

Министерство образования и науки Республики Казахстан
Карагандинский государственный технический университет

Утверждаю
Первый проректор

_____ А. Исагулов
" ____ " _____ 2007 г.

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДИСЦИПЛИНЫ
ПРЕПОДАВАТЕЛЯ**

по дисциплине Средства электроавтоматики
(код и наименование дисциплины)

для студентов специальности 050712 – Машиностроение
(шифр и наименование специальности)

Факультет Электромеханический

Кафедра Автоматизации производственных процессов

Предисловие

Учебно-методический комплекс дисциплины преподавателя разработан:

старшим преподавателем Эм Г.А.
(ученая степень, ученое звание Ф. И. О.)

Обсужден на заседании кафедры

Автоматизации производственных процессов

(наименование кафедры)

Протокол № _____ от « ____ » _____ 2007 г.

Зав. кафедрой _____ Брейдо И.В. « ____ » _____ 2007 г.
(подпись)

Одобрено методическим бюро факультета

Электромеханического

(наименование факультета)

Протокол № _____ от « ____ » _____ 2007 г.

Председатель _____ Умбеталин Т.С. « ____ » _____ 2007 г.
(подпись)

Согласован с кафедрой _____ Горные машины и оборудование

(наименование кафедры)

Зав. кафедрой _____ Климов Ю.И. « ____ » _____ 2007 г.
(подпись)

Рассмотрен УМС КарГТУ

Протокол № _____ от « ____ » _____ 2007 г.

1 Рабочая учебная программа

1.1 Сведения о преподавателе и контактная информация

Эм Геннадий Аркадиевич, старший преподаватель .

(фамилия, имя, отчество преподавателя, ученая степень, ученое звание, должность)

Кафедра Автоматизации производственных процессов находится в главном корпусе КарГТУ (адрес), аудитория 131, контактный телефон 56-51-84 (кафедра АПП), *e-mail: egaapp@kstu.kz*.

1.2 Трудоемкость дисциплины

Семестр	Количество кредитов	Вид занятий					Количество часов СРС	Общее количество часов	Форма контроля
		количество контактных часов			количество часов СРС	всего часов			
		лекции	практические занятия	лабораторные занятия					
7	3	30	–	15	45	90	45	135	Экзамен

1.3 Характеристика дисциплины

Дисциплина «Средства электроавтоматики» является элективной для студентов специальности 050712 – «Машиностроение» и в соответствии с учебным планом специальности входит в компонент по выбору.

1.4 Цель дисциплины

Целью изучения данной дисциплины является формирование специальных знаний, умений, навыков и компетенций в области электроавтоматики и применительно к сфере своей профессиональной деятельности.

1.5 Задачи дисциплины

К задачам дисциплины относятся:

- усвоение студентами принципов действия, основных характеристик, конструкций и условий применения средств электроавтоматики в гидравлических и пневматических системах;
- ознакомление с основными направлениями развития средств электроавтоматики и применением микропроцессоров и промышленных контроллеров в гидро- и пневмосистемах;
- приобретение навыков расчета элементов и устройств электроавтоматики, работы с различными приборами и техническими средствами электроавтоматики.

В результате изучения данной дисциплины студенты должны: иметь представление об:

об истории становления основных идей в области автоматики, телемеханики и связи;

о современном состоянии производства и путях его развития на перспективу;

знать:

фундаментальные принципы построения систем управления;

принципы организации и архитектуру автоматических и автоматизированных систем контроля и управления для объектов и процессов в различных отраслях промышленности;

перспективы и тенденции развития средств электроавтоматики;

правила, методы и средства подготовки технической документации;

уметь:

автоматизировать управление промышленными системами с использованием микропроцессорной техники гидропневмоавтоматики;

использовать методы проектирования и эксплуатации систем управления процессами и оборудованием;

приобрести практические навыки:

расчета элементов и устройств электроавтоматики и работы с различными приборами и техническими средствами электроавтоматики..

1.6 Пререквизиты

Для изучения данной дисциплины необходимо усвоение следующих дисциплин (с указанием разделов (тем)):

№ п\п	Дисциплина	Наименование разделов (тем)
1	Математика	Производная. Дифференциал. Неопределенный интеграл. Определенный интеграл. Теория рядов.
2	Физика	Электричество и магнетизм. Электродинамика. Физика колебаний и волновых процессов.
3	Электротехника	Электрические цепи постоянного тока. Одно- и трехфазные цепи переменного тока. Магнитные цепи. Трансформаторы. Машины постоянного тока. Асинхронные машины. Синхронные машины. Аппараты управления и защиты.
4	Информатика	Технические средства обработки информации, вычислительная техника и ее основное программное обеспечение, программные средства обработки информации.

1.7 Постреквизиты

Знания, полученные при изучении дисциплины «Средства электроавтоматики», используются при написании дипломной работы (проекта).

1.8 Содержание дисциплины

1.8.1 Содержание дисциплины по видам занятий и их трудоемкость

Наименование раздела (темы)	Трудоемкость по видам занятий, час.				
	лекции	практические	лабораторные	СРСП	СРС
1 Введение	2	–	–	2	2
2 Основные понятия, цели и принципы управления	4	–	–	4	4
3 Измерительные преобразователи	4	–	–	4	4
4 Технические средства управления электроавтоматики	6	–	–	6	6
5 Электромагнитные и электромашинные средства электроавтоматики	4	–	–	4	4
6 Исполнительные устройства электроавтоматики	4	–	–	4	4
7 Системы телемеханики	4	–	–	4	4
8 АСУ ТП	2	–	–	2	2
9 Лабораторная работа №1 Изучение основных свойств и возможностей виртуальных элементов и устройств автоматики ППП <i>Electronics Workbench</i>	–	–	3	3	3
10 Лабораторная работа №2 Исследование характеристик термоэлектрического преобразователя	–	–	3	3	3
11 Лабораторная работа №3 Изучение элементной базы, основных свойств и возможностей ПП LOGO! <i>Soft Comfort</i>	–	–	3	3	3
12 Лабораторная работа №4 Изучение типовых релейных схем автоматики	–	–	3	3	3
13 Лабораторная работа №5 Синтез и минимизация логических схем управления	–	–	3	3	3
ИТОГО:	30	–	15	45	45

1.9 Список основной литературы

1. Шишмарев В.Ю. Автоматика: Учеб.пособие. – М.: Изд. центр «Академия», 2005. – 288 с.
2. Шишмарев В.Ю. Типовые элементы систем автоматического управления: Учеб.пособие. – М.: Изд. центр «Академия», 2004. – 304 с.
3. Эм Г.А. Элементы систем автоматики: Учеб.пособие. Караганда, Изд-во КарГТУ, 2007. – 145 с.
4. Горбачев Г.Н., Чаплыгин Е.Е. Промышленная электроника: Учеб. для ВУЗов. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 320 с.: ил.
5. Гаврилов П.Д., Гимельшейн Л.Я., Медведев А.Е. Автоматизация

производственных процессов: Учебник для ВУЗов. – М.: Недра, 1985. – 215 с.

6. Тугевич В.Н. Телемеханика: Учеб. для ВУЗов. – М.: Высшая школа, 1985. – 423 с.: ил.

7. Ильин В.А. Телеуправление и телеизмерение: Учеб. для ВУЗов. – М.: Энергоиздат, 1982. – 560 с.: ил.

1.10 Список дополнительной литературы

8. Автоматизация производственных процессов в машиностроении: Учеб. для ВТУЗов / Н.М. Капустин, П.М. Кузнецов, А.Г. Схиртладзе и др.; Под ред. Н.М. Капустина. – М.: Высшая школа, 2007. – 415 с.

9. Электрификация стационарных установок шахт / С.А. Волотковский, Д.К. Крюков, Ю.Т. Разумный и др.; Под ред. Г.Г. Пивняка. – М.: Недра, 1990. – 399 с.: ил.

10. Попов В.М. Водоотливные установки: Справ. пособие. – М.: Недра, 1990. – 254 с.: ил.

11. Демченко Н.П. Технические средства передачи информации в системах управления угольных шахт. – М.: Недра, 1990. – 206 с.

12. Справочник по автоматизации котельных / Л.М. Файерштейн, Л.С. Этинген, Г.Г. Гохбойм. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 296 с.: ил.

13. Фешин Б.Н. Автоматизация промышленных установок и технологических комплексов: Учеб. пособие. – Караганда, КарГТУ, 2000. – 100 с.

14. Карлащук В.И. Электронная лаборатория на *IBM PC*. Лабораторный практикум на базе *Electronics Workbench* и *Matlab*. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 800 с.

1.11 Критерии оценки знаний студентов

Экзаменационная оценка по дисциплине определяется как сумма максимальных показателей успеваемости по рубежным контролям (до 50%) и итоговой аттестации (экзамену) (до 50%) и составляет значение до 100% в соответствии с таблицей.

Оценка по буквенной системе	Баллы	%-ное содержание	Оценка по традиционной системе
A	4,0	95-100	Отлично
A-	3,67	90-94	
B+	3,33	85-89	Хорошо
B	3,0	80-84	
B-	2,67	75-89	
C+	2,33	70-74	Удовлетворительно
C	2,0	65-69	
C-	1,67	60-64	

Оценка по буквенной системе	Баллы	%-ное содержание	Оценка по традиционной системе
D+	1,33	55-59	
D	1,0	50-54	
F	0	30-49	Неудовлетворительно
Z	0	0-29	

Рубежный контроль проводится на 5-й, 10-й и 15-й неделях обучения и складывается исходя из следующих видов контроля:

Вид контроля	%ое содержание	Академический период обучения, неделя															Итого, %	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
Посещаемость	7,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	7,5
Лаб. работы	15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	15
Модули	15	-	-	-	-	5	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	5	15
СРСП	7,5	-	-	1	0,5	1	-	-	1	0,5	1	1	-	1	0,5	-	7,5	
СРС	15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	15
Экзамен	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	40
Всего	100	2,5	2,5	3,5	3	8,5	2,5	2,5	3,5	3	8,5	3,5	2,5	3,5	3	7,5	100	

1.12 Политика и процедуры

При изучении дисциплины «Средства электроавтоматики» прошу соблюдать следующие правила:

1. Не опаздывать на занятия.
2. Не пропускать занятия без уважительной причины.
3. Во время лекционных, лабораторных и других занятий выполнять Правила внутреннего распорядка, касающиеся поведения студентов в учебных аудиториях.
4. В ходе внеаудиторной подготовки внимательно и вдумчиво изучать прослушанный накануне лекционный материал, систематически использовать рекомендуемую литературу и другие источники.
5. При подготовке к лабораторным занятиям предварительно ознакомиться с описанием лабораторной работы и используемого оборудования, изучить соответствующий тематике работы раздел теоретической части дисциплины, подготовить соответствующие бланки и заготовки таблиц и графиков.
6. При подготовке к СРСП предварительно изучить соответствующий раздел теоретической части дисциплины и ответить на поставленные преподавателем контрольные вопросы.
7. Активно участвовать в учебном процессе.

1.13 Учебно-методическая обеспеченность дисциплины

Ф.И.О. автора	Наименование учебно-методической литературы	Издательство, год издания	Количество экземпляров	
			в библиотеке	на кафедре
1	2	3	4	5
Основная литература				
Шишмарев В.Ю.	Автоматика: Учеб.пособие.	– М.: Изд. центр «Академия», 2005. – 288 с.	7	1
Шишмарев В.Ю.	Типовые элементы систем автоматического управления: Учеб.пособие.	– М.: Изд. центр «Академия», 2004. – 304 с.	7	1
Эм Г.А.	Элементы систем автоматики: Учеб.пособие	Караганда, Изд-во КарГТУ, 2007. – 145 с.	50	10
Горбачев Г.Н., Чаплыгин Е.Е.	Промышленная электроника: Учеб. для ВУЗов.	– М.: Энергоатомиздат, 1988. – 320 с.	31	2
Гаврилов П.Д., Гимельшейн Л.Я., Медведев А.Е.	Автоматизация производственных процессов: Учебник для ВУЗов	– М.: Недра, 1985. – 215 с.	54	3
Тутевич В.Н.	Телемеханика: Учеб. для ВУЗов	– М.: Высш. шк., 1985. – 423 с.	49	2
Ильин В.А.	Телеуправление и телеизмерение: Учеб. для ВУЗов	– М.: Энергоиздат, 1982. – 560 с.	83	2
Дополнительная литература				
Капустин Н.М., Кузнецов П.М., Схиртладзе А.Г. и др.	Автоматизация производственных процессов в машиностроении: Учеб. для ВТУЗов / Под ред. Н.М. Капустина.	– М.: Высшая школа, 2004. – 415 с.	4	–
Волотковский С.А., Крюков Д.К., Разумный Ю.Т. и др.	Электрификация стационарных установок шахт / Под ред. Г.Г. Пивняка	– М.: Недра, 1990. – 399 с.	12	2
Попов В.М.	Водоотливные установки: Справ. пособие	– М.: Недра, 1990. – 254 с.	250	2
Демченко Н.П.	Технические средства передачи информации в системах управления угольных шахт	– М.: Недра, 1990. – 206 с.	5	2

1	2	3	4	5
Файерштейн Л.М., Этинген Л.С., Гохбойм Г.Г.	Справочник по автоматизации котельных	– М.: Энерго- атомиздат, 1985. – 296 с.	3	–
Фешин Б.Н.	Автоматизация промышленных установок и технологических комплексов: Учеб.пособие	Караганда, КарГТУ, 2000. – 100 с.	41	10
Карлащук В.И.	Электронная лаборатория на <i>IBM PC</i> . Лабораторный практикум на базе <i>Electronics Workbench</i> и <i>Matlab</i> .	– М.: СОЛОН- Пресс, 2004.	5	2

2 График выполнения и сдачи заданий по дисциплине

Вид контроля	Цель и содержание задания	Рекомендуемая литература	Продолжительность выполнения	Форма контроля	Срок сдачи
Лабораторная работа №1 ЭСА	Изучение основных свойств и возможностей комплекса виртуальных элементов и устройств автоматики прикладного пакета программ <i>Electronics Workbench</i> (ППП <i>EWB</i>); приобретение первичных навыков их использования при создании, редактировании и анализе работы виртуальных моделей устройств автоматики.	[14, стр.12-57]	3 час.	Отчет по работе, устный опрос	3 неделя
Модуль №1	Контроль знаний по дисциплине и усвоения изученного материала. Ответы на контрольные вопросы по темам 1-3.	[1, стр.6-40; 2, стр.29-109; 3, стр.4-11, 34-106; 5, стр.5-8]	0,75 час.	Письменный и устный опрос	5 неделя
Лабораторная работа №2 ЭСА	Исследование основных характеристик термоэлектрических преобразователей, приобретение практических навыков их использования в промышленной автоматике.	[14, стр.95-107]	3 час.	Отчет по работе, устный опрос	6 неделя
Лабораторная работа №3 ЭСА	Изучение элементной базы, основных свойств и возможностей прикладной программы <i>LOGO! Soft Comfort</i> ; приобретение первичных навыков по использованию <i>LOGO! SoftComfort</i> .	[3, стр.115-123]	3 час.	Отчет по работе, устный опрос	8 неделя
Модуль №2	Контроль знаний по дисциплине и усвоения изученного материала. Ответы на контрольные вопросы по темам 4-5.	[2, стр.164-185, 222-297; 3, стр.97-114; 4, стр.9-103, 134-210; 5, стр.37-40]	0,75 час.	Письменный и устный опрос	9 неделя
Лабораторная работа №4 ЭСА	Изучение схемотехники типовых релейных схем автоматики; приобретение практических навыков анализа релейно-контактных схем автоматики.	[3, стр.106-115]	3 час.	Отчет по работе, устный опрос	10 неделя

Вид контроля	Цель и содержание задания	Рекомендуемая литература	Продолжительность выполнения	Форма контроля	Срок сдачи
Лабораторная работа №5ЭСА	Изучение основных принципов синтеза логических схем управления; приобретение практических навыков перевода релейно-контактных схем автоматики на цифровую элементную базу.	[4, стр.175-178]	3 час.	Отчет по работе, устный опрос	12 неделя
Модуль №3	Контроль знаний по дисциплине и усвоения изученного материала. Ответы на контрольные вопросы по темам 6-8.	[1, стр. 114-126; 2, стр.215-236; 3, стр.16-31, 103-118; 6, стр.3-120; 7; 11]	0,75 час.	Письменный и устный опрос	14 неделя

Примечание – номер рекомендуемой литературы, указанный в квадратных скобках, проставляется согласно нумерации списка основной и дополнительной литературы, предлагаемой в рабочей учебной программе (см. п.1).

3 Конспект лекций

Тема 1 Введение

План лекции

1. Цель и задачи дисциплины. Основные понятия и определения
2. Основные формы и этапы автоматизации
3. Краткий исторический обзор. Современное состояние и перспективы развития средств электроавтоматики

1. *Целью изучения* данной дисциплины является формирование специальных знаний, умений, навыков и компетенций применительно к конкретной сфере профессиональной деятельности.

К задачам дисциплины относятся:

- усвоение студентами принципов действия, основных характеристик, конструкций и условий применения средств электроавтоматики в гидравлических и пневматических системах;
- ознакомление с основными направлениями развития средств электроавтоматики и применением микропроцессоров, микроЭВМ и промышленных контроллеров в гидро- и пневмосистемах;
- приобретение навыков расчета элементов и устройств электроавтоматики, работы с различными приборами и техническими средствами электроавтоматики.

В результате изучения данной дисциплины *студенты должны:*

иметь представление об:

- об истории становления основных идей в области автоматизации, телемеханики и связи;
- о современном состоянии производства и путях его развития на перспективу;

знать:

- фундаментальные принципы построения систем управления;
- принципы организации и архитектуру автоматических и автоматизированных систем контроля и управления для объектов и процессов в различных отраслях промышленности;
- перспективы и тенденции развития средств электроавтоматики;
- правила, методы и средства подготовки технической документации;

уметь:

- автоматизировать управление промышленными системами с использованием микропроцессорной техники гидропневмоавтоматики;
- использовать методы проектирования и эксплуатации систем управления процессами и оборудованием;

приобрести практические навыки:

- расчета элементов и устройств электроавтоматики и работы с различными приборами и техническими средствами электроавтоматики.

Автоматика как научная дисциплина рассматривает принципы и технические средства управления производственными процессами без

непосредственного участия человека. В общем случае *управление* представляет собой такую организацию того или иного процесса, которая обеспечивает достижение определенных целей. Управление осуществляется с помощью специально организованных воздействий, прикладываемых к объекту управления и изменяющих его количественное и качественное состояние в соответствии с поставленной целью.

2. Технический уровень промышленности на современном этапе развития во многом определяется степенью *автоматизации*. Под *автоматизацией процесса* подразумевают автоматическое управление производственным процессом без непосредственного участия человека. Автоматизация является одним из главных направлений научно-технического прогресса и важным средством повышения эффективности производства.

Современное промышленное производство характеризуется ростом масштабов и усложнением технологических процессов, увеличением единичной мощности отдельных агрегатов и установок, применением интенсивных, высокоскоростных режимов, повышением требований к качеству продукции, безопасности персонала, сохранности оборудования и окружающей среды. Экономичное, надежное и безопасное функционирование сложных промышленных объектов может быть обеспечено только с помощью совершенных принципов и технических средств автоматизации.

Различные производственные процессы могут иметь различные уровни автоматизации. Так, при *частичной* автоматизации автоматизированы отдельные машины, механизмы и участки технологического процесса. При *комплексной* автоматизации автоматизируются основные участки производства. В случае же *полной* автоматизации должны быть автоматизированы все основные и вспомогательные участки технологического процесса, по сути автоматизации подвергается все технологическое оборудование, машины и механизмы.

Основными формами автоматизации являются:

технологическая сигнализация,

дистанционное управление,

автоматическая защита, блокировка и контроль,

автоматическое регулирование и управление.

Автоматическое регулирование и управление является наиболее сложной и совершенной формой автоматизации.

3. Начальным этапом развития средств автоматизации является создание простейших *автоматов*. Первые сведения об автоматах появились в начале нашей эры в работах *Герона Александрийского*, который создал пневмоавтомат для открывания дверей храма, автомат для продажи «священной» воды и др.

В средние века развивалась «*андроидная*» автоматика, когда искусные механики создавали автоматы, подражающие отдельным действиям человека. Развитие также получили различные автоматы на основе часовых механизмов.

На рубеже XVIII-XIX в.в., в эпоху промышленного переворота в Европе, начинается новый этап развития автоматики, связанный с ее внедрением в промышленность. К первым промышленным автоматическим устройствам относятся регулятор уровня воды парового котла *И.И.Ползунова* (1765 г.), регулятор скорости паровой машины *Дж.Уатта* (1784 г.), система программного управления от перфоленты ткацким станком *Жаккара* (1804-1808 г.г.) и т.д. В этот период начинает развиваться и теория автоматических систем. Формируется ряд важнейших принципов автоматики: *принцип регулирования – стабилизации по отклонению Ползунова-Уатта*, *принцип регулирования по возмущению Понселе-Чиколева*.

Впервые глубокое теоретическое исследование систем автоматического регулирования с учетом нелинейных факторов было выполнено английским физиком *Максвеллом*, который получил условия устойчивости из анализа линеаризованных уравнений и поставил перед математиками проблему определения устойчивости линейных систем произвольной размерности. Следующий этап в исследованиях автоматических систем связан с именами *И.А.Вышнеградского*, *А.Стодолы*, *Э.Рауса*, *А.Гурвица*, *Н.Е.Жуковского*, *А.М.Ляпунова*, *П.Л.Чебышева*, *В.А.Стеклова*, *А.Н.Крылова*.

Бурное развитие науки и техники в XX веке обусловило и качественный скачок как в исследованиях автоматических систем (*Х.Найквист*, *А.В.Михайлов*, *В.В.Солодовников*, *А.Пуанкаре*, *В.Оппельт*, *А.Н.Колмогоров*, *В.С.Пугачёв*, *Н.Винер*, *Р.Беллман*, *Р.Калман*, *И.А.Вознесенский*, *Н.Н.Лузин* и др.), так и в развитии элементов и устройств автоматизации (полупроводниковые приборы, технологии интегральной микросхемотехники, ЭВМ, микропроцессорные и компьютерные средства автоматизации и т.д.).

Современными тенденциями развития в автоматизации технологических комплексов являются широкое применение ЭВМ (промышленных контроллеров, компьютеров) для управления, создание машин и оборудования со встроенными микропроцессорными средствами измерения, контроля и регулирования, переход на *децентрализованные (распределенные) структуры автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП)* с микроконтроллерами, внедрение человеко-машинных систем, автоматизированное проектирование систем управления и др.

Рекомендуемая литература

1. Гаврилов П.Д., Гимельштейн Л.Я., Медведев А.Е. Автоматизация производственных процессов: Учебник для ВУЗов. – М.: Недра, 1985. С.5-8.
2. Эм Г.А. Элементы систем автоматики: Учеб. пособие. – Караганда, КарГТУ, 2007. С.4-11.

Контрольные задания для СРС [1-3]

1. Обзор развития и современное состояние технических средств электроавтоматики

Тема 2 Основные понятия, цели и принципы управления

План лекции

1. Основные понятия и определения
2. Функциональная структура систем автоматики. Основные принципы управления и регулирования
3. Классификация элементов и средств электроавтоматики и задачи, решаемые ими
4. Типизация, унификация и агрегатирование средств электроавтоматики

1. Принципиальными особенностями систем автоматики являются наличие цели их функционирования и способность изменять свое состояние под влиянием различных воздействий. Под *воздействием* понимают такое влияние окружающей среды или одной части системы на другую, при котором происходят изменения в части, испытывающей это влияние. Внешние воздействия, которые существенно влияют на состояние системы, называют *входными*, а составные части системы, к которым приложены эти воздействия, называют входами системы.

Системы автоматики классифицируют по ряду признаков, характеризующих различные их особенности:

- 1) по типу контура управления – разомкнутые и замкнутые;
- 2) по принципу управления – по отклонению, по возмущению, комбинированные и адаптивные;
- 3) по характеру изменения задания – стабилизирующие, программные, следящие;
- 4) по характеру сигнала – непрерывные и дискретные (импульсные, релейные, цифровые);
- 5) по характеру реакции на возмущение – статические и астатические;
- 6) по виду вспомогательной энергии – электрические, пневматические, гидравлические и комбинированные.

2. Рассмотрим основные принципы построения систем автоматики, используя их функциональные и принципиальные схемы. На функциональных блок-схемах составные части (блоки) системы представляются прямоугольниками кружками, а их взаимодействие – линиями со стрелками. Блоки обозначаются буквами (словами) согласно выполняемым ими функциям, которые, как правило, соответствуют рассмотренным ранее элементам.

Простейшими системами управления являются *разомкнутые САУ*.

Они обеспечивают заданный закон изменения состояния объекта управления (включение, выключение, изменение режима работы и др.) без контроля результатов управления. Закон изменения состояния объекта управления во времени называется *программой управления*, которая размещается в *здатчике* (задающем элементе). Здатчик (рис.1) в свою очередь формирует значение x_3 управляемой величины x объекта и, таким образом, закон ее изменения во времени. При этом под управляемой величиной понимают параметр, характеризующий технологический процесс,

например, угловую скорость и развиваемый момент электропривода технологической машины.

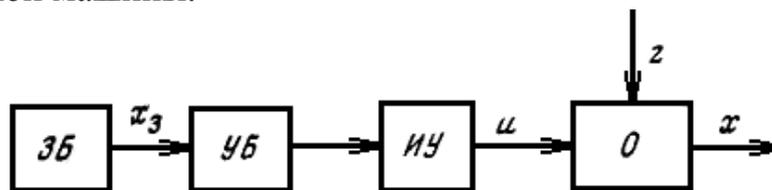


Рисунок 1 – Общая функциональная схема разомкнутой системы автоматического управления

Управляющий блок воспринимает сигнал задатчика, преобразует его и выдает командный сигнал на вход исполнительного устройства, которое вырабатывает управляющее воздействие, прикладываемое ко входу объекта. Последнее изменяет количество энергии или вещества, подводимого к объекту, обеспечивая этим изменение его состояния в соответствии с заданием.

Воздействия z , изменяющиеся при работе системы и нарушающие требуемую функциональную связь между x_3 и x , называются *возмущающими*, или *возмущениями*. Они делятся на основные и второстепенные (помехи). Основные возмущающие воздействия значительно влияют на управляемый процесс. Они, как правило, приложены к объекту. К ним относятся нагрузка объекта управления, влияние температуры, влажности и т.п. *Помехи* – это многочисленные воздействия, слабо влияющие на ход процесса. К ним можно отнести колебания напряжения в сети переменного тока, изменения сопротивлений цепей, воздушные зазоры и упругие деформации в деталях и т.п. Помехи могут воздействовать на часть или на все элементы системы.

Недостаток разомкнутых САУ – малая точность выполнения заданного закона управления, поскольку возмущающие воздействия не компенсируются. Поэтому такие системы в основном применяют для автоматизации процессов пуска и останова машин и механизмов, когда не требуется точное выполнение заданного закона изменения скорости (насосы, вентиляторы, конвейеры, компрессоры и др.), а также для обеспечения требуемой последовательности рабочих операций.

Замкнутые САУ строятся на основе принципа обратной связи, сущность которого заключается в том, что управляющее воздействие ставится в зависимость от того результата, который оно вызывает. Под *обратной связью* понимают устройство, осуществляющее передачу воздействия с выхода системы или ее элемента на их входы. Такие связи (их может быть несколько в одной системе) реализуются на основе измерительных устройств.

Обратные связи могут быть жесткими и гибкими, положительными и отрицательными. Жесткая обратная связь действует постоянно, т. е. в переходных и установившихся режимах работы системы, а гибкая — только в переходных режимах. Сигнал положительной обратной связи суммируется с входным сигналом системы (элемента), а сигнал отрицательной — вычитается из входного сигнала.

Замкнутая САУ, в которой управляющее воздействие вырабатывается в

функции отклонения действительного значения управляемой величины от ее заданного значения, называется *системой автоматического регулирования (САР)*. Управление в таких системах называют *регулированием*, управляющее устройство – *регулятором*, а управляемую величину – *регулируемой величиной*.

В САР, представленной на рис.2, а, реализован принцип *управления по отклонению*.

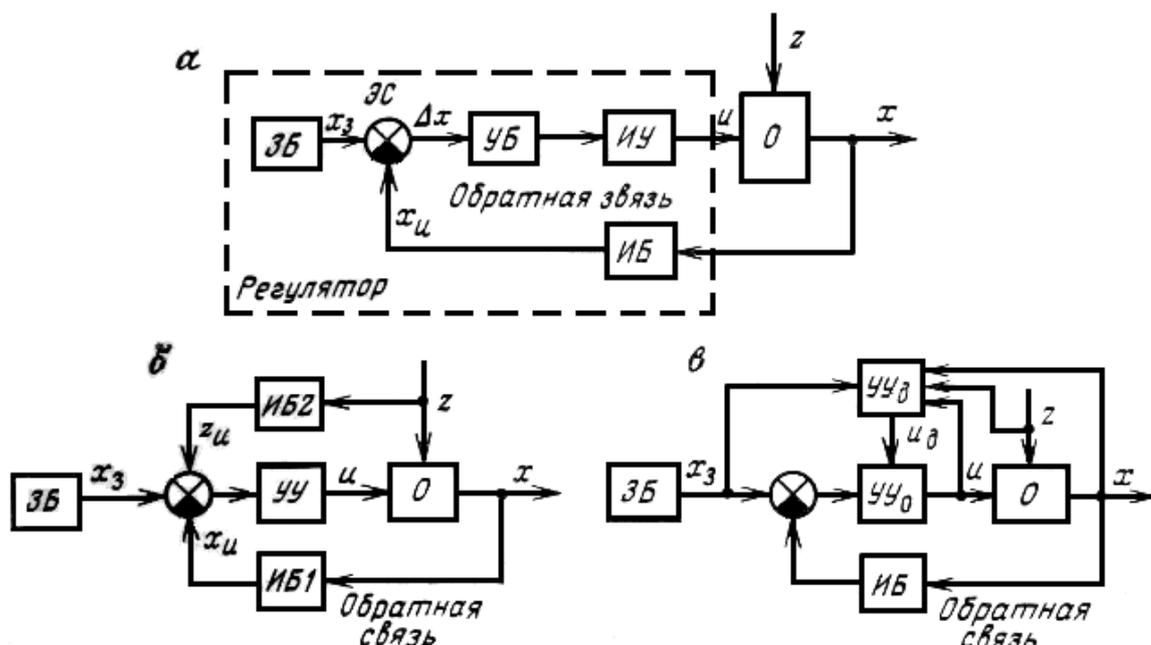


Рисунок 2 – Функциональные схемы замкнутых САУ:

а — САР по отклонению; б — комбинированная; в — адаптивная

Блок *ИБ* измеряет регулируемую величину x , преобразует ее в величину $x_{п}$, подобную выходной величине x_3 задатчика *ЗБ* и подает на элемент сравнения *ЭС*, который определяет отклонение регулируемой величины от заданного значения

$$\Delta x = x_3 - x_{п}.$$

Сигнал Δx после преобразования в управляющем блоке *УБ* передается на исполнительное устройство, котор

ое формирует управляющее воздействие

$u = f(\Delta x)$, прикладываемое к регулирующему органу объекта (задвижке, клапану и др.) и обеспечивает тем самым приближение регулируемой величины к заданному значению. Регулирующий орган может отсутствовать, если весь поток энергии или вещества поступает в объект от исполнительного устройства, например, от генератора к электродвигателю.

Для САР характерно наличие отрицательной обратной связи и замкнутой цепи передачи воздействий: *УБ — ИУ — О — ИБ — ЭС — УБ*. Благодаря этому они способны обеспечить высокую точность управления.

САР, имеющие задание поддерживать управляемую величину на постоянном уровне $x_3 = const$, называются *автоматическими стабилизирующими системами*. К ним относятся, например, системы автоматической стабилизации температуры подаваемого в шахту воздуха,

давления в пневмосети и др.

Замкнутые системы, изменяющие управляемую величину в соответствии с заранее заданной функцией какого-либо параметра (времени, пути и т.д.), называются *программными автоматическими системами*. К таким системам относится, например, САР скорости шахтной подъемной машины.

Системы, имеющие задание изменять управляемую величину в соответствии с действующей на входе системы переменной величиной, закон изменения которой заранее неизвестен, называются *следящими автоматическими системами*. Примером таких систем является САР производительности компрессорной станции, обеспечивающая производство сжатого воздуха для пневмосети в соответствии с его потреблением, имеющим случайный характер изменения во времени.

Автоматические системы управления высокой точности обычно строят по *принципу комбинированного управления* (рис.2, б). В таких системах воздействие вырабатывается управляющим устройством УУ в функции отклонения и возмущения. Последнее измеряется блоком ИБ₂ и подается на вход системы в виде сигнала, который суммируется с заданием x_3 , компенсируя тем самым вредное влияние возмущения на управляемую величину x .

Успешное развитие кибернетики позволило применить в автоматических системах новый принцип управления, называемый *принципом адаптации (самонастраивающиеся системы)*. Системы, использующие этот принцип способны обеспечить высокое качество управления объектами с переменными свойствами и условиями функционирования, например, буровыми установками, у которых в процессе работы затупляются режущие элементы рабочих органов, изменяются физико-механические свойства горного массива, масса подвижных частей и др.

Адаптивная (самонастраивающаяся) САУ (рис.2, в) содержит дополнительное управляющее устройство УУ_д, которое вырабатывает корректирующее воздействие u_d , используя информацию об изменении управляемой величины, задающего и возмущающего воздействия. Сигнал ил вызывает необходимые изменения структуры и параметров основного управляющего устройства УУ₀, т. е. осуществляет самонастройку системы в процессе ее функционирования.

В зависимости от характера реакции на возмущения САУ делятся на *статические* и *астатические*.

К *статическим* САУ относятся системы, у которых установившееся значение управляемой величины зависит от величины возмущающего воздействия так, что отклонение от задания пропорционально величине последнего. В такой системе всегда имеется, так называемая, *статическая погрешность*.

В *астатических системах* установившееся значение управляемой величины не зависит от величины возмущающего воздействия и статическая погрешность равна нулю.

3. Любой процесс управления можно разделить на четыре составляющих:

1) получение информации о цели управления или задание величины

параметров состояния объекта;

2) получение информации о состоянии объекта;

3) переработка полученной информации и принятие решения, т.е. формирование сигнала управления;

4) исполнения решения – реализация управляющего воздействия, соответствующего выработанному сигналу управления.

Соответственно для реализации автоматического управления необходимо иметь элементы – *задающие, измерительные, управляющие (регулирующие) и исполнительные*.

Под *элементом* системы управления понимают составную, относительно самостоятельную ее часть, предназначенную для выполнения какой-либо определенной функции.

Задающим элементом (задатчиком), называется элемент, вырабатывающий сигналы, соответствующие цели управления. В качестве задающего устройства могут использоваться простейшие реостатные задатчики, контактные командоаппараты, бесконтактные программные устройства и др.

Измерительный элемент (измерительный преобразователь) служит для контроля состояния объекта, его выходных параметров, а также параметров внешней среды и передачи этой информации управляющему элементу системы.

Управляющий (регулирующий) элемент в простейшем случае вырабатывает сигнал управления (регулирования), пропорциональный отклонению управляемой (регулируемой) величины от заданного значения. Обычно управляющий элемент (регулятор) имеет весьма сложное строение и может рассматриваться как система, состоящая из других элементов (усилителей, фильтров, суммирующих устройств и др.).

Исполнительные элементы служат для непосредственного изменения состояния объекта управления. К исполнительным элементам относятся *исполнительные механизмы и регулирующие органы*, которые конструктивно могут быть объединены в едином изделии или собираются из индивидуально выпускаемых блоков. В некоторых случаях исполнительный элемент может состоять из одного блока, выполняющего функции исполнительного механизма.

Под *исполнительным механизмом* в общем случае подразумевают блок, преобразующий входной управляющий сигнал от регулирующего устройства в сигнал, который через соответствующую связь осуществляет воздействие на *регулирующий орган* или непосредственно на объект регулирования. Как правило, это весьма мощные устройства, например электродвигатели, гидравлические и пневматические исполнительные механизмы.

Регулирующим органом называют блок исполнительного элемента, с помощью которого оказывается регулирующее воздействие на объект регулирования. Регулирующие органы по конструкции представляют собой устройства, монтируемые непосредственно в технологические объекты. Так, для трубопроводов используют различные клапаны, заслонки, шиберы и т.п.

Управление регулирующими органами осуществляется исполнительными механизмами, выполняющими функции их приводов.

4. *Типизация* – это обоснованное сведение многообразия избранных типов конструкций машин, оборудования, приборов и устройств автоматизации к небольшому числу наилучших с какой-либо точки зрения образцов, обладающих *существенными качественными признаками*. Например, типизация технологических процессов заключается в выборе для внедрения из всей массы действующих технологий только наиболее производительных и рентабельных. В процессе типизации разрабатываются и устанавливаются типовые конструкции, содержащие *общие* для ряда изделий (или их составных частей) базовые элементы и конструктивные параметры, в том числе перспективные, учитывающие последние достижения науки и техники. Процесс типизации эквивалентен группированию, классификации некоторого исходного, заданного множества элементов в ограниченный ряд типов с учетом реально действующих ограничений, целей типизации; другими словами, *типизация является оптимизационной задачей с ограничениями*.

Типизация предшествует *унификации* – приведению различных видов продукции и средств ее производства к рациональному минимуму типоразмеров, марок, форм, свойств и т.п. Унификация вносит единообразие в основные параметры типовых решений технических средств, необходимое для их совместного использования в АСУ ТП, и устраняет неоправданное многообразие средств одинакового назначения и разнотипность их частей. Одинаковые или разные по своему функциональному назначению устройства, их блоки, модули, но являющиеся производными от одной базовой конструкции, образуют *унифицированный ряд*.

Унификация позволяет за счет применения общих и типовых конструктивных решений использовать принцип *агрегатирования*, создавать на одной основе различные модификации изделий, выпускать технические средства одинакового назначения, но с различными техническими характеристиками, удовлетворяющими потребностям того или иного производства, технологии. Такие изделия одного типа, но с различными техническими параметрами образуют *параметрический ряд*.

Агрегатирование предусматривает разработку и использование ограниченной номенклатуры типовых унифицированных модулей, блоков, устройств и *унифицированных типовых конструкций (УТК)* для построения множества проблемно-ориентированных установок и комплексов, технические параметры которых в значительной степени удовлетворяют потребностям целям.

Типизация, унификация и агрегатирование являются основополагающими принципами построения *агрегатных комплексов* для комплексной автоматизации производства и, в частности, при проектировании и внедрении АСУ технологическими объектами и агрегатами.

Существенное сокращение числа различных функциональных устройств достигается обеспечением их *совместимости* в АСУ ТП. Концепция

совместимости, включающая в себя требования *информационного, энергетического, конструктивного, метрологического и эксплуатационного сопряжений* между различными изделиями, основана на последовательной унификации и стандартизации свойств и характеристик изделий.

Применительно к информационным связям термин «унификация» означает введение ограничений, налагаемых на сигналы, несущие сведения о контролируемой величине или команде. Унифицируются виды носителей нормированной информации (электрические – сигналы, коды и согласование входов и выходов; вещественные – с механическим носителем на бланках для записи и печати, с магнитными носителями). Определяется также способ представления информации в устройствах автоматизации – аналоговый и дискретный.

Конструктивная совместимость изделий предусматривает прежде всего унификацию присоединительных размеров отдельных узлов, деталей, модулей, введение типовых конструкций, создание единой элементной базы, разработку общих принципов конструирования приборов. При конструировании устройств автоматизации рекомендуется *блочно-модульный принцип* построения изделий. Применение этого принципа делает приборы более универсальными, позволяет использовать при их создании рациональный минимум конструктивных элементов (сокращается количество наименований деталей). Вместе с тем возможность простой и легкой замены отдельных узлов позволяет модернизировать эти приборы в процессе эксплуатации, повышает их ремонтпригодность и расширяет круг решаемых ими задач (путем различных сочетаний функциональных звеньев и введением специализированных деталей). Блочно-модульное построение приборов позволяет широко применять при их изготовлении современную технологию и максимально использовать кооперацию и специализацию предприятий.

Стандартизируются также общие технические требования к устройствам автоматизации и условиям их работы в АСУ ТП. Ввиду многообразия производств и технологических процессов важное место отводится разделению приборов и устройств по группам условий эксплуатации. По защищенности от воздействия окружающей среды устройства автоматизации подразделяются на следующие исполнения: *обыкновенное, пылезащищенное, взрывозащищенное, герметическое, водозащищенное, защищенное от агрессивной среды*. В зависимости от предполагаемых механических воздействий также предусматриваются *обыкновенное* и *виброустойчивое* исполнение.

Нормируются *метрологические характеристики* изделий (виды погрешностей, методы нормирования погрешностей отдельных устройств, погрешностей совокупности звеньев и систем, классы точности и методы аттестации). Этим достигается *метрологическая совместимость* различных технических средств АСУ ТП.

Рекомендуемая литература

1. Шишмарев В.Ю. Автоматика: Учеб.пособие. – М.: Изд. центр

«Академия», 2005. С.6-40.

2. Эм Г.А. Элементы систем автоматики: Учеб. пособие. – Караганда, КарГТУ, 2007. С.4-11.

3. Гаврилов П.Д., Гимельшейн Л.Я., Медведев А.Е. Автоматизация производственных процессов: Учебник для ВУЗов. – М.: Недра, 1985. С.5-8.

Контрольные задания для СРС [1-3]

1. Основные принципы управления и регулирования

Тема 3 Измерительные преобразователи

План лекции

1. Общие сведения

2. Датчики общепромышленного назначения параметрические

3. Датчики общепромышленного назначения генераторные

1. Комплексная автоматизация технологических процессов предполагает контроль и измерение различных физических величин, характеризующих состояние объекта управления (регулирования) – механических, тепловых, оптических и других неэлектрических. Преимущества же электроизмерительных приборов и преобразователей очевидны. Этим обстоятельством объясняется широкое распространение *первичных измерительных преобразователей (датчиков)*, предназначенных для измерений неэлектрических величин и преобразования их в электрические.

Первичные измерительные преобразователи чрезвычайно разнообразны по принципу действия, устройству, видам входного и выходного сигналов, функциональному назначению, метрологическим и эксплуатационным характеристикам.

В зависимости от выходного параметра первичные измерительные преобразователи разделяют на *параметрические* и *генераторные*. Их классифицируют также по физической природе явлений, лежащих в основе их работы, по принципу действия и др.

2. Выходной величиной в параметрических преобразователях является параметр электрической цепи – электрическое сопротивление или его составляющие (R, L, C). Для использования параметрического преобразователя необходим дополнительный источник питания, обеспечивающий образование выходного сигнала преобразователя.

К наиболее часто применяемым параметрическим преобразователям относятся *реостатные, тензочувствительные (тензорезисторы), термочувствительные (терморезисторы или термометры сопротивления), индуктивные, емкостные, оптоэлектронные (фоторезисторы, фотодиоды и др.), ионизационные* и др.

Принцип действия *реостатных преобразователей* основан на изменении электрического сопротивления проводника под влиянием входной величины – механического перемещения. Реостатный преобразователь (рис.1) представляет собой реостат, подвижный контакт которого перемещается под

действием измеряемой неэлектрической величины. Обмотку преобразователя изготавливают из сплавов (платина с иридием, константан, нихром, фехраль и др.).

Подобные преобразователи обладают статической характеристикой преобразования со ступенчатым характером, поскольку сопротивление измеряется скачками, равными сопротивлению одного витка, что вызывает погрешность

$$\gamma = \frac{\Delta R}{R},$$

где ΔR – сопротивление одного витка;

R – полное сопротивление преобразователя.

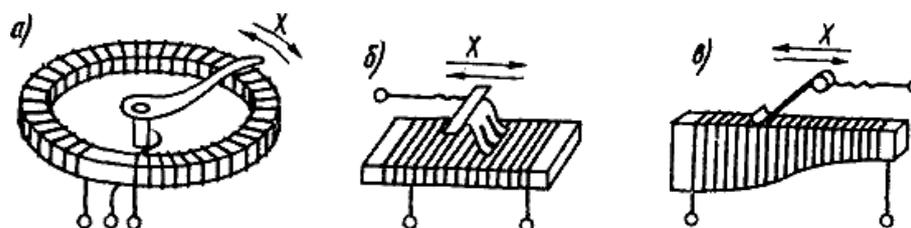


Рисунок 1 – Реостатные преобразователи для угловых и линейных перемещений

Эта погрешность отсутствует в *реохордных* преобразователях, в которых щетка скользит вдоль оси проволоки.

