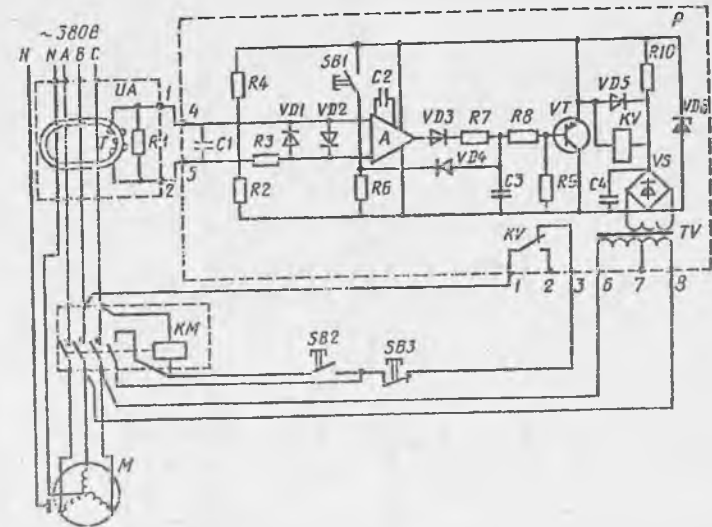


Рис.6.1. Электрическая принципиальная схема защитно-отключающего устройства РУД-05-УЗ и его подключения:

UA—датчик тока; T—дифференциальный трансформатор; P—усилительный блок; KM—электромагнитный пускатель; M—электродвигатель.

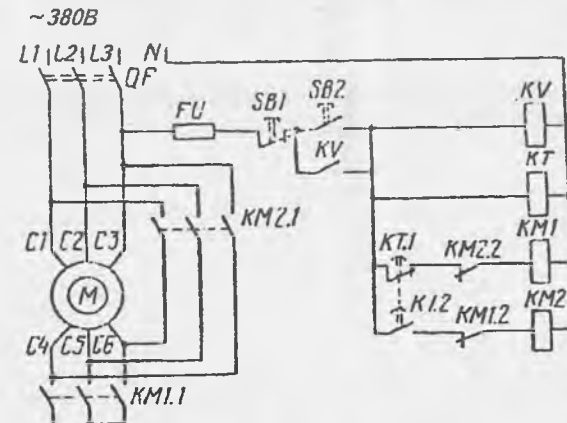


Рис.6.2. Электрическая принципиальная схема пуска электродвигателя с переключением со звезды на треугольник по принципу времени.

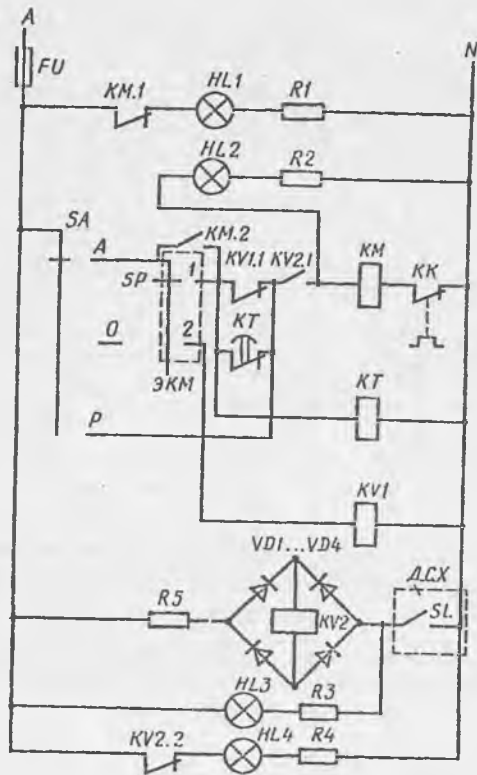


Рис. 6.3. Электрическая схема автоматизации погружного насоса по давлению при работе с водонапорной башней.

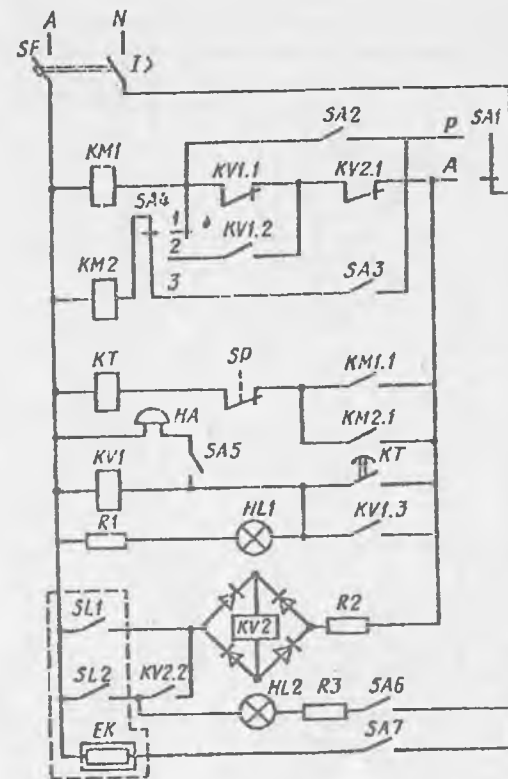


Рис. 6.4. Электрическая схема автоматизации двухагрегатной насосной установки.

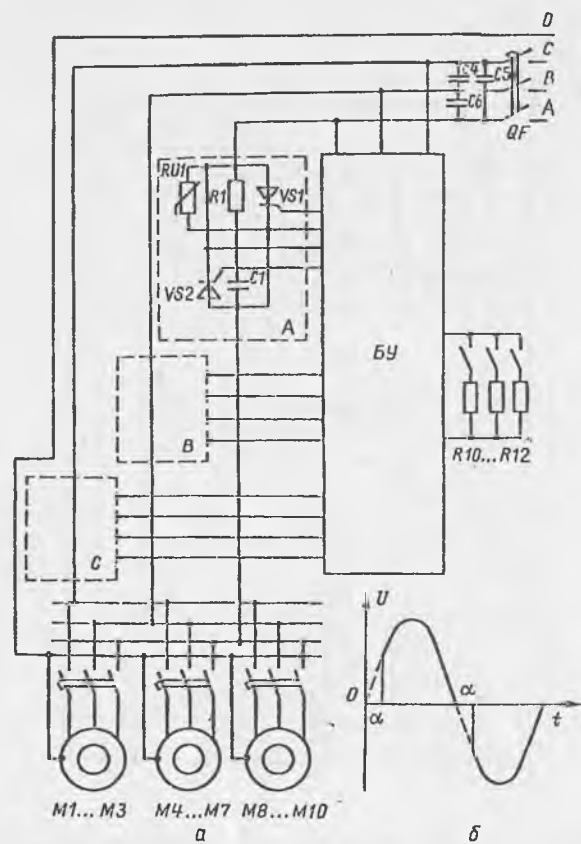


Рис.6.5. Электрическая схема станции управления «Климатика-1».