Для получения нелинейной функции преобразования применяют *функциональные* реостатные преобразователи. Нужный характер преобразования часто достигается профилированием каркаса преобразователя (рис.1, в).

Достоинства реостатного преобразователя: относительная простота конструкции, возможность получения высокой точности преобразования и значительных по уровню выходных сигналов. Основной недостаток – наличие скользящего контакта.

Тензоэффект, положенный в основу работы *тензорезисторов*, заключается в измерении активного сопротивления проводника (полупроводника) под действием вызываемого в нем механического напряжения и деформации.

Если проволоку подвергнуть механическому воздействию, например, растяжению, то сопротивление ее изменится. Относительное изменение сопротивления проволоки

$$\Delta R/R = S \cdot \Delta l/l,$$

где S – коэффициент тензочувствительности;

$\Delta l/l$ – относительная деформация проволоки.

Изменение сопротивления проволоки при механическом воздействии на нее объясняется изменением геометрических размеров (длины, диаметра) и удельного сопротивления материала.

Тензочувствительные проволочные преобразователи представляют собой тонкую зигзагообразно уложенную и приклеенную к подложке проволоку. Преобразователь устанавливают таким образом, чтобы направление

ожидаемой деформации совпадало с продольной осью проволочной решетки. В качестве материала для преобразователя обычно используют константовую проволоку (у константана – малый температурный коэффициент сопротивления) и для подложки – тонкую бумагу (0,03...0,05 мм) и плёнку лака либо клея (БФ-2, БФ-4, бакелитовый и др.).

Распространение также получили *фольговые преобразователи*, у которых вместо проволоки используется фольга, и *пленочные тензорезисторы*, получаемые путем возгонки тензочувствительного материала с последующим осаждением его на подложку.

Достоинства тензорезисторов: линейность статической характеристики преобразования, простота конструкции и малые габариты. Основным недостатком – низкая чувствительность.

В тех случаях, когда требуется высокая чувствительность, находят применение *полупроводниковые* тензочувствительные преобразователи (поликристаллические из порошкообразного полупроводника и монокристаллические из кристалла кремния). Поскольку чувствительность полупроводниковых тензорезисторов в десятки раз выше, чем у металлических, и, кроме того, интегральная технология позволяет в одном кристалле кремния формировать одновременно как тензорезисторы, так и микроэлектронный блок обработки, то в последние годы получили преимущественное развитие интегральные полупроводниковые тензочувствительные преобразователи. Такие элементы реализуются либо по технологии диффузионных резисторов с изоляцией их от проводящей кремниевой подложки p-n-переходами – технология «кремний на кремнии», либо по гетероэпитаксиальной технологии «кремний на диэлектрике» на стеклокерамике, кварце или сапфире. Для тензочувствительных преобразователей, особенно полупроводниковых, существенно влияние температуры на их упругие и электрические характеристики, что требует применения специальных схем температурной компенсации погрешностей (в частности, с этой целью в расширенной схеме *тензомоста* используются компенсационные резисторы и терморезисторы). Особенно широкое применение в изготовлении *измерительных преобразователей давления* в силу своих высоких механических, изолирующих и теплоустойчивых качеств

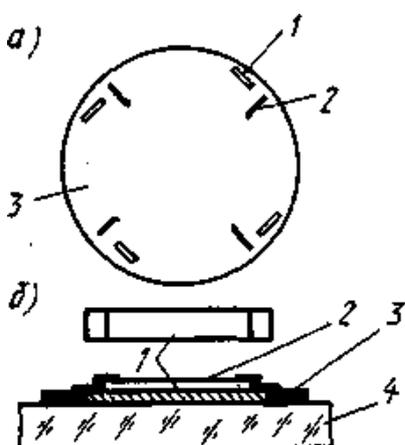


Рисунок 2

получила технология КНС – «кремний на сапфире».

Совершенствование технологии изготовления полупроводниковых тензорезисторов создало возможность изготавливать тензорезисторы непосредственно на кристаллическом элементе, выполненном из кремния или сапфира. Упругие элементы кристаллических материалов обладают упругими свойствами, приближающимися к идеальным. Сцепление тензорезистора с мембраной за счет молекулярных сил позволяет отказаться от использования клеящих материалов,

улучшить метрологические характеристики преобразователей. На рис. 2, а показана сапфировая мембрана 3 с расположенными на ней однополосковыми тензорезисторами p -типа с положительной 1 и отрицательной 2 чувствительностями. Положительной чувствительностью обладает тензорезистор, у которого отношение $\frac{\Delta R}{R} > 0$, если же $\frac{\Delta R}{R} < 0$ – чувствительность отрицательна.

Структура однополоскового тензорезистора приведена на рис.3.2, б. Здесь: 1 – тензорезистор; 2 – защитное покрытие; 3 – металлизированные токоведущие дорожки; 4 – упругий элемент преобразователя (сапфировая мембрана). Тензорезисторы можно располагать на мембране так, что при деформации они будут иметь разные по знаку приращения сопротивления. Это позволяет создавать мостовые схемы, в каждое из плеч которого включаются тензорезисторы с соответствующим значением $\frac{\Delta R}{R}$ и даже термокомпенсационные элементы.

Тензорезисторы применяют для измерения деформаций и других неэлектрических величин – усилий, давлений, моментов и т.п.

Принцип действия *терморезистора* основан на зависимости электрического сопротивления проводников или полупроводников от температуры. По режиму работы терморезисторы различают *перегревные* и *без преднамеренного перегрева*. Перегревные используют для измерения скорости, плотности, состава среды и др. В перегревных преобразователях электрический ток вызывает перегрев, зависящий от свойств среды. Последние применяются для измерения температуры окружающей среды.

Распространение получили терморезисторы, выполненные из медной или платиновой проволоки. Стандартные *платиновые терморезисторы* применяют для измерения температуры в диапазоне от -260 до $+1100$ °С, *медные* – в диапазоне от -200 до $+200$ °С (ГОСТ 6651–78). Низкотемпературные платиновые терморезисторы (ГОСТ 12877–76) применяют для измерения температуры в пределах от -261 до -183 °С.

На рис. 3, а показано устройство платинового терморезистора. В каналах керамической трубки 2 расположены две (или четыре) секции спирали 3 из платиновой проволоки, соединенные между собой последовательно. К концам спирали припаивают выводы 4, используемые для включения терморезистора в измерительную цепь. Крепление выводов и герметизацию керамической трубки производят глазурью 1. Каналы трубки засыпают порошком безводного оксида алюминия, выполняющим роль изолятора и фиксатора спирали. Порошок безводного оксида алюминия, имеющий высокую теплопроводность и малую теплоемкость, обеспечивает хорошую передачу теплоты и малую инерционность терморезистора. Для защиты терморезистора от механических и химических воздействий внешней среды его помещают в защитную арматуру (рис.3.3, б) из нержавеющей стали.

Для медных терморезисторов зависимость сопротивления от температуры выражается уравнением

$$R=R_0 \cdot (1+\alpha t) \text{ при } -50^{\circ}\text{C} \leq t \leq +180^{\circ}\text{C},$$

где R_0 – сопротивление при $t=0^{\circ}\text{C}$; $\alpha = 4,26 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

Для платиновых –

$$R=R_0 \cdot [1+A t+B t^2] \text{ при } 0^{\circ}\text{C} \leq t \leq +650^{\circ}\text{C},$$

где $A=3,968 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$; $B=5,847 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-2}$; $C=-4,22 \cdot 10^{-12} \text{ K}^{-4}$.

Помимо платины и меди, для изготовления терморезисторов используют никель (в странах дальнего зарубежья).

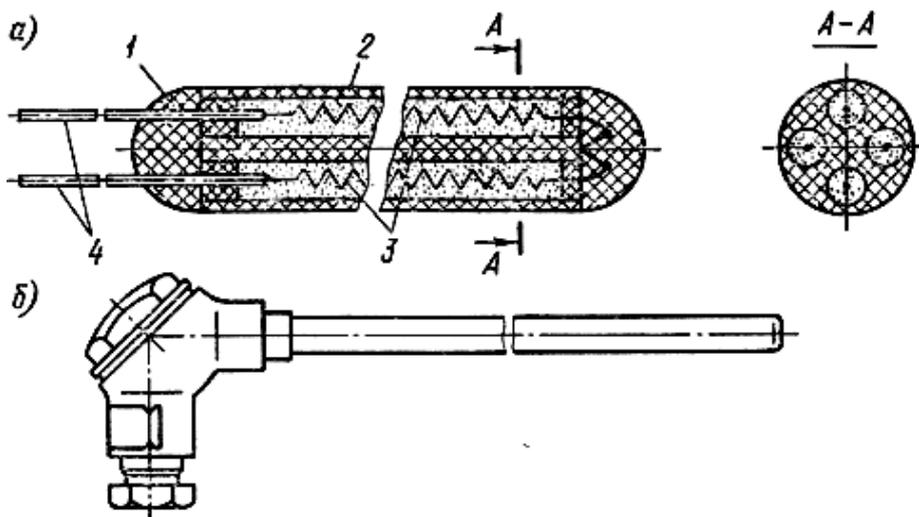


Рисунок 3 – Устройство и внешний вид арматуры платинового термометра сопротивления

Для измерения температуры применяют также полупроводниковые терморезисторы (*термисторы* и *позисторы*) различных типов, которые характеризуются большой чувствительностью (температурный коэффициент сопротивления ТКС термисторов отрицательный и при 20°C в 10–15 раз превышает ТКС меди и платины, ТКС позисторов положительный и несколько хуже) и имеют более высокие сопротивления (до 1 МОм) при весьма малых размерах. Недостаток термисторов – плохая воспроизводимость и нелинейность характеристики преобразования.

Термисторы используются в диапазоне температур от -60 до $+120^{\circ}\text{C}$.

$$R = R_0 \cdot \exp \left[B \cdot \left(\frac{1}{t} - \frac{1}{t_0} \right) \right],$$

где R и R_0 – сопротивления терморезистора при температурах соответственно t и t_0 ;

t_0 – начальная температура рабочего диапазона;

B – коэффициент преобразования.

К термочувствительным преобразователям относят также *термодиоды* и *термотранзисторы*, у которых при изменении температуры изменяется величина сопротивления р-п перехода. Эти приборы обычно применяются в диапазоне от -80° до $+150^{\circ}\text{C}$. Чаще всего термодиоды и терморезисторы

включают в мостовые цепи и измерительные схемы в виде делителей напряжения. К достоинствам таких преобразователей относят высокие чувствительность и надежность, малые габариты, невысокую стоимость и малую инерционность. Основные недостатки: узкий диапазон рабочей температуры и плохая воспроизводимость статической характеристики преобразователя.

Принцип действия *индуктивных преобразователей* основан на зависимости индуктивности или взаимной индуктивности обмоток на магнитопроводе от положения, геометрических размеров и магнитного состояния элементов их магнитной цепи (рис. 4).

На рис. 4 схематически показаны различные типы индуктивных преобразователей. Индуктивный преобразователь (рис. 4, а) с *переменной длиной воздушного зазора* δ характеризуется нелинейной зависимостью $L = f(\delta)$. Такой преобразователь обычно применяют при перемещениях якоря на 0,01—5 мм. Значительно меньшей чувствительностью, но линейной зависимостью $L = f(s)$ отличаются преобразователи с переменным сечением воздушного зазора (рис. 4, б). Эти преобразователи используют при перемещениях до 10...15 мм.

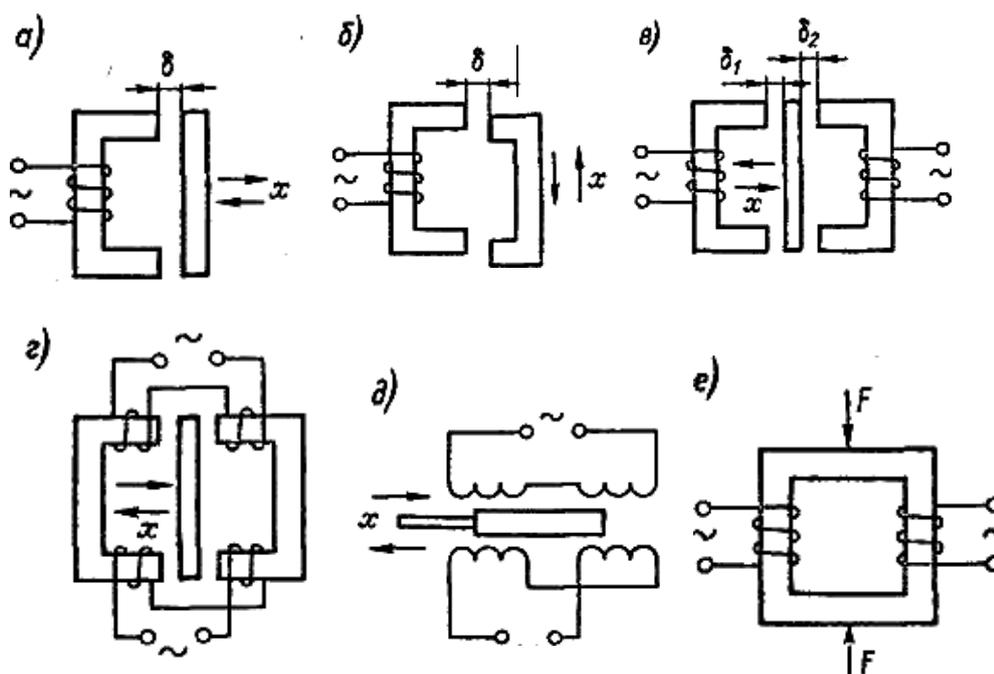


Рисунок 4 – Различные конструкции индуктивных преобразователей

Широко распространены *индуктивные дифференциальные преобразователи* (рис. 4, в), в которых под воздействием измеряемой величины одновременно и притом с разными знаками изменяются два зазора электромагнитов. Дифференциальные преобразователи в сочетании с соответствующей измерительной цепью (обычно мостовой) имеют более высокую чувствительность, меньшую нелинейность характеристики преобразования, испытывают меньшее влияние внешних факторов и сниженное результирующее усилие на якорь со стороны электромагнита, чем недифференциальные преобразователи.

На рис. 4,г показана схема включения *дифференциального индуктивного преобразователя*, у которого выходными величинами являются взаимные индуктивности. Такие преобразователи называют взаимно-индуктивными или трансформаторными. При питании первичной обмотки переменным током и при симметричном положении якоря относительно электромагнитов ЭДС на выходных зажимах равна нулю. При перемещении якоря на выходных зажимах появляется ЭДС.

Для преобразования сравнительно больших перемещений (до 50...100 мм) применяют *трансформаторные преобразователи с незамкнутой магнитной цепью* (рис. 4, д).

В горной промышленности получили распространение *магнитоупругие преобразователи* (рис. 4, е), действие которых основано на использовании эффекта зависимости магнитной проницаемости (магнитного сопротивления цепи) от величины механического воздействия (сжатия или растяжения) на ферромагнитный сердечник преобразователя. Различают магнитоупругие датчики *дрессельного* и *трансформаторного* типов. Последние могут контролировать только усилие сжатия, однако обладают большей чувствительностью. Достоинствами индуктивных и магнитоупругих преобразователей являются простота и надежность в работе, значительная мощность выходных сигналов. Основными недостатками – обратное воздействие преобразователя на исследуемый объект (воздействие электромагнита на якорь) и влияние инерции якоря на частотные характеристики прибора.

Принцип действия *емкостных преобразователей* основан на зависимости электрической емкости конденсатора от размеров, взаимного расположения его обкладок и от значения диэлектрической проницаемости среды между ними. Они представляют собой конденсаторы различных конструкций, преобразующие механические линейные или угловые перемещения, а также давление, влажность или уровень среды в изменение электрической емкости.

Из курса физики известно, что емкость плоского конденсатора

$$C = \frac{\xi_0 \cdot \xi \cdot S}{\delta},$$

где ξ_0 – диэлектрическая постоянная;

ξ – относительная диэлектрическая проницаемость между обкладками;

S – активная площадь обкладок;

δ – расстояние между обкладками.

Таким образом, преобразователь может быть построен с использованием зависимостей $C = f_1(\xi)$, $C = f_2(S)$, $C = f_3(\delta)$.

Преобразователь на рис. 5, а представляет собой конденсатор, одна пластина которого перемещается под действием измеряемой величины x относительно неподвижной пластины. Статическая характеристика преобразования $C=f(\delta)$ нелинейна. Чувствительность преобразователя возрастает с уменьшением расстояния δ . Такие преобразователи используют для измерения малых перемещений (менее 1 мм).

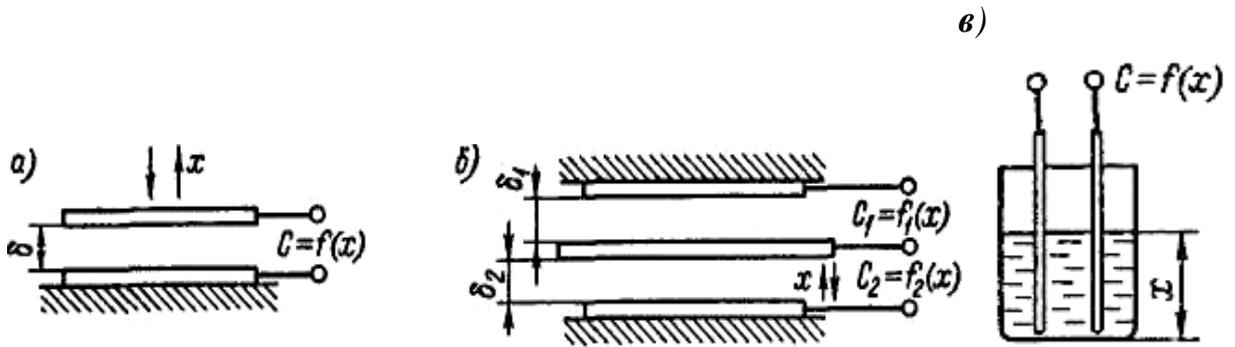


Рисунок 5 – Различные конструкции емкостных преобразователей

Применяют также *дифференциальные преобразователи* (рис. 5, б), у которых имеется одна подвижная и две неподвижные пластины. При воздействии измеряемой величины x у этих преобразователей одновременно изменяются емкости C_1 и C_2 . Такие преобразователи используют для измерения сравнительно больших линейных (более 1 мм) и угловых перемещений. В этих преобразователях легко получить требуемую характеристику преобразования путем профилирования пластин.

Преобразователи с использованием зависимости $C = f_1(\xi)$ применяют для измерения уровня жидкостей, влажности веществ, толщины изделий из диэлектриков и т. п. Для примера (рис. 5, в) приведем устройство *емкостного уровнемера*. Емкость между электродами, опущенными в сосуд, зависит от уровня жидкости, так как изменение уровня ведет к изменению средней диэлектрической проницаемости среды между электродами. Изменением конфигурации пластин можно получить желаемый характер зависимости показаний прибора от объема (массы) жидкости.

Для измерения выходного параметра емкостных преобразователей применяют мостовые цепи и цепи с использованием резонансных контуров. Последние позволяют создавать приборы с высокой чувствительностью, способные реагировать на перемещения порядка 10^{-7} мм. Цепи с емкостными преобразователями обычно питают током повышенной частоты (до десятков мегагерц), что вызвано желанием увеличить сигнал, попадающий в измерительный прибор, и необходимостью уменьшить шунтирующее действие сопротивления изоляции.

Достоинства емкостных датчиков: простота конструкции, малые размеры и масса, высокая чувствительность и малая инерционность. Основные недостатки – необходимость в источниках питания повышенной частоты и вредное влияние паразитных емкостей, температуры, влажности и внешних электрических полей.

Полупроводниковые фоточувствительные преобразователи в качестве чувствительного элемента имеют светочувствительный слой, нанесенный на подложку (стеклянную пластинку). Сопротивление этого слоя обратно пропорционально интенсивности светового потока или мощности источника освещения. *Фоторезисторы, фотодиоды и фототранзисторы* обладают сравнительно высокой стабильностью, хорошей чувствительностью, но их применение ограничивается при наличии пыли, например угольной,

препятствующей нормальной работе.

Действие *ионизационных преобразователей* основано на явлении ионизации газа или люминесценции некоторых веществ под действием ионизирующего излучения. В качестве ионизирующих агентов применяют α -, β - и γ -лучи радиоактивных веществ, иногда *рентгеновские лучи* и *нейтронное излучение*. Выбор типа ионизационного преобразователя зависит во многом от ионизирующего излучения. *Гамма-лучи* (электромагнитные колебания малой длины волны – $10^{-8} \dots 10^{-11}$ см) обладают большой проникающей способностью. Проходя через вещество лучи ослабляются

$$J = J_0 \cdot \exp(-\mu d),$$

где J – интенсивность γ -лучей, прошедших через вещество (тело);

J_0 – интенсивность поступающих в вещество (тело) γ -лучей;

μ – коэффициент ослабления;

d – толщина слоя вещества (тела).

Таким образом, с помощью γ -лучей либо другого ионизирующего излучения можно измерять толщину слоя изделий, плотность жидкостей и газов и др.

Конструкции ионизационных камер и счетчиков разнообразны и зависят от вида излучения. В качестве источников ионизирующего излучения обычно используют кобальт-60, стронций-90, плутоний-239 и др.

Преимущества ионизационных преобразователей – в возможности бесконтактных измерений в агрессивных или взрывоопасных средах, средах, имеющих высокую температуру или находящихся под большим давлением. Основной недостаток: необходимость применения биологической защиты при высокой активности источника излучения.

3. В *генераторных преобразователях* выходной величиной является ЭДС или заряд, функционально связанный с измеряемой неэлектрической величиной.

Рассмотрим наиболее распространенные виды генераторных преобразователей.

Термоэлектрические преобразователи работают на термоэлектрическом эффекте, возникающем в цепи *термопары*: при разности температур в точках 1 и 2 (рис. 6) соединения двух разнородных проводников в цепи термопары возникает *термоЭДС*.

Точку соединения проводников (электродов) 1 называют рабочим концом термопары, точки 2 и 2' – свободными концами. Чтобы термоЭДС в цепи термопары однозначно определялась температурой рабочего конца, необходимо температуру свободных концов термопары поддерживать одинаковой и неизменной.

Градуировку термоэлектрических термометров производят обычно при температуре свободных концов 0°C . Градуировочные таблицы для стандартных термопар также составлены при условии равенства температуры свободных концов 0°C . При практическом применении термоэлектрических термометров температура свободных концов термопары обычно не равна 0°C и поэтому необходимо вводить поправку.

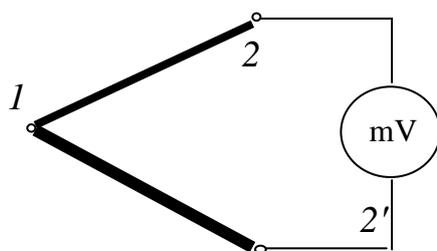


Рисунок 6

Для изготовления термопар, применяемых в настоящее время для измерения температуры, используют в основном специальные сплавы.

В табл. 1 приведены характеристики термопар в соответствии с ГОСТ 6616–74.

Таблица 1 Характеристики стандартных термопар

Тип термопары	Материалы электродов термопар	ТермоЭДС (при $t_{p.k.}=100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{c.k.}=0\text{ }^{\circ}\text{C}$), мВ	Верхний предел измеряемой температуры, $^{\circ}\text{C}$	
			длительно	кратковременно
ТПП	Платинородий (10% родия) - платина	0,64	1300	1600
ТПР	Платинородий (30% родия) – платинородий (6% родия)	13,81 (при $t_{p.k.}=1800\text{ }^{\circ}\text{C}$)	1600	1800
ТХА	Хромель (90% Ni+10% Cr) – алумель (94,83% Ni + 2% Al + 2% Mn + 1% Si+ 0.17 Fe)	4,10	1000	1300
ТХК	Хромель – копель (56% Cu + 44% Ni)	6,90	600	800
ТВР	Вольфрамрений (5% рения) – вольфрамрений (20% рения)	1,33	2200	2500

Для измерения высоких температур используют термопары типов ТПП, ТПР и ТВР. Термопары из благородных металлов (ТПП и ТПР) применяют при измерениях с повышенной точностью.

Для стандартных термопар существует ГОСТ, нормирующий допускаемые отклонения статических характеристик преобразования.

Для удобства стабилизации температуры свободных концов иногда термопару удлиняют с помощью так называемых удлинительных проводов, выполненных либо из соответствующих термоэлектродных материалов, либо из специально подобранных материалов, более дешевых, чем электродные, и удовлетворяющих условию термоэлектрической идентичности с основной термопарой в диапазоне возможных температур свободных концов (обычно от

0 до 100 °С). Иначе говоря, удлинительные провода должны иметь в указанном интервале температур такую же зависимость термоЭДС от температуры, как и у основной термопары.

Основной недостаток термопар – значительная инерционность (в обычной арматуре показатель тепловой инерции составляет несколько минут). В настоящее время известны конструкции малоинерционных термопар, у которых показатель тепловой инерции составляет не более 5 с.

В *фотоимпульсных датчиках* импульсы в оптоэлектронной паре источник излучения – приемник излучения (светодиод – фотопреобразователь) создаются при помощи дисков с прорезями или отверстиями, в некоторых приводах применяют вращающиеся детали машин. В подавляющем большинстве *шифраторов положения* также используют в качестве чувствительного элемента оптоэлектронную пару.

Импульсы *индукционных датчиков* создаются под влиянием пульсирующего или знакопеременного магнитного потока. В качестве тела, модулирующего поток, служат специальные зубчатые колеса либо вращающиеся ферромагнитные детали машин.

В *пьезоэлектрических* преобразователях используется эффект появления электрических зарядов на поверхности некоторых кристаллов (кварц, турмалин, сегнетова соль и др.) под влиянием механических напряжений.

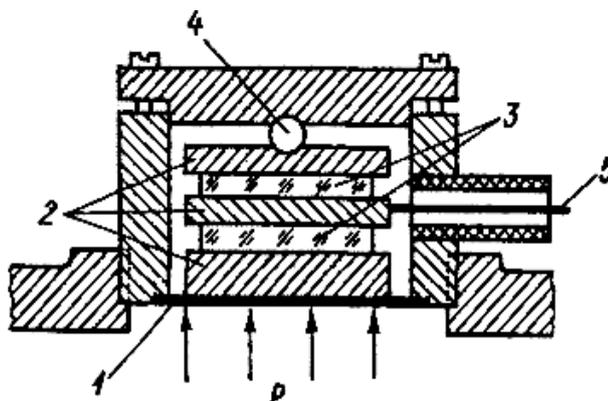


Рисунок 7

Устройство пьезоэлектрического преобразователя для измерения переменного давления газа показано на рис. 7. Давление P через металлическую мембрану 1 передается на зажатые между металлическими прокладками 2 кварцевые пластинки 3 . Шарик 4 способствует равномерному распределению давления по поверхности кварцевых пластинок. Средняя прокладка соединена с выводом 5 , проходящим через втулку из хорошего изоляционного материала. При воздействии давления P между выводом 5 и корпусом преобразователя возникает разность потенциалов

$$U = 2Q / (C_n + C_0) = 2k \cdot S \cdot P / (C_n + C_0),$$

где Q – заряд, возникающий на пластинке кварца;
 C_n – емкость преобразователя;

C_0 – емкость проводов и входной цепи прибора, измеряющего разность потенциалов;

k – пьезоэлектрический модуль кварца;

S – площадь поверхности мембраны, подверженная давлению.

По разности потенциалов U судят о значении давления P . В пьезоэлектрических преобразователях главным образом применяют кварц, у которого пьезоэлектрические свойства сочетаются с высокой механической прочностью и высокими изоляционными качествами, а также с независимостью пьезоэлектрической характеристики от температуры в широких пределах. Используют также поляризованную керамику из титаната бария, титаната и цирконата свинца. Пьезоэлектрические датчики обычно применяют для измерений быстропротекающих динамических процессов при ударных нагрузках, вибрациях, переменных усилиях и т.д.

Рекомендуемая литература

1. Шишмарев В.Ю. Типовые элементы систем автоматического управления: Учеб.пособие. – М.: Изд. центр «Академия», 2004. С.29-109.

2. Эм Г.А. Элементы систем автоматики: Учеб.пособие. Караганда, Изд-во КарГТУ, 2007. С.34-106.

3. Болтон У. Карманный справочник инженера-метролога / Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2002. с.192-205, 293-306, 321-331.

4. Справочник по средствам автоматики / [Б.И.Филиппович, А.П.Шорыгин, В.А.Царьков и др.]; Под ред. В.Э.Низэ и И.В.Антика. – М.: Энергоатомиздат, 1983. с.28, 50-54, 60, 63, 69-73, 84-90, 133, 136-138, 156, 339-363.

5. Фарзани Н.Г., Илясов Л.В., Азим-Заде А.Ю. Технологические измерения и приборы: Учеб. для ВУЗов. – М.: Высш. школа, 1989. с. 95-120, 143-204.

6. Жданкин В.К. Измерительные преобразователи давления // Современные технологии автоматизации. – 2001. – № 4. – С.79-86.

7. Жданкин В.К. Поворотные шифраторы: основные типы и некоторые особенности применения // Современные технологии автоматизации. – 2001. – № 2. – С.68-79.

8. Тун А.Я. Системы контроля скорости электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 168 с.

Контрольные задания для СРС [3-8]

1. Проанализировать существующие типы параметрических датчиков, применяемые в промышленности

2. Проанализировать существующие типы генераторных датчиков, применяемые в промышленности

Тема 4 Технические средства управления электроавтоматики

План лекции

1. Пассивные элементы

2. Полупроводниковые приборы – диоды, тиристоры, транзисторы

3. Выпрямители. Стабилизаторы постоянного и переменного напряжения. Электрические усилители
4. Микросхемы и принципы их построения
5. Общая характеристика аналоговых интегральных микросхем. Операционные усилители. Компараторы
6. Основные понятия цифровой техники. Основные логические операции и элементы. Общая характеристика цифровых интегральных микросхем

1. К наиболее простым по выполняемым функциям элементам электронных устройств автоматики относят резисторы, электрические конденсаторы, катушки индуктивности, коммутирующие устройства.

Каждый из элементов характеризуется определенными количественными показателями, которые называются *функциональными параметрами*. Значения функциональных параметров, предусмотренные техническими условиями на данный элемент, называются номинальными или просто номиналами. Допустимые отклонения от номиналов зависят от класса точности деталей. Цена однотипных деталей различного класса точности может отличаться на 50 % и более.

Электронные элементы обеспечивают нормальное функционирование аппаратуры при соблюдении определенных условий их эксплуатации, т. е. определенного рабочего режима. Режим может определять допустимые рабочие температуры, токи, напряжения, выделяемую мощность и т. д.

Согласно ГОСТ 16962-71 влияние на элементы внешней среды (температуры, влажности, пыли, радиоактивного облучения) оцениваются двумя показателями: *прочностью* (способностью элементов выдерживать без существенного изменения их параметров длительные механические нагрузки) и *устойчивостью* (способностью элементов сохранять параметры в условиях климатических воздействий и после них). Устойчивость того или иного функционального параметра к изменениям температуры оценивается температурным коэффициентом

$$\text{ТКФ} = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{\varphi_1(t_2 - t_1)},$$

где φ_1 и φ_2 — значения параметра при температурах t_1 и t_2 .

Резисторы предназначены для образования на участке электрической цепи определенного активного сопротивления. Резисторы подразделяются на постоянные и переменные. По используемому резистивному материалу различают проволочные и непроволочные резисторы (пленочные и объемные).

Основными параметрами резисторов являются: номинальное значение сопротивления; допустимые отклонения сопротивления от номинала; номинальная мощность рассеивания; температурный коэффициент сопротивления (обычно указывается среднее значение этого коэффициента для определенного диапазона температур t_1 — t_2); частотный диапазон (этот параметр ограничен в связи с тем, что на высоких частотах приходится считаться с наличием собственной емкости и индуктивности резистора); коэффициент собственных шумов, под которым понимается отношение ЭДС

шумов, возникающей в резисторе при подведении к нему постоянного напряжения 1 В.

По особенностям применения постоянные резисторы можно разделить на четыре группы:

А. Резисторы общего применения (выпускаются в номиналах от 10 Ом до 10 МОм с допустимым отклонением от номинала 5, 10 и 20 % при номинальной мощности рассеивания от 0,125 до 2 Вт); к этой же группе принадлежат высокоомные резисторы (номиналы от 10 МОм до 10 ГОм).

В. Высокостабильные резисторы (выпускаются в номиналах 0,1 Ом— 1 МОм при допустимом отклонении от номинала 2—0,05 %).

С. Мощные резисторы (выпускаются на допустимые мощности рассеивания до сотен ватт при напряжении до 100 кВ).

Д. Ультравысокочастотные резисторы (выпускаются в номиналах до 1 кОм при допустимой мощности рассеивания до 100 Вт и пренебрежимо малых емкости и индуктивности).

Переменные резисторы выпускаются с различным характером функциональной зависимости значения сопротивления от угла поворота движка а относительно его исходного положения. В резисторах типа А эта зависимость является линейной. Такие резисторы служат для регулировки режимов в различных цепях. В резисторах типа Б, применяемых в регуляторах громкости, эта зависимость подчинена логарифмическому закону, что соответствует физиологическому свойству человеческого уха воспринимать увеличение громкости звука пропорционально логарифму увеличения его силы. В резисторах типа В значение сопротивления при повороте движка изменяется по обратному логарифмическому закону. Эти резисторы используются в качестве регуляторов тембра звука.

Электрические конденсаторы предназначены для образования на участке электрической цепи определенной емкости.

Конденсаторы, емкость которых не зависит от значения приложенного напряжения, называются *линейными*. Емкость нелинейных конденсаторов, например, *варикапов*, зависит от значения приложенного напряжения.

Линейные конденсаторы подразделяются на конденсаторы постоянной емкости ($C = \text{const}$) и конденсаторы переменной емкости, в которых значение емкости при повороте подвижных пластин (ротора) изменяется в определенных пределах.

Кроме емкости, конденсаторы характеризуются еще рядом параметров:

1. Сопротивление изоляции. Ввиду несовершенства изоляции активное сопротивление конденсатора не бесконечно. Поэтому через него протекает ток, который называется током утечки. Если конденсатор подключен к источнику постоянного напряжения, то сопротивление изоляции можно определить по формуле

$$R_{\text{из}} = U/I_{\text{ут}},$$

где U — напряжение источника; $I_{\text{ут}}$ — ток утечки.

Произведение сопротивления изоляции на емкость конденсатора

называется постоянной времени конденсатора:

$$\tau = R_{\text{из}} C.$$

Постоянная времени измеряется в секундах и характеризует скорость саморазряда конденсатора. За время τ напряжение на обкладках отключенного от источника конденсатора уменьшается в 2,72 раза (2,72—приближенное значение числа e).

В различных конденсаторах значение τ бывает очень разным (от 20 до 5000 с), а в некоторых типах (например, в конденсаторах с диэлектриком из полистирола или из фторопласта) достигает 10 суток.

2. Максимальное напряжение. Во избежание электрического пробоя напряжение, подводимое к конденсатору, должно быть ограничено. Напряжение, при котором в течение 1-5 с возникает пробой конденсатора, называется пробивным.

Рабочее напряжение, т.е. максимальное напряжение, под которым конденсатор может работать в течение всего срока службы, выбирается в три — десять раз меньшим, чем пробивное. Иногда в паспорте указывают также испытательное напряжение, под которым понимается напряжение, выдерживаемое конденсатором в течение установленного для него времени (от 5 до 60 с).

3. Добротность. Поскольку сопротивление диэлектрика между обкладками конденсатора не бесконечно, при работе конденсатора в цепи переменного тока на нем выделяется не только реактивная мощность $Q = U^2/X_c$, но и активная мощность $P = U^2/R_{\text{из}}$. Резистор $R_{\text{из}}$ соответствует сопротивлению изоляции. Отношение реактивной мощности P_p к мощности потерь $P_{\text{п}}$ называется добротностью конденсатора Q ; следовательно,

$$Q = P_p/P_{\text{п}}.$$

Если действующее значение напряжения равно U , то

$$Q = \frac{U^2/X_c}{U^2/R_{\text{из}}} = \frac{R_{\text{из}}}{\omega C} \quad \text{из},$$

где ω — круговая частота.

Добротность современных высококачественных конденсаторов в рабочем диапазоне частот составляет $1 \cdot 10^3$. Величина, обратная добротности, называется тангенсом угла потерь ($\text{tg } \delta = 1/Q$).

4. Температурный коэффициент емкости (ТКЕ). Значение ТКЕ для разных типов конденсаторов существенно разное. Некоторые типы конденсаторов имеют отрицательный ТКЕ.

5. Частотный диапазон (ограничен собственной индуктивностью конденсатора).

Конденсаторы постоянной емкости (их называют также постоянными конденсаторами) классифицируются обычно по виду используемого диэлектрика.

Керамические конденсаторы выпускаются с различными видами керамического диэлектрика: высокочастотная керамика имеет малые потери ($\text{tg } \delta \approx 6 \cdot 10^{-4}$ при частоте 1 МГц), низкочастотная — значительно большие потери ($\text{tg } \delta \approx 2 \cdot 10^{-2}$ при частоте 1 кГц). Номинальные емкости керамических

конденсаторов от 1 пФ до 2,2 мкФ, предельная рабочая частота 10 МГц. ТКЕ керамических конденсаторов лежит в пределах от $1,2 \cdot 10^{-6}$ до $2,2 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Рабочее напряжение до 500 В.

Керамические конденсаторы с различными ТКЕ широко применяются в качестве высокостабильных, компенсационных, контурных, блокировочных, разделительных и других элементов.

Слюдяные конденсаторы обладают рядом ценных качеств, но относительно дороги. Они выпускаются в номиналах от 10 пФ до 1 мкФ и имеют очень малые потери ($\text{tg } d < 0,0015$ при частоте 1 МГц) и ТКЕ (в лучших образцах $= 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$). Предельная рабочая частота 10 МГц. Рабочее напряжение до 1500 В. Слюдяные конденсаторы применяются в качестве контурных элементов, а также в различной измерительной аппаратуре.

Стеклянные и стеклокерамические конденсаторы выпускаются в номиналах 10—15 000 пФ. Они имеют $\text{tg } d \approx 2 \cdot 10^{-3}$, максимальное рабочее напряжение 500 В.

Бумажные конденсаторы выпускаются в номиналах от 50 пФ до 30 мкФ при рабочих напряжениях до 40 кВ, однако у них большие потери и ТКЕ. Бумажные конденсаторы используются как разделительные и блокировочные, а также в электрических фильтрах.

В пленочных конденсаторах в качестве диэлектрика используются тонкие пленки из высокомолекулярных соединений — полимеров (полистирол, фторопласт, лавсан и др.). Конденсаторы с полистироловым и фторопластовым диэлектриками выпускаются в номиналах 100 пФ—10 мкФ, они имеют малые потери на высоких частотах ($\text{tg } d \ll 10^{-3}$), однако допустимая рабочая температура полистироловых конденсаторов ограничена $+ 40 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Конденсаторы с лавсановым диэлектриком выпускаются емкостью до 100 мкФ, в остальном они подобны полистироловым конденсаторам. Рабочее напряжение некоторых типов пленочных конденсаторов достигает 15000 В.

В электролитических конденсаторах в качестве диэлектрика используется тонкий слой окиси металла (оксид), нанесенный на металл путем электролиза. Благодаря малой толщине и высокой диэлектрической проницаемости слоя удается получать большие емкости при относительно малых размерах конденсатора. Особенностью этих конденсаторов является необходимость строгого соблюдения полярности при включении. Обкладки электролитических конденсаторов изготавливаются из алюминия, тантала и ниобия. Алюминиевые электролитические конденсаторы выпускаются в номиналах до 5000 мкФ на рабочее напряжение до 600 В. Потери в них относительно велики ($\text{tg } d = 0,1 \text{ ч } 0,2$), диапазон рабочих температур от -60 до $+70 \text{ } ^\circ\text{C}$. Электролитические конденсаторы с использованием тантала могут работать при очень низких температурах (до $-80 \text{ } ^\circ\text{C}$). Электролитические конденсаторы используются в фильтрах и искрогасящих цепях, а также в качестве блокировочных.

Конденсаторы переменной емкости подразделяются по конструкции на переменные и подстроечные.

Переменные конденсаторы выпускаются с различной формой под-

вижных пластин, что позволяет получать различную зависимость емкости от угла поворота ротора [$C = f(\alpha)$]. Потери в переменных конденсаторах очень малы ($\text{tg} \delta = 0,1 \cdot 10^{-4}$), $\text{TKE} < 2 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Рабочее напряжение переменных конденсаторов различного назначения составляет от десятков вольт до нескольких киловольт.

Подстроечные конденсаторы изготавливаются главным образом на керамической основе. Они рассчитаны на рабочее напряжение до 500 В и имеют $\text{TKE} = (2 \text{ ч } 7) \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Подстроечные конденсаторы выпускаются с пределами изменения емкости, начиная от 2 до 7 пФ и кончая 350—450 пФ.

Катушки индуктивности предназначены для образования на участке электрической цепи определенного значения индуктивности. Они изготавливаются с обмоткой из одного или нескольких слоев провода, намотанной на каркас из изолирующего материала. В зависимости от требований, предъявляемых к катушкам, по конструкции они бывают с магнитным сердечником и без него.

Конструктивные особенности катушек индуктивности во многом зависят от их конкретного назначения. Основными типами катушек индуктивности являются:

1. Контурные, т. е. катушки, входящие в состав колебательных контуров генераторов, резонансных усилителей и других узлов аппаратуры, содержащих колебательные системы.
2. Дроссели, т. е. катушки, обладающие большим индуктивным сопротивлением на частотах выше определенного значения.
3. Фильтровые, т. е. входящие в состав электрических фильтров.
4. Катушки связи, предназначенные для передачи электромагнитной энергии из одних электрических цепей в другие.

Основной параметр катушки — ее индуктивность. Значение индуктивности (мкГн) однослойной катушки можно определить по формуле

$$L = k \cdot 0,01 \frac{\mu^2 m^2}{D^2} \quad ,$$

где D — диаметр катушки, см; μ — число витков; m — магнитная проницаемость сердечника (при его отсутствии $m = 1$); l — длина намотки, см; k — коэффициент, зависящий от соотношения между длиной намотки и диаметром катушки ($k \approx 1$ при $l/D \geq 10$).

Индуктивность многослойной катушки можно приближенно найти, подставив в формулу средний диаметр намотки катушки.

Как видно из формулы, наиболее удобным способом изменения индуктивности катушки является изменение числа ее витков или введение магнитного сердечника.

Сердечники для работы на низких частотах (до 5 кГц) изготавливаются из металлических магнитных материалов. На более высоких частотах для уменьшения потерь на вихревые токи используются магнитодиэлектрики — материалы, полученные путем прессования порошка из ферромагнетика на изолирующей связке. Такие материалы наряду с высокой магнитной проницаемостью имеют большое удельное сопротивление. Большую магнитную проницаемость в сочетании с высоким удельным сопротивлением

имеют также и ферриты — материалы, состоящие из двуокиси железа, в кристаллической решетке которой один из атомов железа заменен двухвалентным металлом (никель, марганец, цинк и др.).

Недостатком большинства ферритов является сильная зависимость их магнитных свойств от температуры.

Для уменьшения наружной магнитной связи между катушкой индуктивности и другими близко расположенными элементами схемы катушки устанавливают в экранах, изготовленных из алюминия, меди или латуни. Возникающие в экране вихревые токи создают магнитное поле, уменьшающее взаимную индукцию между катушкой и соседними деталями.

Помимо индуктивности, катушки характеризуются еще рядом параметров.

1. Частотный диапазон. Этот параметр ограничен наличием собственной емкости катушки. Для работы на высоких частотах собственная емкость должна быть очень малой. Уменьшение емкости достигается применением однослойных обмоток, увеличением расстояния между соседними витками и рядом других конструктивных мер. Следует иметь в виду, что магнитные сердечники, а также экраны увеличивают собственную емкость катушек.

2. Добротность. Этот параметр характеризует активные потери в катушке и определяется как отношение реактивного сопротивления к активному:

$$Q = \omega L/R.$$

Увеличение добротности катушек достигается:

а) увеличением диаметра намотки (при этом индуктивность возрастает значительно быстрее, чем сопротивление);

б) применением провода, состоящего из множества изолированных жил (литцендрат). В таком проводе гораздо меньше проявляется поверхностный эффект — увеличение активного сопротивления с ростом частоты;

в) уменьшением активных потерь в сердечнике и каркасе за счет применения высококачественных материалов.

Практически добротность катушек составляет 50—400, а при использовании сердечников из ферритов — 1000 и более.

3. Температурный коэффициент индуктивности. Для однослойных катушек он лежит в пределах $1 \text{ ч } 3 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, для многослойных катушек — $15 \text{ ч } 30 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Катушки для конкретных образцов аппаратуры рассчитывают в соответствии с их схемными данными. При этом используются типовые конструкции каркасов, обмоток и сердечников.

Для малогабаритных унифицированных катушек имеется стандартизованная шкала номиналов. Так, например, для катушек с броневыми сердечниками из карбонильного железа предусмотрены номиналы от 0,15 до 4000 мкГн.

Катушки, конструкция которых позволяет плавно изменять индуктивность, называются вариометрами.

Вариометр характеризуется минимальным и максимальным значениями

индуктивности. Отношение L_{\max}/L_{\min} называется коэффициентом перекрытия индуктивности:

$$k_L = L_{\max}/L_{\min}.$$

На рис. 1 показаны различные типы вариометров. В вариометре с переменным числом витков (рис. 1, а) переход от L_{\max} к L_{\min} достигается путем короткого замыкания части витков с помощью скользящего контакта. Такие вариометры имеют $k_L=10$ ч 12 . В вариометре со взаимной индукцией (рис. 1, б) имеется две катушки, обмотки которых могут соединяться последовательно или параллельно. Изменение индуктивности происходит за счет поворота, подвижной катушки внутри неподвижной, а также за счет изменения способа соединения обмоток. Для вариометров этого типа $k_L=18$ ч 20 . Наибольший коэффициент перекрытия индуктивности ($k_L = 25$ ч 30) имеют вариометры с подвижным сердечником (рис. 1, в)

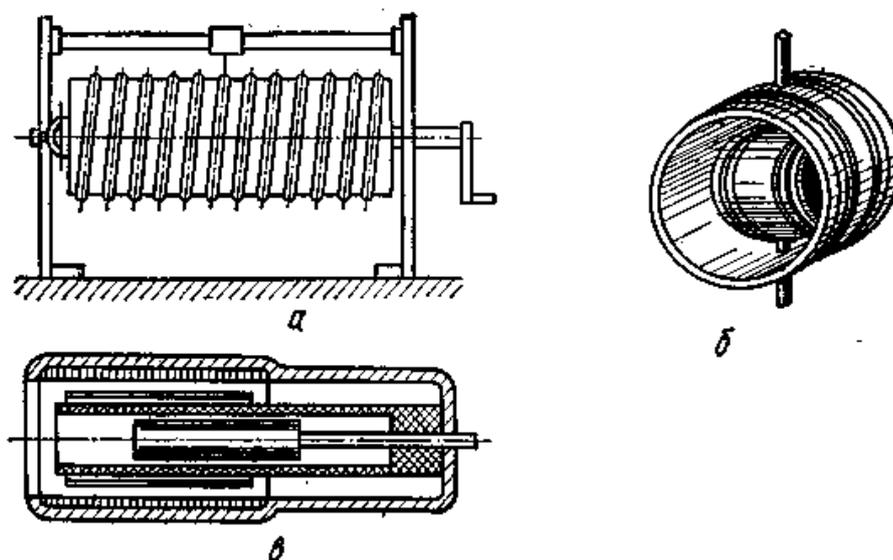


Рисунок 1 – Различные типы вариометров

На частотах выше 70 МГц применяются вариометры с немагнитными сердечниками, в которых изменение индуктивности происходит за счет размагничивающего действия вихревых токов, наводимых в сердечнике. Такие вариометры являются высокостабильными, но имеют небольшой коэффициент перекрытия индуктивности ($k_L < 1,3$).

В современных цифровых устройствах широко используются катушки, имеющие ферритовые сердечники с прямоугольной петлей гистерезиса (сердечники с ППГ), о которых подробнее будет сказано ниже.

2. Полупроводниковый диод – это полупроводниковый прибор, содержащий один р-п переход. Как правило, области прибора с р- и п-проводимостями имеют неодинаковые концентрации основных носителей. Область с более высокой концентрацией называется эмиттером, с более низкой – базой. В настоящее время используются два основных типа диодов: точечный (рис. 2) и плоскостной (рис. 3).

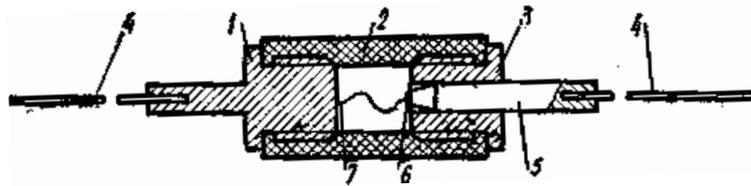


Рисунок 2 – Конструкция точечного полупроводникового диода:
 1,3 – металлические торцы; 2 – керамическая трубка; 4 – проволочный вывод;
 5 – кристалодержатель; 6 – кристалл германия; 7 – вольфрамовая проволока

В точечном диоде к кристаллическому полупроводнику 6 с одним типом проводимости вплавляется конец вольфрамовой проволоки 7, на которую нанесен слой акцептора (если кристалл имеет n-проводимость) или донора (в случае p-проводимости). В процессе приплавки атомы примеси с поверхности проволоки диффундируют в кристалл, и в нем образуется p—n переход. В плоскостных диодах p—n переход образуется путем наплавки кусочка индия 8 на германиевый или кремниевый кристалл 9 с n-проводимостью. Детали конструкций ясны из рисунков.

При малых значениях напряжения (как обратного, так и прямого) сопротивление диода $R = DU/DI$ велико (ток нарастает полого). Когда значение прямого напряжения больше потенциального барьера, ток нарастает круто и почти по прямой; сопротивление диода резко падает и, достигнув некоторого значения R_0 , остается неизменным.

Точечные диоды благодаря малой площади p—n перехода имеют очень малую емкость и поэтому широко применяются в высокочастотных схемах детектирования и преобразования сигналов, а также в различных измерительных и логических схемах.

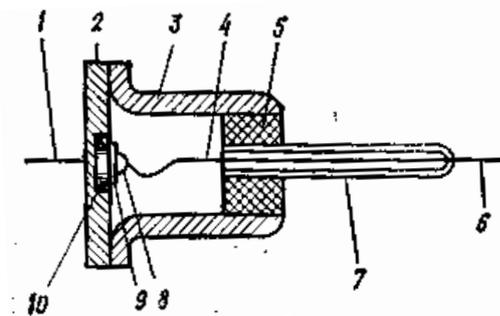


Рисунок 3 – Конструкция плоскостного полупроводникового диода:
 1,6 – проволочные выводы; 2 – кристалодержатель; 3 – корпус; 4 – токосниматель; 5 – проходной изолятор; 7 – втулка; 8 – кристалл индия; 9 – кристалл германия; 10 – подложка

- Основными параметрами, характеризующими точечные диоды, являются:
- а) прямой ток, соответствующий указанному напряжению (обычно 1-2 В);
 - б) допустимая амплитуда обратного напряжения;
 - в) минимальное пробивное напряжение;
 - г) обратный ток, соответствующий указанному обратному напряжению;

д) проходная емкость.

Плоскостные диоды используются главным образом в выпрямителях, а также в различных схемах, работающих в диапазоне низких частот. Основными параметрами этих диодов являются:

- а) максимально допустимое значение обратного напряжения;
- б) обратный ток при максимально допустимом обратном напряжении;
- в) среднее значение выпрямленного тока;
- г) падение напряжения при прохождении прямого тока.

Все указанные величины приводятся для различных рабочих температур.

Стабилитроны. При пробое p - n -перехода обратным напряжением лавинообразное нарастание тока обусловлено ударной ионизацией и массовым переходом электронов из валентной зоны в зону проводимости.

Поскольку ширина запрещенной зоны в кремнии шире, чем в германии, для перехода электронов из запрещенной зоны в зону проводимости в кремнии требуется более высокая температура. Поэтому в кремниевых диодах пробой обусловлен главным образом ударной ионизацией и не сопровождается сильным перегревом. Эта особенность позволила использовать плоскостные кремниевые диоды, включенные в непроводящем направлении, для работы в режиме пробоя в качестве стабилизаторов напряжения – стабилитронов.

Стабилитрон подключается параллельно участку, на котором должно быть стабилизировано напряжение (R_n), причем диод должен быть подобран так, чтобы стабилизированное напряжение $U_{ст}$ соответствовало участку пробоя на вольт – амперной характеристике. Последовательно с участком стабилизации включается балластный резистор ($R_{бал}$). При изменении напряжения на входе начинает изменяться и напряжение на участке стабилизации, но это вызывает резкое изменение тока, проходящего через стабилитрон, и падения напряжения на балластном резисторе. При изменении тока, проходящего через прибор (за счет изменений подводимого напряжения), в пределах I_{min} – I_{max} изменение напряжения на стабилизируемом участке цепи не превышает ДУ.

Варикапы. Переход p - n при обратном напряжении обладает определенной барьерной емкостью. Зависимость объемного заряда перехода от обратного напряжения носит нелинейный характер; это указывает на то, что емкость перехода можно изменять, изменяя значение приложенного к нему обратного напряжения.

Указанное свойство p - n -перехода используется в специальных кремниевых диодах – варикапах. Благодаря малому обратному току варикап представляет собой конденсатор с высокой добротностью. Емкость варикапа составляет 300...600 пФ и может изменяться на 30-40 %.

Варикапы применяются в схемах автоматической подстройки частоты, частотных модуляторах, а также в так называемых параметрических усилителях.

При прямых напряжениях p - n -переход обладает значительно большей (диффузионной) емкостью, однако она шунтируется низким активным

сопротивлением открытого перехода и не используется.

Импульсные диоды. В логических элементах, электронных коммутируемых устройствах и многих других случаях диоды используются в качестве переключателей, имеющих два состояния: открытое с очень малым и закрытое с очень большим сопротивлением. При этом переход из одного состояния в другое должен осуществляться по возможности быстро, что возможно при очень малой ширине и площади запирающего слоя.

Специально сконструированные для работы в режиме переключения диоды получили название переключающих (или импульсных). Важнейшими параметрами их являются: время установления прямого сопротивления; время восстановления обратного сопротивления; значения прямого и обратного токов.

В качестве переключающих используются точечные диоды, время восстановления которых менее 0,1 мкс, а допустимый прямой ток до 50 мА. Более высокими параметрами (прямой ток — до 500 мА) обладают так называемые меза-диоды, в которых переход создается за счет диффузии атомов примесей в твердый полупроводник при высокой температуре.

Особенностью таких диодов является наличие у них электрического поля, образованного за счет неодинаковой концентрации примесей на площади базы, благодаря которому обеспечивается быстрое восстановление (10—50 нс) обратного сопротивления диода.

Полупроводниковый биполярный транзистор представляет собой прибор с двумя последовательно включенными р-п переходами. Он состоит из трех областей с чередующимися типами проводимостей.

Одна из крайних областей транзистора называется эмиттером, средняя область — базой и вторая крайняя область — коллектором, р-п переход со стороны эмиттера называется эмиттерным, а со стороны коллектора — коллекторным. Эмиттер, база и коллектор отличаются не только характером проводимости, но и концентрацией носителей. В базе она на несколько порядков меньше, чем в эмиттере, а в коллекторе — почти такая же, как в эмиттере.

В настоящее время подобные приборы принято называть *биполярными транзисторами*, поскольку в них используются носители обоих типов — электроны и дырки. Введение этого термина связано с появлением новых типов трехэлектродных полупроводниковых приборов — *униполярных (полевых) транзисторов*. В зависимости от типа проводимости различают транзисторы *р-п-р* и *п-р-п структуры*.

В практических схемах транзистор используется как четырехполюсник — прибор с двумя входными и двумя выходными зажимами, поэтому один из выводов транзистора является общим для входной и выходной цепей. Различают схемы включения транзистора: с общим эмиттером (ОЭ), общей базой (ОБ) и общим коллектором (ОК).

Транзистор обладает усилительными свойствами. Значение коллекторного тока зависит в основном от тока эмиттера и может изменяться в широких пределах при изменении напряжения между эмиттером и базой. В

то же время, при достаточно большом отрицательном напряжении на коллекторном переходе, ток коллектора при изменениях этого напряжения почти не меняется. Таким образом, изменения напряжения между эмиттером и базой влияют на коллекторный ток намного сильнее, чем аналогичные изменения напряжения между коллектором и базой.

Усилительные свойства транзистора, как и лампового триода, основаны на резком изменении сопротивления участка эмиттер-коллектор под действием поступающего на базу управляющего сигнала.

Важной особенностью транзисторов, отличающих их от электронных ламп, является взаимосвязь токов базы, эмиттера и коллектора. Поэтому характер зависимостей между токами и напряжениями в транзисторе зависит от того, как включены относительно друг друга источники питания эмиттерного и коллекторного переходов транзистора. Графики зависимостей между токами и напряжениями в транзисторе называются *вольт-амперными характеристиками* или просто *характеристиками* транзистора.

При включении транзистора по схеме с ОЭ, *входной статической характеристикой* называют зависимость тока базы от напряжения на эмиттерном переходе при постоянном напряжении на коллекторе.

С увеличением прямого напряжения на эмиттерном переходе увеличивается инжекция носителей на базу, а также их рекомбинация с основными носителями базы, поэтому ток базы возрастает. При увеличении обратного напряжения на коллекторном переходе вследствие эффекта Эрли уменьшается толщина базы, что приводит к уменьшению рекомбинации носителей на базе, вследствие чего ток базы уменьшается.

Выходной статической характеристикой транзистора, включенного по схеме с ОЭ, называют зависимость коллекторного тока от напряжения на коллекторе при неизменном токе базы.

На примере включения транзистора по схеме с ОЭ рассмотрим четыре характерных рабочих режима транзистора.

Режим насыщения (1) имеет место при напряжении $U_K = 0$, а также при $|U_K| < |U_B|$. В этом режиме оба перехода включены в прямом направлении и обе крайние области транзистора служат одновременно эмиттерами и коллекторами (инжектируют и собирают носители). При данном режиме база насыщена носителями, инжектируемыми через оба перехода. Поэтому сопротивление между двумя любыми выводами транзистора очень мало. При $U_K=0$ результирующий ток коллектора равен нулю. По мере увеличения напряжения U_K коллекторный переход хотя по-прежнему и смещен в прямом направлении, но прямое напряжение на участке база — коллектор транзистора уменьшается. Инжекция носителей из коллектора в базу значительно слабее, чем из эмиттера, что приводит к резкому росту коллекторного тока с увеличением U_K . Начиная с $|U_K|=|U_B|$, коллектор уже не инжектирует дырки в базу, транзистор переходит в *активный режим* (2), который характеризуется плавным ростом коллекторного тока с увеличением U_K , что обусловлено главным образом сужением базы. При больших напряжениях на коллекторе возникает пробой коллекторного перехода

(режим лавинного пробоя 4). Режим отсечки (3) имеет место при $U_{ЭБ} < 0$. В этом режиме ток эмиттера отсутствует, а коллекторный ток равен току базы и представляет собой обратный ток коллекторного перехода $I_{к0}$.

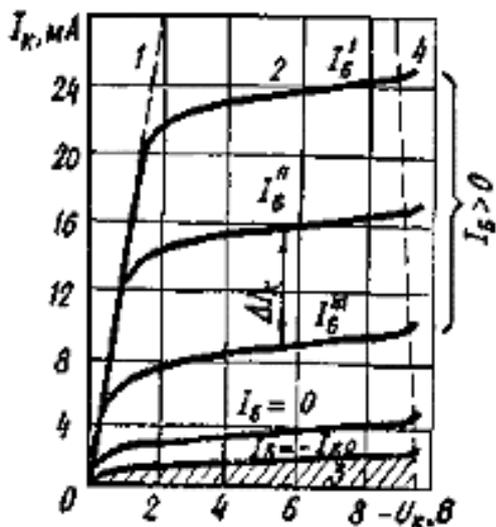


Рисунок 4 – Выходные статические характеристики транзистора, включенного по схеме с ОЭ

При расчете усилительных схем на транзисторах (при условии, что напряжение сигнала намного меньше напряжения питания) транзистор представляют в виде четырехполюсника; соотношения между токами и напряжениями на входе и выходе его ($I_{вх}$, $U_{вх}$, $I_{вых}$, $U_{вых}$) при этом могут выражаться тремя различными системами уравнений. Коэффициенты, входящие в состав этих уравнений, называются первичными параметрами транзистора, поскольку они характеризуют основные электрические свойства транзистора как линейного четырехполюсника.

Наибольшее распространение получила система уравнений с так называемыми *гибридными параметрами* (их называют еще *h-параметрами*), которая имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} U_{вх} &= h_{11}I_{вх} + h_{12}U_{вых}; \\ I_{вых} &= h_{21}I_{вх} + h_{22}U_{вых} \end{aligned} \right\}$$

Здесь под $U_{вх}$, $I_{вх}$, $U_{вых}$, $I_{вых}$ понимаются переменные напряжения и токи на входе и выходе транзистора.

По физическому смыслу h-параметры представляют собой следующие величины:

h_{11} — входное сопротивление при короткозамкнутом по переменному току выходе, т. е. при $U_{вых} = 0$. Так, например, для схемы с ОБ $h_{11} = U_{Э}/I_{Э}$ при $U_{К} = 0$.

h_{12} — отношение напряжения на входе к напряжению на выходе (коэффициент обратной связи) при разомкнутом по переменному току входе, т. е. при $I_{вх} = 0$. Так, например, для схемы с ОБ $h_{12} = U_{Э}/U_{К}$ при $I_{Э} = 0$;

h_{21} — отношение тока на выходе к току на входе (коэффициент передачи тока) при $U_{вых} = 0$. Так, например, для схемы с ОБ $h_{21} = I_{К}/I_{Э}$ при $U_{К} = 0$;

h_{22} — выходная проводимость, т. е. отношение $I_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВЫХ}}$ при $I_{\text{ВХ}} = 0$.

Помимо рассмотренных, транзисторы характеризует еще ряд параметров:

1. *Предельно допустимая мощность*, рассеиваемая на коллекторе, $P_{\text{кmax}}$. Определяется она предельно допустимой температурой нагрева полупроводникового прибора (около 100 °С для германиевых и 150 °С для кремниевых транзисторов). Для улучшения теплоотдачи в мощных транзисторах корпус их закрепляют на ребристом радиаторе. Допустимая мощность, рассеиваемая на коллекторе различных типов транзисторов, находится в пределах от единиц милливольт до десятков ватт.

2. *Предельно допустимое обратное напряжение коллекторного перехода* $U_{\text{кmax}}$, т. е. напряжение, при котором еще не наступает пробой коллекторного перехода. Практически $U_{\text{кmax}} = 10 — 50$ В.

3. *Обратный ток коллекторного перехода* (подобен обратному току диода) $I_{\text{к0}}$. В обычных условиях $I_{\text{к0}}$ не превышает единиц микроампер.

4. *Предельно допустимая частота*. Принято считать, что транзистор работоспособен, если коэффициент усиления по току уменьшается не более чем в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с рассчитанным для низкой частоты. В зависимости от типа транзистора предельная частота его может изменяться в широких пределах (от сотен килогерц до единиц гигагерц).

5. *Диапазон рабочих температур*. Транзисторы, как и все полупроводниковые приборы, в большой степени подвержены влияниям температуры. С повышением температуры резко увеличивается количество основных и неосновных носителей в полупроводнике, что приводит к увеличению токов транзистора. Особенно сильно влияет на работу транзистора температурное изменение обратного тока коллекторного перехода, которое происходит по экспоненциальному закону. Можно приближенно считать, что при повышении температуры на 10°С обратный ток коллектора возрастает вдвое.

Из сказанного следует, что при эксплуатации транзисторов нужно по возможности добиваться того, чтобы они работали в относительно узком диапазоне температур, или принимать специальные меры для компенсации влияния изменений температуры.

Только при этих условиях схемы на транзисторах работают стабильно. Диапазон допустимых температур окружающей среды для различных образцов транзисторов неодинаков, однако максимально допустимая температура в лучшем случае не превышает +125 °С, а минимальная — не ниже -30 °С.

Со второй половины прошлого века используются полупроводниковые приборы с четырехслойной структурой. К ним относятся — *динисторы, тиристоры и симисторы*.

Четырехслойные приборы используются в качестве выпрямителей, а также переключающих устройств.

Ввиду несложной технологии изготовления, отсутствия цепей накала, большого срока службы четырехслойные полупроводниковые приборы очень

перспективны. Современные тиристоры, предназначенные для работы с большой скоростью переключений, включаются за время 0,1-0,5 мкс и выключаются в течение 6 мкс. Разработаны конструкции тиристоров на рабочие напряжения до 2000 В и токи 1000 А и более.

3. Процесс *усиления* представляет собой один из частных случаев процесса управления энергией и, в принципе, заключается в том, что поступающий на вход усилителя от управляющего источника электрической энергии слабый сигнал управляет более сильным сигналом на его выходе.

При этом необходимо иметь в виду, что входной сигнал не является источником энергии выходного — энергия выходного сигнала создается за счет расхода энергии электрических источников питания (питающих устройств), но в то же время без сигнала на входе не создается и сигнал на выходе.

Таким образом, входной сигнал управляет выходным сигналом, источником энергии которого являются питающие устройства. На рис.5 изображена обобщенная структурная схема усилительного устройства.

Входное устройство (входная цепь) служит для подачи усиливаемого сигнала на усилительный элемент, который обеспечивает управление со стороны входного сигнала выходным, создавая тем самым усиление. Усиленный сигнал передается потребителю—нагрузке усилителя. Цепь, в которую включен потребитель, называется *выходной цепью* (выходным устройством).

Питающее устройство обеспечивает работу усилительного элемента и является источником энергии выходного сигнала.

Усилительный элемент необходим для обеспечения процесса усиления. В качестве усилительных элементов в большинстве усилителей используются биполярные и полевые транзисторы навесного монтажа или в исполнении в виде интегральных микросхем. В некоторых видах аппаратуры еще применяются и электронные лампы.

Усилители различаются по следующим основным признакам:

1. В зависимости от типа усилительного элемента усилители бывают *транзисторные* и *ламповые*. Усилители, в которых используются другие типы усилительных элементов, в данном курсе не рассматриваются.

2. По диапазону частот усиливаемых сигналов различают: усилители *постоянного* тока; усилители *звуковой* частоты ($f \leq 20$ кГц); усилители *высокой* частоты ($20 \text{ кГц} < f < 300 \text{ МГц}$); усилители *сверхвысокой* частоты ($f > 300 \text{ МГц}$).

3. В зависимости от ширины спектра частот усиливаемых сигналов усилители бывают: *узкополосные*, у которых отношение полосы усиливаемых частот к средней частоте диапазона значительно меньше единицы, т. е. $\Delta f / f_0 \ll 1$; *широкополосные*, у которых данное отношение больше единицы, т. е. $\Delta f / f_0 > 1$.

4. В зависимости от характера нагрузки различают: *избирательные* усилители, у которых в качестве нагрузки используются частотно-избирательные системы (одиночные или связанные резонансные контуры, а

также электрические фильтры); *апериодические* (неизбирательные) усилители, у которых в качестве нагрузки используются резисторы, дроссели или трансформаторы (эти усилители рассматриваются в данной главе).

5. Назначение любого усилителя состоит в том, чтобы усиливать электрический сигнал, однако при этом главной задачей может быть усиление напряжения, усиление тока или усиление мощности. Таким образом, по назначению усилители могут быть усилителями *напряжения*, усилителями *тока* и усилителями *мощности*.

В многокаскадных усилителях различают *предварительные* и *оконечные* каскады. Первые усиливают входной сигнал до уровня, обеспечивающего нормальную работу последующих — окончательных каскадов. Оконечный каскад должен усилить мощность сигнала до уровня, обеспечивающего нормальную работу выходного устройства усилителя (громкоговорителя, линии и т. д.).

Коэффициент усиления. Важнейшим критерием работы усилителя является величина, показывающая, во сколько раз сигнал на выходе больше, чем на входе. Так как усилитель может быть предназначен для усиления напряжения, тока или мощности, то и оценивать его надо по тому, во сколько раз сигнал на выходе по напряжению, току или по мощности больше, чем на входе.

Отношение напряжения (тока или мощности) на выходе к напряжению (току или мощности) на входе называется *коэффициентом усиления усилителя*.

Итак, для усилителя напряжения коэффициент усиления составляет

$$K_U = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}.$$

Аналогично для усилителя тока

$$K_I = I_{\text{вых}}/I_{\text{вх}}$$

и для усилителя мощности

$$K_P = P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}}.$$

Как следует из определения, коэффициент усиления – это относительная, безразмерная величина.

Если усилитель состоит из нескольких (n) каскадов, то общий его коэффициент усиления равен произведению коэффициентов усиления отдельных каскадов усилителя, т. е.

$$K = K_1 K_2 \cdots K_n$$

Часто коэффициент усиления выражают не в относительных, а в логарифмических единицах. Целесообразность такого подхода обусловлена тем, что органы чувств человека воспринимают возрастание силы внешних раздражителей не по закону прямой пропорциональности, а значительно медленнее.

Рост субъективного восприятия, как оказалось, происходит приблизительно пропорционально логарифму возрастания фактически

воспринимаемого сигнала:

$$S/S_0 = A \lg(U/U_0),$$

где S — субъективное восприятие усиленного сигнала; S_0 — то же, исходного сигнала; U — фактическая амплитуда усиленного сигнала; U_0 — то же, исходного сигнала; A — коэффициент пропорциональности.

Таким образом, если, например, сила звука увеличивается в 100 раз, то субъективное восприятие возрастает примерно в 2 раза ($\lg 100 = 2$).

Коэффициент усиления по напряжению (или по току) в децибелах определяется по формуле

$$K_{дб} = 20 \lg K = 20 \lg(U_{вых} / U_{вх})$$

Коэффициент усиления по мощности в децибелах определяется по формуле

$$K_{P(дб)} = 10 \lg K_P$$

Использование логарифмических единиц удобно еще и тем, что при этом *общий коэффициент усиления усилителя равен сумме коэффициентов усиления отдельных его каскадов*:

$$K_{дб} = K_{1дб} + K_{2дб} + \dots + K_{nдб}$$

Частотные искажения. Практически в схему любого усилителя обязательно входят частотно-зависимые элементы. Действительно, если входная и выходная цепи усилителя состоят из одних только резисторов, то схема все же будет частотно-зависимой, так как в нее входят междуэлектродные емкости усилительного элемента.

Из сказанного следует, что при одной и той же амплитуде сигналов различных частот, подаваемых на вход усилителя, амплитуда сигналов на его выходе может оказаться неодинаковой. Следовательно, коэффициент усиления усилителя зависит от частоты сигнала.

Искажения, возникающие вследствие неодинакового усиления усилителем сигналов различной частоты, называются *частотными* (в старой литературе — *амплитудно-частотными*) искажениями.

Для оценки частотных искажений введено понятие *коэффициента частотных искажений*, под которым понимается отношение коэффициента усиления K_0 на средней частоте диапазона к коэффициенту усиления K на данной частоте,

$$M = K_0 / K.$$

Значение M может быть больше, меньше или равно единице. Так, из рис.б, а видно, что для частоты f_1 $M > 1$ ($K < K_0$), для частоты f_2 $M = 1$ ($K = K_0$), а для частоты f_3 $M < 1$ ($K > K_0$). Очевидно, частотные искажения тем меньше, чем ближе значение M к единице. Для многокаскадного усилителя

$$M = \frac{K}{K_0} = \frac{K_{01} \cdot K_{02} \cdot \dots \cdot K_{0n}}{K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n} = M_1 \cdot M_2 \cdot \dots \cdot M_n$$

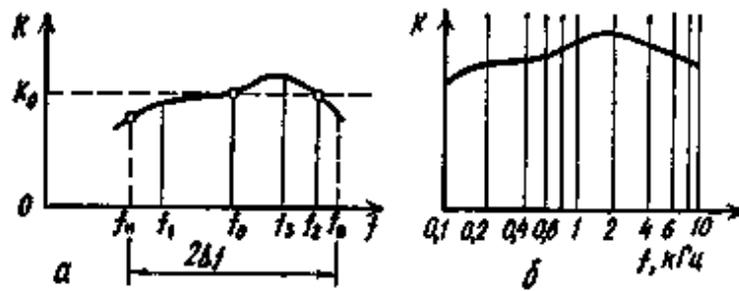


Рисунок 5 – Частотная характеристика усилителя в линейном (а) и логарифмическом (б) масштабах

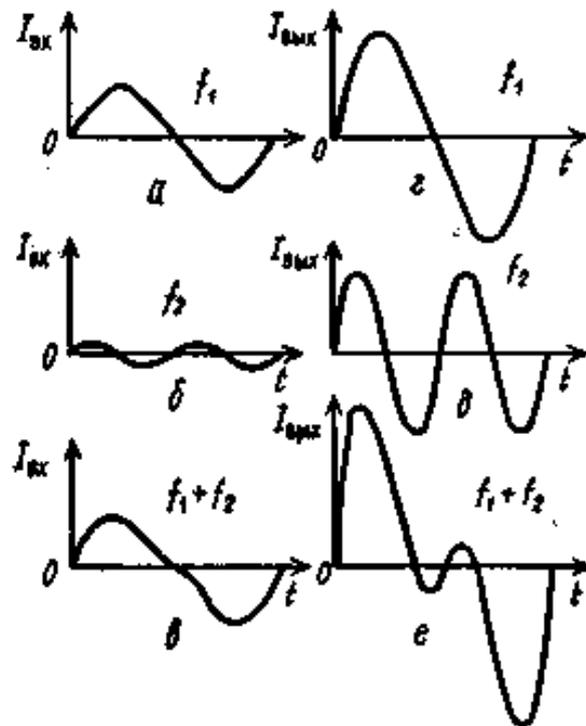


Рисунок 6 – Частотные искажения сигнала усилителем

В результате исследования восприятия частотных искажений звуковых сигналов слуховыми органами человека установлено, что если значение коэффициента частотных искажений M находится в пределах $0,7 \dots 1,4$ (это соответствует изменению данного значения на $\pm 3\text{дБ}$), то частотные искажения практически не ощущаются.

Рабочий диапазон частот усилителя представляет собой полосу частот, в пределах которой частотные искажения не превышают определенного допустимого значения. На рис. 5, а диапазон частот усилителя обозначен отрезком $2\Delta f$, крайние частоты диапазона — символами f_n — нижняя граничная частота и f_s — верхняя граничная частота.

Фазовые искажения так же, как и частотные, возникают вследствие наличия в схеме усилителя частотно-зависимых элементов. Сущность их заключается в том, что сигналы различной частоты претерпевают в схеме

усилителя неодинаковые сдвиги во времени, что приводит к искажению формы результирующего сигнала.

Необходимо заметить, что вследствие физиологических особенностей строения уха человека (ухом анализируется каждая составляющая звука в отдельности) при усилении звуковых сигналов (речь, музыка) фазовые искажения практического значения не имеют. Совсем иначе обстоит дело при усилении сигналов телевизионного изображения. В этом случае фазовые искажения создают двоение и размывание контуров изображения. Поэтому при проектировании таких усилителей стремятся по возможности ограничить фазовые искажения.

Нелинейные искажения. Как было установлено, частотные и фазовые искажения представляют собой изменения амплитудных соотношений и временных сдвигов между отдельными составляющими сложного сигнала. Совсем иначе проявляются нелинейные искажения. При наличии их в составе сложного сигнала на выходе усилителя будут дополнительные составляющие, которых не было вовсе на входе.

Нелинейные искажения возникают из-за наличия в схеме усилителя нелинейных элементов, т. е. элементов, в которых зависимость тока от напряжения не соответствует линейному закону (закону прямой пропорциональности). Такими элементами являются, главным образом, транзисторы и лампы, а также трансформаторы и дроссели с железными сердечниками, работающие в области, близкой к насыщению.

Для оценки нелинейных искажений служит *коэффициент нелинейных искажений* (его называют также *коэффициентом гармоник*). Этот коэффициент (K_f) определяется как корень квадратный из отношения суммы мощностей, выделенных на нагрузке усилителя высшими гармониками, к мощности, выделенной основной гармоникой:

$$K_f = \sqrt{\frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{P_1}}.$$

Так как мощность пропорциональна квадрату тока (напряжения), то при независимости от частоты сопротивления нагрузки для определения коэффициента K_f можно пользоваться формулами:

$$K_f = \sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots} / I_1;$$
$$K_f = \sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots} / U_1.$$

где I_1, I_2, \dots — действующие значения токов первой, второй и последующих гармоник, протекающих через нагрузочное сопротивление; U_1, U_2, \dots — действующие значения напряжений первой, второй и последующих гармоник, выделяемых на нагрузочном сопротивлении.

Обычно значение K_f выражают в процентах. В зависимости от назначения усилителя коэффициент K_f не должен превышать определенного допустимого значения. Так, в усилителях звуковой частоты допустимое значение K_f не более 10 %, в усилителях сигналов изображения — не более 15 % .

В некоторых случаях, когда одна из высших гармоник (обычно вторая или третья) по амплитуде намного больше других, коэффициент нелинейных искажений определяют по одной гармонике. Так, например, коэффициент второй гармоники $K_{f2} = I_2/I_1$ и т.д.

Выходная мощность, чувствительность и КПД. Выходной (номинальной) мощностью называется наибольшая мощность, которая может быть выделена на нагрузке усилителя при условии, что нелинейные искажения его не превышают допустимого значения.

Напряжение на входе усилителя, при котором на выходе развивается номинальная мощность, называется *чувствительностью усилителя*.

Для усилителей мощности существенным показателем является к. п. д., под которым понимается выраженное в процентах отношение номинальной мощности к суммарной мощности, затрачиваемой источниками питания:

$$\eta = \frac{P_{ном}}{P_{пит}} \cdot 100\% .$$

Динамический диапазон. Если на входе усилителя полезный сигнал отсутствует, то на выходе его чувствительный прибор все же может отметить наличие переменного напряжения сложной формы. Появление такого напряжения обусловлено наличием собственных шумов усилителя, сущность которых состоит в том, что коллекторный (анодный) ток усилителя даже при отсутствии сигнала на его входе хаотически изменяется (флуктуирует).

В многокаскадных усилителях реально приходится учитывать только шумы первого каскада, поскольку они усиливаются всеми последующими каскадами и на выходе заметно преобладают над остальными шумами.

Кроме шумов усилительных элементов и деталей, на выходе усилителя могут появляться напряжения наводок за счет паразитных связей усилителя с посторонними источниками электрических сигналов (электродвигателями, генераторами и т. п.), а также фон — напряжение с частотой, кратной 50 Гц, которое возникает при питании усилителя от сети переменного тока в случае недостаточного сглаживания пульсаций в выпрямителе и при плохом экранировании цепей питания.

Таким образом, на выходе усилителя, помимо полезного сигнала, всегда имеется определенный *уровень помех* — выраженное в децибелах отношение напряжения помех к номинальному напряжению сигнала:

$$L_{дБ} = 20 \lg \frac{U_{пом}}{U_{ном}} .$$

В хороших усилителях уровень помех должен быть порядка — 50 дБ и ниже, что соответствует отношению $\frac{U_{пом}}{U_{ном}} \approx \frac{1}{315}$.

Наличие помех приводит к тому, что минимальный полезный сигнал на выходе усилителя не может быть меньше определенной амплитуды, в противном случае он окажется совершенно искаженным («заглушенным» помехой).

Обычно считают, что амплитуда оптимального полезного сигнала должна быть в три-пять раз больше уровня помех. В то же время полезный сигнал не

может быть и слишком велик — при этом возрастают нелинейные искажения.

Итак, полезный сигнал на выходе усилителя ограничен как сверху, так и снизу.

Выраженное в децибелах отношение максимальной амплитуды, при которой сигнал еще не искажен, к минимальной амплитуде, при которой сигнал еще достаточно преобладает над помехой, называется *динамическим диапазоном усилителя*:

$$D = 20 \lg \frac{U_{\max}}{U_{\min}}.$$

4. Интегральной микросхемой (ИС) называется микроэлектронное изделие, выполняющее определенную функцию обработки сигналов и имеющее высокую плотность размещения электрически соединенных элементов (или элементов и компонентов). Все элементы микросхемы и их соединения выполнены в едином технологическом цикле на общей подложке. Синонимами термина «*интегральная микросхема*» являются термины «*микросхема*» и «*интегральная схема*».

Элементом ИС называется ее часть, выполняющая функцию транзистора, резистора или другого электрорадиоэлемента, изготовленная в едином технологическом цикле при создании ИС и не представляющая собой самостоятельного изделия. Компонент ИС отличается от элемента тем, что, он представляет собой самостоятельное комплектуемое изделие, которое устанавливается в ИС в процессе ее изготовления.

Микросхемы изготавливаются методами интегральной технологии, имеющей следующие отличительные особенности.

1. Элементы, однотипные по способу изготовления, обычно представляют собой или полупроводниковые *p-n* структуры с несколькими областями, различающиеся концентрацией примесей (транзисторы, диоды, резисторы и др.) или пленочные структуры из проводящих, резистивных и диэлектрических пленок (резисторы, конденсаторы и др.). При создании этих элементов используется ограниченное количество базовых технологических процессов. Основными из них являются:

а) эпитаксиальное наращивание полупроводникового материала на кремниевой подложке;

б) термическое окисление кремния для получения слоя оксида SiO_2 , защищающего поверхность кристалла от внешней среды;

в) фотолитография, обеспечивающая требуемые конфигурации пленок (SiO_2 , металл и т. п.) на поверхности подложки;

г) локальная диффузия – перенос примесных атомов в ограниченные области полупроводника (в настоящее время вместо диффузии часто используется ионная имплантация легирующего вещества путем воздействия пучка ионов, ускоренных внешним полем);

д) напыление тонких (до 1 мкм) пленок проводящего, резистивного и диэлектрического материала, е) нанесение толстых (более 1 мкм) пленок из

указанных материалов путем использования специальных паст с их последующим выжиганием.

2. Одновременно в едином технологическом цикле изготавливается большое количество одинаковых функциональных узлов, каждый из которых, в свою очередь, может содержать до сотен тысяч и более элементов.

3. При создании функциональных узлов многократно (на несколько порядков) по сравнению с традиционными методами производства аппаратуры на дискретных элементах сокращается количество технологических операций (особенно таких ненадежных и трудоемких, как сборка и монтаж элементов).

4. Размеры элементов и соединений между ними в большинстве случаев уменьшаются до технологически возможных пределов, обусловленных уровнем современного технологического оборудования.

5. Низконадежные соединения элементов (выполненные с помощью пайки) исключаются и заменяются высоконадежными соединениями (путем металлизации).

По технологии построения современные ИС делятся на две основные группы: *полупроводниковые* и *гибридные*.

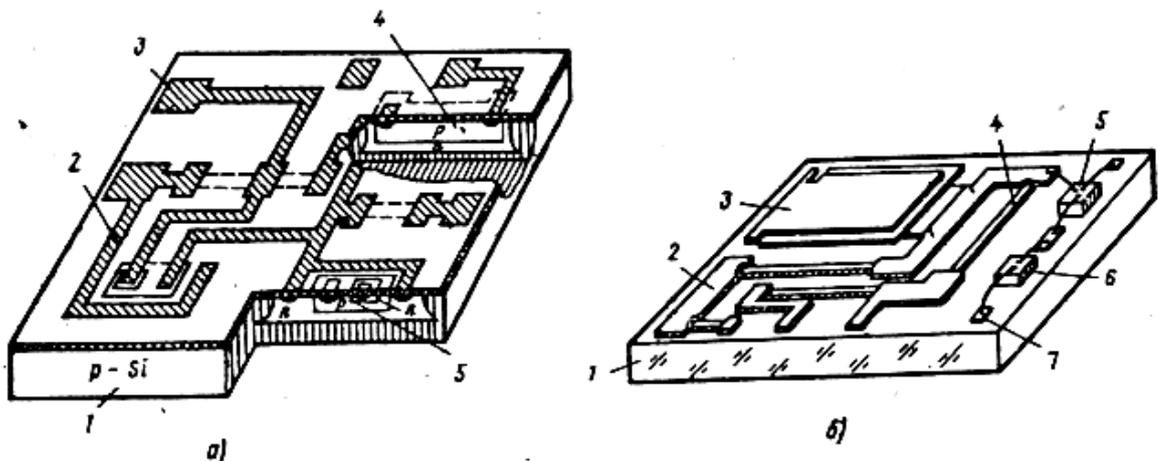


Рисунок 7 – Устройство интегральной микросхемы:

а) полупроводниковая ИС (1 – кремниевая подложка; 2 – межсоединения; 3 – контактная площадка; 4 – резистор; 5 – транзистор); б) гибридная ИС (1 – диэлектрическая подложка; 2 – межсоединения; 3 – конденсатор; 4 – резистор; 5 – транзистор; 6 – диод; 7 – контактная площадка)

Полупроводниковой называется ИС, в которой все элементы и межсоединения выполнены в объеме и на поверхности полупроводниковой кремниевой подложки. Создаются такие ИС на биполярных и МДП-структурах. На рис. 7, а показано устройство полупроводниковой биполярной ИС и элементов на примере транзистора и резистора, представляющих собой соответственно *n-p-n* и *p-n-p* структуры, созданные в приповерхностной области кремниевой подложки. Межсоединения и контактные площадки для соединения с внешними выводами выполнены в виде металлизации, нанесенной на поверхность подложки.

Гибридной называется ИС, содержащая пассивные элементы (резисторы, конденсаторы и др.) и межсоединения в виде пленок, выполненных на поверхности диэлектрической подложки, а также активные компоненты (диоды, транзисторы, кристаллы бескорпусных полупроводниковых ИС и др.). В зависимости от способа создания пассивных элементов и межсоединений гибридные ИС делятся на тонкопленочные и толстопленочные. Устройство тонкопленочной гибридной ИС показано на рис. 7, б.

Последовательность основных этапов построения полупроводниковой ИС иллюстрирует рис. 9. Исходным материалом для построения полупроводниковых ИС являются пластины кремния. Использование кремния обусловлено его высокой допустимой температурой и возможностью получения на кремнии слоя окисла, который является хорошим защитным покрытием для ИС и одновременно может использоваться как маска при создании элементов путем диффузии.

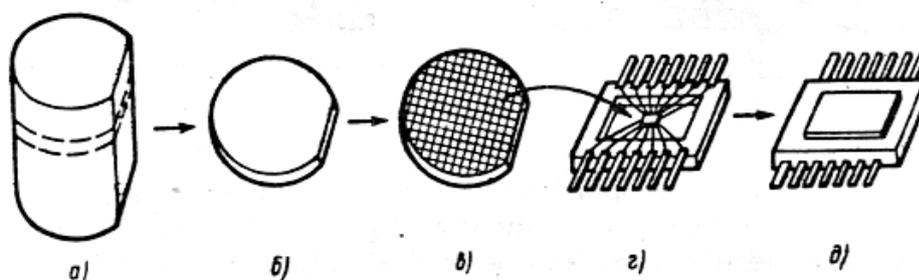


Рисунок 8 – Последовательность этапов полупроводниковой создания ИС

Выращенный кристалл кремния (рис. 8, а) разрезают на пластины слоями со строго параллельными плоскостями (рис. 8, б). Толщина пластин составляет 200...300 мкм, диаметр 40... 150 мм. Поверхность пластин тщательно обрабатывается для получения очень высокой степени чистоты поверхности. Получение элементов и их соединений на пластине (рис. 8, в) ведется одновременно для большого количества ИС. При этом используется ряд базовых технологических процессов, которые многократно могут повторяться. После создания элементов и межсоединений пластину разрезают на отдельные части (кристаллы), содержащие элементы соединения и контактные площадки одной ИС. При сборке такой кристалл закрепляют в корпусе ИС, контактные площадки соединяют с его выводами (рис. 8, г). Заключительной операцией при сборке ИС является герметизация корпуса (рис. 8, д).