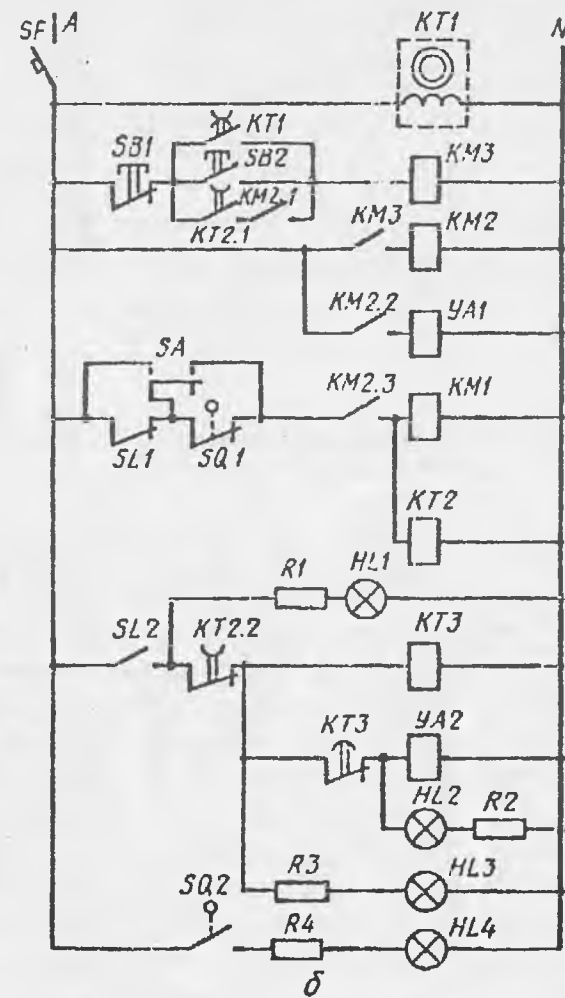


Рис. 6.6. Электрическая схема автоматизации приготовления клубнеплодов.

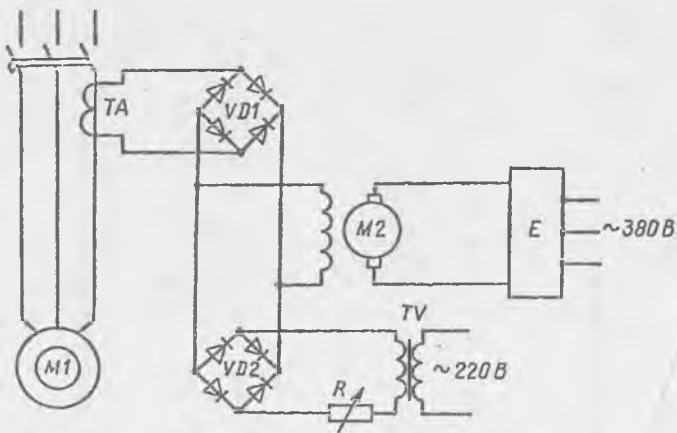


Рис.6.7. Электрическая схема автоматизированного управления подачей пилорамы.

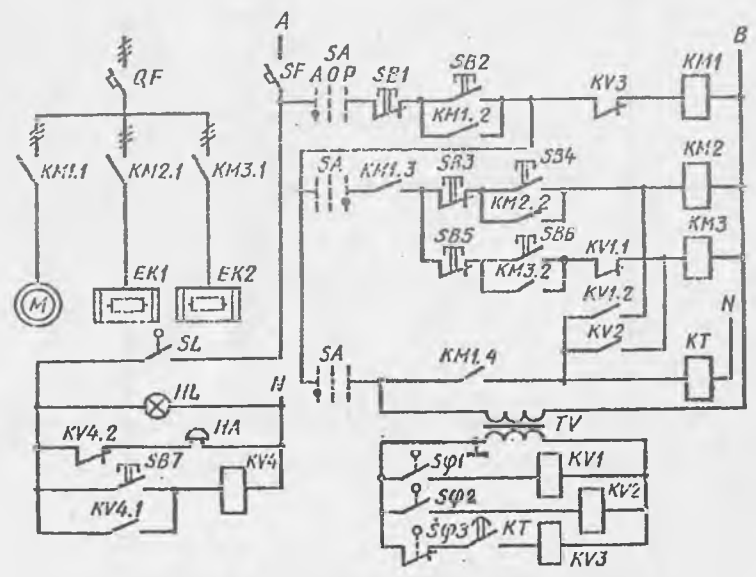


Рис.6.8. Принципиальная электрическая схема управления бункером активного вентилирования.

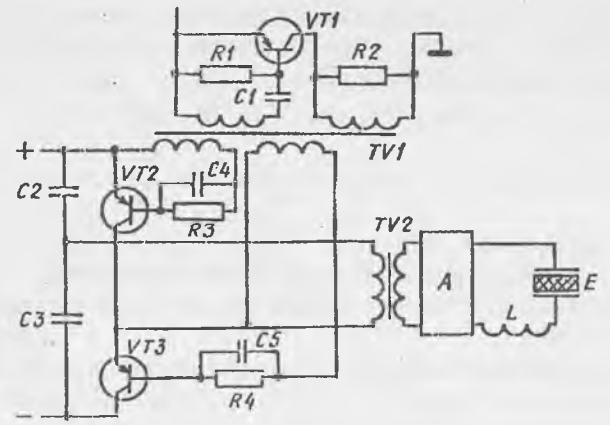


Рис.6.9. Принципиальная электрическая схема ультразвукового генератора на транзисторах.

Методические указания к выполнению контрольной работы

Задача 1 относится к рассмотрению статических характеристик элементов автоматики и определению их параметров.

Статическая характеристика элемента автоматики – это зависимость выходного сигнала y от входного x в установившемся режиме работы, т.е. $y=f(x)$. Статические характеристики могут быть представлены графически, аналитически или в виде таблиц.

Параметры статических характеристик:

1. Статический коэффициент передачи – это отношение выходной величины y к входной величине x . Он численно равен отношению их значений, например y_1 к x_1 или тангенсу угла наклона статической характеристики, т.е. $k_c = y_1/x_1 = \text{tga}$. (см. Л-1, с. 20, рис. 1.7.)

2. Динамический коэффициент передачи – это отношение дифференциала выходного сигнала dy к дифференциалу входного сигнала dx , он приблизительно равен отношению приращений Δy к Δx или тангенсу угла наклона на прямой, проходящей через точки графика с координатами y_1, x_1 и y_2, x_2 (см. рис. 1.7б, Л-1, с. 20), т.е.

$$K_d = \frac{dy}{dx} = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \text{tg}\beta.$$

3. Относительный коэффициент передачи – это отношение выходной величины к входной, представленное в относительных единицах измерения (см. рис. 1.7в, Л-1, с.20)

$$y^* = \frac{dy}{y_n} \approx \frac{\Delta y}{y_n}, \quad x^* = \frac{dx}{x_n} \approx \frac{\Delta x}{x_n};$$

$$K^* = \frac{y^*}{x^*} = \frac{dy x_n}{dx y_n} \approx \frac{\Delta y x_n}{\Delta x y_n},$$

где x_n, y_n – номинальные значения величин (параметров)

Нелинейные статические характеристики линеаризуют графически или аналитически.