При получении гибридных ИС используют пластины из высококачественного диэлектрика, на которых создаются пленочные пассивные элементы и межсоединения для нескольких ИС. Пластина разрезается на отдельные подложки ИС. На них устанавливают компоненты, после чего осуществляются соединения с выводами корпуса и ИС герметизируется. Микросхемы являются основным видом элементной базы современной радиоэлектронной аппаратуры. По сравнению с другими видами элементной базы (дискретные полупроводниковые, электровакуумные, газоразрядные приборы,

радиодетали) ИС имеют ряд особенностей. Рассмотрим их на примере полупроводниковой ИС, у которой эти особенности проявляются в наибольшей мере.

А. Микросхема самостоятельно выполняет законченную, часто весьма сложную функцию, например процессора ЭВМ и т.п., которую можно осуществить с помощью большого количества дискретных элементов, соединенных по определенной схеме. Поэтому ИС должна рассматриваться не только как элемент с определенными входными и выходными параметрами, но и как устройство с определенной электрической схемой.

В. Усложнение функций, выполняемых ИС, в отличие от реализации на дискретных элементах практически не сопровождается заметным ухудшением надежности, габаритных размеров и других показателей. Действительно, надежность ИС при повышении сложности остается почти равной надежности транзистора в силу того, что все элементы выполняются совместно в одном том же технологическом цикле, подобном производству транзистора. Размеры ИС с повышением сложности электрической схемы также почти не изменяются, поскольку степень интеграции растет главным образом за счет уменьшения размеров элементов ИС. Отсюда следует, что при использовании ИС в значительной мере снимаются принципиальные ограничения по усложнению функций аппаратуры, которые были свойственны традиционному построению радиоэлектронных устройств на дискретных элементах.

С. Функциональная сложность и параметры ИС в значительной степени определяются возможностями технологии их изготовления. Например, совершенствование технологии обуславливает повышение степени интеграции элементов. Это, в свою очередь, позволяет, с одной стороны, реализовать на том же кристалле более сложный функциональный узел, а с другой, — за счет сокращения длины соединений уменьшить задержки сигналов и паразитную емкость в соединительных линиях. Поэтому разработка и правильное применение ИС невозможны без учета технологических особенностей построения ИС, от которых зависят их параметры и функциональные возможности.

Д. Элементы ИС имеют следующие отличия от аналогичных дискретных элементов. Во-первых, они имеют большой разброс параметров относительно расчетных значений, что обусловлено их малыми размерами, невозможностью подгонки и подстройки и рядом других технологических особенностей. Во-вторых, имеет место ограничение номинальных значений параметров-сопротивлений и емкостей, что вызвано малой площадью, отводимой под эти элементы. Индуктивность в виде простого полупроводникового элемента не реализуется вообще. Элементы ИС имеют также ограничение по мощности рассеивания тепла. В-третьих, однотипные элементы одной ИС, созданные в едином технологическом процессе, характеризуются высокой идентичностью параметров и характеристик. В-четвертых, для элементов ИС характерно наличие ряда паразитных параметров, отсутствующих в дискретных элементах; (появление токов утечки

в подложку, появление емкости между элементом подложкой, а также наличие индуктивных и емкостных связей между близко расположенными элементами и соединениями), это является следствием создания элементов ИС на единой полупроводниковой подложке. Перечисленные особенности элементов сказываются на принципах построения функциональных узлов, реализуемых в виде ИС.

Е. В ИС при создании функционального узла предпочтение отдается активным элементам перед пассивными. Это обусловлено при одинаковой технологии построения тех и других меньшими размерами активных элементов. При построении аналогичных узлов на дискретных элементах, наоборот, всегда стремятся уменьшить количество дорогих активных элементов (транзисторов и др.) и использовать по возможности более дешевые пассивные элементы, это определяет различие в построении электрических схем на дискретных элементах и в виде полупроводниковых ИС.

Ф. В ИС реализуются некоторые типы элементов, которые не имеют дискретных аналогов (многоэмиттерные транзисторы, элементы с инжекционным питанием, структуры с распределенными параметрами, приборы с зарядовой связью и др.). Их использование открывает дополнительные схемотехнические и технологические возможности по построению микроэлектронной аппаратуры с лучшими показателями по надежности, габаритным размерам, быстродействию и т.п.

В зависимости от функционального назначения ИС можно разделить на *аналоговые* и *цифровые*.

В *аналоговых* ИС сигнал на выходе является непрерывной функцией сигнала, действующего на входе. В этих ИС сигнал отображается обычно мгновенным значением напряжения (или тока) на входе и выходе элемента. Аналоговые ИС по выполняемым функциям подразделяются на следующие подгруппы: *генераторы, детекторы, коммутаторы, модуляторы, преобразователи, вторичные источники питания, устройства задержки, устройства сравнения, усилители, фильтры, формирователи, многофункциональные ИС.*

В *цифровых* ИС сигналы имеют два дискретных уровня, одному из которых присваивается условное наименование «*логическая единица*», а другому – «*логический ноль*». В качестве сигналов чаще всего выбираются уровни напряжений на входе и выходе элемента. Обычно напряжение высокого уровня принимается за «*единицу*», напряжение низкого уровня — за «*нуль*». Цифровые ИС по выполняемым функциям подразделяются на следующие подгруппы: *логические элементы, триггеры, цифровые устройства, запоминающие устройства, вычислительные устройства.*

В настоящее время широко применяют аналого-цифровые ИС, в которых аналоговый сигнал преобразуется в цифровой и наоборот.

Обычно микросхемы выпускают сериями, представляющими собой совокупность ИС имеющих единое конструктивно-технологическое исполнение и предназначенных для совместного применения.

Количество элементов и компонентов, находящихся в корпусе ИС, определяет степень ее интеграции $K = [lg N]$, где фигурные скобки означают округление до ближайшего большего целого числа. В соответствии с этой формулой к ИС первой степени интеграции относятся микросхемы, содержащие до 10 элементов и компонентов включительно, ко второй – до 100, к третьей – до 1000 и т.д. В настоящее время выпускаются ИС седьмой степени интеграции.

В литературе часто встречаются такие понятия сложности, как: малая (МИС), средняя (СИС), большая (БИС) и сверхбольшая интегральная схема (СБИС). Эти понятия зависят не только от числа элементов и компонентов, но и от функционального назначения ИС, технологии ее изготовления.

Большинство аналоговых ИС относится к малым и средним интегральным схемам, однако разработаны гибридные БИС, а также сверхбольшие гибридные БИС (СБИС). Цифровые ИС, содержащие логические элементы, триггеры и цифровые устройства, как правило, представляют собой малые и средние микросхемы, а вычислительные устройства (микропроцессоры) и запоминающие устройства относятся, как правило, к большим и сверхбольшим интегральным схемам (БИС, СБИС).

Основными проблемами, которые приходится решать при повышении степени интеграции, являются уменьшение рассеиваемой мощности, создание сложных межсоединений и корпусов БИС. Проблема рассеивания мощности возникает вследствие того, что кремниевая подложка ИС допускает удельную мощность, не превышающую 5 Вт/см^2 (при естественном охлаждении). Проблема межсоединений обусловлена тем, что из-за большого количества элементов для их соединений часто требуется многослойная система разводки. Изоляция слоев соединений и необходимость осуществления связей между ними представляет трудную технологическую задачу. Сложной является также проблема создания надежных корпусов с количеством выводов более 100.

Основным путем достижения высокой степени интеграция полупроводниковых ИС является использование элементов с минимальными размерами и потребляемой мощностью. В современных БИС широко используются *МДП-элементы* с каналом *n*-типа и маломощные элементы на базе *диодов Шоттки*. Одним из перспективных видов элементов для построения БИС являются приборы с *инжекционным питанием*.

Другим путем повышения степени интеграции является увеличение площади кристалла, размеры которого достигают в настоящее время $10 \times 10 \text{ мм}$. Однако этот путь имеет ограничение, связанное с тем, что с ростом площади кристалла экспоненциально уменьшается выход годных кристаллов из-за большой вероятности появления дефектов в кристаллической решетке.

5. Аналоговые ИС предназначены для преобразования и обработки сигналов, изменяющихся по закону непрерывной функции. Они находят широкое применение в профессиональной и любительской аппаратуре связи, телевидения и телеуправления, магнитофонах, измерительных приборах, системах контроля и т.п.

Благодаря совершенствованию технологии, схемотехники и методов проектирования номенклатура аналоговых ИС постоянно расширяется, заменяются и улучшаются их функциональные возможности. Выпускаются ИС для различных генераторов, детекторов, модуляторов, преобразователей, усилителей коммутаторов, ключей, фильтров, устройств селекции и сравнения, вторичных источников питания, а также многофункциональные ИС и др. Все они объединены в серии. На первом этапе развития микроэлектроники серии аналоговых ИС, как правило, имели сравнительно узкое функциональное предназначение и ограниченный состав, а сами ИС были далеки до функциональной завершенности. Применение ИС, особенно совместное использование ИС разных серий, было сопряжено с необходимостью подключения сравнительно большого количества дополнительных внешних элементов, что снижало ожидаемый эффект от использования изделий, выполненных по интегральной технологии, и вызывало скептическое отношение к новой элементной базе со стороны отдельных профессиональных разработчиков аппаратуры и радиолюбителей. В настоящее время наметилась тенденция к формированию серий аналоговых ИС с ориентацией не на тип, а на класс аппаратуры. Прослеживается стремление разработчиков к максимально возможному расширению функциональных возможностей большинства ИС.

Усилительные ИС составляют наиболее многочисленную и универсальную подгруппу среди аналоговых ИС. Для них характерны определенные схемотехнические особенности, связанные с достоинствами и ограничениями интегральной технологии: преимущественное использование *n-p-n* структур, замена высокоомных резисторов активными транзисторными источниками тока, обладающими большим динамическим внутренним сопротивлением, отказ от применения межкаскадных разделительных конденсаторов, широкое использование составных транзисторов, управляемых, источников тока, комплементарных структур, дифференциальных транзисторных пар, многоэлектродных транзисторов, различных термостабилизирующих цепей и др.

Выпускаемые промышленностью ИС усилителей существенно различаются по основному предназначению, функциональным возможностям, схемотехнической сложности и т.д.

Для усилителей звуковой частоты (УЗЧ) и трактов ЗЧ аппаратуры радиосвязи и радиовещания выпускается широкая гамма ИС.

Несколько ИС УЗЧ для высококачественной звуковоспроизводящей аппаратуры выпускаются в составе серии К174. Микросхема К174УН4 предназначена для использования в усилителях мощности звуковых трактов. Выходная мощность усилителя до 1 Вт при сопротивлении нагрузки 4 Ом и номинальном напряжении питания 9 В. Коэффициент гармоник не более 2%, коэффициент усиления 4...40. Входное сопротивление на частоте 1 кГц не менее 10 кОм. Ток потребления не превышает 10 мА.

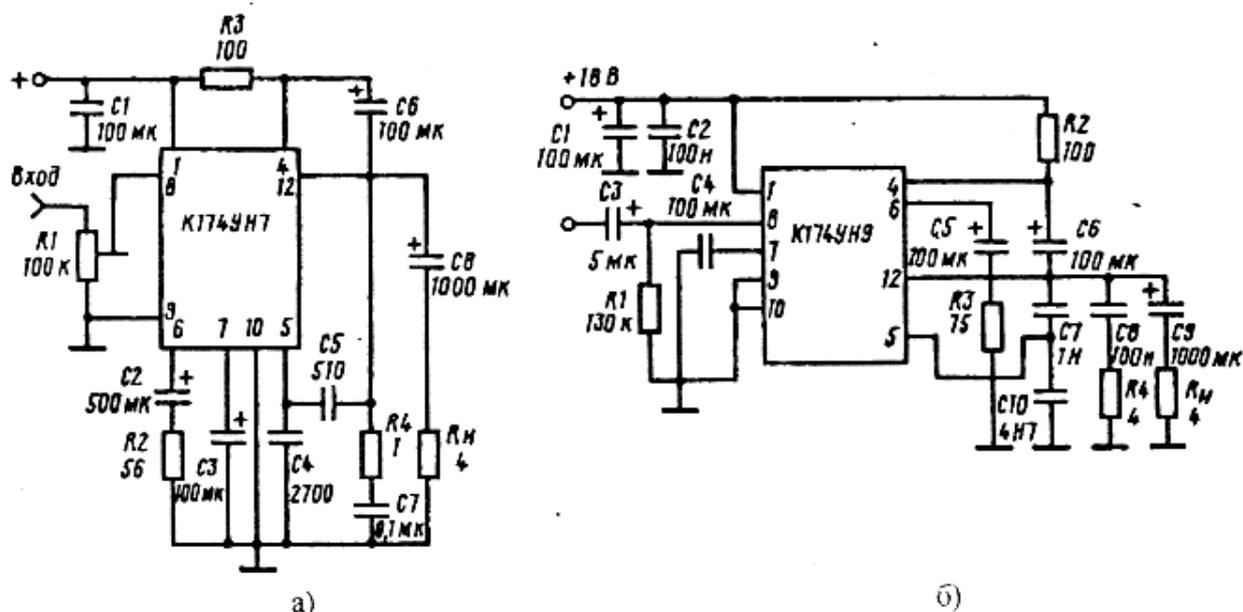


Рисунок 9 – Усилители звуковой частоты

Используя ИС К174УН7, можно построить УЗЧ (рис.9, а) с выходной мощностью 0,05...4,5 Вт. Коэффициент гармоник ИС усилителя при мощности до 2,5 Вт не превышает 2%, а затем возрастает до 10% при мощности 10 Вт. Микросхема предназначена для использования в телевизионных приемниках. Напряжение питания составляет 15 В, ток потребления 5... 20 мА.

Микросхема К174УН9 предназначена для создания низкочастотного усилителя мощности (рис.9, б), работающего в диапазоне 0,02...20 кГц при коэффициенте неравномерности АЧХ не более 3 дБ. Коэффициент гармоник усилителя при выходной мощности 5 Вт не более 1 % для модификации А и 2 % для модификации Б. В ИС предусмотрена возможность регулирования коэффициента усиления и улучшения АЧХ с помощью внешних элементов. Предусмотрена защита от перегрузок на выходе. Ток потребления УЗЧ не более 30 мА, напряжение питания 18 В.

Особого внимания среди выпускаемых промышленностью ИС заслуживают операционные усилители (ОУ) различных серий.

За последние годы благодаря совершенствованию технологии и развитию схемотехники значительно расширена номенклатура ОУ и улучшено их качество. Повышены коэффициент усиления и коэффициент подавления синфазного сигнала, расширен частотный диапазон, увеличено быстродействие и входное сопротивление, уменьшены входные токи и их разности, обеспечена защита выходных каскадов многих ОУ от перегрузки при коротком замыкании в нагрузку и др.

В современных ОУ широко применяют *супер-β-транзисторы*, *двухэмиттерные транзисторы*, *полевые транзисторы*, *двухколлекторные боковые р-п-р транзисторы*, являющиеся эквивалентами высокоомных генераторов стабильного тока с малыми токами эмиттера и др.

Операционные усилители на практике условно классифицируют на несколько групп.

К ОУ общего применения относят обычно ИС, характеризуемые средними значениями параметров по сравнению с максимальным достигнутыми уровнем и суммарной погрешностью в пределах единиц процентов. На их основе можно построить *УЗЧ, усилители постоянного и переменного тока, генераторы сигналов различной формы, гираторы, функциональные преобразователи, стабилизаторы, компараторы, активные фильтры* и др.

Прецизионные ОУ характеризуются суммарной погрешностью не более долей процента. У них очень высокий коэффициент усиления по напряжению, хорошее подавление синфазного сигнала, низкий уровень шума, незначительное напряжение смещения нуля, пренебрежимо малый дрейф основных параметров. Основное назначение прецизионных ОУ – усиление без искажений слабых электрических сигналов датчиков, сопряженных с измерительными устройствами.

К *быстродействующим ОУ* относят ИС, обеспечивающие скорость нарастания выходного сигнала более 50 В/мкс. Для повышения быстродействия в ОУ вводят дополнительный ВЧ канал, максимально (до двух) сокращают число усилительных каскадов, используют преимущественно высококачественные биполярные *n-p-n* и *n*-канальные МДП-транзисторы, широко используют каскадное включение транзисторов и глубокие ООС.

Для работы в малогабаритной, в том числе, переносной аппаратуре с батарейным питанием, выпускают *микромощные ОУ*. Перевод ИС в микроваттный режим осуществляется как путем уменьшения тока потребления, так и снижением напряжения источника питания. Микромощные ОУ строятся преимущественно по двухкаскадной схеме с динамической нагрузкой, с использованием достоинств экономичных комплементарных структур. Источники стабильного тока и внутренние стабилизаторы напряжения во многих микромощных ОУ управляются извне.

Выпускаются *мощные ОУ* с выходным током в пределах единиц ампер и высоковольтных ОУ с повышенным напряжением питания.

При работе с ОУ в интересах оптимизации выбора элементной базы необходимо учитывать схемотехнические и технологические особенности отдельных ИС. Например, *МДП-транзисторы* на входе ОУ позволяют получить очень высокое входное сопротивление и малый входной ток, но по шумовым параметрам и дрейфу *напряжения смещения* они уступают ОУ на биполярных структурах (особенно с супер- β -транзисторами) и на полевых транзисторах с управляющим *p-n* переходом. *Операционные усилители с дифференциальным входом* более многофункциональны, чем усилители, имеющие лишь инвертирующий вход, но последние обеспечивают лучшее быстродействие. *Двухканальные ОУ* более высокочастотны, чем одноканальные. Минимальным напряжением смещения нуля и лучшими шумовыми параметрами характеризуются *ОУ с преобразованием сигнала* и т.д.

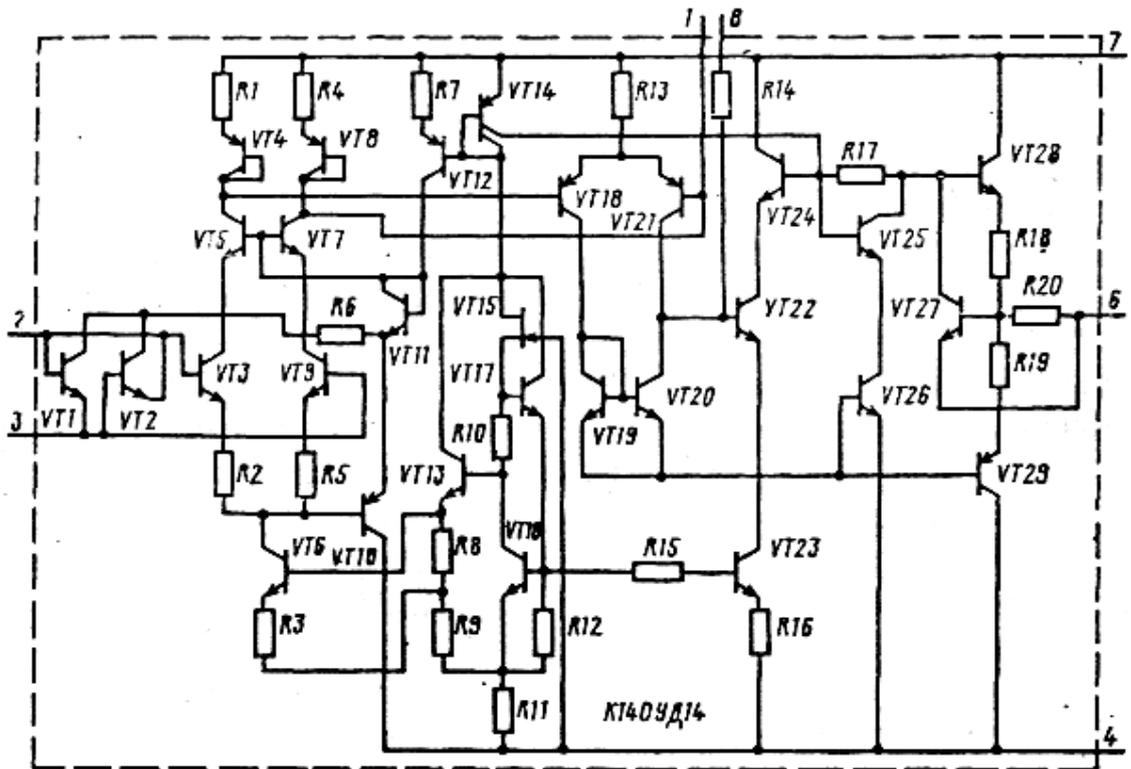


Рисунок 10 – Схема операционного усилителя К140УД14

Например, особенности ОУ К140УД14 (рис.10) определяются применением во всех каскадах супер- β -транзисторов.

В последние годы большое развитие получили ИС *компараторов*. Они широко используются в профессиональной и любительской аппаратуре при переходе от аналоговых трактов к цифровым, при необходимости сравнения двух сигналов и в ряде других случаев. Компараторы представляют собой специализированные ОУ, работающие в нелинейном режиме и предназначенные для сравнения входного сигнала с опорным. В зависимости от того, какой из этих сигналов преобладает, на выходе компаратора устанавливается напряжение, соответствующее уровню логического нуля или логической единицы.

Наиболее типична трехкаскадная схема компаратора: входной дифференциальный усилитель, в значительной степени определяющий чувствительность, быстродействие, входные токи, диапазон допустимых входных напряжений, коэффициент ослабления синфазного сигнала и ряд других параметров, промежуточный усилитель, обладающий большим усилением и обеспечивающий формирование больших перепадов напряжения при незначительной разнице сигналов на входах, выходной формирователь уровня, представляющий собой усилитель мощности.

Серийные компараторы подразделяют по точности и быстродействию. В зависимости от целевого предназначения ИС ее каскады имеют определенные особенности. Например, для обеспечения максимального быстродействия нельзя допускать перехода транзисторов в режим глубокого насыщения, а усиление должно быть наименьшим из обеспечивающих требуемую чувствительность. Наиболее эффективно в этом плане

применение широкополосных дифференциальных усилителей с использованием каскадных схем, замена усилителей напряжения усилителями токов, что сокращает время зарядки паразитных емкостей и др.

б. Современные цифровые микросхемы характеризуются широким диапазоном выполняемых функций и большим разнообразием вариантов конструктивно-технологического исполнения.

Цифровые ИС, как и аналоговые, выпускаются сериями. Микросхемы одной серии имеют одинаковые напряжения питания, электрические и эксплуатационные характеристики и при совместном применении не нуждаются в дополнительных согласующих элементах. Принадлежность ИС к той или иной серии указывают в ее условном обозначении. Среди большого числа серий цифровых ИС можно выделить следующие группы: серии функционально полного состава, серии, специализированные по функциональному назначению, микропроцессорные комплекты больших интегральных схем.

Серии первой группы включают ИС различного функционального назначения: *логические, триггеры, регистры, счетчики, дешифраторы, кодопреобразователи* и т.д. Чем шире функциональный состав серии, тем в большей степени она обеспечивает выполнение требований к микроэлектронной аппаратуре в отношении надежности, компактности, экономичности, технологичности, удобства эксплуатации и ремонта. Некоторые серии состоят из 100 и более типов ИС.

Серии ИС второй группы характеризуются более узкой специализацией. К ним относят серии ИС памяти, серии ИС сопряжения с линиями передачи и управления различными устройствами (интерфейсные ИС), серии ИС аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразования, серии ИС вторичных источников питания и т. д.

Серии ИС третьей группы, называемые микропроцессорными комплектами БИС, включают ИС, необходимые для построения микропроцессорных вычислительных и управляющих устройств. Сюда входят микропроцессоры БИС ввода-вывода, таймеры, генераторы, различные вспомогательные ИС.

Цифровую микросхему как функциональный узел характеризуют системой сигналов, которые целесообразно разделить на информационные и управляющие.

Сигналы управления определяют вид операции, режим работы ИС, обеспечивают синхронизацию, установку начального состояния, коммутируют входы и выходы, стробируют входные или выходные сигналы, задают адрес, например в БИС памяти, и т.д.

Современные ИС повышенного уровня интеграции содержат в едином полупроводниковом кристалле десятки и сотни тысяч транзисторов, объединенных в сложные функциональные узлы и устройства. Такие БИС имеют большое число внешних выводов (24, 48 или 64) для информационных и управляющих сигналов. Учитывая сложность таких ИС, их свойства обычно рассматривают на структурном уровне с привязкой основных элементов структуры ИС к ее информационным и управляющим сигналам.

Такой подход оказывается целесообразным и при рассмотрении сравнительно несложных ИС, таких, как триггеры, регистры и т. п.

Потребляемая микросхемой от источника питания мощность в режиме переключения обычно значительно выше, чем в статическом режиме. Для некоторых типов ИС это превышение может достигать двух-трех порядков. Это объясняется наличием в микросхемах емкостных элементов, работой биполярных транзисторов с насыщением и другими причинами. Указанное обстоятельство следует учитывать при расчете энергоемкости источников питания микроэлектронных устройств.

Динамическая помехоустойчивость количественно определяется амплитудой кратковременного импульса помехи на входе ИС, при которой уровень сигнала на выходе не выходит за установленные пределы. Причиной возникновения импульсов помех могут быть емкостные и индуктивные связи в меж соединениях, источники мощных энергетических излучений (реле, тиристоры и др.), броски тока и напряжения в цепях питания. Имеется тесная связь между временными параметрами и динамической помехоустойчивостью: чем меньше средняя задержка, т.е. чем выше быстродействие ИС, тем ниже ее динамическая помехоустойчивость. Об этом следует помнить при выборе ИС: неоправданное завышение требований к быстродействию ИС неминуемо приводит к снижению надежности функционирования микроэлектронных устройств из-за сбоев под воздействием импульсов помех.

Современные цифровые ИС характеризуются широким диапазоном электрических параметров. Наиболее важным показателем, определяющим многие свойства и область применения ИС, является *быстродействие*. С быстродействием непосредственно связан другой важный показатель – *потребляемая мощность*: чем выше скорость переключения, тем большая мощность потребляется ИС от источника питания. В свою очередь, мощность потребления определяет уровень рассеиваемой мощности, а через этот показатель – *допустимую плотность размещения элементов* (транзисторов) в полупроводниковом кристалле, т.е. уровень интеграции: чем выше уровень потребляемой мощности, тем ниже уровень интеграции. Поэтому практически целесообразно иметь серии ИС с различным быстродействием и энергопотреблением.

В зависимости от технологии изготовления ИС подразделяются на серии (семейства), различающиеся физическими параметрами базовых элементов, а также числом и функциональным назначением входящих в их состав микросхем. В настоящее время разработано несколько десятков технологий изготовления ИС. Наиболее широкое применение находят ИС, изготавливаемые по *ТТЛ*-, *КМОП*- и *n-МОП*-технологиям. Каждая технология непрерывно совершенствуется с целью увеличения быстродействия ИС, уменьшения потребляемой мощности и увеличения степени интеграции-числа элементов, размещаемых на кристалле заданной площади.

Наиболее важным параметром, характеризующим качество серий ИС, является работа переключения – произведение среднего времени задержки сиг-

налов в вентиле $t_{3,cp}$ на мощность потребления вентиля P (табл. 1).

Таблица 1

серия ИС	$t_{3,cp}$, нс	P , мВт/вент	$I_{вх}^1$, мкА	$I_{вх}^0$, мА	F_{max} , МГц	$I_{вых}^1$, мкА	$I_{вых}^0$, мкА	n	$t_{3,cp} \times P$, Дж
SN74	10	10	40	-1,6	35	-400	16	10	100
SN74L	33	1	10	-0,18	3	-200	3,6	10	33
SN74H	6	22	50	-2	50	-500	20	10	132
SN74LS	9,5	2	20	-0,36	45	-400	8	20	19
SN74S	3	19	50	-2	125	-1000	20	10	57
SN74ALS	4	1	10	-0,2	50	-400	8	40	4
SN74AS	1,5	22	-	-	200	-	20	100	33
SN74F	2	4	20	-0,6	130	-1000	20	33	8

Остальные параметры в табл. 1 означают: $I_{вх}^0$ – входной ток при подаче на вход уровня логического нуля; $I_{вх}^1$ – входной ток при подаче на вход уровня логической единицы; F_{max} – максимальная частота переключения; $I_{вых}^1$ – выходной ток при уровне логической единицы на выходе; $I_{вых}^0$ – выходной ток при уровне логического нуля на выходе, n – нагрузочная способность (отношение $I_{вых}^0/I_{вх}^0$).

Наиболее перспективными являются ИС с диодами Шоттки.

Комплементарные МОП ИС (КМОП ИС) характеризуются малым потреблением мощности в статическом режиме и большей помехоустойчивостью по сравнению с ТТЛ ИС. Первые КМОП ИС были разработаны фирмой КСА в 1968 г.

В табл.2 приведено соответствие отечественных и зарубежных серий ИС.

Таблица 2

Серия		Фирма	Напряжение питания, В
отечественная	зарубежная		
164,176	CD4000	RCA	9 и 3...15
564, 561	CD4000A MC14000A	RCA Motorola	3...15
КР1561	CD4000B MC14000B	RCA Motorola	3...18
1564	54НС	National Semiconductor Corp., Motorola	2...6

По сравнению с ТТЛ ИС следует отметить следующие достоинства КМОП ИС:

- малая потребляемая мощность в диапазоне частот до 2 МГц (в статическом режиме мощность потребления составляет 0,02... 1 мкВт на вентиль);
- большой диапазон напряжения питания (3... 15 В; для серии 74НС 2...6 В)
- можно использовать нестабилизированный источник питания;
- очень высокое входное сопротивление ($10^3...10^6$ МОм);
- большая нагрузочная способность ($p=50$; $p=1000$ -на частотах до 10 кГц).

незначительная зависимость характеристик от температуры.
Недостатки КМОП ИС серий 561 и 1561:
повышенное выходное сопротивление (0,5... 1 ком);
большое влияние емкости нагрузки и напряжения питания на время задержки, длительность фронтов и потребляемую мощность;
большие времена задержек и длительности фронтов;
большой разброс всех параметров.

Увеличение мощности потребления с повышением частоты переключения вызвано наличием паразитных емкостей у входов ИС. На предельно допустимых частотах мощность потребления КМОП ИС оказывается такого же порядка, что и у ТТЛ ИС.

Рекомендуемая литература

1. Горбачев Г.Н., Чаплыгин Е.Е. Промышленная электроника: Учеб. для ВУЗов. – М.: Энергоатомиздат, 1988. С.9-103, 134-210.
2. Гутников В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.
3. Могилевский М.М., Анохина И.Д., Бревда Н.И. Общая радиотехника. – К.: Вища школа, 1985. С.35-67, 93-109, 216-243.
4. Вениаминов В.Н., Лебедев О.Н., Мирошниченко А.И. Микросхемы и их применение. – М.: Радио и связь, 1989.
5. Пухальский Г.И., Новосельцев ТЛ. Проектирование дискретных устройств на интегральных микросхемах: Справочник. – М.: Радио и связь, 1990.
6. Тарабрин Б.В., Лукин Л.Ф. и др. Интегральные микросхемы: Справочник. – М.: Радио и связь, 1986.
7. Шилов В.Л. Популярные цифровые микросхемы: Справочник. – М.: Радио и связь, 1987.

Контрольные задания для СРС [1-7]

1. Дать общую характеристику современных интегральных микросхем
2. Проанализировать архитектуру современных микропроцессоров

Тема 5 Электромагнитные и электромашинные средства электроавтоматики

План лекции

1. Электромагниты и электромагнитные реле. Типовые релейные схемы
2. Исполнительные двигатели постоянного тока
3. Исполнительные двигатели переменного тока
4. Шаговые двигатели
5. Тахогенераторы

1. *Электромагнит* (ЭМ) является наиболее распространенным преобразователем электрического сигнала в механическое движение. ЭМ получили применение в системах автоматизации в качестве приводных и управляющих устройств. Например, в подъемных и тормозных устройствах,

приводах для включения и выключения коммутационных аппаратов, электромагнитных контакторах, автоматических регуляторах, приводах для включения и отключения механических, пневматических, гидравлических цепей, а также для сцепления и расцепления вращающихся валов, открывания и закрывания клапанов, вентилях, заслонок, золотников на небольшое расстояние с усилием в несколько десятков ньютонов.

По назначению различают электромагниты:

– *удерживающие*, которые служат для фиксации положения ферромагнитных тел (например, предназначенные для подъема предметов из ферромагнитного материала, электромагнитные плиты для фиксации деталей на металлообрабатывающих станках, электромагнитные станки);

– *приводные*, которые служат для перемещений исполнительных устройств (например, клапанов, золотников, заслонок, железнодорожных стрелок), а также используются в контакторах, электромагнитных муфтах и др.;

– *специальные*, которые используются в ускорителях элементарных частиц, медицинской аппаратуре и др.

По роду тока в обмотке различают ЭМ *постоянного* и *переменного* токов. ЭМ постоянного тока делят на *нейтральные*, не реагирующие на полярность управляющего сигнала, и *поляризованные*, реагирующие на полярность сигнала (когда на якорь действуют два независимых друг от друга потока).

По конструктивному исполнению различают следующие типы ЭМ.

Клапанные – с внешним притягивающим якорем (рис. 1, а-г), при этом магнитные системы могут иметь различную форму:

- П-образный магнитопровод и сердечник круглого сечения;
- П-образный магнитопровод и плоский якорь-ядро;
- Ш-образный магнитопровод и сердечник круглого сечения;
- цилиндрический магнитопровод.

В клапанных ЭМ происходит небольшое перемещение якоря (несколько миллиметров), благодаря чему они развивают большие усилия и имеют высокую чувствительность.

Прямоходовые – с поступательным движением якоря. Используются, как правило, в виде соленоидов и поэтому часто называются соленоидными ЭМ (рис. 1, д, е). Прямоходовые ЭМ имеют большой ход якоря, меньшие, чем клапанные, размеры и большее быстродействие, однако чувствительность у них меньше.

По своему назначению прямоходовые ЭМ выполняются в двух вариантах: с неподвижным сердечником-«стопом» (рис. 1, д, е) и без сердечника со сквозным отверстием по оси катушки – так называемые *длинноходовые* электромагниты (рис. 1, е).

ЭМ с неподвижным сердечником создает большое усилие, значение которого возрастает по мере приближения якоря к сердечнику. Длинноходовые системы позволяют получить относительно большой ход якоря (до 200 мм) за счет удлинения катушки.

Эти ЭМ применяются в установках, работающих в режиме кратковременной нагрузки, т.е. когда ток, проходящий через катушку, имеет большое значение, но не вызывает ее перегрева.

С поперечным движением – якорь движется в поперечном направлении к средней линии между полюсами. Практическое использование получили следующие формы магнитных систем:

с выступающим якорем (рисунок 1, ж) – применяется при углах поворота якоря 25...40°;

с вытягивающимся якорем (рисунок 1, з) – применяют при углах поворота якоря 10... 15°. Позволяют получить тяговую характеристику любой формы (возрастающую, спадающую с любым углом наклона), что обеспечивается соответствующим выбором профиля якоря.

В этих системах якорь подвешивается на пружине, а рабочий угол поворота якоря выбирается таким, чтобы он не занимал крайних положений против полюсов.

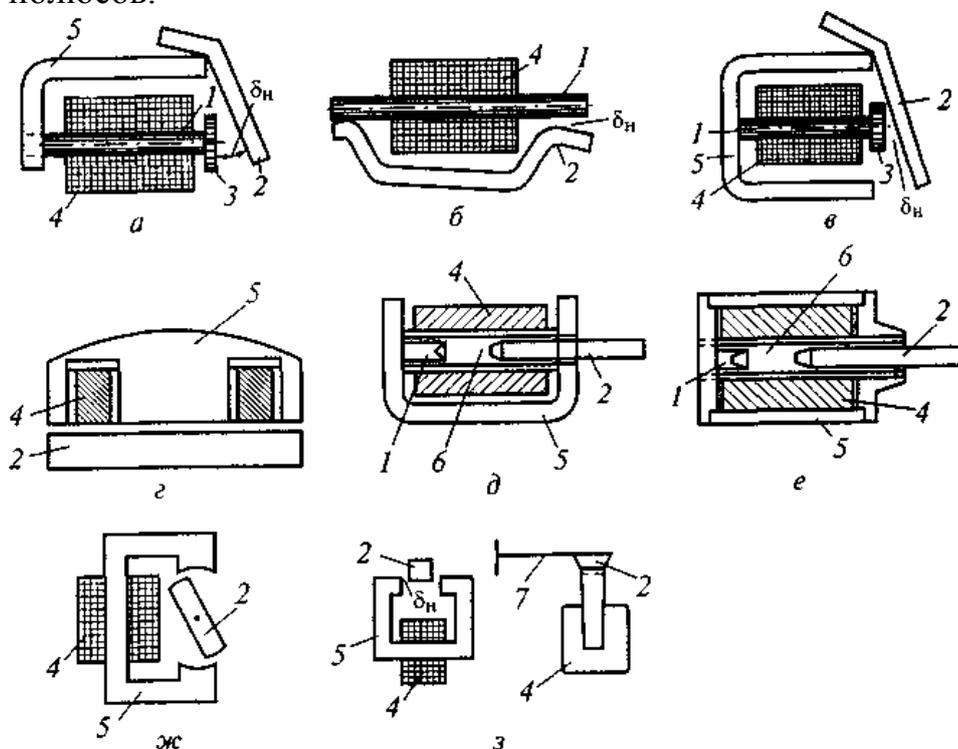


Рисунок 1 – Нейтральные электромагниты различных конструкций:

а ... г – клапанные; д, е – прямоходовые; ж, з – с поперечным движением якоря; 1 – сердечник; 2 – якорь; 3 – полюсный наконечник; 4 – катушка; 5 – ярмо; 6 – направляющая трубка; 7 – пружина; δ_n – начальный воздушный зазор

Рассмотренные системы с движущимся в поперечном направлении якорем применяются в автоматических регуляторах, когда требуется получить большое значение коэффициента возврата. Кроме того, их удобно использовать в устройствах, работающих на постоянном токе (при переменном токе могут возникнуть вибрации якоря, в то время как зазор между полюсами и якорем должен быть постоянным).

ЭМ состоит из *магнитопровода* и собственно *катушки*.

Поведение якоря электромагнита после прекращения тока в обмотке во многом зависит от магнитных свойств магнитопровода, а именно от величины его *остаточной индукции* B_T и *коэрцитивной силы* H_C . При перемагничивании ферромагнетика полем обратного знака остаточная индукция B_T уменьшается и при значении поля H_C индукция падает до нуля. Напряженность магнитного поля, равная H_C , называется *коэрцитивной силой*. Доводя внешнее поле до $-H_S$, можно получить нижнюю ветвь кривой намагничивания, а, изменяя поле от $-H_S$ до $+H_S$, получить замкнутую петлю гистерезиса. Площадь, ограниченная петлей, пропорциональна работе, которая затрачивается на нагревание ферромагнетика, и определяет потери энергии на перемагничивание.

Низкокоэрцитивные магнетики ($H_C = 0,8...150$ А/м) обладают узкой петлей гистерезиса и называются магнитомягкими материалами, которые в свою очередь подразделяются на две группы:

- электротехнические стали, используемые для работы в средних и сильных магнитных полях ($H = 2...200$ А/см) и обладающие большой величиной индукции насыщения B_S (более 2 Тл) и сравнительно высокой магнитной проницаемостью μ ($4...6 \times 10^3$) при средней индукции 0,5...1,2 Тл;

- железо-никелевые сплавы, обладающие в слабых полях ($H \ll 1$ А/см) высокой и сверхвысокой магнитной проницаемостью ($\mu = 10^4...10^5$), что и используется для усиления таких полей.

Магнитомягкие ферромагнетики имеют малое магнитное сопротивление и поэтому используются в качестве магнитопроводов.

Высококоэрцитивные ($H_C = 400...1200$ А/см) магнито жесткие (магнито-твердые) материалы обладают широкой петлей гистерезиса, имеют значительное магнитное сопротивление и требуют больших затрат энергии на намагничивание и перемагничивание. Из магнито жестких материалов путем их предварительного намагничивания получают постоянные магниты, которые используются в ЭМР как источники дополнительной намагничивающей силы.

В ЭМ постоянного тока *магнитопровод* выполняется сплошным из полосового или круглого материала - технически чистого железа марок Э, ЭА и ЭАА. Высокочувствительные электромагниты имеют магнитопровод из железоникелевых и железоникелькобальтовых сплавов, это пермаллои марок 79НМ, 79НМА и гайперники марок 50НП, 45Н, 45НП. Широкое применение в магнитопроводах быстродействующих ЭМ нашли легированные кремнием стали марок Э11, Э21 и т.д. Легирование электротехнических сталей кремнием обуславливает значительное повышение электрического сопротивления. При этом уменьшаются потери энергии на вихревые токи, что позволяет применять сталь в более мощных устройствах, работающих на переменном токе.

Магнитопроводы ЭМ переменного тока выполняют шихтованными, т.е. собирают из пластин, штампуемых из листового материала толщиной 0,3...0,5 мм. Материалами могут быть: горяче- и холоднокатаная

электротехническая сталь марок Э11... Э43, Э1100, Э310 и др.

В некоторых случаях магнитопроводы ЭМ постоянного тока также делают шихтованными для устранения вихревых токов, возникающих в процессе включения и выключения. Иногда в целях экономии небольшие ЭМ переменного тока изготавливают из сплошного материала толщиной 2... 3 мм.

По своей конструкции катушки бывают *каркасными* и *бескаркасными*, а по форме – круглого и прямоугольного сечения. Каркасная катушка состоит из каркаса и обмотки. На одном каркасе может быть несколько обмоток, уложенных рядами. Бескаркасная катушка проще каркасной. Отсутствие каркаса позволяет полностью использовать намоточное окно.

Электромагнитные реле (ЭМР) представляют собой электромеханические контактные устройства, преобразующие управляющий электрический ток в магнитное поле, которое оказывает силовое скачкообразное воздействие на подвижное намагниченное тело, механически связанное с электрическим контактом реле или являющееся подвижной частью этого контакта. При возникновении управляющего тока в ЭМР происходит скачкообразное срабатывание контакта, который из *разомкнутого (замкнутого)* состояния через *замыкание (размыкание)* переходит в *замкнутое (разомкнутое)* состояние.

В разомкнутом состоянии контакт имеет видимый разрыв с высокой электрической прочностью и контактным сопротивлением на уровне поверхностного сопротивления элементов конструкции реле. В замкнутом состоянии переходное сопротивление механического контакта, выполненного из соответствующих материалов, составляет единицы – десятки мОм, а падение напряжения на контакте даже при протекании тока силой в десятки ампер не превышает 100 ...200 мВ.

На работу контактов ЭМР, помимо управляющей электромагнитной силы, существенное влияние оказывают также *силы упругой деформации* контактных элементов и/или специальной (возвратной) пружины, которые в процессе срабатывания реле препятствуют действию электромагнитной силы, а в ее отсутствие способствуют возвращению контактов в исходное состояние.

Конструкции ЭМР в зависимости от принципа силового воздействия магнитного поля на подвижный элемент контакта подразделяются на два основных вида:

– реле с *магнитоуправляемым якорем* или *якорные* реле, в которых подвижное магнитоуправляемое тело — якорь, который либо несет на себе подвижный контактный элемент, либо механически воздействует на него посредством толкателя, поводка и т.п. передающего органа;

– реле с *магнитоуправляемым контактом* (МУК), в которых магнитоуправляемым телом является сам подвижный элемент контакта – геркон.

Дальнейшим шагом по совершенствованию ЭМР с МУК было заключение рабочей части контакта в герметичный магнитопроницаемый баллон. Такой контакт называют герметизированным контактом или *герконом*, а ЭМР на их основе – герконовым реле. Для повышения

чувствительности и уменьшения габаритов реле геркон помещают вблизи или внутри обмотки ЭМ, получая, таким образом, разомкнутую магнитную цепь со стороны выводов.

Помимо обычных «сухих» контактов, геркон может содержать контакты, смоченные жидким металлом, например, ртутью, что позволяет повысить скорость размыкания жидкометаллических герконов.