При графической линеаризации нелинейную характеристику 1 заменяют на секущую 2 (см. рис. 1.7б, Л-1, с. 20) или касательную 2 (см. рис. 1.7в) к выбранной точке линеаризации (например, с параметрами x_n, y_n).

4. Абсолютная погрешность элемента – это отклонение полученного выходного параметра y_l от его расчетного (номинального) значения y_n (см. рис. 1.7г).

$$\delta_y = y_l - y_n$$

5. Относительная погрешность – это отношение δ_y к значению выходного сигнала y_l , выраженное в относительных единицах или процентах:

$$\lambda = \delta_y / y_l.$$

6. Приведенная погрешность – это отношение δ_y к нормирующему (максимальному) значению y_n или диапазону изменения выходного сигнала Δy_n , выраженное в относительных единицах или процентах:

$$\gamma = \delta_y / y_n, \quad \text{или} \quad \gamma = \delta_y / \Delta y_n,$$

Пример 1. Экспериментально были получены точки статической характеристики $R = f(\Theta)$ датчика температуры (термистора) с координатами, указанными в таблице 1.1.

Таблица 1.1.

№ измерения	1	2	3	4	5
Измеряемая величина					
Температура теплоносителя, Θ , °C	20	40	60	80	100
Сопротивление датчика температуры, R_T , кОм	3,0	1,62	0,98	0,65	0,41

Требуется:

1. Изобразить графически статическую характеристику датчика температуры $R_T = f(\Theta)$.

2. В диапазоне $\Theta_2 = 60^\circ\text{C}$ и $\Theta_1 = 40^\circ\text{C}$ определить все коэффициенты передачи, приняв в качестве номинальных средние значения диапазона.

3. Определить значения сопротивления датчика температуры R_∞ при $\Theta \rightarrow \infty$ и коэффициента B , характеризующего термочувствительность резистора.

4. Записать аналитическое выражение статической характеристики датчика $R = f(\Theta)$.

5. Для заданного диапазона определить погрешности измерения, приняв за расчетные значения сопротивления термистора, определенные графически (R_r) и аналитически (R_a).

Решение:

1. По данным таблицы 1 строим статическую характеристику $R_T = f(\Theta)$, приняв масштабы

$$m_\Theta = 1 \text{ град/1 мм}$$

$$m_{R_T} = 1 \text{ кОм/20 мм}$$

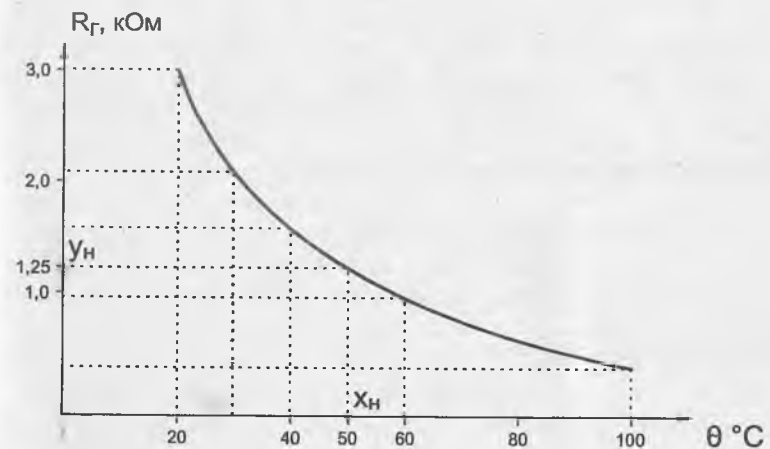


Рис. 1.1. Статическая характеристика датчика температуры.

2. В заданном диапазоне $\Theta_2 = 60^\circ\text{C}$ и $\Theta_1 = 40^\circ\text{C}$ определяем по статической характеристике $R_T = f(\Theta)$ значения R_{T2} при $\Theta_2 = 60^\circ\text{C}$ и R_{T1} при $\Theta_1 = 40^\circ\text{C}$

$$R_{T2} = 0,98 \text{ кОм}, \quad R_{T1} = 1,62 \text{ кОм}.$$

Параметры статической характеристики:

Статический коэффициент передачи не имеет физического смысла, т.к. он присущ только для линейных характеристик, проходящих через начало координат.

Динамический коэффициент передачи

$$K_d \approx \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{R_{T2} - R_{T1}}{\Theta_2 - \Theta_1} = \frac{0,98 - 1,62}{60 - 40} = -3,2 \cdot 10^{-2} \text{ кОм}/^\circ\text{C}.$$

Относительный коэффициент передачи

$$K^* = \frac{\Delta y x_H}{\Delta x y_H} = \frac{R_{T2} - R_{T1}}{\Theta_2 - \Theta_1} \cdot \frac{x_H}{y_H} = \frac{-0,64}{20} \cdot \frac{50}{1,3} = -1,23,$$

где $x_H = \frac{\Theta_1 + \Theta_2}{2} = \frac{40 + 60}{2} = 50$ °C – среднее значение температуры Θ_{cp} ,

$$y_H = \frac{R_{T2} + R_{T1}}{2} = \frac{0,98 + 1,62}{2} = 1,3 \text{ кОм} – \text{среднее значение сопротивления датчика } R_{T,cp}$$

3. Для определения значения сопротивления датчика температуры R_∞ при $\Theta \rightarrow \infty$ и коэффициента B составим и решим систему уравнений

$$\begin{cases} R_{T1} = R_\infty \cdot e^{\frac{B}{\Theta_1 + 273}} \\ R_{T2} = R_\infty \cdot e^{\frac{B}{\Theta_2 + 273}} \end{cases}$$

Подставив известные значения R_T и Θ , имеем

$$\begin{cases} 1,62 = R_\infty \cdot e^{\frac{B}{40 + 273}} & (1) \\ 0,98 = R_\infty \cdot e^{\frac{B}{60 + 273}} & (2) \end{cases}$$

Поделив (1) на (2), получим:

$$1,65 = 1 \cdot e^{\frac{B}{313} - \frac{B}{333}} = e^{0,19 \cdot 10^{-3} B} \quad (3)$$

Прологарифмируем (3):

$$\ln 1,65 = 0,19 \cdot 10^{-3} B \cdot \ln e$$

$$0,502 = 0,19 \cdot 10^{-3} B \cdot 1$$

отсюда $B = 0,502 / 0,19 \cdot 10^{-3} = 2650$ °C,

$$\text{из (2) } R_\infty = \frac{R_{T2}}{e^{\frac{B}{\Theta_2 + 273}}} = \frac{0,98}{e^{\frac{2650}{333}}} = \frac{0,98}{e^{7,96}} = \frac{0,98}{2864} = 3,42 \cdot 10^{-4} \text{ кОм}.$$