По общетехническим признакам реле подразделяются:

- по выполняемым функциям (логические (или коммутирующие) и измерительные). Для логических реле входная воздействующая величина не нормируется в отношении точности и должна находиться в некоем рабочем диапазоне. Измерительные реле должны срабатывать только при определенном значении входного сигнала, который, как правило, подается непрерывно;

- по количеству коммутационных позиций (двухпозиционные, трехпозиционные);

- по количеству обмоток управления и их номинальному сопротивлению;

- по количеству контактов;

- по виду контактов (с замыкающими, размыкающими, переключающими, перекрывающими, неперекрывающими контактами и с их сочетанием);

- по роду тока в цепи управления (постоянного тока, переменного тока);

- по чувствительности к управляющему току (сверхчувствительные (например, измерительные реле, регистрирующие сверхмалые токи менее 1 мкА), высокочувствительные и нормально чувствительные (до 10^{-5} Вт));

- по характеру и величине управляющего сигнала (реле тока, реле напряжения);

- по количеству начальных состояний (одностабильные (с самовозвратом), двустабильные (с самоблокировкой));

- по принципу действия (нейтральные, действие которых не зависит от направления тока в обмотке и поляризованные – со вспомогательным поляризующим магнитным полем);

- по времени действия (нормальнодействующие, с замедлением, быстродействующие, сверхбыстродействующие);

- по частоте коммутируемого тока (низкочастотные, высокочастотные);

- по величине коммутируемого тока (слаботочные и силовоточные, низковольтные и высоковольтные). Разделение ЭМР по величине коммутируемого сигнала носит условный характер. В электротехнике силовоточными (силовыми) реле или контакторами принято считать устройства, коммутирующие ток свыше 50...60 А, а высоковольтными – ЭМР, коммутирующие напряжение от 500 до 1200 В и более. Некоторые зарубежные производители считают силовыми промышленные реле, коммутирующие номинальный ток более 5 А и др.

Слаботочные электромагнитные реле (СЭМР) составляют наиболее многочисленную по номенклатуре и исполнениям группу малогабаритных, миниатюрных и сверхминиатюрных ЭМР, предназначенных для работы в

устройствах связи, сигнализации, автоматики, телемеханики и т.п.

Электромагнитные реле в последние годы вытесняются бесконтактными элементами и устройствами автоматики (полупроводниковыми диодами, транзисторами, интегральными микросхемами и др.). Однако реле еще длительное время будут оставаться одними из самых распространенных элементов аппаратуры автоматики и телемеханики в различных отраслях промышленности. Это связано как с традиционными преимуществами реле (высокая нагрузочная способность, значительная перегрузочная способность и помехозащищенность и др.), так и с появлением современных реле пятого поколения, в том числе, твердотельных, сверхбыстродействующих и др.

Наиболее широкое применение получили следующие типовые релейные схемы:

- 1) самоблокировки;
- 2) взаимной блокировки;
- 3) экономичного включения;
- 4) искробезопасного включения;
- 5) замедления (реле времени).

В схеме *самоблокировки* реле при кратковременном замыкании кнопки *SB1* «Пуск» реле срабатывает (рис. 2) и своим замыкающим контактом блокирует цепь питания этой кнопки, благодаря чему последующее отпускание кнопки *SB1* не приведет к отключению реле. Для отключения реле необходимо разорвать общую цепь питания нажатием кнопки *SB2*.

Схема *взаимной блокировки*, показанная на рис. 3, не допускает одновременного включения реле, так как в цепь обмотки каждого реле введен размыкающий контакт другого реле.

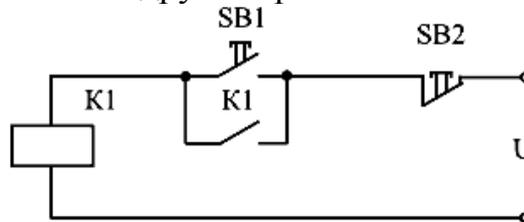


Рисунок 2 – Релейная схема самоблокировки

Необходимость взаимной блокировки встречается в схемах, предохраняющих от возможной аварии. Например, одно реле служит для включения двигателя в прямом направлении вращения, а другое – на реверс.

На рис. 3 показаны схема и график *экономичного включения* реле. Если в обычных схемах реле срабатывает при напряжении срабатывания U_{cp} и остается в этом состоянии при таком напряжении за счет цепи самоблокировки, то в рассматриваемой схеме реле, срабатывающее также при напряжении U_{cp} , при отпускании кнопки *SB1* остается в рабочем состоянии через цепь резистора R при напряжении U_p . На графике видно, что $U_{cp} > U_p$, поэтому и потребление энергии в рабочем состоянии реле намного меньше, чем в ранее рассмотренных схемах. Необходимым условием работы схемы является $U_p > U_{от}$, в противном случае при отпускании кнопки *SB1* реле будет отключаться.

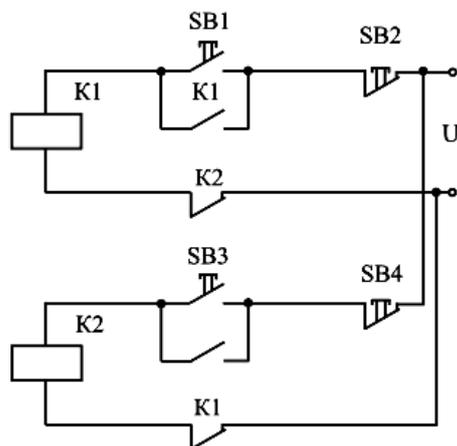


Рисунок 3 – Релейная схема взаимной блокировки

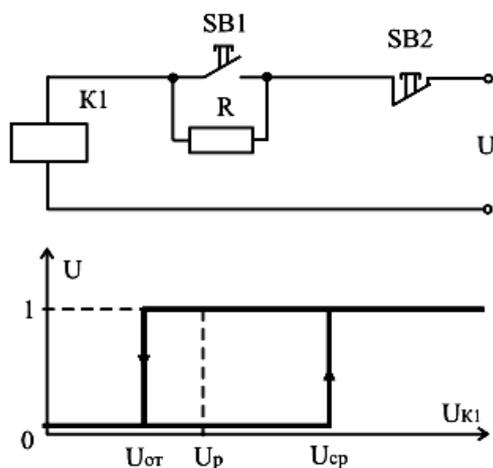


Рисунок 4 – Схема и график экономичного включения реле

Отличительная особенность схемы *искробезопасного включения* реле, широко применяющейся в различной рудничной и шахтной аппаратуре автоматизации (рис. 5), заключается в том, что цепь питания реле осуществляется искробезопасным напряжением $U_{иск}$.

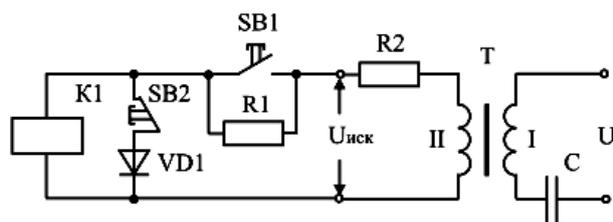


Рисунок 5 – Схема искробезопасного включения реле

Искробезопасные параметры цепи питания достигаются выполнением обмотки II проводом высокого удельного сопротивления или включением в цепь питания ограничительного резистора R_2 . В исходном положении при поданном питании реле K не работает, так как $U_{ср} > U_p$. При нажатии кнопки $SB1$ реле срабатывает и остается во включенном состоянии. При этом выполняется соотношение $U_{ср} > U_p > U_{от}$. Через обмотку реле протекает однополупериодный постоянный ток, второй полупериод закорачивается в цепи искробезопасного напряжения через диод $VD1$. Сопротивление обмотки

реле однополупериодному току мало и реле работает устойчиво.

При нажатии кнопки *SB2* сопротивление обмотки реле для переменного тока возрастает, реле отключается и схема возвращается в исходное положение. Следует отметить, что когда работает реле *K*, диод *VD1* переводит его в режим замедления – реле времени (за счет ЭДС самоиндукции, которая действует от однополупериодного тока в обмотке), что предотвращает вибрацию якоря реле.

На рис. 6 показана схема замедления срабатывания реле с помощью шунтирования его обмотки конденсатором. В этом случае при замыкании ключа заряд конденсатора происходит за определенный промежуток времени.

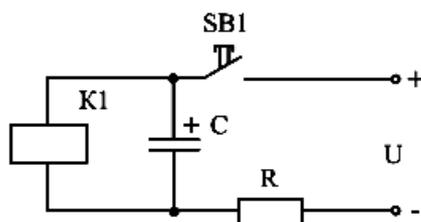


Рисунок 6 – Схема замедления срабатывания реле

В схеме на рис. 7 время отпускания реле увеличивается за счет того, что при размыкании ключа в цепи, состоящей из параллельного соединения обмотки реле, конденсатора и резистора, некоторое время сохраняется ток разряда конденсатора.

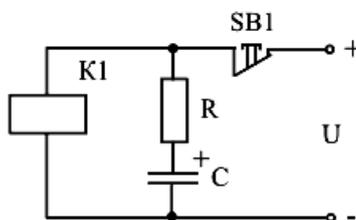


Рисунок 7 – Схема увеличения времени отпускания реле

Чтобы переходный процесс в этой цепи имел апериодический характер, применяют достаточно большую емкость конденсатора и большое значение сопротивления резистора.

Рекомендуемая литература

1. Шишмарев В.Ю. Типовые элементы систем автоматического управления: Учеб. пособие. – М.: Изд. центр «Академия», 2004. С. 164-185, 222-236.
2. Гаврилов П.Д., Гимельшейн Л.Я., Медведев А.Е. Автоматизация производственных процессов: Учеб. для вузов. – М.: Недра, 1985. С.37-40.
3. Малащенко А. Электромагнитные реле // Электронные компоненты. – 2004. - №7. – С.17-29.
4. Игловский И.Г., Владимиров Г.В. Справочник по слаботочным электрическим реле. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 560 с.

5. Гридчин А. Микроэлектромеханические реле: технология ближайшего будущего // Электронные компоненты. – 2004. - №7. – С.38-40.
6. Леонтьев М. Силовые реле // Электронные компоненты. – 2004. – №2. – С.142-147.
7. Справочник по средствам автоматики / [Б.И. Филиппович, А.П. Шорыгин, В.А. Царьков и др.]; Под ред. В.Э. Низэ и И.В. Антика. – М.: Энергоатомиздат, 1983. С.331-338.
8. Эм Г.А. Элементы систем автоматики: Учеб. пособие. – Караганда, КарГТУ, 2007. С.106-114.

Контрольные задания для СРС [1-8]

1. Классификация электромагнитных исполнительных устройств
2. Конструкция электромагнитных исполнительных устройств и их применение
3. Схемотехника релейно-контактных схем автоматики
4. Микроэлектромеханические реле 5-го поколения

2. В системах автоматики и телемеханики *исполнительные двигатели постоянного тока* находят достаточно широкое применение. К положительным качествам исполнительных двигателей постоянного тока относятся следующие:

- возможность получения теоретически любых, сколь угодно малых и больших частот вращения;
- возможность простого, плавного, экономичного и в широком диапазоне регулирования частоты вращения;
- устойчивость работы практически при любых частотах вращения;
- линейность механических, а в ряде случаев и регулировочных характеристик;
- отсутствие самохода;
- значительный пусковой момент;
- сравнительно небольшая электромеханическая постоянная времени;
- малые габаритные размеры и масса (значительно меньшие, чем у исполнительных двигателей переменного тока).

Основным недостатком наиболее широко распространенных коллекторных (контактных) исполнительных двигателей постоянного тока, ограничивающим области их применения, является наличие скользящих контактов - коллектора и щеток.

Непостоянство переходного сопротивления скользящих контактов приводит к нестабильности характеристик двигателя. Искрение под щетками приводит к подгоранию контактов коллектора и щеток, т.е. обуславливает необходимость систематического ухода за ними и недопустимость установки двигателей обычного использования во взрывоопасных помещениях. Коллектор и щетки являются источниками радиопомех, для подавления которых требуются специальные фильтры.

Двигатели постоянного тока в зависимости от способа возбуждения в них подразделяются на три типа:

- а) двигатели с независимым возбуждением;
- б) двигатели с последовательным возбуждением;
- в) двигатели со смешанным возбуждением.

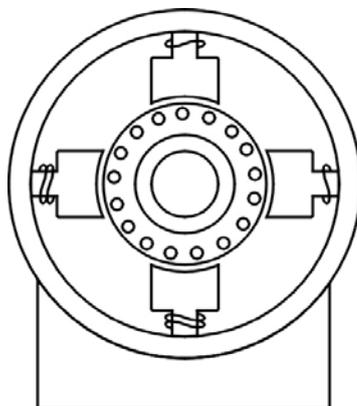


Рисунок 8 – Электрическая машина постоянного тока

Машина постоянного тока (рис. 8) состоит из статора, который обычно является индуктором, и ротора (якоря).

Статор содержит:

- а) стальной корпус;
- б) полюсные наконечники вместе с полюсными сердечниками;
- в) обмотку возбуждения;
- г) траверсу со щеткодержателями для крепления щеток;
- д) подшипниковые щиты с подшипниками.

Условное изображение машины постоянного тока независимого возбуждения на электрических схемах приведено на рис. 9.

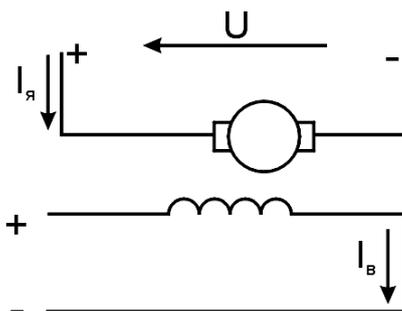


Рисунок 9 – Условное изображение машины постоянного тока независимого возбуждения

При вращении якоря его обмотка пересекает $\Phi_{ост}$ и в ней индуцируется небольшая по величине остаточная ЭДС $E_{ост}$. Под действием этой ЭДС по обмотке возбуждения потечет ток возбуждения, который создаст небольшой магнитный поток. Если обмотка возбуждения включена правильно, то этот магнитный поток совпадет с остаточным магнитным потоком.

В результате общий магнитный поток возрастает, увеличится и ЭДС, наводимая этим потоком в обмотке якоря. Поскольку возросла ЭДС якоря,

возрастает и ток возбуждения, что в свою очередь ведет к новому увеличению магнитного потока и ЭДС якоря. Процесс продолжается до тех пор, пока ЭДС якоря не станет равной падению напряжения в цепи возбуждения.

Рассмотрим работу *машины постоянного тока независимого возбуждения* в режиме двигателя (рис. 10).

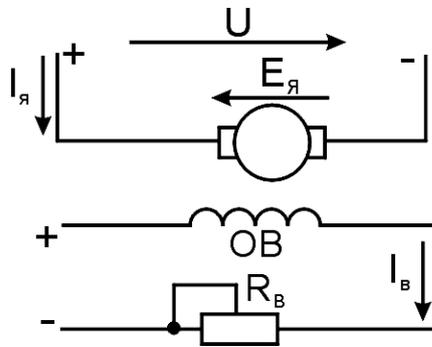


Рисунок 10

Уравнение

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - M \frac{R_я + R_p}{k^2 \Phi^2}.$$

называется *уравнением механической характеристики*.

Если в это уравнение подставить $U=U_H$, $\Phi=\Phi_H$, $R_p=0$, то получим уравнение *естественной механической характеристики*:

$$\omega = \frac{U_H}{k\Phi_H} - M \frac{R_я}{k^2 \Phi_H^2}.$$

В режиме идеального холостого хода, когда $E_я=U$, $I_я=0$, $M=0$, якорь должен вращаться со скоростью ω_0 , тогда из выражений для механической и электромеханической характеристик следует, что скорость идеального холостого хода можно найти согласно выражению:

$$\omega_0 = \frac{U}{k\Phi}.$$

На рис. 11 приведено семейство искусственных характеристик, соответствующих различным значениям сопротивления реостата R_p , включенного последовательно с якорем.

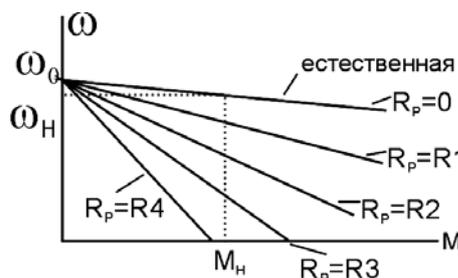


Рисунок 11

Все характеристики пересекаются в точке идеального холостого хода ω_0 , поскольку скорость идеального холостого хода не зависит от сопротивления якорной цепи двигателя

$$(\omega_0 = \frac{U}{k\Phi}).$$

Разность значений установившихся скоростей до и после приложения заданной статической нагрузки называется статическим падением скорости электропривода ($\Delta\omega_0$). Для данного двигателя из уравнения естественной механической характеристики следует, что:

$$\Delta\omega_0 = M \frac{R_{я}}{k^2\Phi^2}.$$

Для искусственных характеристик статическое падение скорости определится из выражения:

$$\omega_0 = M \frac{R_{я} + R_p}{k^2\Phi^2}.$$

Уравнение для скорости двигателя запишется в следующей форме:

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega.$$

Обмотка возбуждения у двигателя постоянного тока последовательного возбуждения включена последовательно с якорем (рис. 12).

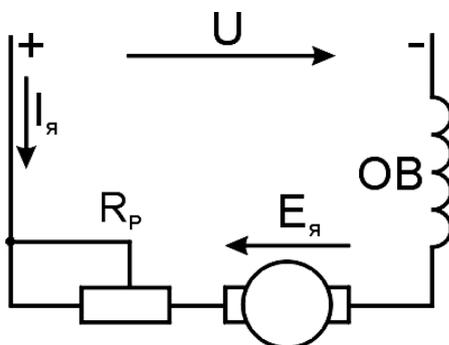


Рисунок 12 – Схема включения двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

Уравнение механической характеристики имеет вид:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - M \frac{(R_{\partial} + R_p)}{k^2\Phi^2}$$

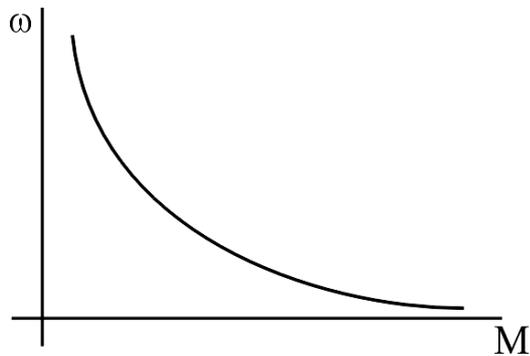


Рисунок 13 – Механическая характеристика двигателя последовательного возбуждения

При уменьшении момента скорость якоря возрастает, при $M \rightarrow 0$ скорость $\omega \rightarrow \infty$, то есть такой двигатель не имеет скорости идеального холостого хода. При возрастании скорости машина не переходит в генераторный режим. Механические характеристики не имеют продолжения во втором квадранте. При снижении момента сопротивления скорость якоря растет и может достигнуть выше допустимой по условиям механической прочности коллектора и бандажей обмотки якоря. При нагрузках ниже (15-20)% номинальных, работа двигателя практически недопустима из-за чрезмерного увеличения скорости якоря (двигатель идет вразнос). Это ограничивает область применения этих двигателей. Их нельзя использовать для привода механизмов, которые в режиме холостого хода создают малый момент сопротивления на валу.

С увеличением сопротивления реостата скорость двигателя уменьшается при одном и том же моменте сопротивления M_c , уменьшается и жесткость механических характеристик. На рис. 14 представлены искусственные реостатные механические характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения.

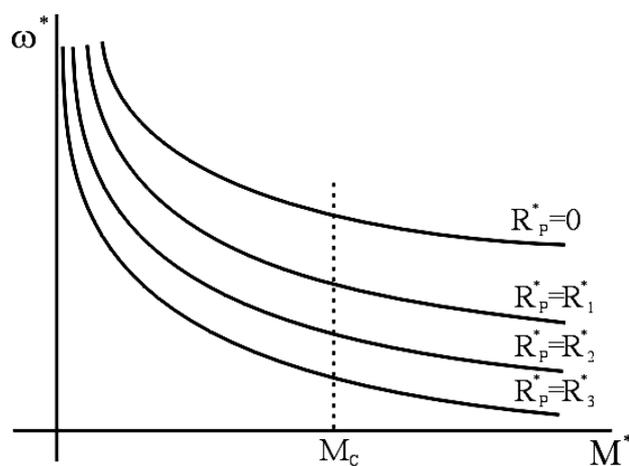


Рисунок 14

По способу возбуждения коллекторные исполнительные двигатели постоянного тока могут быть с электромагнитным возбуждением и возбуждением от постоянных магнитов. У двигателей с электромагнитным

возбуждением в качестве обмотки управления используется либо обмотка якоря – двигатели с якорным управлением либо обмотка полюсов - двигатели с полюсным управлением. У двигателей, возбуждаемых постоянными магнитами, обмоткой управления является единственная их обмотка - обмотка якоря, поэтому они всегда работают при якорном управлении.

В схемах автоматики широко используются также *бесконтактные двигатели постоянного тока*, основные характеристики которых аналогичны характеристикам коллекторных исполнительных двигателей постоянного тока с якорным управлением.

По конструкции коллекторные исполнительные двигатели постоянного тока можно разделить на *двигатели с якорем обычного исполнения* – с полузакрытыми пазами на его цилиндрической поверхности; *двигатели с гладким якорем*, у которых обмотка якоря расположена на шихтованном гладком цилиндрическом ядре и укреплена с помощью эпоксидных смол и бандажей; *двигатели с малоинерционными якорями* (цилиндрическими и дисковыми), у которых во время работы вращается лишь обмотка якоря с коллектором, а ядро якоря остается неподвижным.

Особенностью исполнительных двигателей постоянного тока с изменяющимся по значению магнитным потоком возбуждения (в отличие от обычных силовых двигателей) является то, что они имеют шихтованные (набранные из тонких листов электротехнической стали) не только магнитопровод якоря, но и спинку статора и полюсы, что необходимо для уменьшения постоянной времени при быстром изменении магнитного потока, а также потерь в магнитопроводе при работе двигателя в переходных режимах, которые являются обычными для исполнительных двигателей.

Исполнительные двигатели с обычным якорем и электромагнитным возбуждением отличаются от обычных силовых двигателей постоянного тока тем, что имеют шихтованные из листовой стали не только магнитопроводы якоря, но и магнитопроводы спинки статора и полюсы, что обеспечивает повышение быстродействия при переходных процессах. Они менее насыщены (с целью повышения линейности основных характеристик), что приводит к увеличению их габаритных размеров по сравнению с силовыми двигателями тех же мощностей, а также имеют большее число секций якоря, а следовательно, и коллекторных пластин, что необходимо для улучшения коммутации особенно при переходных режимах, в которых постоянно работают исполнительные двигатели. В нашей стране выпускается несколько серий исполнительных двигателей постоянного тока с обычным якорем и электромагнитным возбуждением. Это двигатели серий СЛ, МИ, ПБС и др. Многие двигатели средней и большой мощностей выпускаются со встроенными тахогенераторами (МИ, ПБС).

Исполнительные двигатели *с обычным якорем и возбуждением от постоянных магнитов* отличаются от рассмотренных двигателей обычного использования только тем, что основной их магнитный поток создается не обмоткой возбуждения, а постоянными магнитами, которые располагаются на статоре и заменяют обычные полюсы с обмоткой возбуждения.

Преимущества двигателей с постоянными магнитами по сравнению с двигателями постоянного тока, имеющими обмотки возбуждения, можно сформулировать следующим образом:

- отсутствие потерь мощности на возбуждение, что обуславливает более высокий КПД, достигающий даже у двигателей малых мощностей (в несколько ватт) 60...70%;
- отсутствие источника питания для обмотки возбуждения;
- практически полная независимость основного магнитного потока машины от изменений температуры и колебаний напряжения сети.

Эти преимущества двигателей с постоянными магнитами способствуют все более возрастающему их применению как в следящих системах, так и автоматизированных приводах. В последнее время в технике получают широкое применение не только двигатели с постоянными магнитами малых мощностей, но и двигатели средних и больших мощностей.

Отсутствие потерь мощности на возбуждение позволяет увеличить ток якоря и потери в его обмотке без увеличения температуры нагрева (а значит, без увеличения габаритных параметров якоря), что приводит к увеличению вращающего момента ($M \approx \Phi I_a$), развиваемого двигателем, а следовательно, и отдаваемой им мощности $P = M\omega$. Именно поэтому такие двигатели иногда называют *высокомоментными*.

С целью уменьшения искрения под щетками – получения удовлетворительной коммутации при увеличенных токах якоря, что имеет место в переходных режимах (при пуске, остановке, реверсе), в которых, как правило, большую часть времени работают исполнительные и высокомоментные двигатели автоматических систем, обмотки якорей выполняют с большим числом N_c секций, а коллекторы – с большим числом N_k коллекторных пластин ($N_c = N_k$). Это позволяет уменьшить число витков в каждой из секций, а следовательно, и значения ЭДС (e_k) коммутируемых секций, наводимых в них в процессе коммутации (ЭДС вращения $e_{вр}$, ЭДС самоиндукции e_L , ЭДС взаимной индукции e_m и ЭДС трансформации $e_{тр}$).

Стоимость двигателей с постоянными магнитами, несмотря на кажущуюся их простоту, часто не ниже, а даже выше стоимости двигателей с обмоткой возбуждения. Объясняется это высокой стоимостью и дефицитностью целого ряда материалов, идущих на изготовление постоянных магнитов (например, самария, кобальта), а также трудностью их механической обработки. В последнее время получили широкое распространение недорогие ферритобариевые и другие магниты, обладающие высокой удельной энергией за счет большой коэрцитивной силы материалов. Это позволило проектировать и выпускать двигатели с постоянными магнитами большой номинальной мощности (на десятки киловатт).

На рис. 15 представлена конструкция микродвигателя постоянного тока с постоянным магнитом серии ДПМ, получившего широкое распространение. Его недостатками являются нетехнологичность и сравнительно дорогой кольцевой постоянный магнит из сплава типа ЮНДК.

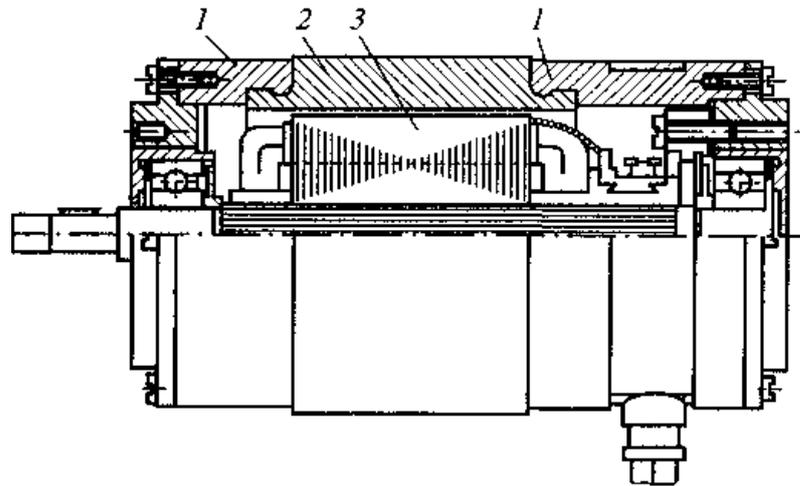


Рисунок 15 – Конструкция исполнительного двигателя с постоянным магнитом: 1 – концевые части из цинкового сплава; 2 – постоянный магнит; 3 – якорь с коллектором

В последние годы была разработана целая серия ДП микродвигателей постоянного тока исполнения Р09 с дешевыми ферритобариевыми постоянными магнитами. По своим характеристикам такие двигатели весьма близки к двигателям серии ДПМ.

Исполнительные двигатели постоянного тока с гладким беспазовым якорем появились сравнительно недавно. Отличительной особенностью этих двигателей является то, что обмотка якоря у них располагается не в пазах (они отсутствуют), а укрепляется непосредственно на гладкой цилиндрической поверхности якоря с помощью клея-компаунда и бандажей. Такое расположение значительно уменьшает индуктивность обмотки, что приводит к улучшению коммутации и уменьшению электрохимической постоянной времени, т.е. повышению быстродействия двигателя. Недостатком двигателя с гладким беспазовым якорем является наличие значительного немагнитного промежутка на пути магнитного потока полюсов, который здесь складывается из воздушного зазора и толщины обмотки якоря. Исполнительные двигатели с гладким беспазовым якорем выпускаются как с электромагнитным возбуждением, так и с постоянными магнитами.

Недостатком всех рассмотренных ранее исполнительных двигателей постоянного тока является наличие скользящих контактов – коллектора и щеток, которые значительно снижают надежность работы и ограничивают области их применения. С целью устранения этих недостатков в последнее время были разработаны и начали довольно широко применяться *бесконтактные исполнительные (управляемые) двигатели постоянного тока*, принципиально не отличающиеся от бесконтактных двигателей, рассмотренных ранее.

Эти двигатели (рис. 16) не имеют коллектора и щеток, что обеспечивает более надежную работу в условиях тряски, вибрации, резко изменяющихся температур, при высоких частотах вращения, достигающих десятков и сотен тысяч оборотов в минуту, и значительно повышает срок службы.

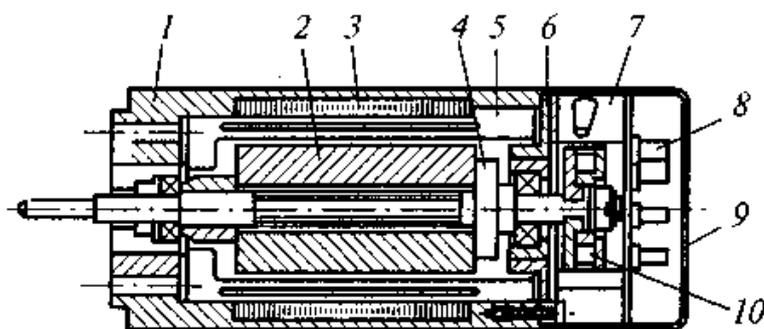


Рисунок 16 – Бесконтактный исполнительный двигатель типа ДБУ:
 1 - корпус; 2 - индуктор - двухполюсный постоянный магнит; 3 - магнитопровод статора; 4 - вал; 5 - обмотка якоря; 6 - подшипниковый щит; 7 - обмотка датчика положения; 8 - контактная плата; 9- кожух; 10- сигнальный элемент (постоянный магнит)

Одним из недостатков контактных исполнительных двигателей постоянного тока является то, что они имеют шихтованные из листов стали якоря с большим моментом инерции, что значительно снижает их быстродействие. Этих недостатков нет у разработанных сравнительно недавно, но получивших уже достаточно широкое применение так называемых малоинерционных двигателей. Малоинерционные двигатели в зависимости от конструкции и технологии изготовления их якорей можно разделить на две группы: двигатели с печатной обмоткой якоря и двигатели с обмоткой якоря, выполненной из обычного изолированного провода. По своим пусковым и рабочим свойствам эти двигатели близки друг другу.

Рекомендуемая литература

1. Шишмарев В.Ю. Типовые элементы систем автоматического управления: Учеб. пособие. – М.: Изд. центр «Академия», 2004. С.248-259.
2. Кацман М.М. Электрические машины автоматических устройств: Учеб. пособие. – М.: ФОРУМ, ИНФРА-М, 2002. С.102-114, 122-132.

Контрольные задания для СРС [1-2]

1. Конструкция исполнительных двигателей постоянного тока
2. Пуск и тормозные режимы работы машин постоянного тока

3. Самыми распространенными *силовыми микродвигателями автоматике* в настоящее время являются асинхронные двигатели. По своему устройству это двигатели с короткозамкнутым ротором, который чаще всего имеет обмотку, изготовленную в виде беличьей клетки. Реже ротор изготавливается массивным и полым из чугуна или стали, что делается либо для получения мягких механических характеристик, либо ради достижения особой механической прочности ротора, необходимой при высоких частотах вращения, либо с целью уменьшения акустического шума при работе двигателя. Асинхронные двигатели с фазовым ротором не выпускаются.

В качестве силовых двигателей в схемах автоматики часто применяются трехфазные и однофазные асинхронные микродвигатели широкого применения, рассчитанные на работу от сети с частотой 50 Гц. Применение асинхронных двигателей повышенной частоты в ряде случаев диктуется не только стремлением уменьшить габариты машины, но и рядом других соображений: необходимостью иметь более высокие угловые скорости вращения, работой автоматических систем от сетей повышенной частоты и др.

Асинхронный двигатель состоит (рис. 17) из двух основных частей – неподвижной, называемой *статором* и вращающейся части, называемой *ротором*.

Статор содержит:

А. корпус, выполненный из стали или алюминиевых сплавов;

В. сердечник, представляющий из себя полый цилиндр, набранный из листов электротехнической стали, на внутренней поверхности, которого имеются пазы, в которые укладывается и закрепляется обмотка статора;

С. обмотку, состоящую из трех одинаковых фазных обмоток (катушек), расположенных в пазах сердечника статора и сдвинутых в пространстве под углом в 120 градусов друг относительно друга. Выводы обмотки статора соединяются по схемам «звезда» или «треугольник».

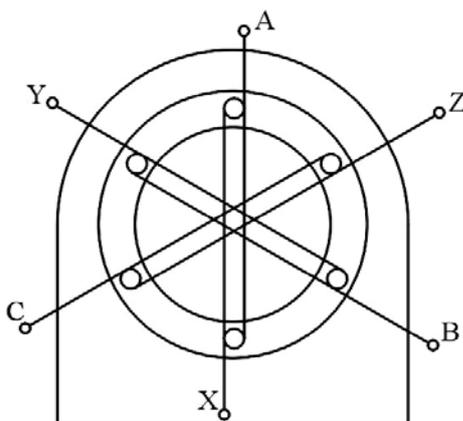


Рисунок 17

Ротор содержит:

1. вал, изготовленный из стали;

2. сердечник ротора, закреплённый на валу который представляет собой цилиндр, набранный из листов электротехнической стали. На внешней поверхности сердечника имеются пазы, в которые укладывается обмотка ротора;

3. обмотку ротора.

В зависимости от типа обмотки различают две конструкции ротора: *ротор с короткозамкнутой обмоткой* и *ротор с фазной обмоткой*.

Обмотка короткозамкнутого ротора состоит из алюминиевых или медных стержней, уложенных по одному стержню в каждый паз сердечника ротора. Выступающие торцы стержней соединяют между собой (закорачиваются)

кольцами, которые изготавливаются из того же материала, что и стержни. Таким образом, при помощи колец стержни обмотки замыкаются накоротко.

Обмотка фазного ротора имеет такую же конструкцию, что и обмотка статора, т.е. состоит из трех (катушек) совершенно одинаковых фазных обмоток, которые располагаются в пазах сердечника ротора под углом 120 градусов друг к другу в пространстве. Выводы обмотки ротора соединяются «звездой». Оставшиеся выводы подсоединяются к трем медным кольцам, которые закреплены на валу ротора. Кольца изолируются друг от друга и от вала ротора. При помощи щеток, которые скользят по кольцам, обмотка ротора может быть соединена с внешней цепью, обычно с трехфазным реостатом. Щетки закрепляются в щеткодержателях на траверсе, которая крепится на подшипниковом щите.

Если к обмотке статора приложить переменное трехфазное напряжение, то по обмоткам будут протекать переменные трехфазные токи, которые возбуждают в фазных обмотках три магнитных потока. Эти магнитные потоки складываясь вместе образуют результирующее магнитное поле статора, которое по величине неизменно, а по направлению вращается с угловой скоростью n_0 или ω_0 . Скорость вращения магнитного поля статора (n_0 или ω_0) зависит от числа пар магнитных полюсов P и частоты f тока статора.

$$n_0 = \frac{60f_1}{P} \quad \text{или} \quad \omega_0 = \frac{n_0}{60} \cdot 2\pi = \frac{2\pi f}{P}$$

Магнитное поле статора, вращаясь, пересекает проводники обмотки ротора и наводит в них ЭДС. Поскольку, обмотка ротора замкнута накоротко, то под действием ЭДС по обмотке ротора будут протекать токи. Тогда на проводники с током обмотки ротора, находящиеся в магнитном поле статора, будут действовать электромагнитные силы. Совокупность этих сил образует вращающий момент, приложенный к ротору, под действием которого ротор придет во вращение.

Изменяя сопротивление цепи ротора можно изменять ток ротора и, соответственно, будут изменяться вращающий момент и частота вращения ротора. Так же, как и изменяя скорость магнитного поля статора, можно изменять и угловую скорость ротора.

Угловую скорость ротора обозначим через n или ω . Угловая скорость асинхронных двигателей близка к скорости вращения поля статора, $n < n_0$ или $\omega < \omega_0$, но всегда несколько меньше ее. Разность скоростей магнитного поля статора и ротора ($n_0 - n$) или ($\omega_0 - \omega$) принято оценивать в относительных единицах по отношению к скорости вращения поля статора и называть *скольжением S*.

$$S = \frac{n_0 - n}{n_0}, \quad \text{или} \quad S = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}.$$

Поскольку скорость ротора не совпадает со скоростью вращения поля статора, то двигатель называют асинхронным. Если же скорость вращения

ротора станет равной скорости вращения поля статора $\omega = \omega_0$, то магнитное поле статора не будет пересекать проводники обмотки ротора, следовательно, в них не будет ЭДС и тока, а, значит, исчезнет вращающий момент, приложенный к ротору. Поскольку в двигателе всегда присутствует тормозной момент (хотя бы за счет сил трения), то ротор двигателя будет всегда вращаться со скоростью несколько меньшей, чем поле статора. Если же под действием сторонних сил (момента) ротор заставить вращаться со скоростью ω_0 , то такой режим работы называется режимом *идеального холостого хода двигателя*.

На рисунке 18 представлена механическая характеристика, на которой указаны области и точки соответствующие характерным режимам работы асинхронной машины.

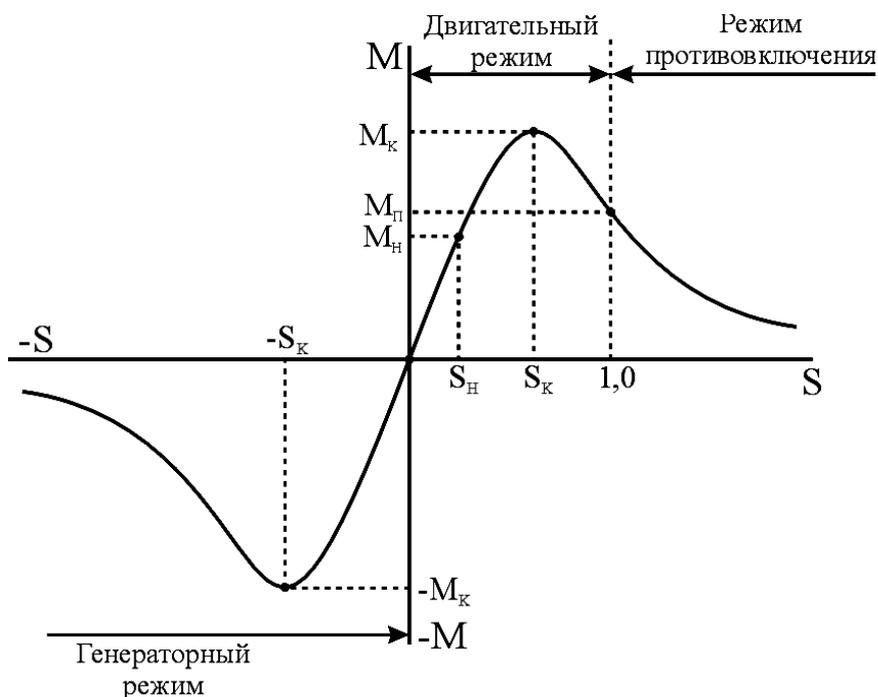


Рисунок 18 – Механическая характеристика асинхронной машины

На механической характеристике можно выделить три участка, каждый из которых соответствует одному из трех режимов работы асинхронной машины:

1. двигательный режим работы, ему соответствует изменение скольжения от $S=0$ до $S=1$;
2. режим торможения противовключением, ему соответствует изменение скольжения от $S=1$ до $S \rightarrow \infty$;
3. режим рекуперативного торможения или генераторный режим с возвратом энергии в сеть, ему соответствуют отрицательные значения скольжения $S < 0$.

Отметим характерные точки механической характеристики, к ним относятся:

1. $S=0$, $M=0$, при этом скорость ротора равна синхронной $\omega = \omega_0$, так называемый режим идеального холостого хода двигателя;

2. $S=S_n, M=M_n$ – номинальный режим двигателя;
3. $S=S_k, M=M_k$ – критический режим, при котором двигатель развивает максимальный момент;
4. $S=1,0, M=M_n$ – пуск двигателя, при котором при неподвижном роторе $\omega=0$, двигатель развивает пусковой момент M_n ;
5. $S= - S_k, M= - M_k$ – при котором двигатель развивает максимальный момент в генераторном режиме, когда он работает параллельно с сетью.

Эта же механическая характеристика может быть построена в других координатах $M=f(\omega)$, она приведена ниже.

Рассмотрим естественную механическую характеристику асинхронного электродвигателя, представленную на рис. 19.

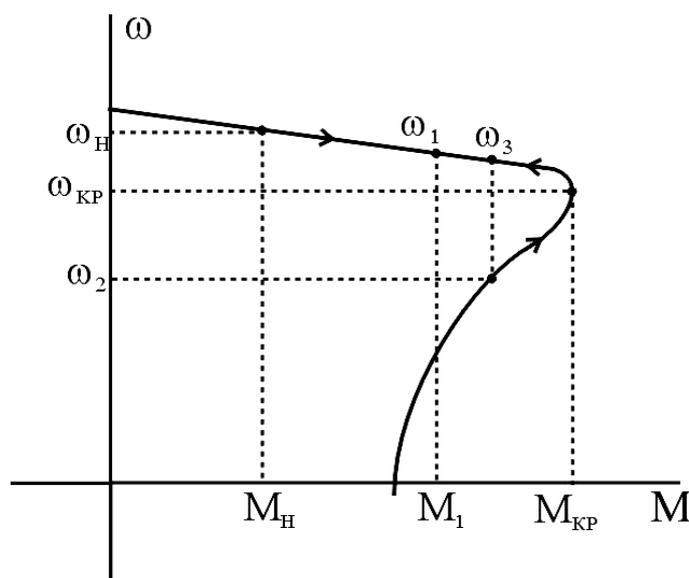


Рисунок 19

Участок характеристики между $\omega=\omega_0$ и $\omega=\omega_{kp}$ то есть $0 < S < S_{kp}$ называют *устойчивым* участком, так как на этом участке увеличению тормозного момента соответствует снижение скорости и увеличение вращающегося момента и наоборот. Участок механической характеристики между $\omega=\omega_0$ и $\omega=\omega_k$ называют *неустойчивым*, так как на этом участке уменьшению угловой скорости ротора соответствует уменьшение вращающегося момента двигателя.

В большинстве схем автоматики силовые двигатели питаются не от трехфазных, а однофазных сетей переменного тока.

Однофазные асинхронные двигатели по своему устройству в подавляющем большинстве случаев являются двухфазными. Они, как правило, имеют на статоре две обмотки, сдвинутые в пространстве на 90° . Одна обмотка называется рабочей, или главной. Она подключается непосредственно к однофазной сети. Другая обмотка называется пусковой, или вспомогательной. Она подключается к однофазной сети через фазосдвигающий элемент либо только на время пуска, либо постоянно. В некоторых двигателях вспомогательная обмотка вообще не подключается к сети, а ЭДС в ней наводится потоком главной обмотки.

В зависимости от типа фазосдвигающего элемента, а также от способа использования вспомогательной (пусковой) обмотки силовые однофазные

асинхронные (и синхронные) микродвигатели можно разделить на пять групп: с пусковым сопротивлением; пусковым конденсатором; пусковым и рабочим конденсатором; рабочим конденсатором; экранированными полюсами.

Конструктивное устройство одного из *асинхронных микродвигателей* с полым немагнитным ротором представлено на рис. 20. Внешний статор 4 такого двигателя ничем не отличается от статора обычного асинхронного двигателя. Он набирается из изолированных друг от друга листов электротехнической стали. В пазах статора располагаются обмотки 6 управления и возбуждения, сдвинутые в пространстве на 90° . Эти обмотки либо изолированы друг от друга, либо соединены по мостиковой схеме. Мостиковая схема представляет собой замкнутую обмотку с отпайками через 90° . Она помогает достаточно просто осуществить точный пространственный сдвиг обмоток, способствует лучшему распределению токов и потерь в них. К недостаткам схемы следует отнести, во-первых, электрическую связь цепей возбуждения и управления, во-вторых, большое число параллельных ветвей ($2a$) и отпаек-концов при большом числе пар полюсов ($2a = 2p$) и, в третьих, постоянство коэффициента трансформации $k = w_p/w_y$. Внутренний статор 5 набирается из листов электротехнической стали на цилиндрическом выступе одного из подшипниковых щитов. Он служит для уменьшения магнитного сопротивления на пути основного (рабочего) магнитного потока, проходящего через воздушный зазор.