4. Запишем аналитическое выражение статической характеристики датчика

$$R_a = f(\Theta) \text{ при } R_\infty = 3,42 \cdot 10^{-4} \text{ кОм, и } B = 2650^\circ\text{C}$$

$$R_a = R_\infty \cdot e^{\frac{B}{\Theta + 273}} = 3,42 \cdot 10^{-4} \cdot e^{\frac{2650}{\Theta + 273}}$$

5. Определим погрешности измерения:

5.1. абсолютная

$$\delta_y = y_1 - y_H = 1,62 - 1,25 = 0,37,$$

где $y_H = 1,25$; $x_H = 50$ °C по статической характеристике датчика;

5.2. относительная

$$\lambda = \delta_y / y_1 = 0,37 / 1,62 = 0,23;$$

5.3. приведенная

$$\gamma = \delta_y / y_H = 0,37 / 1,25 = 0,30$$

где y_H – нормирующее (максимальное) значение выходной величины.

Задача 2 относится к рассмотрению систем управления, назначения, принципа действия, устройства, схемы, примеров применения и динамических свойств элементов САУ.

Уравнения элементов САУ обуславливаются их физической природой и составляются на основании законов механики, электротехники, термо- и гидродинамики и т. п.

Для удобства исследования САУ установлены типовые возмущающее $\Delta x = f(t)$ и управляющее $\Delta x = g(t)$ воздействия.

Типовые воздействия на элементы автоматики различной физической природы позволяют описать переходные процессы одними и теми же дифференциальными уравнениями, что позволяет отразить типизацию элементов по виду этого уравнения.

Уравнения принято записывать в операторной форме, вводя оператор

$$p = \frac{d}{dt}.$$

Из уравнения в операторной форме находят передаточную функцию

$$W(p) = \frac{y(p)}{x(p)}.$$

По виду передаточной функции выделяют шесть простейших типовых позиционных звеньев:

1. Безынерционное (пропорциональное).

Его выходная величина $y(t)$, рис. 2.1a, изменяется прямо пропорционально входной величине $x(t = 1)$.

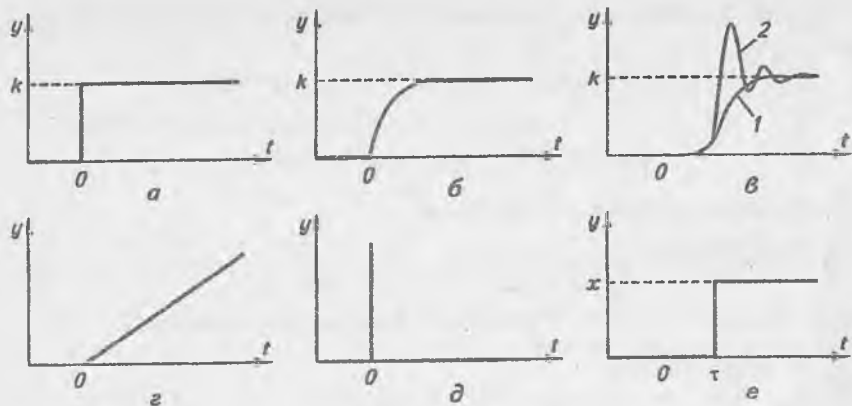


Рис. 2.1 Переходные характеристики типовых звеньев:
a – пропорционального; *б* – аperiodического первого порядка;
в – аperiodического второго порядка (1) и колебательного (2);
г – идеального интегрирующего; *д* – идеального дифференцирующего;
е – звена транспортного запаздывания

Передаточная функция звена

$$W(p) = k,$$

где k – передаточный коэффициент звена.

Частотная характеристика $W(\omega) = k$;

Амплитудная – $k(\omega) = k$;

Фазовая – $\varphi(\omega) = 0$.

Примеры пропорциональных звеньев: манометрическая пружина, рычаг, зубчатый редуктор, усилитель постоянного тока, потенциометр и др.

2.1. Аperiodическое звено первого порядка (инерционное)

Его динамическая характеристика представлена на рис. 2.1б.

$$\text{Передаточная функция} - W(p) = \frac{k}{T_p p + 1}.$$

Частотные характеристики:

$$\text{амплитудная} - K(\omega) = \frac{k}{\sqrt{1 + T^2 \omega^2}};$$

$$\text{фазовая} - \varphi(\omega) = - \operatorname{arctg} \omega T;$$

$$\text{амплитудно-фазовая} - W(j\omega) = \frac{k}{T_j \omega + 1}.$$

Примеры инерционных звеньев: емкость с самовыравниванием, контактный теплообменник, термopара, контуры цепей RC и RL, электрический генератор, электродвигатели, магнитные и электромагнитные усилители и другие устройства, в которых переходной процесс завершается не мгновенно, а в течение определенного времени $t = (3...4)T$, где T – постоянная времени, характеризующая инерционность процесса.

2.2. Колебательное и аperiodическое звено второго порядка

Их динамические характеристики представлены на рис. 2.1в в зависимостях 1 (в аperiodических звеньях второго порядка) и 2 (в колебательных звеньях).

$$\text{передаточная функция} - W(p) = \frac{k}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1}.$$

Частотные характеристики:

$$\text{амплитудная} - K(\omega) = \frac{k}{\sqrt{(1 - T_2^2 \omega^2)^2 + T_1^2 \omega^2}};$$

$$\text{фазовая} - \varphi(\omega) = - \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{\omega T_1}{1 - \omega^2 T_2^2};$$

$$\text{амплитудно-фазовая} - W(j\omega) = \frac{k}{1 - T_2^2 \omega^2 + T_1 j\omega}.$$

Примеры колебательных звеньев: упругая механическая система; система, состоящая из двух сообщающихся сосудов; пневматический (мембранный) исполнительный механизм, электрический RLC-контур, двигатель постоянного тока с независимым возбуждением.

Примеры аperiodических звеньев второго порядка: нагревательные и охлаждающие установки, отопительные печи, сушилки, теплицы, животноводческие помещения, птичники.