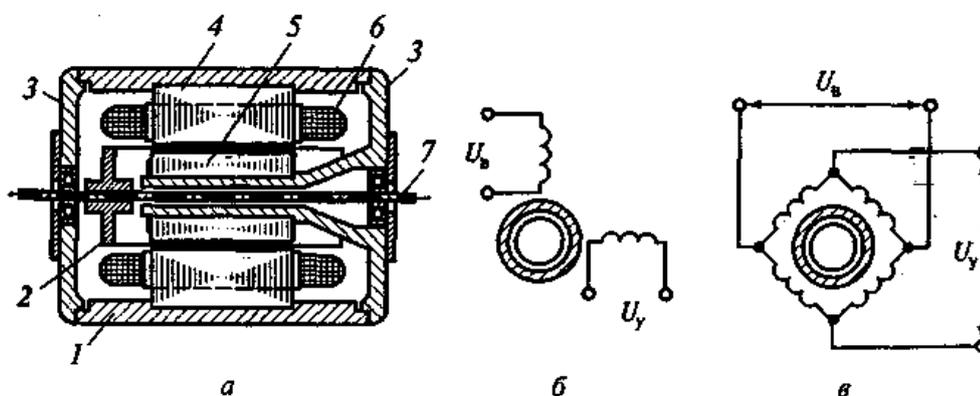


Рисунок 20 – Конструкция асинхронного исполнительного двигателя с полым немагнитным ротором:

а – поперечный разрез; б – раздельная электрическая схема обмотки статора; в – мостиковая электрическая схема обмотки статора; 1 – корпус; 2 – ротор немагнитный полый (цилиндр); 3 – щит подшипниковый; 4 – статор внешний; 5 – статор-сердечник внутренний; 6 – обмотка статора; 7 – ось

Полый ротор двигателя 2 изготавливается в виде тонкостенного станка из немагнитного материала, обычно из сплавов алюминия. Своим дном ротор жестко укрепляется на оси 7, которая свободно вращается в подшипниках, расположенных в подшипниковых щитах 3. Толщина стенок ротора зависит от мощности двигателя и колеблется в пределах от 0,1 до 1 мм. Вследствие весьма малой массы ротор обладает незначительным моментом инерции, что

является очень ценным свойством двигателя с полым немагнитным ротором, способствующим его широкому распространению. Между стенками ротора и статорами имеются воздушные зазоры, которые обычно составляют 0,15...0,25 мм.

Принцип действия двигателя с полым немагнитным ротором состоит в следующем: переменный ток, протекая по обмоткам статора, создает вращающее магнитное поле, которое, пересекая полый ротор, наводит в нем вихревые токи. В результате взаимодействия этих токов с вращающимся магнитным полем двигателя возникает момент, который, действуя на ротор, увлекает его в сторону этого поля. Двигатели мощностью менее 3 Вт изготавливаются иначе. Их обмотки возбуждения и управления размещаются в пазах внутреннего статора, и тогда внешний статор не имеет пазов и служит лишь для уменьшения магнитного сопротивления. При такой конструкции весьма облегчается процесс укладки обмоток в пазы при малых диаметрах расточки статора и несколько повышается вращающий момент, но диаметр ротора для увеличения обмоточного пространства на внутреннем статоре приходится несколько увеличить, что обуславливает некоторое увеличение момента инерции ротора. Для устранения этого недостатка иногда используется третья конструктивная форма двигателя: одна из обмоток размещается на внутреннем, а другая – на наружном статоре.

Из-за большого немагнитного промежутка двигателя с полым немагнитным ротором имеют большой намагничивающий ток $(0,8... 0,9)I_n$ и низкий коэффициент мощности $\cos \varphi$. Большая сила намагничивающего тока приводит к большим электрическим потерям в обмотках двигателя и значительно снижает его КПД. С целью уменьшения электрических потерь двигателя с полым немагнитным ротором обычно конструируют так, чтобы до 70 % площади поперечного сечения статора у них занимали пазы с обмотками.

В отличие от всех остальных типов роторов, применяемых для асинхронных исполнительных двигателей переменного тока, полый немагнитный ротор при большом активном сопротивлении r_p обладает весьма незначительным индуктивным сопротивлением $x_p \approx (0,05...0,1) r_p$. Это его свойство способствует значительному повышению линейности механических и регулировочных характеристик двигателей.

К положительным свойствам двигателей с полым немагнитным ротором следует отнести:

малый момент инерции ротора, что в совокупности со значительным пусковым моментом обеспечивает быстродействие двигателя. Электромеханические постоянные времени T_m подавляющего большинства современных двигателей не превышают 60 мс;

сравнительно хорошую линейность механических и регулировочных характеристик. У большинства двигателей нелинейность $\sigma_{0,5}$ лежит в пределах от 0,05 до 0,15, что обеспечивает устойчивую работу двигателя почти при всех частотах вращения и кратность регулирования $n_{max}/n_{min} = 100...200$;

высокую чувствительность – малый сигнал трогания, что обеспечивается малым моментом инерции ротора, малой его массой, большим пусковым моментом и отсутствием радиальных сил притяжения ротора к статору. Последнее объясняется тем, что ротор немагнитный;

плавность и бесшумность хода, постоянство пускового момента в любом положении ротора, что определяется отсутствием паров на роторе, а следовательно, зубцовых гармоник поля.

К недостаткам относятся:

низкий КПД, у большинства двигателей даже в номинальном режиме $\eta_n=0,2...0,4$ и значительно уменьшается при регулировании. Низкий КПД объясняется большими электрическими потерями в обмотке статора вследствие большого намагничивающего тока и полым роторе вследствие его большого активного сопротивления;

низкий коэффициент мощности ($\cos \varphi = 0,2...0,4$) вследствие большого немагнитного промежутка между наружным и внутренним статорами;

большие габариты и масса, обусловленные первыми двумя недостатками. По габаритам и массе двигатель с полым немагнитным ротором больше силовых асинхронных двигателей и исполнительных двигателей постоянного тока той же номинальной мощности в 2-4 раза.

В некоторых схемах исполнительные двигатели должны длительное время развивать вращающий момент при неподвижном роторе, т.е. работать *на упор* (в режиме короткого замыкания). С целью необходимого при таком режиме отвода выделяемой в двигателях теплоты иногда выполняются двигатели с двумя развязанными в механическом отношении роторами, находящимися в расточке одного и того же статора. Один из них – ротор исполнительного двигателя, а другой – вентиляторного. Его можно рассматривать как два двигателя, исполнительный и вентиляторный, обмотки статоров которых соединены последовательно. В режиме короткого замыкания (при неподвижном роторе) входное сопротивление исполнительного двигателя весьма незначительно, поэтому большая часть приложенного напряжения приходится на вентиляторный двигатель, ротор которого вращается с большой частотой и хорошо охлаждает исполнительный двигатель. При возрастании частоты вращения ротора двигателя вследствие увеличения его входного сопротивления происходит перераспределение напряжений: на исполнительном двигателе оно увеличивается, на вентиляторном – уменьшается.

По конструктивному исполнению и свойствам *асинхронные исполнительные двигатели с короткозамкнутым ротором*, имеющим обмотку, выполненную в виде беличьей клетки, можно разделить на две группы:

двигатели обычной конструкции, у которых механическая обработка всех деталей производится до сборки двигателя;

двигатели «сквозной» конструкции, у которых посадочные места под подшипники и внутренняя поверхность статора обрабатываются в полусобранном состоянии.

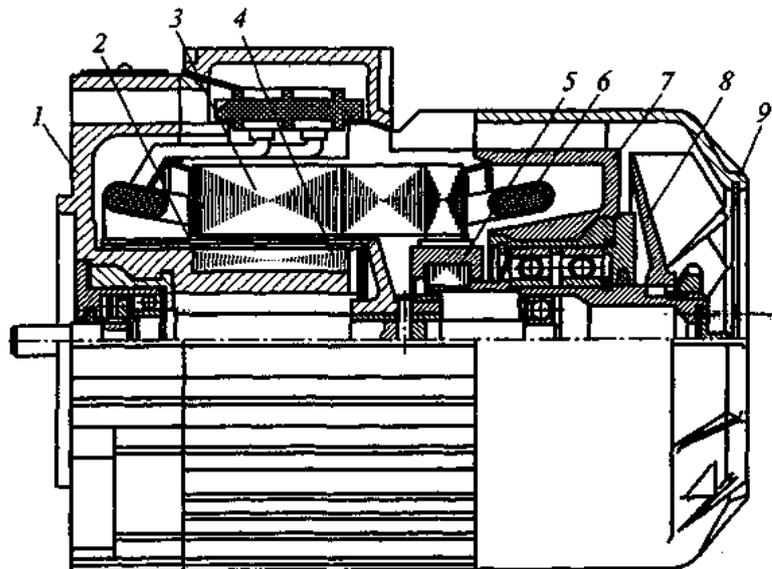


Рисунок 21 – Асинхронный исполнительный двигатель типа ДАУ-63П ($P_n = 63$ Вт; $n_n = 2500$ об/мин) с двумя роторами:

1 – передний подшипниковый щит; 2 – полый ротор исполнительного двигателя; 3 – наружный статор; 4 – внутренний статор исполнительного двигателя; 5 – короткозамкнутый ротор вентилятора; 6 – обмотки возбуждения и управления; 7 – задний подшипниковый щит; 8 – крыльчатка вентилятора; 9 – кожух вентилятора

Двигатели первой группы имеют обычный для электрических микромашин воздушный зазор 0,15...0,25 мм; а двигатели второй группы - уменьшенный до 0,03...0,07 мм. Двигатели обычной конструкции применяются чаще всего в обычной промышленной автоматике. Они имеют невысокую стоимость.

Двигатели сквозной конструкции применяются в особо ответственных схемах приборной автоматики. Они имеют лучшие характеристики, но и более высокую стоимость.

Двигатели с ротором обычной конструкции чаще всего применяются в тех схемах автоматики, где быстродействие системы не играет существенной роли. Поэтому в быстродействии ($T = 0,2...1,5$ с) эти двигатели, имеющие зазор 0,15...0,25 мм, значительно уступают двигателям с полым немагнитным ротором. Однако по некоторым свойствам они выгодно отличаются от последних. Двигатель с обмоткой в виде беличьей клетки на роторе может быть выполнен со значительно меньшим, чем у двигателя с порам ротором, магнитным сопротивлением на пути рабочего порока, что позволяет снизить намагничивающий ток, электрические потери от него в обмотке статора, а следовательно, повысить $\cos\varphi$ и КПД.

В схемах промышленной автоматики в настоящее время большое распространение получил простой и дешевый асинхронный исполнительный двигатель типа РДМ-09 с короткозамкнутой выполненной в виде беличьей клетки обмоткой на роторе. Статор этого двигателя, набираемый из листов электротехнической стали, имеет восемь зубцов, на каждом из которых

располагается по одной катушке. Четыре катушки (через одну) составляют обмотку возбуждения, последовательно с которой включается конденсатор емкостью 1мкФ, четыре другие катушки - обмотку управления. Обе обмотки рассчитаны на напряжение питания 127 В и частоту питающей сети 50 Гц. Номинальная частота вращения двигателя 1200 об/мин. В двигатель РДМ-09 встроен редуктор с передаточным отношением, соответствующим одному из восьми возможных вариантов, что позволяет изменять частоту вращения на выходе от 1,92 до 76,8 об/мин.

Двигатели сквозной конструкции (рис. 22) появились сравнительно недавно. Особенностью этих двигателей является то, что диаметр расточки под подшипники (в подшипниковых щитах) у них равен внутреннему диаметру статора, что позволяет производить окончательную обработку (шлифовку) внутренней поверхности статора и отверстий под подшипники после сборки (установки подшипниковых щитов) одновременно. Такая конструкция двигателя позволяет уменьшить воздушный зазор между статором и ротором до 0,03...0,05 мм, что способствует снижению намагничивающегося тока, потерь в обмотке статора, а, следовательно, повышает $\cos\varphi$, КПД и коэффициент использования двигателя.

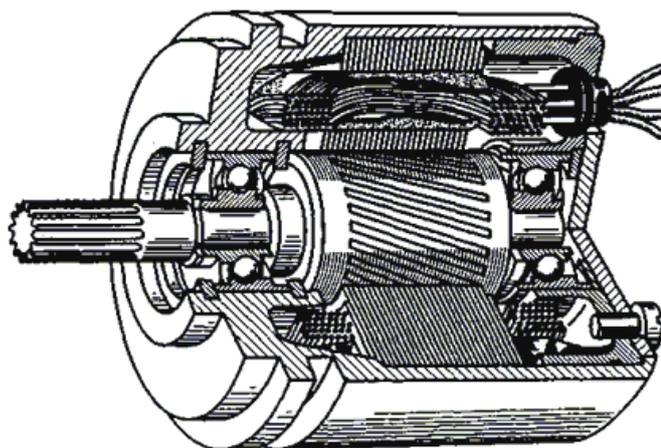


Рисунок 22 – Асинхронный исполнительный двигатель сквозной конструкции

Ротор для уменьшения момента инерции обычно изготавливается малого диаметра. Необходимая мощность обеспечивается за счет увеличения его длины. Обычно отношение длины ротора к его диаметру равно 2...3.

Преимущество исполнительных двигателей сквозной и обычной конструкции типа беличьей клетки ротора по отношению к двигателям с полым немагнитным ротором особенно ощутимо при очень малых мощностях – от сотых долей ватта до 3...5 Вт и больших мощностях – свыше 200...300 Вт. В этом случае потери от намагничивающегося тока в процентном отношении у двигателей с полым ротором особенно велики.

К положительным свойствам двигателей сквозной конструкции следует отнести: более высокие $\cos\varphi$ и КПД; меньшие массу и габаритные размеры в определенных диапазонах номинальных мощностей.

Недостатками двигателей с обычным короткозамкнутым ротором являются:

сравнительно большой момент инерции ротора, что ведет к увеличению электромеханической постоянной времени;

сравнительно большой сигнал трогания, что обусловлено массой ротора, наличием действующих на ротор радиальных сил одностороннего магнитного притяжения к статору из-за ферромагнитных свойств ротора;

наличие высших зубцовых гармоник поля.

Синхронная машина состоит из двух частей: индуктора и якоря. Индуктором называют часть машины, в которой создается первичное магнитное поле. Якорем называют часть машины, в которой индуцируется ЭДС. Наибольшее распространение получили синхронные машины, в которых якорь неподвижен, а индуктор вращается.

Рассмотрим устройство (рис. 23) синхронной трехфазной машины, в которой якорь является статором, а индуктор является вращающимся ротором.

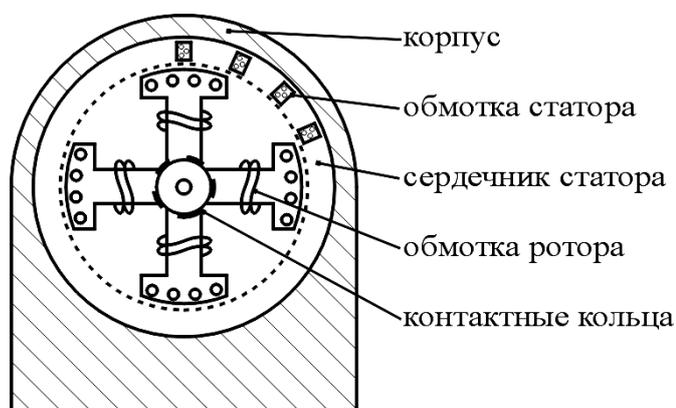


Рисунок 23

Статор такой машины по конструкции аналогичен статору асинхронной машины и состоит из трех основных частей: корпуса (станины), сердечника и обмоток. Сердечник представляет собой полый цилиндр, набранный из электротехнической стали толщиной 0,5 мм. На внутренней поверхности сердечника имеются пазы, в которые укладывается обмотка статора. Пазы, как правило имеют прямоугольное сечение.

Обмотка статора состоит из трех одинаковых фазных обмоток, сдвинутых в пространстве друг относительно друга на 120° и соединенных звездой.

В синхронных машинах применяют роторы двух конструкций: *явнополюсные* и *неявнополюсные*. Неявнополюсные роторы используются в синхронных генераторах рассчитанных на скорость вращения ротора 1500 и 3000 оборотов в минуту. В синхронных двигателях используют только явнополюсные роторы.

Явнополюсный ротор содержит вал, на котором закреплен обод, а к нему крепятся полюса. Сердечники полюсов набираются из пластин, из электротехнической стали толщиной 0,5 мм, на полюсах крепится обмотка возбуждения, по которой пропускают постоянный ток, подводимый через

щетки и контактные кольца, закрепленные на роторе. Кроме этого в сердечниках полюсов делают пазы, в которые укладывают медные стержни, по одному стержню в каждый паз. С торцов стержни между собой закорачиваются сегментами или кольцами, образуя короткозамкнутую обмотку такого же типа как обмотка у короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя, которая является пусковой обмоткой.

На электрических схемах синхронная машина изображается (рис. 24) в виде двух concentрических окружностей (внешняя окружность изображает обмотку ротора). К обмотке статора подключается трехфазная сеть, а к обмотке ротора сеть постоянного тока.



Рисунок 24

При пуске обмотка статора подключается к трехфазной сети. Ротор приводится в движение благодаря наличию короткозамкнутой пусковой обмотки. Трехфазные токи, проходя по обмоткам статора создают вращающееся магнитное поле, которое вращается со скоростью ω_0 . Поле статора, вращаясь, пересекает стержни пусковой обмотки, индуцируя в них ЭДС, под действием которой по ним будут протекать токи. При взаимодействии этих токов с вращающимся полем статора создается электромагнитный момент, приложенный к ротору, ротор придет во вращение. Обмотка возбуждения на период пуска замыкается на резистор с целью уменьшения возникающих в ней напряжений. В конце пуска, когда скорость ротора становится достаточно близкой к скорости вращения магнитного поля статора $(0,95-0,98) \omega_0$, обмотку возбуждения отключают от резистора, и на нее подается постоянный ток. Постоянное магнитное поле вращающегося ротора сцепляется с вращающимся полем статора, и ротор втягивается в *синхронизм*. После этого ротор продолжает вращаться со скоростью ω_0 , развивая вращающий момент. Пусковая обмотка при этом перестает работать, так как поле статора уже не пересекает стержни пусковой обмотки, и ток в ней становится равным нулю.

Механическая характеристика при пуске синхронного двигателя соответствует характеристике асинхронного двигателя, а в рабочем режиме представляет собой прямую. Обе характеристики приведены на рис. 25.

Электромагнитный момент, приложенный к ротору синхронной машины, создается за счет взаимодействия между магнитными полюсами магнитного поля ротора и вращающимся магнитным полем статора.

Изменение нагрузки на валу двигателя сопровождается изменением взаимного положения магнитных полюсов ротора и вращающегося магнитного поля статора.

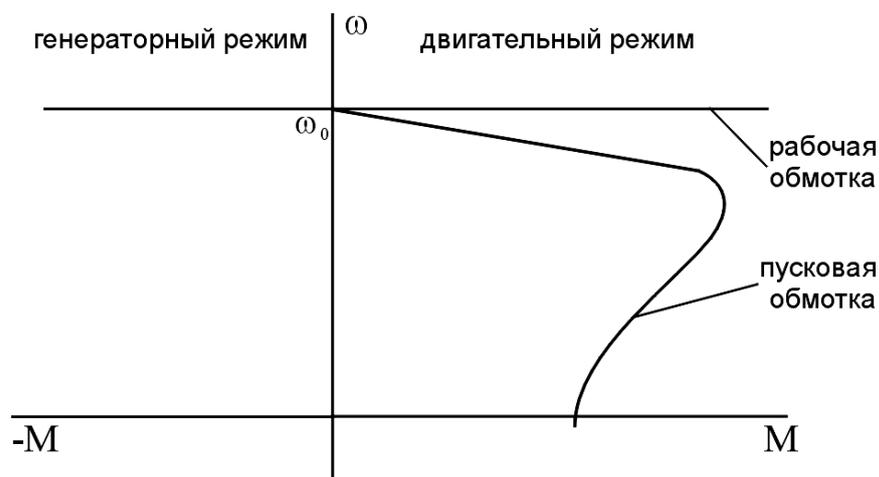


Рисунок 25

При идеальном холостом ходе оси полюсов магнитного поля ротора и магнитного поля статора совпадают. Ротор не создает электромагнитного момента. При увеличении нагрузки на вал ротора, ротор несколько отстает в пространстве от магнитного поля статора. Ось магнитных полюсов ротора будет сдвинута от оси магнитных полюсов статора на некоторый угол θ . За счет взаимодействия между полюсами ротора и статора появится электромагнитный момент. Чем больше угол θ , тем больше будет электромагнитный вращающий момент ротора. При определенном значении угла θ вращающий момент достигает максимума.

Ниже на рис. 26 показано расположение полюсов магнитного поля статора и ротора при нагрузке в двигательном режиме.

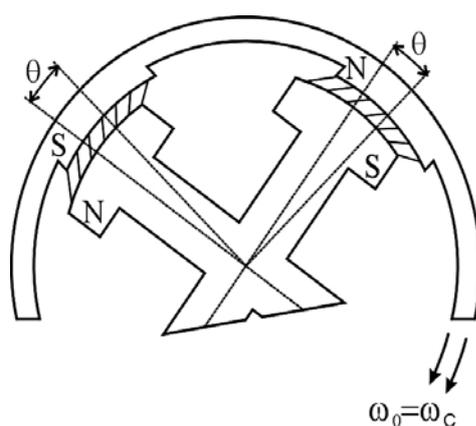


Рисунок 26

Если статический момент нагрузки превысит значение максимального момента, то двигатель выпадает из синхронизма. При приеме и сбросе нагрузки ротор совершает колебания прежде, чем займет определенное положение.

Если при работе машины в режиме идеального холостого хода к ротору будет приложен вращающий момент, направленный в сторону вращения, то ось магнитных полюсов ротора сдвинется в сторону вращения на угол θ . Возникнет электромагнитный момент, направленный против вращения ротора (за счет взаимодействия между полюсами магнитных полей ротора и статора) и машина перейдет в генераторный режим работы.

Мощность, потребляемая синхронным электродвигателем из сети можно найти из выражения

$$P = 3 \cdot U \cdot I.$$

В этом выражении U – фазное напряжение статора, I – фазный ток. Если не учитывать потери, тогда выражение для электромагнитного момента развиваемого ротором можно записать так:

$$M = \frac{P}{\omega_0} = \frac{3UI}{\omega_0}.$$

При $\theta=90^\circ$ электромагнитный момент, развиваемый ротором принимает максимальное значение:

$$M_{\max} = \frac{3E}{\omega_0} I_{кз}.$$

Тогда электромагнитный момент синхронной машины:

$$M = M_{\max} \sin \theta$$

Необходимо отметить, что угол θ сдвига по фазе между ЭДС и напряжением статора в двухполюсной машине равен углу сдвига между магнитными полюсами статора и ротора. В многополюсной машине угол θ сдвига по фазе между ЭДС и напряжением статора будет больше угла $\theta_{\text{реальный}}$ между полюсами на число пар полюсов магнитного поля ротора:

$$\theta = \theta_{\text{реальное}} P$$

Зависимость электромагнитного момента синхронной машины от угла θ называется угловой характеристикой, она представлена на рис. 27.

Устойчивый режим работы синхронного двигателя обеспечивается на участке $0 < \theta < 90^\circ$ (устойчивый участок). Обычно номинальный момент двигателя лежит в пределах $\theta = 20 \dots 30^\circ$ для обеспечения запаса по моменту.

Вращающий момент двигателя пропорционален напряжению сети в первой степени, что определяет его меньшую чувствительность к колебаниям напряжения, чем у асинхронного двигателя.

Для торможения обычно применяется режим динамического торможения, при котором обмотки статора отключаются от сети и замыкаются на резисторы. Механические характеристики в этом случае подобны характеристикам асинхронного двигателя при динамическом торможении.

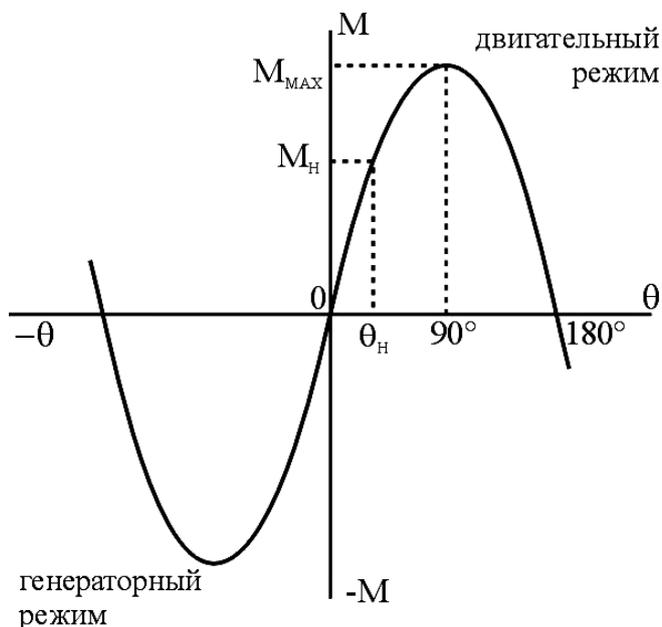


Рисунок 27

Принципиальная схема включения синхронного двигателя при динамическом торможении приведена на рис. 28.

Торможение синхронных двигателей противовключением практически не применяется, так как оно сопровождается большими бросками тока и ведет к усложнению управления ввиду необходимости отключения двигателя при подходе к нулевой скорости.

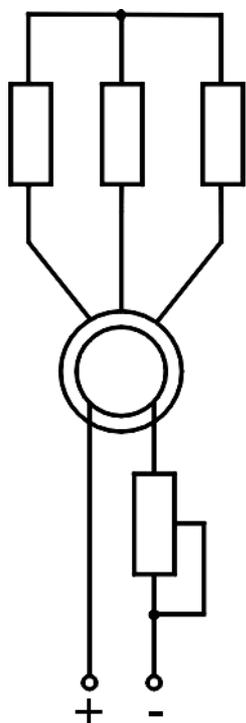


Рисунок 28

Синхронный двигатель может работать и в режиме генератора параллельно с сетью (рекуперативное торможение), в этом случае электромагнитный момент будет иметь отрицательное значение. Этому режиму отвечает левая ветвь угловой характеристики, угловая скорость вращения при этом не изменяется (равна синхронной).

Отличительной особенностью синхронного двигателя является его способность регулирования потребления реактивной мощности. Объясняется это тем, что, при некоторых допущениях можно считать, что ЭДС индуцируемая в обмотках статора ($E = 4,44w_1f_1k_1\Phi$) и равная напряжению сети определяется результирующим магнитным потоком двигателя, который в свою очередь возбуждается намагничивающим током статора и ротора. Следовательно, значение магнитного потока машины (вращающегося магнитного поля) и напряжение сети связаны пропорциональной зависимостью. При неизменном напряжении сети неизменен магнитный поток машины.

В случае, когда ток возбуждения отсутствует (тока в роторе нет), то весь магнитный поток создается током статора, следовательно, синхронный

двигатель потребляет из сети реактивную энергию и двигатель представляет собой активно-индуктивную нагрузку.

Если же машину возбудить, то результирующий магнитный поток будет создаваться как током статора так и током ротора, следовательно, потребление реактивной энергии статором из сети уменьшится. Дальнейшее увеличение тока возбуждения приведет к дальнейшему уменьшению потребления реактивной энергии. При номинальном токе ротора, статор вообще не будет потреблять реактивную энергию из сети, т.е. магнитный поток машины весь создается током ротора, наступает режим идеального холостого хода. При дальнейшем увеличении тока возбуждения, ток обмотки статора станет размагничивающим, т.е. статор будет работать и представлять собой по отношению к сети активно-емкостную нагрузку, а машина станет генератором реактивной энергии. Изменяя значение тока возбуждения машины (ток ротора) можно регулировать реактивную мощность синхронного двигателя. При токе ротора больше номинального (перевозбуждение двигателя) двигатель представляет собой активно-емкостную нагрузку, и его можно использовать для повышения $\cos \varphi$ промышленных предприятий.

С целью получения низких частот вращения приходится применять специальные тихоходные двигатели либо с электромагнитной редукцией частоты вращения, либо с катящимся или волновым роторами.

Основной особенностью *синхронных микродвигателей*, определяющей области их применения, является постоянство частоты вращения при неизменной частоте f питающей сети. Частота вращения ротора двигателя в синхронном режиме (при $M_{\text{сопр}} < M_{\text{max}}$) не зависит от колебаний напряжения питания и момента сопротивления. Она равна частоте вращения магнитного поля, т.е. синхронной частоте вращения:

$$n_c = 60f/p$$

В настоящее время в схемах автоматики синхронные микродвигатели применяются очень широко. По конструктивному исполнению они весьма разнообразны, особенно однофазные микродвигатели малых мощностей (от долей ватт до нескольких ватт).

Двигатели с номинальной мощностью от десятков до сотен ватт имеют обычное классическое исполнение. Они состоят из неподвижной части – статора, в пазах которого размещается трехфазная или двухфазная обмотка переменного тока, и вращающейся части – ротора, который у большинства двигателей имеет явно выраженные, полюсы.

В зависимости от конструкции ротора различают синхронные микродвигатели с электромагнитным возбуждением, постоянными магнитами, реактивные и гистерезисные. Кроме двигателей обычного исполнения в схемах автоматики иногда встречаются обращенные синхронные микродвигатели, обмотка переменного тока которых размещается в пазах ротора.

Микродвигатели с электромагнитным возбуждением (с обмоткой возбуждения постоянного тока на полюсах) вследствие сложности их

конструкций и пуска, а также необходимости наличия источника постоянного тока для питания обмотки возбуждения, в схемах автоматики применяются крайне редко.

Синхронные микродвигатели выпускаются как на промышленную частоту 50 Гц, так и на повышенные частоты 400, 500, 1000 Гц. Кроме обычных двигателей в схемах автоматики широко применяются тихоходные двигатели с электромагнитной редукцией частоты вращения, работающие на зубцовых гармониках поля, и двигатели с катающимся или волновым роторами. Иногда для получения низких частот вращения используются обычные двигатели со встроенными редукторами.

Синхронные микродвигатели широко применяются в приборах звуко- и видеозаписи, кино- и фотоаппаратуре, системах связи, всевозможных лентопотяжных устройствах и т. п.

К синхронным микродвигателям предъявляются как общие для всех электрических машин требования – высокие энергетические показатели (η и $\cos \phi$), малые габариты, масса и т.п., так и специфические для синхронных двигателей требования, которые зависят от схемы, в которой применяется двигатель. В одних схемах от двигателя требуется постоянство средней частоты вращения, в других – постоянство мгновенной частоты вращения в пределах одного оборота ротора и т. п.

В схемах автоматики применяется большое количество различных типов *синхронных микродвигателей с постоянными магнитами*, отличающихся друг от друга по способу запуска, конструктивному исполнению, способу питания и т. п. Все синхронные двигатели с постоянными магнитами, если их классифицировать по одному из основных показателей – способу запуска, можно разделить на три группы: самозапускающиеся микродвигатели; двигатели с асинхронным пуском; двигатели с гистерезисным пуском.

Самозапускающиеся синхронные микродвигатели с постоянными магнитами находят в настоящее время очень широкое применение в схемах автоматики. Они используются для привода часовых механизмов, механизмов реле, всевозможного рода программных устройств и т.п. Номинальные мощности таких двигателей обычно не превышают долей ватта. Они имеют большое число полюсов и небольшие синхронные частоты вращения (обычно $n_c = 60f/p \leq 375$ об/мин).

Двигатели часто рассчитываются на работу от однофазных сетей переменного тока. Их магнитное поле либо пульсирующее, либо резко выраженное эллиптическое (у двигателей с расщепленными экранированными полюсами). Пуск этих двигателей часто осуществляется в течение полупериода изменения тока за счет всегда существующего в синхронных двигателях пульсирующего момента. Самозапускающиеся двигатели рассчитываются либо на малоинерционную нагрузку, либо за счет специального устройства, развязывающего ротор и вал на время пуска, пускаются вхолостую, а затем нагружаются. Для обеспечения пуска таких двигателей широко используют различные устройства с пружинами, храповиками и иными приспособлениями, обеспечивающими вращение

ротора в заданном направлении и блокирующими обратный ход. Самозапускающиеся синхронные микродвигатели с постоянными магнитами обычно выпускаются плоскими, т.е. имеют относительно большой диаметр и малую длину. Их обмотка возбуждения имеет вид кольца, а магнитная цепь статора, изготовленная зачастую из одного листа стали, имеет клювообразные полюсы, расщепленные у двигателей с экранированными полюсами. КПД таких двигателей невелик – 3...5%.

Основной массовой серией однофазных самозапускающихся синхронных двигателей с постоянными магнитами, выпускаемых в России, длительное время являлась серия ДСМ. Двигатели этой серии рассчитаны на работу от сети с $f=50$ Гц напряжением 200, 127, 36, 24, 12 В. Они выпускались как без редуктора, так и с различными понижающими механическими редукторами. Частота вращения выходного вала такого двигателя - 375 об/мин; частота вращения выходного редуктора - 60; 2; 0,2; 1/300 об/мин. Эти двигатели выпускались с правым и левым вращением вала. Мощность, потребляемая ими от сетей, не превосходила 4 Вт. Двигатели серии ДСМ выпускались в больших количествах и в настоящее время еще работают во всевозможных устройствах. Но с началом выпуска и расширением производства новых серий двигателей с лучшими показателями – ДСО, ДСОР, ДСК, ДСКР – выпуск двигателей серии ДСМ сокращается.

Тихоходные однофазные микродвигатели типов ДСО (двигатели синхронные однофазные) – это многополюсный двигатель, рассчитанный для работы от однофазных сетей переменного тока с частотой 50 или 60 Гц, с надежными однонаправленными пуском и вращением, предназначенный для работы в различных промышленных и бытовых приборах.

Конструкция двигателя типа ДСО-32 (рис. 29) достаточно проста и технологична. Статор состоит из намотанной в виде кольца катушки 7, залитой и соответствующим образом отформованной литьевой пластмассой. Отформованная катушка 7 является основой двигателя. Справа и слева к катушке прилегают магнитопроводы 4, имеющие по восемь клювообразных полюсов 6 определенной длины, направленных аксиально и полученных путем неполной выштамповки и отгибки пластин 10 правого и левого магнитопроводов. При этом полюсы одного магнитопровода располагаются между полюсами другого магнитопровода. Магнитопроводы одновременно служат подшипниковыми щитами. В их центральных отверстиях располагаются подшипники скольжения 2, изготовленные путем заливки из литьевого сополимера.

Медные пластины 3 особой конфигурации, прилегающие изнутри к правому и левому магнитопроводам (по две штуки к каждому), экранируют определенную часть полюсов статора, выполняя роль короткозамкнутых витков, что обеспечивает при питании катушки статора переменным током через зажимы 9 создание вращающегося в пространстве магнитного поля (не кругового, а эллиптического).

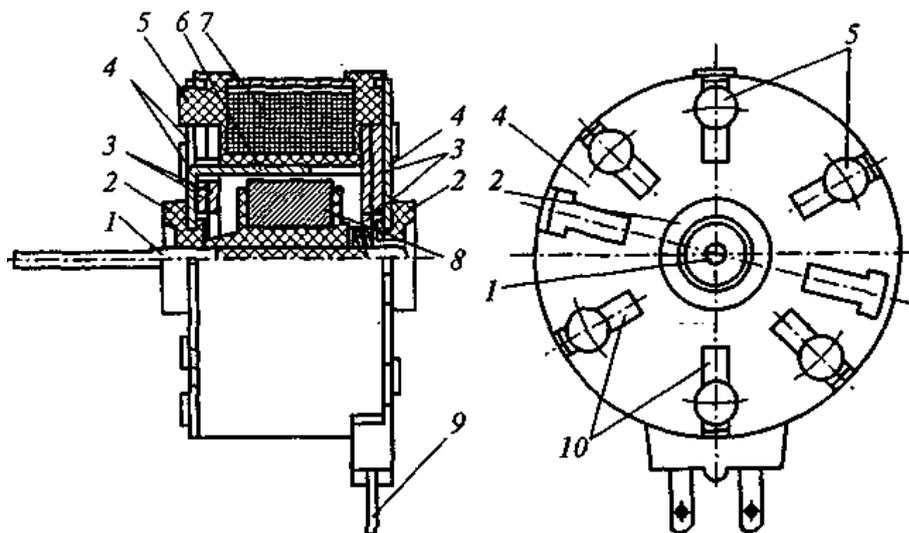


Рисунок 29 – Однофазный многополюсный двигатель типа ДСО-32 с экранированными полюсами: 1 – вал; 2 - подшипники скольжения; 3 – медная пластина; 4 – магнитопроводы; 5 – шпильки; 6 – полюс; 7 – катушка; 8 – постоянный магнит; 9 – зажимы; 10 – пластины

Магнитный поток, созданный обмоткой статора, замыкаясь вокруг нее, проходит по левому магнитопроводу, его клювообразным полюсам, цилиндрическому магниту 8 ротора, клювообразным полюсам правого магнитопровода, правому магнитопроводу и замыкается на внешнем магнитопроводе, соприкасающемся с левым и правым магнитопроводами. Цилиндрический ротор двигателя состоит из кольцевого феррито-бариевого магнита 8 марки М1БИ, опрессованного литьевым полимером на стальном валу 1. Цилиндрический магнит ротора имеет 16 полюсов, полученных путем радиального намагничивания. Синхронные микродвигатели с постоянными магнитами и асинхронным пуском отличаются от других типов синхронных двигателей с постоянными магнитами наличием на роторе короткозамкнутой обмотки типа беличьей клетки, предназначенной, во-первых, для пуска двигателя, во-вторых, для стабилизации его частоты вращения – демпфирования качаний ротора при резких изменениях нагрузки.

В последнее время наибольшее распространение получили синхронные двигатели двух конструктивных исполнений: с радиальным и аксиальным расположением постоянного магнита и пусковой короткозамкнутой обмотки. Статоры двигателей обоих конструктивных исполнений ничем не отличаются от статоров обычных синхронных и асинхронных машин. В пазах шихтованных статоров располагаются трехфазные или двухфазные обмотки переменного тока. Роторы двигателей сочетают в себе элементы синхронного двигателя – постоянные магниты и асинхронного двигателя – короткозамкнутую обмотку, выполненную в виде беличьей клетки, располагающуюся в пазах.

Двигатели с радиальным расположением постоянного магнита и пусковой обмотки имеют кольцевой пакет стали ротора, напрессованный на постоянный магнит-звездочку, в пазах которого располагается короткозамкнутая обмотка. В магнитопроводе ротора имеются

междуполусные прорези, размеры которых выбираются из условия хорошего асинхронного пуска и оптимального использования энергии постоянного магнита в синхронном режиме, т.е. из условия уменьшения потока рассеяния магнита. Пакет стали ротора с короткозамкнутой обмоткой предохраняет магнит от размагничивания в режиме пуска (короткого замыкания).

Благодаря простоте конструкции, невысокой стоимости, необходимости лишь одного источника питания, высокой надежности, стабильности характеристик *синхронные реактивные микродвигатели*, несмотря на сравнительно невысокие энергетические показатели, находят широкое применение во всевозможных схемах автоматики, приборах магнитной записи, связи и др.

Наибольшее распространение в настоящее время нашли синхронные микродвигатели, которые конструктивно мало отличаются от трехфазных и однофазных асинхронных микродвигателей. Их статоры аналогичны статорам асинхронных двигателей. Роторы же синхронных реактивных микродвигателей весьма разнообразны (рис. 30). До последнего времени наибольшее распространение имел ротор, представленный на рисунке 6.7, а, отличающийся от обычного короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя лишь наличием впадин – вырезов из цилиндрической поверхности, с помощью которых образуются явно выраженные полюсы, необходимые для работы двигателя в синхронном режиме.

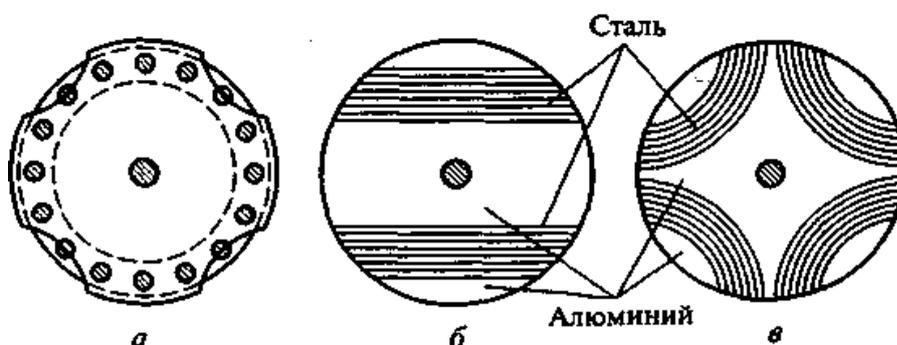


Рисунок 30 – Некоторые виды (а... в) роторов синхронных реактивных двигателей

Ротор разгоняется до подсинхронной скорости за счет асинхронного момента, а затем втягивается в синхронизм за счет синхронизирующего момента, возникающего вследствие разности магнитной проводимости по продольной и поперечной осям.

Особенностью реактивного двигателя является то, что его момент как в синхронном, так и асинхронном режимах прямо пропорционален квадрату приложенного напряжения. Это свойство обуславливает высокую чувствительность двигателя к колебаниям напряжения сети. Так, при уменьшении напряжения на 15 % ($U=0,85U_H$) вращающий момент уменьшается на 28% ($M \approx U^2 \approx 0,85^2 U_H^2 \approx 0,72M_H$).

В настоящее время в схемах автоматики получили широкое распространение *синхронные гистерезисные микродвигатели*. Статор обычного гистерезисного двигателя ничем не отличается от статоров

синхронных и асинхронных машин. Пакет статора набирается из изолированных листов электротехнической стали. В полузакрытых (с неширокой прорезью) пазах располагается обычная трехфазная или двухфазная (в конденсаторных двигателях) обмотка, которая при подключении к сети переменного тока создает вращающееся магнитное поле. Ротор большинства гистерезисных двигателей представляет собой сплошной или шихтованный полый цилиндр из магнитотвердого материала, имеющего широкую петлю гистерезиса (обладающего большой остаточной намагниченностью), и располагается на магнитной или немагнитной втулке. Магнитные схемы гистерезисных двигателей с различными роторами представлены на рис. 31.

Принцип действия гистерезисного двигателя рассмотрим на примере двигателя со сплошным массивным ротором (рис. 32). Вращающий момент такого двигателя можно представить как сумму двух моментов: основного гистерезисного M_{Γ} , обусловленного наличием большой остаточной намагниченности, и момента от вихревых токов $M_{\text{В}}$ $M = M_{\Gamma} + M_{\text{В}}$.

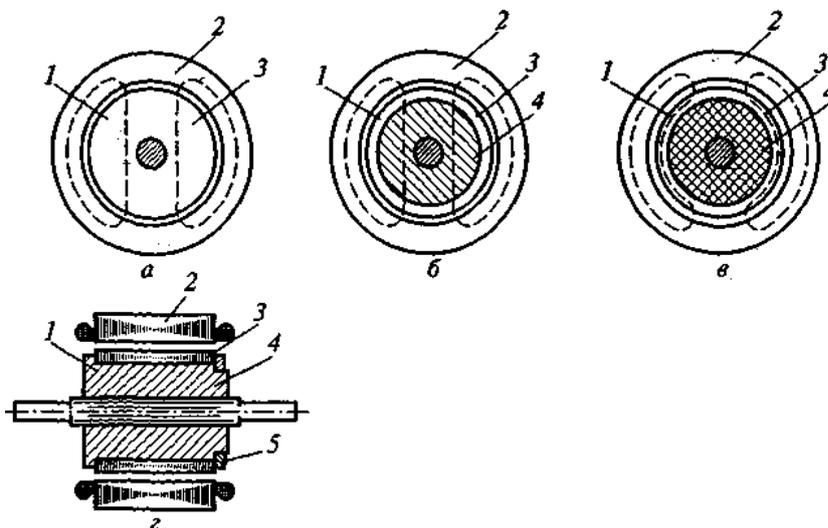


Рисунок 31 – Магнитные схемы гистерезисных двигателей

с различными роторами: а – с ротором из магнитотвердого материала; б – с составным ротором с ферромагнитной втулкой; в – с составным ротором с немагнитной втулкой; г – двигателя с ферромагнитной втулкой; 1 – ротор; 2 – статор; 3 – магнитотвердый материал; 4 – втулка; 5 – запорное кольцо

Момент от вихревых токов возникает в результате взаимодействия вращающегося магнитного поля двигателя с вихревыми токами ротора. По своей природе это асинхронный момент. Он равен нулю при синхронизме и вследствие большого активного сопротивления массивного ротора максимален при пуске ($n = 0$). Если бы двигатель обладал только моментом от вихревых токов, то его механическая характеристика не отличалась бы ничем от механической характеристики – обычного асинхронного двигателя с повышенным активным сопротивлением ротора, имеющего $s_k > 1$.