3. Идеальное дифференцирующее звено

Его динамическая характеристика представлена на рис. 2.1д. У этого звена выходная величина пропорциональна скорости изменения выходной величины, т.е. $y = T dx/dt$,

$$\text{передаточная функция} - W(p) = kp.$$

Характеристики:

$$\text{амплитудно-фазовая} - W(j\omega) = kj\omega;$$

$$\text{амплитудная} - k(\omega) = k\omega;$$

$$\text{фазовая} - \varphi(\omega) = \pi/2.$$

Примеры дифференцирующих звеньев: тахогенератор (т.к. вырабатываемое им напряжение пропорционально скорости вращения якоря, которая является производной по времени от угла поворота якоря); электрический конденсатор С (если за входную величину принять напряжение, подаваемое на конденсатор, а за выходную – ток в его цепи); индуктивность L (если за входную величину принять ток в цепи катушки, а за выходную – напряжение на ней),

4. Реальное дифференцирующее звено:

$$\text{передаточная функция } W(p) = \frac{kTp}{Tp+1}.$$

Характеристики:

$$\text{амплитудно-фазовая } - W(j\omega) = \frac{kTj\omega}{Tj\omega+1};$$

$$\text{амплитудная } - K(\omega) = \frac{T\omega}{\sqrt{1+T^2\omega^2}};$$

$$\text{фазовая } - \varphi(\omega) = \text{arc tg } T\omega.$$

5. Интегрирующее звено

Его динамическая характеристика представлена на рис. 2.1г. У этого звена выходная величина пропорциональна интегралу по времени входной величине, т.е. скорость изменения выходной величины пропорциональна входной величине

$$T \frac{dy}{dx} = K \cdot x,$$

где T – постоянная времени звена;

K – коэффициент передачи,

$$\text{передаточная функция } - W(p) = \frac{1}{Tp}.$$

Частотные характеристики:

$$\text{амплитудно-фазовая } - W(j\omega) = \frac{1}{Tj\omega};$$

$$\text{амплитудная } - k(\omega) = 1/T\omega;$$

$$\text{фазовая } - \varphi(\omega) = -\pi/2.$$

Примеры интегрирующего звена: емкость без самовыравнивания; паровой котел; электрический конденсатор (если за входную величину принять ток в цепи, а за выходную – напряжение на конденсаторе).

6. Запаздывающее звено

Его динамическая характеристика представлена на рис. 2.1е. Это звено, в котором выходная величина воспроизводит без искажения входную величину, но с отставанием по времени τ , называемого временем транспортного запаздывания,

$$\text{передаточная функция } - W(p) = k \cdot e^{-p\tau}.$$

Частотные характеристики:

$$\text{амплитудно-фазовая } - W(j\omega) = k \cdot e^{-j\omega\tau};$$

$$\text{амплитудная } - k(\omega) = k;$$

$$\text{фазовая } - \varphi(\omega) = -\omega\tau.$$

Примеры звена запаздывания: транспортеры, трубопроводы и др.

Задача 3 относится к разделу анализа и синтеза релейно-контактных схем. В основу аналитической формы записи релейных схем положены следующие обозначения:

A, B, ... X, Y ... – воспринимающие, промежуточные и исполнительные элементы (обычно их рабочие обмотки);

a, b, ... x, y, ... – замыкающие контакты;

$\bar{a}, \bar{b}, \dots \bar{x}, \bar{y}, \dots$ – размыкающие контакты;

a + b – параллельные соединения контактов;

a · b – последовательное соединение контактов;

1 – постоянно замкнутая цепь;

0 – постоянно разомкнутая цепь;

f – структурная формула контактов;

F – структурная формула всей схемы.

При анализе и упрощении структурных формул однотактных релейных устройств пользуются следствиями законов алгебры логики, основные из которых таковы:

$$a \cdot 1 = a,$$

$$a \cdot 0 = 0,$$

$$a \cdot a = a,$$

$$a + a \cdot b = a(1 + b) = a,$$

$$a + \bar{a} \cdot b = a + b,$$

$$a + \bar{a} = 1,$$

$$a + 1 = 1,$$

$$a + 0 = a,$$

$$a + a = a,$$

$$a \cdot (a + b) = a,$$

$$\bar{a} + a \cdot \bar{b} = \bar{a} + \bar{b},$$

$$\bar{a} \cdot \bar{a} = 0; \quad \bar{a} + a \cdot b = \bar{a} + b,$$

В дополнение к приведенным следствиям пользуются следующими теоремами.

Теорема 1. Если имеется схема соединения параллельно с замыкающим контактом x , то все контакты x , имеющиеся в схеме, можно заменить нулями, а контакты \bar{x} — единицами.

$$F = x + f(x, \bar{x}, y, \dots, W) = x + f(0, 1, y, \dots, W).$$

Если схема соединена параллельно с размыкающим контактом \bar{x} , то все контакты \bar{x} , имеющиеся в схеме, можно заменить нулями, а контакты x — единицами.

$$F = \bar{x} + f(x, \bar{x}, y, \dots, W) = \bar{x} + f(1, 0, y, \dots, W).$$

Пример 3.1. Упростить структурную формулу

$$F = x + a[(x + a)b + \bar{x}ab(c + b)].$$

Решение. 1. Применяем теорему 1:

$$F = x + a[(0 \cdot c + a)b + 1 \cdot a \cdot b(c + b)].$$

2. Производим дальнейшие упрощения.

Так как $0 \cdot c = 0$, $1 \cdot ab = ab$, то

$$F = x + a[ab + ab(c + b)].$$

Вынесем за скобки общий множитель ab :

$$F = x + aab[1 + (c + b)].$$

Но $1 + (c + b) = 1$, а $aaab = aab$. Поэтому

$$F = x + aab.$$

В результате упрощения получили схему, состоящую из трех контактов вместо одиннадцати.

Как видно, исходная схема имела «лишние» контакты и «лишний» релейный элемент c , который не влиял на работу схемы. Вычертив схемы, соответствующие исходной и упрощенной структуре, легко убедиться, что исполнительный элемент F получит питания только при условии замыкания контакта x или одновременного замыкания контактов a и b .

Теорема 2. Если какая-нибудь схема включена последовательно с замыкающим контактом x , то все контакты x , имеющиеся в схеме, можно заменить единицами, а контакты \bar{x} — нулями.

$$F = x \cdot f(x, \bar{x}, y, \dots, W) = x \cdot f(1, 0, y, \dots, W).$$

Если схема соединена последовательно с контактом \bar{x} , то все контакты \bar{x} , имеющиеся в схеме, можно заменить нулями, а контакты x — единицами.

$$F = \bar{x} \cdot f(x, \bar{x}, y, \dots, W) = \bar{x} \cdot f(1, 0, y, \dots, W).$$

Пример 3.2. Упростить структурную формулу

$$F = \bar{x} \cdot [(xc + a)b + \bar{x}a(a + b)].$$

Решение. 1. Применяем теорему 2.

$$\begin{aligned} F &= \bar{x} \cdot [(xc + a)b + \bar{x}a(a + b)] = \\ &= \bar{x} \cdot [(0 \cdot c + a)b + 1 \cdot a(a + b)] = \\ &= \bar{x} \cdot [ab + a(a + b)] = \bar{x}a(b + a + b); \\ F &= \bar{x}a \end{aligned}$$

Таким образом, схема способна выполнять те же функции при наличии двух контактов.

Для решения задачи 3 полезно разобрать примеры 11, 12 и 13, приведенные в Л-4, с. 22...24; Л-1, пример 4, с. 107.

Задача 4 рассматривает построение систем автоматизации с применением бесконтактных логических элементов путем перевода релейных (контактных) схем на бесконтактные.

Для решения этой задачи внимательно проработайте учебный материал в Л-1 на с. 101...113; Л-4, с. 129...137; 145...146 и разберите примеры на с. 146...148.

Пример 4.1. Требуется преобразовать релейную контактную схему в бесконтактную. В задаче 2 получена структурная формула:

$$F = \bar{a}b + c,$$

ей соответствует контактная схема.

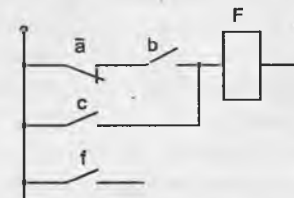


Рис. 4.1.

Выделим сигналы:

Входные: \bar{a} , b , c ; выходные — f ;

Промежуточных нет.

Этой структурной схеме соответствует бесконтактная схема из двух логических элементов: «запрет» и одного элемента ИЛИ, соответствующего сложению.

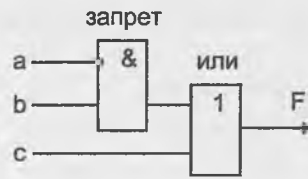


Рис. 4.2

Возможен и второй вариант выполнения схемы из трех логических элементов: НЕ, соответствующего черточке над элементом а; одного И, соответствующего умножению; одного элемента ИЛИ, соответствующего сложению:

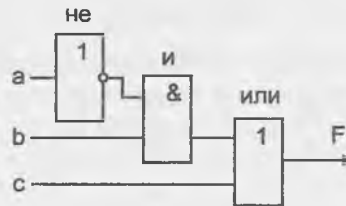


Рис. 4.3

Задача 5 относится к исследованию устойчивости линейных систем автоматического управления (САУ) по алгебраическим и частотным критериям. Алгебраические критерии применяют для исследования систем, процессы в которых описываются уравнениями не выше пятого – шестого порядка, а частотные критерии (графоаналитические) – для исследования систем, характеризуемых уравнениями любого порядка. Из алгебраических критериев наибольшее практическое применение получили критерии Рауса и Гурвица.

Критерий Гурвица представляет собой последовательность математических операций, осуществляемых при решении задачи, и является простым методом анализа характеристического уравнения системы.

$$G(p) = a_0 \cdot p^n + a_1 \cdot p^{n-1} + \dots + a_{n-1} \cdot p + a_n = 0$$

В практических расчетах устойчивость систем определяют по критерию устойчивости Гурвица.

Для устойчивых систем характеристические уравнения первого и второго порядка должны иметь положительные коэффициенты:

$$a_0 > 0; a_1 > 0 \text{ и } a_2 > 0.$$

Применительно к уравнениям более высоких порядков, кроме положительных значений коэффициентов $a_0 > 0; a_1 > 0; \dots a_{n-1} > 0$ и $a_n > 0$, необходимо соблюдение следующих соотношений:

для уравнения $G(p) = a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 = 0$
условие устойчивости

$$\Delta_2 = a_1 \cdot a_2 - a_0 \cdot a_3 > 0;$$

для уравнения $G(p) = a_0 p^4 + a_1 p^3 + a_2 p^2 + a_3 p + a_4 = 0$
условие устойчивости

$$\Delta_3 = a_3 (a_1 \cdot a_2 - a_0 \cdot a_3) - a_4 \cdot a_1^2 > 0.$$

Пример 5.1. Определить по критерию Гурвица, устойчива ли система с характеристическим уравнением

$$a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 = 0,$$

коэффициенты которого

$$a_0 = 1; a_1 = 1,48; a_2 = 4,6; a_3 = 4.$$

Решение:

1. При заданных коэффициентах уравнение имеет вид:

$$p^3 + 1,48p^2 + 4,6p + 4 = 0.$$

Коэффициенты данного уравнения

$$a_0 = 1 > 0; a_1 = 1,48 > 0; a_2 = 4,6 > 0; a_3 = 4 > 0.$$

2. Вычисляя определители, получим:

$$\Delta_1 = a_1 = 1,48 > 0$$

$$\Delta_2 = a_1 \cdot a_2 - a_0 \cdot a_3 = 1,48 \cdot 4,6 - 1 \cdot 4 = 6,8 - 4 = 2,8 > 0.$$

3. Так как все коэффициенты и определители положительны, то данная система устойчива.

Пример 5.2. Определить по критерию Гурвица, устойчива ли система с характеристическим уравнением

$$p^4 + 16p^3 + 32p^2 + 10p + 5 = 0.$$

Решение:

1. Коэффициенты данного уравнения

$$a_0 = 1 > 0; a_1 = 16 > 0; a_2 = 32 > 0; a_3 = 10 > 0; a_4 = 5 > 0 - \text{положительны.}$$

2. Вычисляя определители, получим:

$$\Delta_1 = a_1 = 16 > 0$$

$$\Delta_2 = a_1 \cdot a_2 - a_0 \cdot a_3 = 16 \cdot 32 - 1 \cdot 10 = 512 - 10 = 502 > 0.$$

$$\Delta_3 = a_3 (a_1 \cdot a_2 - a_0 \cdot a_3) - a_4 \cdot a_1^2 = 10 \cdot 502 - 5 \cdot 16^2 = 5020 - 1280 = 3740 > 0.$$

3. Так как все коэффициенты и определители положительны, то данная система устойчива.

Критерий Михайлова относится к графоаналитическим. Характеристическое уравнение любой степени можно представить в виде комплексного полинома

$$W(j\omega) = p(\omega) + jQ(\omega),$$

где $W(j\omega)$ – вектор, амплитуда и фаза которого являются функциями частоты ω . По критерию Михайлова для устойчивости системы необходимо и достаточно, чтобы при изменении угловой частоты ω от 0 до ∞ годограф, описываемый концом вектора $W(j\omega)$ на плоскости комплексного переменного, начинался на вещественной положительной полуоси $p(\omega)$ и, вращаясь только против часовой стрелки, нигде не обращаясь в нуль, проходил последовательно число квадрантов, которое равно степени n характеристического уравнения, повернувшись на угол $n \frac{\pi}{2}$ (см. Л-1, с. 210, рис. 80а).

При немонотонном изменении годографа система неустойчива (см. Л-4, рис. 80б).

Система находится в нейтральном состоянии, если годограф при некотором значении ω проходит через начало координат.

Пример 5.3. Определить по критерию Михайлова, устойчива ли система с характеристическим уравнением

$$p^3 + 1,48 p^2 + 4,6 p + 4 = 0.$$

Решение:

1. Для построения годографа Михайлова определяем вещественную и мнимую части функции

$$W(j\omega) = R(\omega) + jQ(\omega)$$

путем замены в характеристическом уравнении p на $j\omega$ и деления его на вещественную и мнимую части:

$$1 \cdot (j\omega)^3 + 1,48 \cdot (j\omega)^2 + 4,6 \cdot (j\omega) + 4 = 0.$$

Известно, что $j = \sqrt{-1}$; $j^2 = -1$; $j^3 = -j$, тогда уравнение примет вид

$$-j\omega^3 - 1,48\omega^2 + 4,6j\omega + 4 = 0$$

$$\text{и } R(\omega) = -1,48\omega^2 + 4$$

$$Q(\omega) = -\omega^3 + 4,6\omega.$$

Задавая различные значения ω , находим соответствующие им $P(\omega)$ и $Q(\omega)$ и их значения оформляем таблично.