Возникновение гистерезисного момента объясняется наличием у материала ротора широкой петли гистерезиса. При асинхронной скорости вращения ротор, находясь в магнитном поле, все время перемагничивается.

При этом ось поля ротора, изготовленного из магнитотвердого материала, при наличии момента сопротивления на валу отстает от оси вращающегося магнитного поля на некоторый угол θ . В результате взаимодействия поля ротора с опережающим его вращающимся магнитным полем статора возникает вращающий гистерезисный момент $M_{г}$.

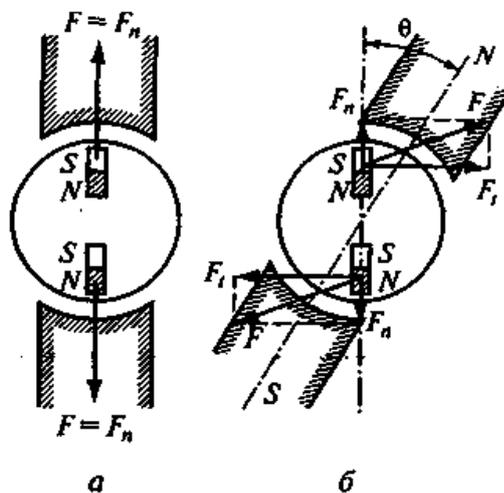


Рисунок 32 – Принцип действия гистерезисного двигателя: а – схема сил при не вращающемся магнитном поле; б – схема сил при вращающемся магнитном поле

Если ротор гистерезисного двигателя поместить в магнитное поле, то он намагнитится, его области спонтанной намагниченности – элементарные магнетики будут ориентированы по силовым линиям магнитного поля. На рис. 32 схематично показаны два элементарных магнетика. В результате взаимодействия внешнего поля, которое для наглядности представлено в виде двух полюсов магнита, с элементарными магнетиками ротора возникнут силы $F = F_n$, которые в положении ротора, соответствующем показанному на рис. 32, а, будут направлены радиально. Момент, действующий на ротор в этом случае, будет равен нулю.

Если полюсы магнита, а, следовательно, и внешнее магнитное поле вращать относительно ротора, то элементарные магнетики будут поворачиваться вслед за полем полюсов, однако вследствие молекулярного трения, которое у магнитотвердых материалов весьма значительно, они будут отставать от поля полюсов на некоторый угол θ . Силы взаимодействия F между элементарными магнетиками и полем полюсов магнита в этом случае (рис. 32, б) кроме радиальных составляющих F_n будут иметь еще тангенциальные составляющие F_t , которые и создадут вращающий гистерезисный момент.

Положительные качества синхронных гистерезисных двигателей следующие:

- большие пусковой момент и момент входа в синхронизм;
- независимость момента входа в синхронизм от момента инерции
- плавность входа в синхронизм - отсутствие рывка;
- незначительное изменение тока - на 20...30 % от пуска ($n = 0$) до холостого хода ($n = n_c$) и на 1...3 % от холостого хода до номинальной нагрузки;

сравнительно высокий КПД, достигающий в некоторых двигателях 60%;
малое время разгона;

большая механическая прочность и симметрия ротора, что позволяет создавать высокоскоростные двигатели, в том числе, гидродвигатели;

способность одного и того же ротора работать в магнитных полях различной полюсности – полисинхронизм ротора, позволяющий создавать много-скоростные синхронные двигатели, хотя и неравноценные по качеству на различных скоростях из-за различного намагничивания активного материала ротора;

высокая температурная стабильность пусковых и рабочих характеристик, обусловленная тем, что изменение температуры влияет лишь на значение активного сопротивления обмотки статора;

высокая надежность;

малый уровень шума;

сравнительно небольшие габариты и масса.

Недостатки синхронных гистерезисных двигателей, ограничивающие области их применения, сводятся к следующим:

низкий коэффициент мощности ($\cos \varphi$), не превосходящий 0,3...0,45;

малая стабильность мгновенной скорости вращения – качание ротора при резко изменяющихся нагрузках;

большой технологический разброс характеристик двигателя, объясняющийся тем, что даже незначительные отклонения от установленного режима термической обработки ведут к значительным изменениям свойств магнитотвердых материалов;

высокая стоимость магнитотвердых материалов и сложность их механической обработки.

Рекомендуемая литература

1. Шишмарев В.Ю. Типовые элементы систем автоматического управления: Учеб. пособие. – М.: Изд. центр «Академия», 2004. С.259-272.
2. Кацман М.М. Электрические машины автоматических устройств: Учеб. пособие. – М.: ФОРУМ, ИНФРА-М, 2002. С.40-91.

Контрольные задания для СРС [1,2]

1. Конструкция исполнительных двигателей переменного тока
2. Пуск и тормозные режимы работы машин переменного тока

4. В позиционных системах программного управления для отработки типовых команд используются *шаговые двигатели* (ШД). В шаговых ИУ электродвигатель управляется последовательностью импульсов и перемещается строго на определенный угол (шаг), пропорциональный числу импульсов управления. По принципу действия ШД представляет собой дискретный синхронный двигатель, ротор которого поворачивается после каждого импульса на входе системы управления и остается неподвижным при отсутствии импульса. Блок управления ШД содержит коммутатор на логических схемах (триггеры, схемы совпадения) и усилитель мощности (ре-

лейные усилители). Шаговые двигатели имеют более низкие энергетические показатели, чем регулируемые двигатели непрерывного действия, поэтому ШД используется в маломощных системах, в частности в системах с ЧПУ. ШД широко используются в качестве электромеханических преобразователей унитарного кода в угол поворота, воздействуя на задатчик программы силового следящего привода.

Шаговые двигатели – это электромеханические устройства, которые преобразуют электрические импульсы напряжения управления в дискретные (скачкообразные) угловые и линейные перемещения ротора с возможной его фиксацией в нужных положениях.

Применяемые в настоящее время шаговые двигатели в большинстве являются многофазными и многополюсными синхронными электрическими машинами. В отличие от обычных синхронных двигателей роторы шаговых двигателей не имеют пусковой короткозамкнутой обмотки, что объясняется частотным (а не асинхронным) их пуском. Роторы двигателей могут быть возбужденными (активными) и невозбужденными (пассивными).

На рис. 33 изображены схемы работы m -фазного шагового двигателя. Для упрощения анализа физических процессов рассмотрим работу этого двигателя с простейшим невозбужденным ротором, имеющим два полюса.

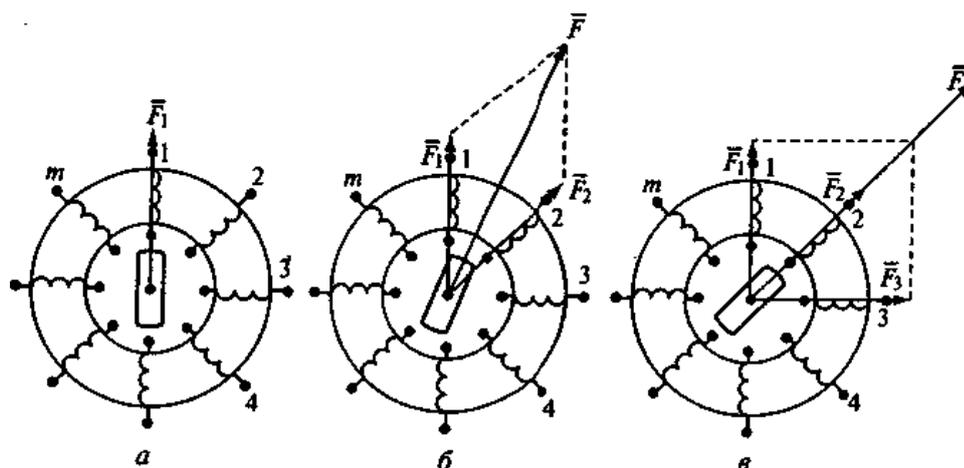


Рисунок 33 – Схемы работы m -фазного шагового двигателя: а - поочередное питание однополярными импульсами; б - питание четного числа обмоток; в - питание нечетного числа обмоток

Питание обмоток статора может быть либо *однополярным*, либо *двухполярным*. При однополярном питании напряжение изменяется от нуля до $+U$; при двухполярном - от $+U$ до $-U$.

Шаговые двигатели по существу являются синхронными двигателями, работающими в несколько иных (необычных) режимах. Последнее накладывает отпечаток на их конструктивное исполнение. В отличие от обычных синхронных двигателей они для обеспечения нужных динамических и статических характеристик имеют минимальные диаметры ротора, выполняются без пусковой короткозамкнутой обмотки, рассчитываются на большие электромагнитные нагрузки и т. п. В настоящее время известно множество конструктивных форм шаговых двигателей.

По числу фаз (обмоток управления) шаговые двигатели можно разделить на однофазные, двухфазные и многофазные.

По типу роторов – на активные (возбужденные) и пассивные (невозбужденные). Активные шаговые двигатели можно в свою очередь разделить на двигатели с постоянными магнитами (магнитоэлектрические) и двигатели с обмотками возбуждения (электромагнитные), а пассивные - на индукторные и реактивные.

По числу пакетов стали магнитопровода двигатели делятся на однопакетные, двухпакетные и многопакетные.

По способу фиксации ротора при обесточенных обмотках управления различают двигатели с внутренней и внешней фиксацией.

Шаговые двигатели можно разделить на группы также по типу магнитной системы и другим признакам.

Описание всех конструкций шаговых двигателей, применяемых в настоящее время на практике, весьма затруднительно, поэтому рассмотрим лишь некоторые, наиболее типичные из них.

Однопакетные шаговые двигатели с активным ротором по своей конструкции (рис. 34) мало отличаются от обычных синхронных двигателей. Их роторы чаще возбуждаются постоянными магнитами, реже – обмоткой возбуждения постоянного тока. Роторы имеют явно выраженные полюсы. С целью уменьшения шага их изготавливают многополюсными в виде магнитов-звездочек. Малые диаметры не позволяют значительно увеличить число полюсов, что приводит к сравнительно крупному шагу таких двигателей, который обычно находится в пределах от 15 до 90°. Уменьшение шага у этих двигателей возможно лишь за счет увеличения числа фаз статора и тактов коммутации.



Рисунок 34 – Шаговый двигатель типа ШД-2 с активным ротором в виде магнита-звездочки

Выпускается несколько серий шаговых двигателей с активным ротором – ШДА, ШДА-3, ДША и др.

Кроме однопакетных шаговых двигателей с активным ротором на практике можно встретить двух-, трех- и многопакетные двигатели. У двухпакетного двигателя в одном корпусе имеется два совершенно одинаковых пакета стали ротора с одинаковыми обмотками. Пакеты стали смещены в пространстве на половину зубцового деления, что обеспечивает соответствующий сдвиг обмоток в пространстве и расширяет возможности двигателя - ведет к уменьшению шага без увеличения диаметра ротора и т.п. Оба ротора-звездочки располагаются на одном валу и не имеют пространственного сдвига, т. е. оси их полюсов совпадают.

Иногда для индикаторных целей (работы практически без момента сопротивления) применяются гистерезисные шаговые двигатели, у которых ротор не имеет явно выраженных полюсов и возбуждается полем статора. Шаг таких двигателей определяется числом пазов статора.

Шаговые двигатели индукторного типа имеют следующие отличительные признаки. Пакеты их статоров и роторов изготавливаются из листов магнитомягкой электротехнической стали. Паза ротора открытые. Ротор пассивный. Статор имеет два вида пазов: большие полуоткрытые, в которых размещается обмотка, и малые открытые, выполняемые на зубцах, образуемых большими пазами (рис. 35). Совокупность открытых пазов статора, расположенных на одном большом зубце, называется гребенчатой зоной. Число пазов статора и ротора и их геометрические размеры выбираются такими, чтобы обеспечить необходимый шаг и достаточный синхронизирующий момент при заданном виде коммутации токов.

Основной особенностью индукторных двигателей является то, что магнитный поток в их воздушном зазоре при работе двигателя содержит постоянную и переменную составляющие. Постоянная составляющая потока возбуждается либо постоянной составляющей тока обмоток управления – у двигателей с самовозбуждением, либо специальной обмоткой возбуждения – у двигателей с независимым возбуждением, либо постоянными магнитами – у магнитоэлектрических двигателей.

Переменная составляющая магнитного поля, вращающегося в пространстве в соответствии с частотой тактов коммутации, создается импульсами тока обмоток управления, поступающими от электронного коммутатора.

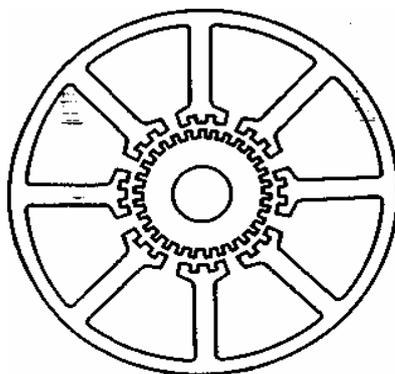


Рисунок 35 – Листы стали статора и ротора шагового двигателя индукторного типа

В индукторных шаговых двигателях с самовозбуждением постоянная составляющая магнитного потока в воздушном зазоре создается непосредственно однополярными импульсами управления с помощью шунтирующих обмотки управления встречных диодов. Двигатели с самовозбуждением просты по устройству, не требуют сложного коммутатора. Благодаря ряду положительных качеств они получили широкое применение. Выпускается несколько серий таких двигателей: ШДР, ДШИ, РШД. Недостатком индукторных двигателей с самовозбуждением является

отсутствие внутренней магнитной фиксации ротора при обесточенных обмотках статора.

В четырехфазных индукторных шаговых двигателях с независимым электромагнитным возбуждением постоянный поток возбуждения создается специальной обмоткой, питаемой постоянным током, который минует коммутатор. Этот двигатель в отличие от предыдущего имеет внутреннюю магнитную фиксацию роторов при отсутствии токов в обмотках управления. Положительным качеством такого двигателя является также то, что ток возбуждения, минуя коммутатор управления, позволяет тем самым уменьшить его установленную мощность.

Шаговые реактивные двигатели, так же как и индукторные, имеют невозбужденный (пассивный) ротор (рис. 36, а). Конструктивно они весьма схожи с индукторными двигателями, имеющими электромагнитное возбуждение, однако не имеют обмоток возбуждения и постоянной составляющей магнитного потока в воздушном зазоре. По своим энергетическим показателям и величине синхронизирующего момента они уступают индукторным двигателям аналогичной конструкции. Одним из недостатков реактивных шаговых двигателей является отсутствие внутренней магнитной фиксации ротора при обесточенных обмотках статора. Однофазные шаговые двигатели наряду с многофазными находят достаточно широкое применение в средствах автоматики. Обычно они применяются там, где не требуется больших синхронизирующих моментов и высоких скоростей. Они просты по устройству и управлению, не требуют сложных коммутаторов и чаще всего имеют одно направление вращения (не имеют реверса). Главная трудность при создании однофазных двигателей состоит в получении пускового момента однонаправленного действия.

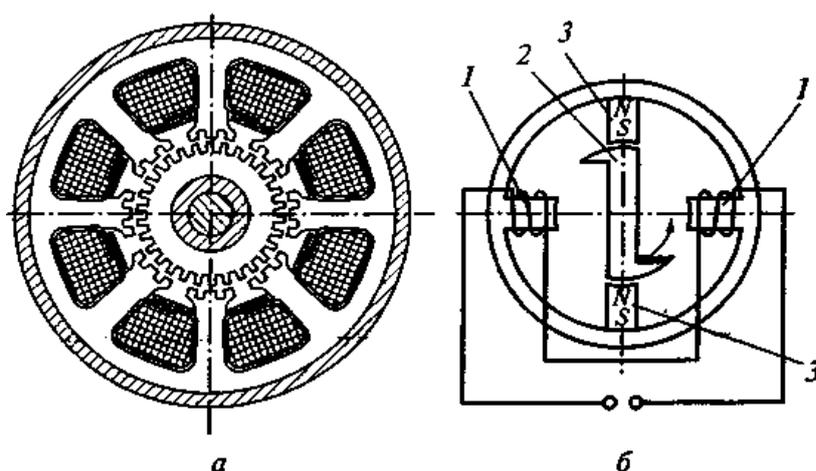


Рисунок 36 – Схемы шаговых реактивных двигателей:
а – четырехфазного; б – однофазного двухполюсного; 1 – обмотки управления; 2 – ротор; 3 – постоянные магниты

На рис. 36, б схематично представлен простейший однофазный шаговый двигатель, пусковой момент однонаправленного действия у которого создается с помощью клювообразных несимметричных полюсов. В обесточенном состоянии обмоток управления 1 ротор 2 удерживается

постоянными магнитами 3 в определенном положении. При подаче импульса управления ротор поворачивается в направлении, показанном стрелкой. При повороте ротора на 90° напряжение с обмоток управления снимается и ротор, продолжая вращаться под действием сил инерции, приходит в положение, соосное с полюсами постоянных магнитов.

Кроме рассмотренных конструкций в последнее время появился ряд новых шаговых двигателей: шаговые двигатели с катящимися и волновыми роторами, шаговые двигатели с печатными обмотками и др.

В *моментных двигателях* ротор, развивая необходимый момент, поворачивается лишь на весьма малые углы, составляющие долю его оборота. Таким образом, двигатель работает практически с неподвижным ротором или, как говорят, в режиме короткого замыкания.

В качестве моментных могут быть использованы двигатели различного типа как постоянного, так и переменного токов. Например, у двигателя постоянного тока независимого возбуждения момент короткого замыкания пропорционален приложенному напряжению. У асинхронного двигателя (трехфазного или двухфазного) момент определяется квадратом напряжения в цепи статора, причем в двухфазном двигателе достаточно регулировать ток в одной обмотке (обмотке управления) и изменять момент за счет внесения асимметрии.

Системы с моментными двигателями отличаются повышенным быстродействием. Поскольку двигатель не вращается, то его механическая инерция не влияет на динамику системы, а переходные процессы определяются в основном электромагнитной инерцией обмоток. Поскольку электромагнитная постоянная двигателя обычно существенно меньше электромеханической, то переходные процессы в них завершаются быстрее, чем при отработке перемещений.

В приводах подачи прецизионных шлифовальных станков, приборов точной механики и оптики часто требуется отработка перемещений, составляющих несколько микрометров, а иногда и десятые доли микрометра. При использовании для этой цели шаговых двигателей как обладающих малым угловым шагом все же необходима механическая передача с большим передаточным отношением, которой свойственны существенные погрешности. Так как в перечисленных установках очень высоки точностные требования, то применение шаговых двигателей практически исключается. Частичным решением задачи может быть использование шаговых двигателей с электрическим дроблением шага, когда посредством специальной электронной схемы при подаче очередного импульса обеспечивается перемещение не на полный шаг, а только на его часть. По сути дела в этом случае от дискретного управления переходят к непрерывному. Однако и здесь не обойтись без механической передачи.

В связи с этим для микроперемещений необходимы двигатели, выполненные на иной физической основе. Принципиально возможно построение двигателей на основе теплового расширения тела, электромагнитного взаимодействия, магнитострикций; обратного

пьезоэффекта.

Двигатели для микроперемещений, построенные на тепловом расширении тела, не используются из-за большой инерционности и отрицательного влияния температурных полей на окружающие приборы и узлы.

Двигатели, выполненные как втяжные или поворотные электромагнитные устройства, иногда находят применение, однако очень трудно в них обеспечить тяговое усилие, слабо зависящее от перемещения. Кроме того, такой двигатель весьма инерционен из-за большой индуктивности тяговой катушки. Полоса пропускания управляющего сигнала в нем составляет 10...20 Гц. Положительное качество двигателя – обеспечение достаточно больших перемещений, определяемых ходом электромагнита (ход может составлять несколько миллиметров). В большинстве случаев в прецизионных установках наряду с микроперемещениями необходимы и относительно большие юстировочные подачи.

Более широко применяют магнестрикционные двигатели, в которых используется свойство стержня из ферромагнитного материала изменять длину под воздействием магнитного поля. Максимальное относительное изменение продольных размеров стержней из таких материалов, как никель, железоникелевые, железохромникелевые и железокобальтовые сплавы, сплавы типа инвар и другие, может составлять $(20...50) \cdot 10^{-6}$. Следовательно, при длине 100 мм свободный конец стержня может перемещаться на 2... 5 мкм. Пороговая чувствительность составляет 0,05...0,10 мкм. Недостаток магнестрикционного двигателя, так же как и электромагнитного – инерционность, обусловленная процессами, происходящими в намагничивающей катушке. Однако индуктивность ее несколько меньше, так как зазора в магнитной цепи может не быть. Все же полоса пропускания и в этом случае не превышает 30 Гц. На точность работы двигателя существенно влияют внешнее тепловое поле и нагрев стержня. Следует иметь в виду, что намагничивающая катушка двигателя сама создает ощутимое тепловое поле, так как ее размеры и потребление энергии достаточно велики.

Наиболее предпочтителен пьезоэлектрический двигатель, выполняемый обычно как столбик из пьезокерамических шайб, склеенных между собой. Исходным материалом для пьезокерамики служат оксиды металлов (титанат бария, цирконат-титанат свинца и др.). Когда к торцевым поверхностям шайб приложено напряжение, то в зависимости от ориентации электрического поля столбик сжимается или удлиняется. В некоторых пределах зависимость удлинения от напряженности электрического поля носит линейный характер. Максимальное относительное удлинение может составлять $(5...7) \cdot 10^{-4}$. Следовательно, пьезостолбик длиной 50 мм может обеспечить перемещение до 25 мкм, т. е. примерно на порядок больше, чем в магнестрикционных двигателях. Напряжение, подаваемое на шайбу, достаточно велико – до 300 В. Потребление энергии незначительно.

Существенное достоинство пьезоэлектрического двигателя – быстрое действие. Полоса пропускания достигает 1000 Гц. К недостаткам как

магнестрикционного, так и пьезоэлектрического двигателей относится наличие петли гистерезиса в характеристиках. Ширина петли может достигать 20...30 % максимального перемещения. В пьезоэлектрических двигателях влияние гистерезиса можно несколько ослабить предварительным сжатием столбика шайб.

Усилия, которые могут создавать магнестрикционный и пьезоэлектрический двигатели, естественно, зависят от размеров стержня и шайб и в реальных двигателях составляют несколько сотен ньютонов.

Часто максимальные перемещения, которые могут обеспечить магнестрикционный и пьезоэлектрический двигатели, недостаточны. Тогда приходится прибегать к шаговым двигателям, построенным на тех же принципах. Работу шагового пьезоэлектрического двигателя поясняет рис. 37. Двигатель состоит из столбика пьезоэлектрических шайб 2 и двух зажимных устройств 1 и 3 на его концах. При нормальной работе в непрерывном режиме зажимное устройство 3 зафиксировано, а устройство 1 свободно. В зависимости от напряжения, поданного на шайбы, осуществляются микроперемещения конца А.

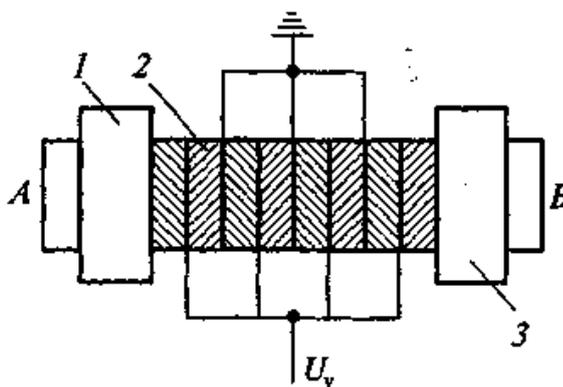


Рисунок 37 – Схема шагового пьезоэлектрического двигателя:
1,3 – зажимные устройства; 2 – шайба пьезоэлектрическая

При использовании возможного ресурса перемещений и соответственно при достижении напряжением предельного значения зажим 1 фиксирует конец А, напряжение с шайб снимается, а зажим 3 освобождает конец В. При этом столбик шайб сжимается до исходной длины (конец В подтягивается). После этого зажим 3 вновь фиксируется, а зажим 1 - отпускает конец А; далее вновь подается напряжение на шайбы и двигатель начинает работать, перемещая конец А, соответственно управляя объектом, механически связанным с двигателем. Если одного шага перемещения оказывается недостаточно, то цикл повторяется. Зажимными устройствами управляют с помощью специального коммутатора. Для того чтобы зафиксировать конец столбика шайб, можно установить механические устройства (например, цанговые зажимы) с управлением от магнитов или тех же пьезокерамических элементов – шайб.

Шаговый магнестрикционный двигатель работает на том же принципе.

Рекомендуемая литература

1. Шишмарев В.Ю. Типовые элементы систем автоматического управления: Учеб. пособие. – М.: Изд. центр «Академия», 2004. С.254-297.
2. Кацман М.М. Электрические машины автоматических устройств: Учеб. пособие. – М.: ФОРУМ, ИНФРА-М, 2002. С.172-178.
3. Справочник по средствам автоматики / [Б.И. Филиппович, А.П. Шорыгин, В.А. Царьков и др.]; Под ред. В.Э. Низэ и И.В.Антика. – М.: Энергоатомиздат, 1983. С.339-363.

Контрольные задания для СРС [1-3]

1. Классификация электрических микромашин
2. Конструкции электрических микромашин и их применение

5. *Тахогенераторы* предназначены для измерения угловой скорости вращающихся объектов. Ротор тахогенераторов механически связывают с валом испытуемого электродвигателя или исполнительного механизма, а об угловой скорости ω судят по выходной ЭДС генератора.

У большинства ТГ основной является скоростная характеристика, которая дает зависимость среднего значения напряжения от частоты вращения вала

$$U_{cp}=f(n); U_{cp}=\int_0^T (u/T)dt ,$$

где u – мгновенное значение пульсирующего или выпрямленного напряжения; T – время (период) одного оборота.

Из тахогенераторов наибольшее распространение получили *тахогенераторы постоянного тока*, выпускаемые с постоянными магнитами либо с независимым возбуждением. Область их применения весьма разнообразна: прецизионные тахогенераторы постоянного тока используются в авиации, судостроении, станкостроении, металлургической и других отраслях промышленности. К преимуществам этих датчиков относят достаточно высокую точность и наличие выходного сигнала постоянного тока, удобного для последующей обработки. Основным недостатком этих тахогенераторов является наличие коллекторно-щеточного узла, снижающего надежность работы и долговечность преобразователя.

Машины постоянного тока типа ТГ1, встроенного и автономного исполнения, а также типа ЭГ разработаны для комплектации с двигателями металлорежущих станков; машины типа ТГП служат для маломощных электроприводов следящих устройств, отличающихся большой частотой включений с изменением направления вращения; маломощные ТГ типов СЛ, ТД, ТГ (55-74 мм) предназначены для установки на авиационных и иных электроприводах с эксплуатационным сроком до 2000 ч; крупные прецизионные ТГ типа ПТ рассчитаны на использование в металлургической промышленности. Каждый вид ТГ, кроме отведенной для него области, может оказаться пригодным для применения на иных агрегатах серийного или индивидуального изготовления.

Номинальные частоты вращения большинства ТГ не превышают 2000 об/мин, но по центробежной устойчивости предусматривается запас в 2,5-3 раза и более; при этом учитывается вероятность «разноса» привода постоянного тока. Некоторые типы ТГ или отдельные их исполнения (ТМГ, СЛ и др.) допускают продолжительную работу при частотах вращения 3500-4000 об/мин и напряжениях на якоре до 300 В. На быстроходных агрегатах находят применение ТГ типов ТГП ($n_{\max}=7000$ об/мин) и ТДР-0,031 ($n_m=12000$ об/мин); максимальные напряжения таких ТГ обычно лежат в пределах 50-80 В.

Для прецизионных ТГ заводы-изготовители применяют подшипники высокого класса точности и износостойкости; некоторые заводы гарантируют срок их службы до 20 тыс. ч.

Прецизионные ТГ типов ПТ22, ПТ32 и ПТ42 предназначены для приводов металлургической промышленности. Номинальное напряжение 230 В, сечения проводов якорной обмотки выбираются в зависимости от скорости. Машины значительно отличаются по массе и габаритам, но надо отметить, что это не дает выигрыш по частоте полюсных пульсаций f_p или частоте зубцовых пульсаций f_z , так как числа зубцов их якореи мало отличаются ($N_z=21, 23, 25$). Тахогенераторы типа ПТ42 имеют значительно большее число коллекторных пластин ($N_k=69, 62, 125$), однако вследствие крутого фронта импульса и его малой продолжительности коллекторные пульсации ΔU_k практически не влияют на регулировочные свойства САР.

Синхронные тахогенераторы имеют малое внутреннее сопротивление, что позволяет получить от них достаточно большие мощности. При изменении частоты вращения ротора в синхронных машинах изменяется не только амплитуда выходного напряжения, но и его частота. Благодаря механической устойчивости синхронные тахогенераторы нашли применение в трамваях, локомотивах, крановом хозяйстве и др.

Асинхронные тахогенераторы по конструкции подобны двухфазным асинхронным двигателям. Их роторы обычно выполняют в виде тонкостенного металлического цилиндра. Две обмотки статора тахогенератора сдвинуты на 90° относительно друг друга. К одной обмотке подводят напряжение питания, а с измерительной обмотки снимают ЭДС. При подаче напряжения питания постоянной величины и частоты пульсирующий магнитный поток, пересекая ротор, индуцирует в измерительной обмотке ЭДС, пропорциональную угловой скорости ω ротора, приводимого в движение контролируемой машиной или механизмом. Основное достоинство асинхронных тахогенераторов состоит в том, что независимо от частоты вращения ротора ЭДС переменного тока на выходе такого тахогенератора имеет постоянную частоту.

Асинхронные ТГ отличаются простотой конструкции и малой массой подвижной части. Главное их достоинство, определяющее в большинстве случаев их выбор, состоит в том, что независимо от скорости привода напряжение на выходе ТГ имеет постоянную частоту. Наличие постоянной

достаточно большой частоты позволяет отфильтровать зубцовые пульсации выпрямленного напряжения без заметного демпфирования системы.

Асинхронный ТГ имеет шихтованный статор 1 (рис. 38) с двумя обмотками – задающей 3 и приемной П, сдвинутыми относительно друг друга на 90° .

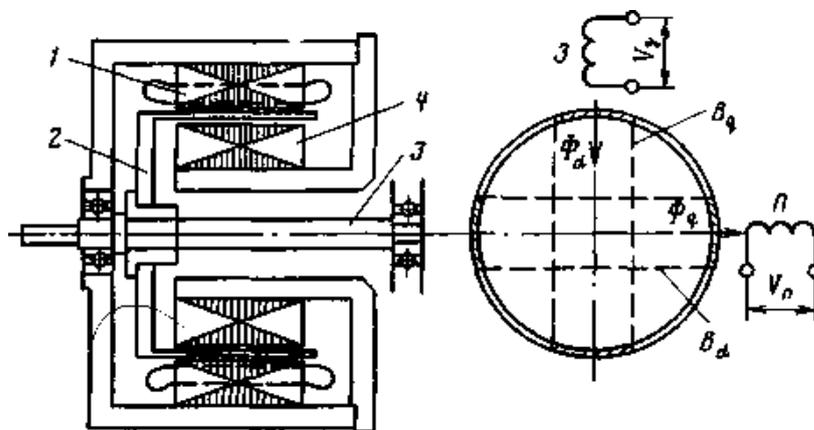


Рисунок 38 – Схема асинхронного ТГ

Ротор 2, закрепленный на оси 3, представляет собой полый тонкостенный цилиндр из немагнитного металла (дюраль, бронза). Внутри ротора расположен цилиндр 4 из шихтованной стали.

В некоторых схемах для улучшения электрических характеристик к обмоткам асинхронных ТГ подключаются компенсирующие конденсаторы.

Синхронные ТГ имеют малое внутреннее сопротивление, что позволяет получить от них достаточно большие мощности. При изменении частоты вращения у синхронных машин изменяется не только выходное напряжение, но и частота. Выходное напряжение обычно выпрямляется, но находят применение схемы, осуществляющие контроль по частоте сигналов, поступающих от ТГ. Благодаря механической устойчивости синхронные ТГ нашли применение в трамваях, поездах, шахтных машинах, на кранах и иных агрегатах, подверженных значительной вибрации.

Синхронный ТГ по принципу действия аналогичен обычному силовому синхронному генератору. Вследствие большого реактивного сопротивления статора напряжение ТГ резко падает с увеличением нагрузки и поэтому они должны работать на потенциометр с неизменным сопротивлением.

Распространение получили ТГ с небольшим числом полюсов (6-12), однако имеются конструкции с числом полюсов 24, 72 и даже 500. Большое число полюсов и трехфазные схемы обмоток позволяет применять синхронные ТГ на тихоходных приводах. Известны конструкции синхронных ТГ с выпрямителями, закрепленными на корпусе машины.

Роторы и статоры бывают разнообразных конструкций, но всем им свойственна некоторая *несимметрия*, вызывающая низкочастотные пульсации напряжения статора.

Обычно напряжение статора ТГ выпрямляется, а зубцовые пульсации сглаживаются при помощи RC-фильтра. Для снижения пульсаций

выпрямленного напряжения ТГ изготавливают с полюсами специального профиля, позволяющими получить желаемую форму ЭДС.

В синхронных ТГ для температурной компенсации применяются специальные магнитные шунты; при отсутствии насыщения и больших зазорах внешние магнитные поля мало влияют на напряжение статора. При чисто активной и неизменной нагрузке скоростная характеристика имеет линейный характер, несмотря на большое падение напряжения в самом ТГ.

Известные синхронные ТГ предназначены для работы с приводами, не требующими высокой стабильности скоростной характеристики; при их разработке в первую очередь стремились получить дешевую безотказную машину.

Индукторные ТГ трехфазного тока были созданы для крупных электроприводов металлургической и бумажной промышленности; впоследствии они нашли применение также в различных агрегатах быстродействующего регулирования средней мощности. По сравнению с ТГ иных систем они отличаются небольшой чувствительностью к температуре и изменению напряжения на обмотке возбуждения. Главное их достоинство состоит в низком уровне оборотных погрешностей, что играет решающую роль при строгом поддержании скорости без инерционных электроприводов. Сигнал данных ТГ оценивается по среднему значению выпрямленного напряжения.

Индукторные тахогенераторы представляют собой видоизмененные индукторные машины повышенной частоты. Впервые они были разработаны для приводов непрерывных прокатных станков.

Необходимость в создании таких ТГ возникла при анализе работы действующих электроприводов; выявилось, что применявшиеся ТГ постоянного тока имеют недопустимо большие оборотные и полюсные пульсации выходного напряжения.

Внешние характеристики ТГ, как и у обычных индукторных и синхронных генераторов, отличаются малой жесткостью, поэтому система электропривода должна быть построена таким образом, чтобы сопротивление нагрузки ТГ в процессе управления не изменялось. В случае изменения сопротивления нагрузки и перехода на другую скоростную характеристику ТГ требуется изменять добавочные резисторы в цепи таховольтметров.

К основным недостаткам тахогенераторов относят ограниченный частотный диапазон измеряемых величин. В последние годы тахогенераторы постепенно вытесняются *фотоимпульсными* и *индукционными* датчиками, а также специальными *интеллектуальными* преобразователями – *шифраторами углового перемещения (положения)*.

В *фотоимпульсных датчиках* импульсы в оптоэлектронной паре источник излучения – приемник излучения (светодиод – фотопреобразователь) создаются при помощи дисков с прорезями или отверстиями, в некоторых приводах применяют вращающиеся детали машин. В подавляющем большинстве *шифраторов положения* также используют в качестве чувствительного элемента оптоэлектронную пару.

Импульсы *индукционных датчиков* создаются под влиянием пульсирующего или знакопеременного магнитного потока. В качестве тела, модулирующего поток, служат специальные зубчатые колеса либо вращающиеся ферромагнитные детали машин.

На практике в средствах механизации, промышленной робототехнике, устройствах числового программного управления и других промышленных системах управления и контроля широко используются два основных типа оптических угловых (поворотных) кодирующих устройств: *шифраторы приращений* и *абсолютные шифраторы*.

Цифровые измерения линейных перемещений (длин) и углов поворота, в частности, функциональных элементов роботов и металлообрабатывающих станков, можно осуществлять так называемым методом считывания с использованием кодирующих линейчатых масок и кодирующих дисков. На них нанесены кодирующие дорожки в виде, например, темных (соответствуют "0") и светлых (соответствуют "1") элементов.

Считывание кода и получение соответствующих сигналов обычно осуществляется оптоэлектронным способом (элементы дорожек просвечиваются). Ранее упоминалось о применении и других способов считывания. Разрешающая способность масок ограничивается различной длиной элемента кода. При магнитном способе считывания она составляет примерно 0,1 мм, а при фотоэлектрическом — порядка единиц микрометра, то есть существует механический предел их чувствительности. Оптические шифраторы приращений интерферометрического типа обладают существенно более высокой разрешающей способностью за счет эффективного увеличения расстояния между чувствительными сегментами.

При простом двоичном кодировании ошибка из-за неопределённости считывания, равная единице младшего разряда кода, может вызвать для ряда чисел перенос единицы в старший разряд, вследствие чего минимальная ошибка трансформируется в максимальную. Для уменьшения указанной погрешности вместо двоичного кода используют код Грея. В коде Грея изменение младшего разряда на 1 вызывает изменение только соседнего старшего разряда.

Независимо от того, какой код используется в шифраторе, измерительная система должна его преобразовывать в простой двоичный цифровой код.

Шифратор приращений индицирует только перемещение при движении от начального состояния, а *абсолютный шифратор* индицирует абсолютное положение. В абсолютных шифраторах углового положения используется электромеханический способ аналого-цифрового преобразования, предполагающий непосредственное преобразование угла поворота вала в соответствующий цифровой выходной сигнал, который может быть использован для обработки и интерпретации информации любым измерительным комплексом.

Абсолютные шифраторы применяются в тех случаях, когда устройство бездействует в течение продолжительных интервалов времени или перемещается с небольшой скоростью. Примерами таких устройств могут

быть задвижки управления подъемом воды, телескопы, грузовые краны и т.п.

В традиционном абсолютном шифраторе маска на диске состоит из ряда концентрических дискретных дорожек с числом периодов на один оборот, удвоенным на каждой следующей дорожке увеличенного радиуса. Каждая дорожка имеет собственные фотодетекторы, и расположены дорожки так, что показания всех детекторов генерируют параллельный двоичный код, обычно *код Грея*, преимущество которого, как отмечалось выше, заключается в изменении только одного разряда при переходе в последовательном счёте от одного числа к другому. Например, шифратор с 12 дорожками будет генерировать 4096 слов за один оборот вала. Оптомеханика и электроника считывания кода такого шифратора являются значительно более сложными и дорогостоящими, чем у шифратора приращений. Тем не менее, он имеет существенное преимущество: предоставление информации тотчас же после запуска, без процедуры возврата в исходное положение.

Абсолютные шифраторы по принципу действия делятся на *однооборотные* и *многооборотные*. У однооборотных шифраторов один оборот вала (360°) делится максимум на 8192 отсчета (13-битовый код измерений). После каждого полного оборота код возвращается к своему начальному значению. Контроллер шифратора не распознает количество сохраненных оборотов.

В дополнение к кодирующему диску, применяемому в однооборотных шифраторах, многооборотные шифраторы имеют встроенный редуктор. Это устройство является подчиненным и закодировано таким образом, что может быть обнаружено до 4096 оборотов (12 бит). Поэтому полная разрешающая способность абсолютного шифратора составляет 25 бит: 13 бит — однооборотная разрешающая способность и 12 бит — количество оборотов. Этот тип шифраторов, характеризующийся большим значением допустимого числа измерений (33 554 432), может быть использован для длительных по времени применений, требующих для управления более одного оборота приводного устройства (например, зубчатая рейка и шестерня, подающий винт, шкив или конвейер с ременным приводом).

Рекомендуемая литература

1. Справочник по средствам автоматики / Б.И. Филиппович, А.П. Шорыгин, В.А. Царьков и др.; Под ред. В.Э. Низэ и И.В. Антика. – М.: Энергоатомиздат, 1983. С. 68, 76-78.
2. Промышленные приборы и средства автоматизации: Справочник / В.Я. Баранов, Т.Х. Безновская, В.А. Бек и др. / Под общ. ред. В.В. Черенкова. – Л.: Машиностроение, 1987. С. 330-355, 478-480.
3. Болтон У. Карманный справочник инженера-метролога / Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2002. С.192-205.
4. Мозоляк Е. Индуктивные датчики положения фирмы Peperl+Fuchs // Современные технологии автоматизации. – 2004. – № 4. – С.6-20.
5. Жданкин В.К. Поворотные шифраторы: основные типы и некоторые особенности применения // Современные технологии автоматизации. – 2001. – № 2. – С.68-79.

6. Тун А.Я. Системы контроля скорости электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 168 с.
7. Эм Г.А. Элементы систем автоматики: Учеб. пособие. – Караганда, КарГТУ, 2007. С.97-105.

Контрольные задания для СРС [1-7]

1. Проанализировать конструкции современных тахогенераторов и их технические характеристики
2. Проанализировать конструкции и технические характеристики шифраторов приращений и абсолютных шифраторов

Тема 6 Исполнительные устройства промышленных систем автоматики

План лекции

1. Общие сведения
2. ИУ электрические, пневматические и гидравлические
3. Основные характеристики ЭИУ с электродвигателями
4. Позиционные ЭИУ

1. *Исполнительные механизмы и устройства* (ИМ, ИУ) промышленных систем автоматики входят в четвертую функциональную группу изделий ГСП в соответствии с ГОСТ 12997-84 — группу устройств использования командной информации в целях воздействия на процесс и для связи с оператором (сюда же входят рассматриваемые в следующей главе устройства сбора, регистрации, передачи и отображения информации). Термины «исполнительное устройство» и «исполнительный механизм» иногда употребляются как синонимы. В дальнейшем будем преимущественно использовать термин «исполнительное устройство», понимая под этим силовое устройство, назначение которого состоит в изменении регулирующего воздействия на объект управления в соответствии с сигналом (командной информацией), подаваемым на его вход от командного устройства (регулятора, ручного дистанционного задатчика, УВМ).

К основным блокам ИУ относятся исполнительные механизмы (ИМ) и регулирующие органы (РО), которые конструктивно могут быть объединены в едином изделии или собираются из индивидуально выпускаемых блоков. В некоторых случаях ИУ может состоять из одного блока, выполняющего функции исполнительного механизма. Под *исполнительным механизмом* в общем случае подразумевают блок ИУ, преобразующий входной управляющий сигнал от регулирующего устройства в сигнал, который через соответствующую связь осуществляет воздействие на регулирующий орган или непосредствен но на объект регулирования. *Регулирующим органом* называют блок ИУ, с помощью которого производится регулирующее воздействие на объект регулирования.

Одной из основных характеристик ИУ является *величина перестановочного усилия (момента)*, передаваемого выходным органом исполнительного механизма на регулирующий орган. Эта величина обычно

указывается в паспорте и является основной при энергетическом расчете и выборе ИУ.

2. По виду энергии, создающей перестановочное усилие, ИМ подразделяются на *пневматические, гидравлические и электрические*. Существуют ИМ, в которых используются одновременно два вида энергии: *электронпневматические, электрогидравлические и пневмогидравлические*. Наиболее распространенными из них являются *электрогидравлические ИМ*.

В *пневматических ИМ* перестановочное усилие создается за счет действия давления сжатого воздуха на мембрану, поршень или сильфон. В соответствии с этим пневматические подразделяются на мембранные, поршневые и сильфонные. Давление сжатого воздуха в пневматических ИУ обычно не превышает 103 кПа.