ω	0	1,6	4	2,1	6	7	10	∞
$P(\omega)$	4	0	-19,7	-2,5	-49,3	-66,5	-144	$-\infty$
$Q(\omega)$	0	3,1	-45,6	0	-188,4	-311	-954	$-\infty$

При $\omega = 0$ $P(\omega) = 4;$ $Q(\omega) = 0$
 $P(\omega) = 0$ $\omega = 1,64;$ $Q(\omega) = 3,1$
 $Q(\omega) = 0$ $\omega = 2,1;$ $R(\omega) = -2,52$
 $\omega = 4$ $P(\omega) = -19,7;$ $Q(\omega) = -45,6$
 $\omega = 7$ $P(\omega) = -68,5;$ $Q(\omega) = -311$
 $\omega = 10$ $P(\omega) = -144;$ $Q(\omega) = -954$
 $\omega = \infty \textcircled{\omega}$ $P(\omega) = -\infty \textcircled{\omega};$ $Q(\omega) = -\infty \textcircled{\omega}$

По значениям $P(\omega)$ и $Q(\omega)$ строим годограф Михайлова.

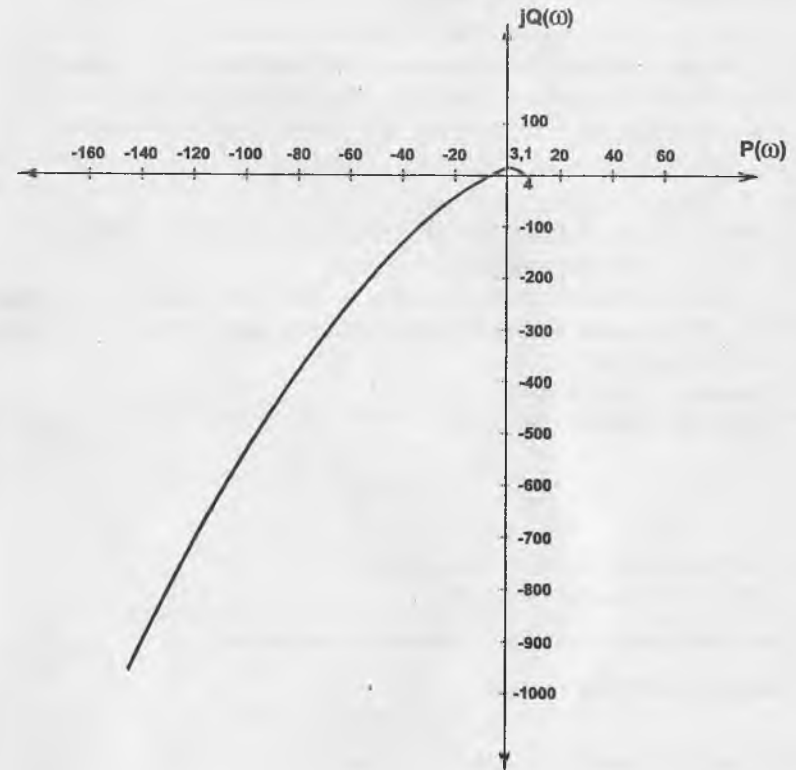


Рис. 5. К примеру 5.3

Заметно, что годограф повернулся против часовой стрелки на угол $\varphi = 3\frac{\pi}{2}$. Построенная кривая отвечает всем условиям критерия Михайлова и, следовательно, данная система устойчива.

Задача 6 относится к расчету надежности систем автоматики. Надежность определяют как свойство объекта выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в заданных пределах.

К количественным показателям надежности относятся: вероятность безотказной работы, интенсивность отказов, наработка на отказ, средний срок службы, среднее время восстановления, средний срок сохраняемости, коэффициент готовности объекта и другие.

Вероятность безотказной работы:

$$P(t) = N(t)/N_n,$$

где $N(t)$ – число изделий, безотказно проработавших до конца наработки, N_n – начальное число изделий или

$$P(t) = e^{-k \cdot \lambda t},$$

где k – коэффициент, учитывающий влияние окружающей среды:

$k = 1$ – для нормальных условий,

$k = 10 \dots 15$ – для стационарных установок в сельском хозяйстве,

$k = 25 \dots 30$ – для мобильных установок;

λ – **интенсивность отказов** (один в час), которая указывается в технической документации на изделие или принимается по таблицам показателей надежности;

t – время эксплуатации.

Средняя наработка на отказ

$$T_{cp} = \sum_{i=1}^n \frac{t_i}{n}; \quad T_{cp} = \frac{1}{\lambda},$$

где t_i – наработка до отказа i -го изделия;

n – число отказавших изделий.

Применительно к восстанавливаемым изделиям:

Параметр потока отказов

$$\omega = \Delta N / N_n \cdot \Delta t,$$

где ΔN – число отказавших изделий за время Δt ;

N_n – число изделий в партии;

Δt – интервал времени испытания.

Наработка на отказ

$$T_0 = \sum_{i=1}^n \Delta t_i / n,$$

где n – число отказов изделия за время испытаний (наблюдений);

Δt_i – время исправной работы изделия между $i-1$ и i -м отказами.

Среднее время восстановления

$$T_B = \sum_{i=1}^m \tau_i / m,$$

где m – число изделий, подвергавшихся восстановлению;

τ_i – длительность восстановления i -го изделия.

Коэффициент готовности

$$K_r = T_0 / (T_0 + T_B).$$

Вероятность безотказной работы автоматической системы зависит от надежности входящих в нее элементов системы, структурной схемы их соединения и степени резервирования.

С точки зрения надежности структурные схемы соединения элементов подразделяются на схемы: с последовательным, параллельным и смешанным соединением.

При последовательном соединении элементов вероятность безотказной системы

$$P(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t) = e^{-\sum_{i=1}^n k \lambda_i t},$$

где $P_i(t)$, λ_i – вероятность безотказной работы и интенсивность отказов i -го элемента.

При параллельном соединении m элементов:

$$P(t) = 1 - \prod_{j=1}^m [1 - P_j(t)],$$

При смешанном соединении n последовательных и m параллельных элементов:

$$P(t) = \prod_{i=1}^n \left\{ 1 - \prod_{j=1}^m [1 - P_j(t)] \right\},$$

Пример 6.1

Для принципиальной электрической схемы управления конвейерами (рис. 6) заданная вероятность безотказной работы $P_3(t) = 0,96$. Срок нормальной эксплуатации $t = 10000$ час. Коэффициент, учитывающий влияние окружающей среды, $k = 1$ (условия нормальные).

Требуется рассчитать действительную вероятность безотказной работы.

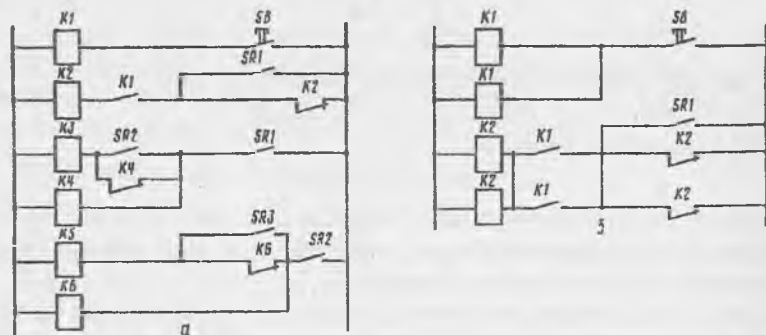


Рис. 6. Принципиальная электрическая схема управления конвейерами:
а – исходная; б – после резервирования ее узла

Решение:

1. Из схемы видно, что САУ с последовательным соединением элементов по надежности.
2. В соответствии с принципиальной схемой управления все элементы разобьем на три группы по числу разнотипных элементов (электро-механическое реле, механические контакты, кнопка «Пуск»).
3. Для каждого типа элементов по таблице 6.1. находим интенсивность отказов и заносим их в таблицу 6.2.

Таблица 6.1

Значение интенсивности отказов для некоторых изделий

Наименование изделий	$\lambda, 10^{-6} 1/ч$		
	верхний предел	среднее значение	нижний предел
1	2	3	4
Тепловые выключатели	0,400	0,1375	0,045
Диоды, ограничивающие перенапряжение	0,437	0,200	0,080
Держатели плавких предохранителей	0,100	0,020	0,008
Плавкие предохранители	0,820	0,500	0,300
Диоды:			
германиевые	0,380	0,300	0,230
селеновые	0,600	0,200	0,110
кремниевые	0,250	0,200	0,150
карбидно-кремниевые	0,550	0,020	0,009
Соединение пайкой	1,050	0,004	0,0001
Лампы накаливания	8,000	0,625	0,100
Контакты (закрывающие, размыкающие)	0,400	0,250	0,120
Серводвигатели	0,350	0,230	0,110
Потенциометры:			
сплавные	15,700	7,000	4,400
проволочные	2,050	1,400	0,137
Реле:			
общего назначения	0,480	0,250	0,110
мощные	4,100	0,300	0,150
с задержкой времени	0,784	0,390	0,156
тепловые	1,000	0,400	0,120
времени, электронные	1,800	1,200	0,250
электромеханические	1,570	0,500	0,750
Сопротивления:			
постоянные	0,888	0,030	0,005
большой мощности	0,065	0,028	0,009
прецизионные	–	0,004	–
проволочные	0,126	0,068	0,038
Ламповое штырьковое соединение	0,009	0,005	0,00021
Микровыключатели	0,500	0,250	0,090
Выключатели:			
кнопочные	0,110	0,063	0,043
поворотные, пакетные	0,660	0,175	0,118
конечные	0,261	0,161	0,114
Транзисторы:			
кремниевые	1,440	0,500	0,100
германиевые	–	0,300	–

Продолжение таблицы 6.1

1	2	3	4
Керамические конденсаторы	–	0,100	–
Интегральные схемы –ИС гибридные до 30 элементов	–	0,100	–
Триггер на полупроводниковых приборах	–	53,00	–
Триггер на интегральных схемах	–	0,10	–
Полусумматор на полупроводниковых приборах	–	39,0	–
Полусумматор на интегральных схемах	–	0,85	–
Специализированная ЭВМ, содержащая до 13 000 ИС	–	40,0	–
Манометры с трубчатой пружиной с электрическим, пневматическим сигналом МПД	–	100,0	–
Сильфонные и мембранные дифманометры ДММ-К	–	47,0	–
Регуляторы давления РД-8	–	26,0	–
Расходомеры гидравлического сопротивления РЭВ	–	250,0	–
Индукционные расходомеры ИР	–	110,0	–
Электрические регуляторы уровня ЭИУ	–	42,0	–
Анализаторы газов МГК-6	–	150,0	–
Измеритель влажности «Роса»	–	1460	–
Логометры, милливольтметры ЛСШПр-01-18, МСШПр-02-18	–	380,0	–
Уравновешенные мосты КСМ	–	105,0	–
Потенциометры КСП	–	105,0	–
Регулирующие электрические приборы КЭП	–	60,0	–
КЭП	–	80,0	–
Приборы системы:			
ЭАУ	–	220,0	–
УСЭППА	–	5,0	–
«Старт»	–	45,0	–
Исполнительные механизмы и устройства:			
КДУ	–	220,0	–
МИМ	–	110,0	–
Тензодатчики	–	10,0	–

Таблица 6.2

Наименование разнотипных элементов, входящих в принципиальную схему	Число однотипных элементов, n	Интенсивность отказа элементов i-го типа λ_i , (1/час)	Результирующая интенсивность λ_p , (1/час)
1. Электромеханическое реле	6	$0,5 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$
2. Механический контакт	9	$0,25 \cdot 10^{-6}$	$2,25 \cdot 10^{-6}$
3. Кнопка «Пуск»	1	$0,063 \cdot 10^{-6}$	$0,063 \cdot 10^{-6}$

4. Определяем результирующую интенсивность отказов всех элементов рассматриваемой схемы:

$$\lambda_{p1} = n_1 \cdot \lambda_1 = 6 \cdot 0,5 \cdot 10^{-6} = 3 \cdot 10^{-6} \text{ 1/час;}$$

$$\lambda_{p2} = n_2 \cdot \lambda_2 = 9 \cdot 0,25 \cdot 10^{-6} = 2,25 \cdot 10^{-6} \text{ 1/час;}$$

$$\lambda_{p3} = n_3 \cdot \lambda_3 = 1 \cdot 0,063 \cdot 10^{-6} = 0,063 \cdot 10^{-6} \text{ 1/час;}$$

$$\lambda_p = \sum_{i=1}^3 n_i \lambda_{pi} = 3 \cdot 10^{-6} + 2,25 \cdot 10^{-6} + 0,063 \cdot 10^{-6} = 5,313 \cdot 10^{-6} \text{ 1/час}$$

5. Определяем результирующую (действительную) вероятность безотказной работы элементов схемы

$$P_{рез}(t) = e^{-k \cdot \lambda_p \cdot t} = e^{-1 \cdot 5,313 \cdot 10^{-6} \cdot 10000} = 0,951.$$

Видно, что результирующая надежность системы получилась меньше ее заданного значения ($0,951 < 0,960$).

Для повышения надежности рассматриваемой схемы целесообразно применить метод нагруженного резервирования для узла, состоящего из двух магнитных пускателей k1 и k2.