В *гидравлических ИМ* перестановочное усилие создается за счет действия давления жидкости на мембрану, поршень или лопасть. В соответствии с этим различают мембранные, поршневые и лопастные гидравлические ИМ. Давление жидкости в них обычно находится в пределах $(2,5-20) 10^3$ кПа. Отдельный подкласс гидравлических ИУ составляют ИУ с гидромуфтами. Пневматические и гидравлические мембранные и поршневые ИМ подразделяются на пружинные и беспружинные. В пружинных ИМ перестановочное усилие в одном направлении создается давлением в рабочей полости ИМ, а в обратном направлении — силой упругости сжатой пружины. В беспружинных ИМ перестановочное усилие в обоих направлениях создается перепадом давления на рабочем органе механизма.

Электрические ИМ по принципу действия подразделяются на электродвигательные и электромагнитные; по характеру движения выходного элемента — на прямоходные с поступательным движением выходного элемента, поворотные с вращательным движением до 360° (однооборотные) и с вращательным движением на угол более 360° (многооборотные).

Как было отмечено ранее, вторым основным блоком исполнительного устройства является регулирующий орган (РО). Различные РО по виду воздействия на объект подразделяются на два основных типа: *дросселирующие* и *дозировующие*. В табл.1 приведена классификация регулирующих органов.

Дросселирующие регулирующие органы изменяют гидравлическое сопротивление в системе, воздействующее на расход вещества путем изменения своего проходного сечения. В дозирующих регулирующих органах осуществляется заданное дозирование поступающего вещества или энергии или изменение расхода вещества путем изменения производительности агрегатов. В настоящее время широкое распространение в АСУ ТП получили дросселирующие РО, хотя применение дозирующих РО экономически более оправдано.

К *вспомогательным блокам* исполнительных устройств относят блоки, расширяющие область применения ИУ и обеспечивающие выполнение ряда дополнительных функций. К вспомогательным блокам относятся блок

ручного управления для механического (ручного) управления регулирующим органом, блок сигнализации конечных положений для выдачи информации о положении выходного элемента исполнительного механизма или затвора регулирующего органа, фиксаторы положения для фиксации положения выходного элемента исполнительного механизма или затвора регулирующего органа, блок дистанционного управления, блок обратной связи для улучшения статических и динамических характеристик ИУ или всей замкнутой системы регулирования.

Таблица 1

I. Дросселирующие	II. Дозирующие
1. Для стандартных исполнительных устройств:	2. Механические:
<i>заслоночные односедельные трехходовые двухседельные диафрагмовые шланговые</i>	<i>плужковые сбрасыватели дозаторы насосы питатели компрессоры</i>
2. Для специальных исполнительных устройств:	2. Электрические:
<i>здвижные крановые клапаны с поворотными створками шиберные направляющие аппараты специальные</i>	<i>реостатные автотрансформаторы специальные</i>

Электрические исполнительные устройства (ЭИУ) находят преимущественное распространение в системах автоматизации, использующих изделия электрической ветви средств автоматизации. При необходимости пневматические и гидравлические ИУ дополняются электропнеumo- либо электрогидропреобразователями.

ЭИУ разделяются на четыре группы:

- ЭИУ позиционного действия;
- ЭИУ постоянной скорости;
- ЭИУ переменной скорости;
- усилители мощности.

Исполнительные механизмы ЭИУ позиционного типа, постоянной или переменной скорости состоят из электродвигателя и редуктора. Такой ИМ по своим динамическим свойствам соответствует интегрирующему звену, если в качестве выходной переменной в ИУ принят угол поворота (перемещение). Вследствие этого силовая часть может формировать интегральную составляющую таких законов регулирования, как ПИ и ПИД в структуре регулятора (собственно регулятор при этом формирует П- и ПД-составляющие). Наибольшее распространение получило именно такое использование ИМ.

Другой способ использования ИМ с электродвигателями состоит в охвате двигателя жесткой обратной связью, и в этом случае ЭИУ является пропорциональным звеном (точнее, малоинерционным), положение

выходного органа которого пропорционально входному сигналу. ИМ с корректирующими обратными связями используют в ЭИУ переменной скорости.

3. Качество работы ЭИУ с электродвигателями характеризуют такими показателями, как номинальный момент, время полного хода, выбег, люфт, гистерезис, импульсные характеристики, режим работы.

Номинальный момент ИМ должен поддерживаться при всех допустимых условиях эксплуатации, при понижении напряжения питания до $0,85U_{с.ном}$.

Пусковой момент при номинальном напряжении питания должен не менее чем в 1,7 раза превышать номинальный.

Время полного хода $T_{им}$ выбирают исходя из допустимого времени $T_{ро}$ перестановки затвора РО от начала до конца. Это время равно $T_{им} = \beta^{-1} T_{ро}$, где β – отношение диапазона рабочего перемещения выходного органа к величине полного хода.

Выбег есть перемещение выходного органа ИМ после выключения механизма, работающего в установившемся режиме. Выбег желательно иметь таким, чтобы после выключения двигателя изменение сигнала обратной связи по регулируемому параметру было в пределах установленной зоны нечувствительности регулятора. Согласно требованиям ГОСТ 7192–80Е, величина выбега не должна превышать 1% для ЭИУ с временем полного хода 10 с, 0,5% для механизмов с временем 25 с и 0,25% для механизмов с временем 63 с и более.

Люфт и *гистерезис* характеризуют нелинейности статической характеристики ЭИУ. Люфт образуется свободным ходом выходного органа при неподвижном вале электродвигателя из-за зазора в зацеплении кинематических узлов редуктора, износа контактирующих поверхностей. Согласно ГОСТ 7192–80Е, люфт выходного органа не должен превышать 1° для однооборотных ЭИУ с номинальной нагрузкой 40 Н·м и менее; $0,75^\circ$ для однооборотных ЭИУ нагрузкой более 40 Н·м; 3° для многооборотных ЭИУ; 0,2 мм для прямоходных ЭИУ с нагрузкой до 1000 Н и 0,5 мм при нагрузке свыше 1000 Н. Гистерезис между положением выходного органа и сигналом датчика положения складывается из люфта механической передачи и вариаций показания датчика. По стандарту гистерезис не должен быть более 1,5% от полной шкалы показаний датчика при нелинейности статической характеристики менее 2,5%.

Импульсная характеристика ЭИУ определяется как средняя относительная скорость S перемещения выходного органа. Для ЭИУ постоянной скорости с импульсным сигналом управления рассматривается отношение величины перемещения выходного органа к длительности импульса, вызвавшего перемещение. Если это перемещение брать в долях от полного хода, а длительность – в долях времени полного хода, то соответственно их отношение даст значение S . Значение $S = f(\Delta t)$, где Δt – относительная длительность импульса управления, и образует импульсную характеристику. Для идеального ЭИУ постоянной скорости $S = 1$. Реальное

значение S для отечественных ЭИУ постоянной скорости лежит в диапазоне от 0,5 до 1,5.

Режим работы ИУ – повторно-кратковременный реверсивный, с частотой до 320 включений в час и продолжительностью до 25% при нагрузке на выходном органе в пределах от номинальной противодействующей до 0,5 номинального значения сопутствующей. К ЭИУ предъявляются требования к повышенной частоте включений: в течение часа 600 и более с интервалом времени между выключением и включением на обратный ход не менее 50 мс.

4. *Позиционные электрические исполнительные устройства* предназначены для установки РО в определенные фиксированные положения. Чаще всего таких положений бывает два – «Открыто» и «Закрыто», хотя возможно построение и многопозиционных ЭИУ (например, с помощью шаговых двигателей). Примером ЭИУ позиционного действия является исполнительный механизм типа ИМТМ-4/2,5, предназначенный для быстрого перемещения РО в системах позиционного регулирования и дистанционного управления. Номинальный момент на валу ИМ составляет около 40 Н·м, время одного полного оборота выходного вала – 2,5 с.

ИМ состоит из трехфазного асинхронного двигателя типа АОЛ21-4 мощностью 270 Вт с присоединенным к нему червячным понижающим редуктором и концевыми выключателями. Для устранения вращения после отключения от сети питания ИМ имеет фрикционный тормоз, поэтому «выбег» выходного вала не превышает 3°.

К числу позиционных ИУ относятся исполнительные механизмы ДР–М, ДР–1М, предназначенные для управления РО с малыми перестановочными усилиями. ИМ типов ДР используются в двухпозиционных системах регулирования для работы по принципу «открыть— закрыть». Устройство этих ИМ подобно устройству ИМТМ–4/2,5: однофазный конденсаторный электродвигатель с зубчатым понижающим редуктором и предельный концевой выключатель, заключенные в общий пыленепроницаемый корпус. ДР–М имеет два выходных устройства: диск, вращающийся на 180° поворотный РО, и шток с ходом 19 мм, воздействующий на поступательный РО. ИМ типа ДР–1М имеет только поворотный диск.

5. *ЭИУ постоянной скорости.* Исполнительные устройства постоянной скорости являются силовыми устройствами пропорционального действия: РО с помощью таких ЭИУ устанавливаются в любое промежуточное положение в зависимости от величины и длительности управляющего сигнала с выхода регулятора.

В практике автоматизации традиционно наибольшей известностью пользуются ЭИУ постоянной скорости, управляемые от импульсных регуляторов последовательностью импульсов различной длительности (информативный признак). Частота вращения выходного органа ИМ постоянна и не зависит от величины (амплитуды) управляющего сигнала, вследствие этого в системах регулирования с ЭИУ постоянной скорости реализуется широтно-импульсная модуляция сигналов управления.

Минимальная длительность импульсов для отечественных ЭИУ составляет 0,1 с. Между командами на перемещение (это время составляет более 90% срока службы) выходной вал ЭИУ сохраняет свое положение при наличии активной механической нагрузки в условиях вибрации. Для этого ЭИУ снабжаются автоматическим устройством торможения. К ЭИУ предъявляются повышенные требования по надежности, так как ни дублирование, ни «горячее» резервирование в этой части замкнутой системы невозможны.

Советские (российские) ЭИУ постоянной скорости типов МЭО, ИМТ, МЭМ, МЭП являются основными в системах промышленной автоматики (энергетика, металлургия). В зависимости от характера изменения выходного органа различают одно- и многооборотные (МЭО, ИМТ и МЭМ соответственно) и прямоходные (МЭП).

В ЭИУ постоянной скорости ранних выпусков применялись асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором типа АОЛ и редукторы на основе червячной передачи (ЭИУ типов МЭОБ, МЭОК, ИМТ). Это упрощало конструкцию редуктора, и автоматически решался вопрос самоторможения.

Дальнейшее повышение качественных показателей, надежности и долговечности ЭИУ при работе «на упор» и большой частоте включений (до 300–600 включений в час) потребовало разработки специальных двигателей типа ДАУ. Для уменьшения разброса значения средней относительной скорости при отработке импульсов управления малой длительности потребовались эффективные тормозные устройства. Стремление к повышению ресурса ЭИУ при работе «на упор» потребовало применения редукторов с цилиндрическими передачами, отличающимися большим КПД. Все эти качества нашли воплощение в ЭИУ типа ВЭО.

Выпуск в начале 80-х годов в СССР серии асинхронных электродвигателей типа 4А (а затем новой серии типа 5А) с улучшенными технико-экономическими показателями по сравнению с двигателями типа АОЛ, разработка тиристорных устройств бесконтактного управления и блокировки двигателя по потребляемому току составили основу для современного параметрического ряда ЭИУ постоянного тока типа МЭО.

Перспективное направление в развитии ЭИУ постоянного тока состоит в применении низкооборотных электродвигателей с электромагнитной редукцией частоты вращения. Особенностью этих двигателей является возможность весьма высокой частоты включений – до 1200 включений в час.

На базе электродвигателей с электромагнитной редукцией в СССР осуществлялось серийное производство прямоходных ЭИУ типа МЭП. Такие ЭИУ значительно упрощают сочленение с арматурой, исключают люфт. Основная кинематическая цепь механизмов состоит из низкооборотного электродвигателя типа ДСРТ, механического тормоза автоматического действия, трехступенчатого редуктора на основе цилиндрической передачи и прямоходной приставки на основе шариковинтового преобразователя движения. Быстрый пуск и малый выбег двигателя ДСРТ позволяют обходиться в МЭП без тормозных устройств.

ЭИУ постоянной скорости кроме ИМ содержат устройства, выполняющие дополнительные функции. Для изменения положения выходного органа ИМ предусматривается устройство ручного управления. Для дистанционной передачи информации о текущем значении положения РО оператору или для введения в автоматическую систему устанавливаются датчики положения (один или два) выходного органа ЭИУ. Для выдачи информации о положении выходного органа в виде дискретного сигнала предусматриваются путевые и концевые выключатели.

Важным элементом ЭИУ является блок усиления (управления) ИМ. Реализация этих блоков может быть выполнена на контактной аппаратуре (электромагнитных реле и магнитных пускателях), а также на бесконтактных устройствах – магнитных усилителях, бесконтактных реверсивных пускателях на полупроводниковых тиристорах и симисторах.

В настоящее время с контактным управлением выпускается еще большая часть ЭИУ постоянного тока. Причинами этого являются простота исполнения, низкая стоимость и доступность в приборостроении контактной аппаратуры. Входным сигналом контактных пускателей служит напряжение постоянного тока 24 В, 400 мА. Выпускаются реверсивные магнитные пускатели ПМЕ, ПМА и др.

Высокоэффективные бесконтактные ЭИУ создаются на основе полупроводниковых тиристоров и симисторов. Эти блоки по размерам, массе и стоимости приближаются к аналогичным устройствам контактного исполнения, но имеют практически неограниченный ресурс по числу включений и не требуют обслуживания в течение всего срока службы. Источником управляющих импульсов в бесконтактных коммутирующих устройствах ЭИУ являются блокинг-генераторы, возбуждаемые сигналами с выхода регулятора или разностью между ними и сигналами с блоков обратных связей ЭИУ.

6. ЭИУ переменной скорости. В основу бесконтактных ЭИМ переменной скорости положен способ регулирования скорости асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при постоянной частоте путем изменения значения или симметрии напряжения, подводимого к обмоткам двигателя. Напряжение в бесконтактных ИМ переменной скорости изменяется с помощью дросселей насыщения или магнитных усилителей. Применение асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором (в частности, асинхронных двигателей с массивным ферромагнитным ротором) обусловлено их мягкими механическими характеристиками, что дает возможность плавно регулировать частоту вращения в широких пределах путем изменения подводимого к обмотке статора напряжения. Для расширения зоны пропорциональности между величиной управляющего сигнала и скоростью и для повышения устойчивости работы ИМ при малых скоростях вращения ротора в ИМ переменной скорости вводится стабилизирующая отрицательная обратная связь по скорости (ОСС) вращения. Кроме ОСС в ИМ переменной скорости используют устройства ОС по положению выходного вала редуктора, что позволяет использовать ИМ переменной

скорости в системах пропорционального регулирования.

Из серийно выпускавшихся в СССР бесконтактных ЭИУ переменной скорости следует упомянуть исполнительные механизмы типа ИМ-Б, БИМ, МЭК-Б, МЭК-25Б, предназначенные для перемещения однооборотных РО. Для реализации надежных и мощных ЭИУ переменной скорости необходим достаточно сложный блок усиления большой мощности (блок управления) на силовых полупроводниковых элементах. По этой и другим причинам ЭИУ переменной скорости пока не нашли столь широкого распространения в системах промышленной автоматики нежели ЭИУ постоянной скорости.

Рекомендуемая литература

1. Шишмарев В.Ю. Автоматика: Учеб.пособие. – М.: Изд. центр «Академия», 2005. С.114-126.
2. Шишмарев В.Ю. Типовые элементы систем автоматического управления: Учеб.пособие. – М.: Изд. центр «Академия», 2004. С.215-236.
3. Промышленные приборы и средства автоматизации / В.Я.Баранов, Т.Х.Безновская, В.А.Бек и др./ Под ред. В.В.Черенкова. – Л.: Машиностроение, 1987. С.716-726, 753-765, 784-788.
4. Родионов В.Д., Терехов В.А., Яковлев В.Б. Технические средства АСУ ТП / Под ред. В.Б.Яковлева. – М.: ВШ, 1989. С.218-226.

Контрольные задания для СРС [1, 2]

1. Принцип действия, основные характеристики, конструкция, область применения электрических, пневматических и гидравлических исполнительных механизмов

Тема 7 Основы телемеханики

План лекции

1. Основные понятия и определения. Классификация систем телемеханики. Функциональная структура телемеханической системы
2. Признаки сигналов
3. Методы селекции (избирания)
4. Интерфейсы

1. *Телемеханикой* называют область науки и техники, охватывающую теорию и средства автоматической передачи на большие расстояния команд управления и информации о состоянии объектов контроля и управления.

Комплекс технических средств, обеспечивающих передачу на расстояние по каналам связи значительного числа команд от оператора или УВМ (контроллера) к объектам управления и контрольной информации в обратном направлении, называется *системой телемеханики*.

В зависимости от выполняемых функций системы телемеханики принято различать: *телесигнализации* (ТС), *телеизмерения* (ТИ), *телеуправления* (ТУ) и *телерегулирования* (ТР). Современные системы телемеханики, как правило, комбинированные, совмещающие свойства систем ТУ-ТС-ТИ.

Структура телемеханической системы включает в себя: диспетчерский пункт – телемеханическое устройство – линии связи – телемеханическое устройство – исполнительный пункт.

В общем случае линии связи можно разделить на проводные и беспроводные. В свою очередь проводные линии связи делятся на: *воздушные, кабельные и волоконно-оптические*. Последние являются в настоящее время наиболее перспективными среди проводных линий связи.

К беспроводным линиям относятся *радиорелейные, спутниковые и лазерные*. Для лазерной связи необходим комплект, состоящий из пары приемопередатчиков. Передатчик – полупроводниковый лазер преобразует электрические сигналы в модулированное оптическое излучение мощностью не более 40...50 мВт в инфракрасном диапазоне (0,82 мкм). Испускаемый передатчиком лазерный луч достигает (дальность связи – порядка 1200 м) приемника, представляющего собой инфракрасный фотодиод. Приемник производит обратное преобразование, и на выходе получается исходный электрический сигнал.

В качестве линии связи в подземных условиях используют жилы контрольных, телефонных и силовых кабелей, а в ряде случаев – трубопроводы, подъемные канаты, контактный провод и рельсовый путь.

Для сокращения затрат часто прибегают к многократному использованию выделенных или занятых линий связи одним из следующих способов:

- создание искусственных цепей;*
- частотное разделения (уплотнение);*
- временное разделения (уплотнение).*

Метод частотного разделения или уплотнения каналов заключается в переносе сигнала каждого канала при помощи индивидуальной несущей частоты. При этом каналы располагаются в неперекрывающихся полосах частот. Общее количество каналов, объединяемых таким образом, может составлять сотни и тысячи, при суммарном спектре в единицы и десятки МГц.

При временном разделении каналов информация каждого канала передается дискретными отсчетами поочередно. Данный способ уплотнения характерен для цифровых (импульсных) систем.

2. *Носителями информации* в системах телемеханики являются сигналы, как правило, импульсы тока с различными качественными признаками. К таким признакам относят: полярность и амплитуду сигналов, длительность посылок и интервалов между ними, частоту и фазу посылок.

Полярность импульса определяется направлением тока в цепи и обеспечивает два качественных признака (рис. 1, а).

Импульсы посылок различной амплитуды (рис. 1, б) можно получить изменением напряжения источника питания.

Длительность посылок импульсов (рис. 1, в) характеризуется изменением продолжительности очередного сигнала.

Создание *частотных признаков* (рис. 1, г) посылок на передающей стороне осуществляется генераторами, а расшифровка на приемной стороне

– приемниками, настроенными на соответствующие частоты генераторов.

Фаза посылки (рис. 1, д) определяется по отношению к какому-либо периодическому опорному процессу, в качестве которого обычно принимается сигнал синусоидальной формы.

Преобразование любого сообщения в электрический сигнал одного из указанных признаков производится *кодированием*.

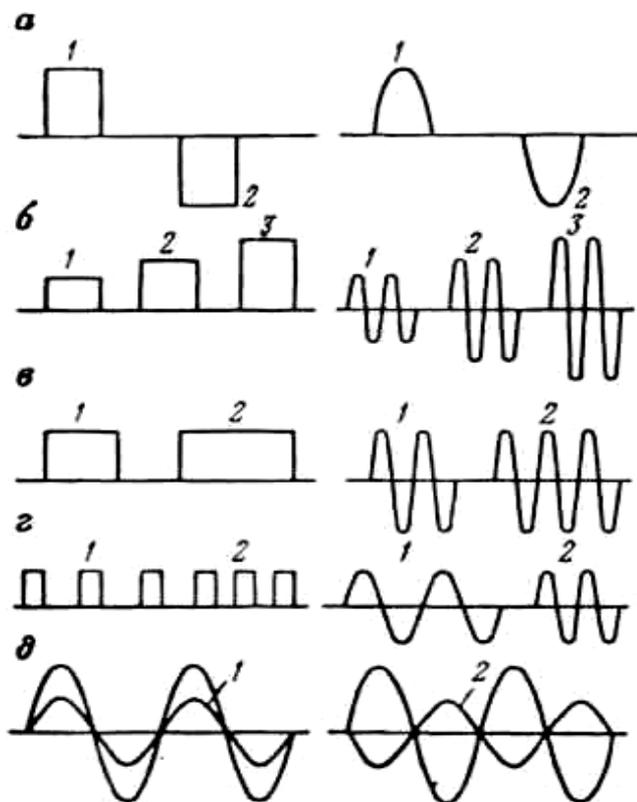


Рисунок 1 – Качественные признаки импульсов сигналов

3. Процесс преобразования сигналов в телемеханических устройствах в вид, удобный для следования их по линии связи, и повторного преобразования на исполнительном пункте для дальнейшего использования называют *избиранием* или *селекцией*.

Распространение получили *качественный, комбинационный, распределительный* и *кодовый* методы избирания.

Качественный метод характеризуется посылкой сигналов разных качественных признаков, причем каждый импульс может быть послан по отдельной линии связи или все импульсы посылаются по одной линии связи.

Комбинационный метод обеспечивается тем, что в качестве одного сигнала передается комбинация разных качеств импульсов, проходящих по отдельным линиям связи.

Распределительный метод позволяет передавать по двухпроводной линии связи сигналы в виде поочередно следующих импульсов с заданными признаками полярности.

Кодовый метод является разновидностью распределительного метода, когда передача сигнала осуществляется комбинацией нескольких импульсов

– кодом с заданными качественными признаками.

4. Для унифицированных систем сопряжения между устройствами, участвующими в обмене информации, стал общепринятым термин *интерфейс*. Под *интерфейсом* (или *сопряжением*) понимают совокупность схмотехнических средств, обеспечивающих непосредственное взаимодействие составных элементов телемеханической системы. Устройства подсоединяются к системе сопряжения и объединяются по определенным правилам, относящимся к физической реализации сопряжения. Конструктивное исполнение этих устройств, характеристики вырабатываемых и принимаемых блоками сигналов и последовательности выдаваемых сигналов во времени позволяют упорядочить обмен информацией между отдельными функциональными блоками.

Под *интерфейсной системой* понимают совокупность логических устройств, объединенных унифицированным набором связей и предназначенных для обеспечения информационной, электрической и конструктивной совместимости. Интерфейсная система также реализует алгоритмы взаимодействия функциональных модулей в соответствии с установленными нормами и правилами.

Интерфейс может быть общим для устройств разных типов, наиболее распространенные интерфейсы определены международными, государственными и отраслевыми стандартами. Стандарт (ГОСТ 26016—81) включает четыре признака классификации:

способ соединения комплектов системы (магистральный, радиальный, цепочечный, комбинированный);

способ передачи информации (параллельный, последовательный, параллельно-последовательный);

принцип обмена информацией (асинхронный, синхронный);

режим передачи информации (двусторонняя одновременная передача, двусторонняя поочередная передача, односторонняя передача).

Соединение отдельных приборов и блоков между собой осуществляется линиями связи или *линиями интерфейса*. Линии интерфейса могут объединяться в группы для выполнения одной из операций в программно-управляемом процессе передачи данных. Эти группы линий называются *шинами интерфейса*. Назначение отдельных линий и шин, их номенклатура и взаимное расположение в системе (топологии) являются базовыми при рассмотрении функционирования любого интерфейса.

В *цепочечной структуре* (рис. 2, а) каждая пара источник-приемник соединена попарно линиями от выходов предыдущих функциональных блоков ко входам последующих, обмен данными происходит непосредственно между блоками или приборами. Функции управления распределены между этими устройствами. Цепочечную структуру интерфейсов используют, как правило, в несложных системах с несколькими функциональными устройствами.

В системе, выполненной по *радиальной структуре* (рис. 2, б), имеется центральное устройство – *контроллер*, с которым каждая пара источник-

приемник связана с помощью индивидуальной группы шин. Блоки и приборы, подключаемые к контроллеру, могут изменять свои места при соответствующем изменении программы работы контроллера. Под управлением контроллера происходит обмен данными между каждым устройством и контроллером. Связи между управляющим устройством и одним из устройств-источников или приемников сигналов могут осуществляться как по инициативе контроллера, так и по инициативе устройств-абонентов. В последнем случае одно из устройств вырабатывает сигнал запроса на обслуживание, а контроллер идентифицирует запрашиваемое устройство. Когда контроллер готов к обмену данными, логически подключаются цепи связи и начинается процесс обмена. Эти цепи остаются подключенными, пока не будет передана нужная порция информации.

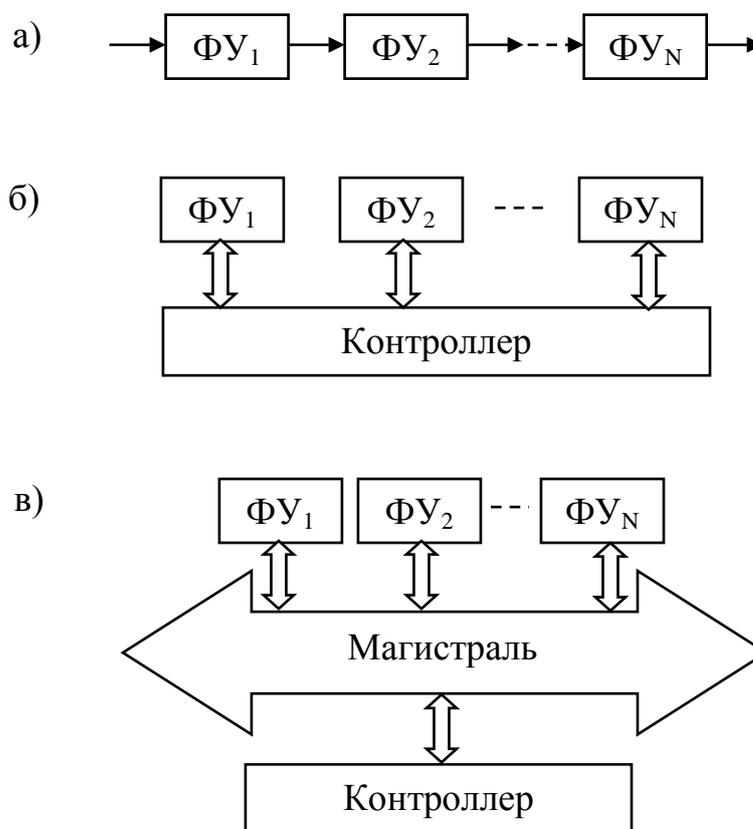


Рисунок 2

Контроллер может производить обмен данными только с одним из устройств. В случае одновременного поступления запросов от двух и более абонентов по системе приоритетов будет установлена связь с устройством, имеющим наивысший приоритет. Приоритет присваивается приборам и блокам в зависимости от их типа, технических характеристик и важности поступающей информации. В интерфейсах с радиальной структурой чаще всего приоритет зависит от места подключения кабеля, соединяющего абонента с контроллером.

Радиальное соединение функциональных блоков позволяет достаточно просто и быстро осуществлять адресацию и идентификацию требуемого функционального блока.

К недостаткам радиальной структуры можно отнести большую длину соединительных линий, а также сложность контроллера, что приводит к увеличению стоимости всей системы.

В системах с *магистральной структурой* (рис. 2, в) вместо группы индивидуальных шин имеются *коллективные шины*, к которым подсоединяются все источники и приемники информации и контроллер.

К *основным характеристикам* интерфейса относятся следующие: функциональное назначение; структура или тип организации связей; принцип обмена информацией; способ обмена данными; режим обмена данными; номенклатура шин и сигналов; количество линий; количество линий для передачи данных; количество адресов; количество команд; быстродействие; длина линий связи; число подключаемых устройств; тип линии связи.

По принципу обмена информацией интерфейсы подразделяют на *параллельные, последовательные и параллельно-последовательные*.

При параллельной передаче цифровых данных численное значение величины, содержащее k -битов, транслируют по k -информационным линиям. Это сообщение одновременно может быть введено в интерфейс, а также воспринято приемником. Интерфейсные устройства параллельного ввода-вывода информации позволяют согласовать во времени процесс обмена данными между ЭВМ и периферийным устройством.

Для связи датчиков информации, исполнительных элементов, территориально удаленных от процессора на десятки и сотни метров, в телемеханике применяют *интерфейсы периферийных устройств*. В таких интерфейсах используются как параллельный, так и *последовательный* способы обмена информацией. При этом последний по причине существенного упрощения собственно линии связи, а следовательно, и снижения стоимости, наиболее предпочтителен, если при этом обеспечивается необходимая скорость передачи информации.

В последнее время в связи с развитием микро- и мультипроцессорных систем связи, отдельные микропроцессоры или устройства ввода-вывода которых могут отстоять друг от друга территориально на сотни метров (например, заводская или цеховая система телемеханики), все более широко применяются *системные интерфейсы* или *интерфейсы локальных сетей*. Системный интерфейс, как правило, имеет многоуровневую архитектуру (совокупность) аппаратных и программных средств.

Широкое распространение получил *цифровой протокол HART*. Этот открытый стандартный гибридный протокол двунаправленной связи предусматривает передачу цифровой информации поверх стандартного аналогового сигнала 4...20 мА.

Бурно развивается системная интеграция первичных преобразователей с использованием различных разновидностей промышленных сетей *Foundation Fieldbus, ModBus, Profibus* и др. При этом используется полностью цифровой коммуникационный протокол для передачи информации в обоих направлениях между датчиками и системами управления, существенно облегчая

взаимозаменяемость приборов разных мировых производителей.

В отечественных и зарубежных микропроцессорных измерительно-управляющих вычислительных системах распространены асинхронные мультиплексные интерфейсы с *параллельным* способом передачи информации *8-разрядные интерфейсы Microbus, 16-разрядные интерфейсы общая шина (Unibus, Microbus)*.

В последние годы при реализации информационно-измерительных сетей преобладают цифровые интерфейсы *последовательной передачи* данных *RS-232C* и *RS-485*, а также интерфейс *параллельной* передачи *IEEE-488*. До сих пор используются выходящие из применения *ДДПК* (двоично-десятичный параллельный код) и *ИРПС* (интерфейс радиальный последовательный), разработанные в 1980-е годы.

Для последовательной передачи цифровых данных существует три формы связи:

А) *симплексная связь* предполагает наличие одного передатчика и одного приемника; информация передается в одном направлении, связь осуществляется через отдельную пару проводов;

Б) *полудуплексная связь* допускает двунаправленную передачу данных, но не одновременно; связь осуществляется по кабелю, состоящему из двух или четырех проводов;

В) *дуплексная связь* обеспечивает одновременную двунаправленную передачу данных, а связь осуществляется также по кабелю, состоящему из двух или четырех проводов.

Для каждой из указанных выше форм связи необходимо, чтобы приемное устройство было готово принять и идентифицировать каждый набор данных, переданный передатчиком. Существуют два способа решения этой задачи. При *асинхронной передаче* каждому пакету данных предшествует *старт-бит*, а по окончании передачи этого пакета данных следует *стоп-бит*. Таким образом, приемник четко определяет начало и конец сообщения. Однако из-за необходимости постоянной проверки старт- и стоп-битов скорость передачи при данном виде связи ограничена и, как правило, не превышает 1200 бит/с.

Асинхронная передача используется в условиях неуверенного приема и высокого уровня помех. *Синхронная передача* не требует старт- и стоп-битов, передатчик и приемник *синхронизированы*. Начало приема-передачи данных предварительно синхронизируется синхроимпульсом, а затем каждое слово пакета данных распознается как блок из семи или восьми бит. Синхронная передача данных может обеспечивать скорость более 1200 бит/с и наиболее часто применяется для передачи таких потоков данных, как программные файлы.

Современные интеллектуальные датчики и элементы управления наряду с традиционным *интерфейсом RS-232C* могут иметь также в своем составе подсистему последовательного ввода-вывода на базе *интерфейса RS-485*. Программируемые логические контроллеры большинства производителей в качестве средств организации территориально-распределенных систем сбора

данных и управления содержат ту или иную реализацию интерфейсов RS-422A/RS-485.

RS-232C – широко распространенный стандартный последовательный интерфейс. Он может быть использован для синхронной передачи данных со скоростью до 20 000 бит/с на расстояние до 15 метров; на более длинные дистанции скорость передачи уменьшается. Интерфейс RS-449 – это более поздний стандарт, он обладает улучшенными по сравнению с RS-232 характеристиками по скорости и расстоянию передачи; здесь достижима скорость до 10 000 бит/с на расстояние до 1 км. Уровни напряжения, соответствующие стандарту RS-232, составляют +12 В для логического “0” и –12 В для логической “1”. Интерфейс RS-232 является в настоящее время стандартным для *com*-портов персональных компьютеров. Поскольку подавляющее большинство микропроцессоров построено на *ТТЛ-структуре* (транзисторно-транзисторная логика), где уровень логического нуля составляет 0 В, а логической единицы +5 В, то, очевидно, что уровни сигналов необходимо преобразовывать для согласования. Последнее достигается использованием интегральных микросхем – преобразователей уровня, таких как *MC1488* для преобразования ТТЛ-уровней в уровни RS-232 и *MC1489* для преобразования уровней RS-232 в ТТЛ-уровни.

Интерфейс RS-485 (*EIA-485*) – один из наиболее распространенных стандартов физического уровня связи (канал связи + способ передачи сигнала).

Сеть, построенная на интерфейсе RS-485, представляет собой приемопередатчики, соединенные при помощи *витой пары* – двух скрученных проводов. В основе интерфейса RS-485 лежит принцип *дифференциальной (балансной) передачи* данных. Суть его заключается в передаче одного сигнала по двум проводам. Причем по одному проводу (условно *A*) идет оригинальный сигнал, а по другому (условно *B*) – его инверсная копия. Другими словами, если на одном проводе логическая “1”, то на другом “0” и наоборот. Таким образом, между двумя проводами витой пары всегда есть разность потенциалов (рис. 3).

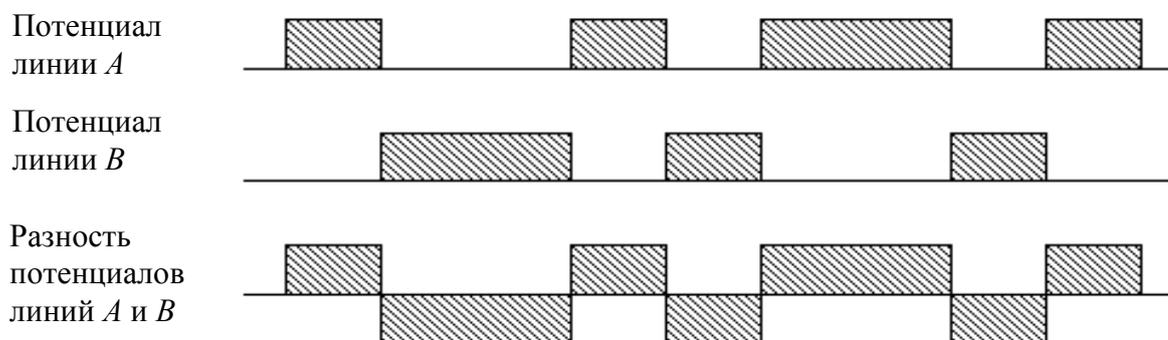


Рисунок 3

Такой способ передачи обеспечивает высокую устойчивость к синфазной помехе, действующей на оба провода линии одинаково. Если сигнал передается потенциалом в одном проводе относительно общего, как в RS-

232, то наводки на этот провод могут исказить сигнал относительно хорошо поглощающего наводки общего («земли»). Кроме того, на сопротивлении длинного общего провода будет падать разность потенциалов общих точек как дополнительный источник искажений. При дифференциальной передаче таких искажений не происходит, поскольку в витой паре наводка на оба провода одинакова. Таким образом, потенциал в одинаково нагруженных проводах изменяется одинаково, при этом информативная разность потенциалов остается без изменений.

Аппаратная реализация интерфейса – микросхемы приемопередатчиков с дифференциальными входами/выходами (к линии) и цифровыми портами (к портам UART-контроллера). Существуют два варианта такого интерфейса: RS-422 и RS-485.

RS-422 – дуплексный интерфейс. Прием и передача обеспечиваются по двум отдельным парам проводов. На каждой паре проводов может быть только по одному передатчику.

RS-485 – полудуплексный магистральный аналог интерфейса RS-422. Прием и передача выполняются по одной паре проводов с разделением во времени. В сети может быть много передатчиков, так как они могут отключаться в режиме приема.

Все устройства подключаются к одной витой паре одинаково: прямые выходы (A) к одному проводу, инверсные (B) - к другому.

Входное сопротивление приемника со стороны линии обычно составляет 12 кОм. Поскольку мощность передатчика не беспределельна, это создает ограничение на количество приемников, подключенных к линии. Согласно стандарта RS-485, с учетом согласующих резисторов, передатчик может вести до 32 приемников. Однако, применяя микросхемы с повышенным входным сопротивлением, можно подключать к линии значительно большее количество устройств (более 100 приборов). При этом приборы подключаются к линии параллельно, а контроллер (компьютер) должен быть снабжен дополнительным устройством – преобразователем последовательного порта RS-485/ RS-232 .

Максимальная скорость связи в RS-485 может достигать 10 Мбит/сек, а максимальная длина линии связи – 1200 м. Если необходимо организовать связь на расстоянии, превышающем 1200 м, или подключить большее число устройств, нежели допускает нагрузочная способность передатчика, то применяют специальные повторители (*репитеры*).

Диапазон напряжений логических “1” и “0” в передатчика RS-485 составляют, соответственно, +1,5...+6 В и –1,5...-6 В, а диапазон синфазного напряжения передатчика – (-1...+3 В).

Значения параметров определены таким образом, что любое устройство, входящее в состав измерительной информационной системы, сохраняет работоспособность при наличии на его клеммах, подключенных к линии связи, помехи общего вида, напряжение которой находится в диапазоне от –7 до +7 В.

Для параллельной передачи данных в измерительных информационных

системах часто используется стандартный интерфейс *IEEE-488* (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), называемый также *HP-IB* (*Hewlett-Packard Interface Bus*) или *GP-IB* (*General Purpose Interface Bus* – интерфейсная шина общего применения). Международная электротехническая комиссия (*МЭК*) рекомендовала данный стандарт в качестве международного, по этой причине на постсоветском пространстве он носит название *цифрового интерфейса МЭК*.

Интерфейс *IEEE-488* был разработан для программируемых и непрограммируемых электронных измерительных приборов и преобразователей. Он рассчитан на асинхронный обмен информацией, ориентирован на сопряжение устройств, располагаемых относительно друг друга на расстоянии до 20 м, и обеспечивает работу в ИИС приборов различной сложности, допускает прямой обмен информацией между ними, дистанционное и местное управление приборами. Описываемый интерфейс имеет магистральную структуру (рис. 4).

Магистраль интерфейса состоит из 24 сигнальных линий, восемь из которых – линии заземления, а остальные линии разбиты на три группы. Первая группа, состоящая из восьми двунаправленных сигнальных линий, является *шиной данных*. Она предназначена для передачи данных и команд между различными приборами, присоединенными к интерфейсу. Другая группа из пяти сигнальных линий – *шина общего управления*, по ней передаются сигналы управления и состояния. Последняя группа из трех линий используется для управления передачей данных (*шина квитирования*).

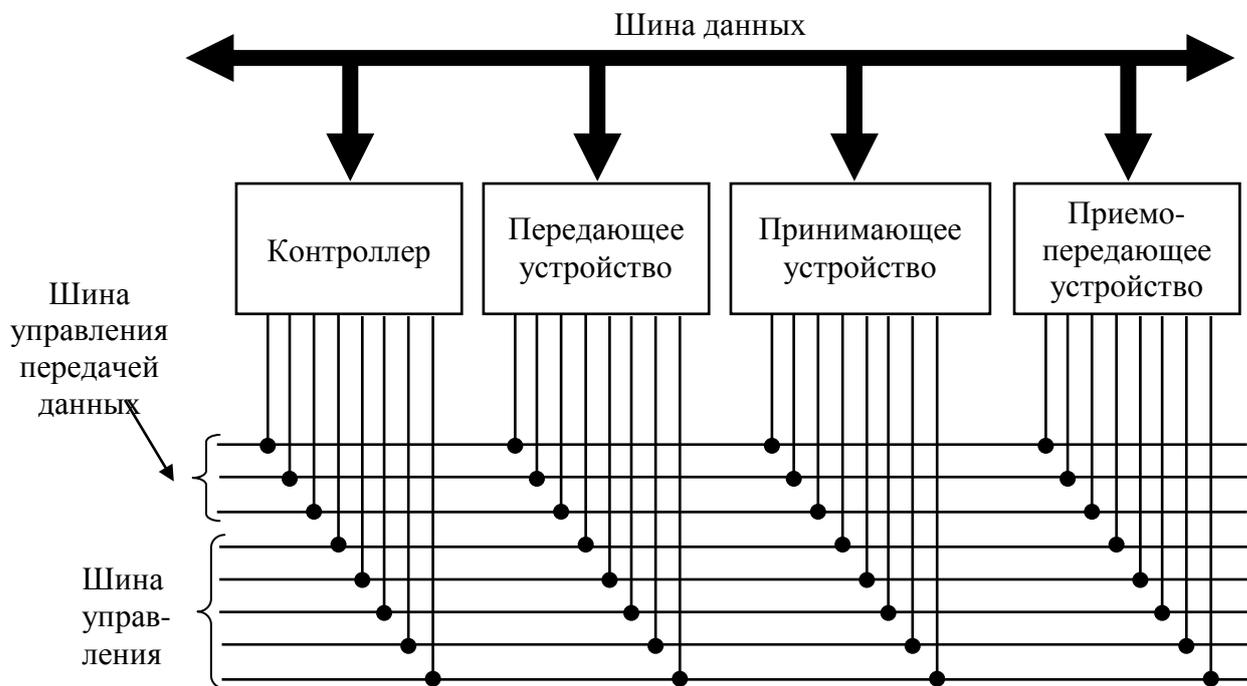


Рисунок 4 – Структура интерфейса *IEEE-488*

Приборы, подсоединенные к интерфейсу, могут работать как приемники либо источники сообщений. В каждый момент времени только одно устройство может быть источником информации, тогда как приемниками

сообщений могут работать одновременно несколько устройств. Одно из устройств на магистрали является *контроллером* интерфейса.

Общее количество приемников и источников информации в IEEE-488 не должно превышать 31 при однобайтовой адресации, а число параллельно подключаемых приборов – 15 (включая контроллер).

В стандарте IEEE-488 высокому уровню сигнала в линии соответствует значение напряжения, равное или больше 2 В, а низкому уровню – значение, равное или меньше 0,8 В.

Рекомендуемая литература

1. Тугевич В.Н. Телемеханика: Учеб. для ВУЗов. – М.: Высшая школа, 1985. С.3-120.

2. Ильин В.А. Телеуправление и телеизмерение: Учеб. для ВУЗов. – М.: Энергоиздат, 1982. – 560 с.

3. Демченко Н.П. Технические средства передачи информации в системах управления угольных шахт. – М.: Недра, 1990. – 206 с.

4. Метрология и радиоизмерения: Учеб. для ВУЗов / В.И. Нефедов, В.И. Хахин, В.К. Битюков и др., Под ред. проф. В.И. Нефедова. – М.: Высш. шк., 2003. С.411-427.

5. Эм Г.А., Потемкина Е.Б. Информационно-измерительная техника: Учеб. пособие. – Караганда, Изд-во КарГТУ, 2006. С.103-118.

Контрольные задания для СРС [1-3]

1. Проанализировать современное состояние и перспективы развития промышленных телемеханических средств

2. Основные методы селекции (избирания), используемые в промышленной телемеханике

Тема 8 АСУ ТП

План лекции

1. Общие сведения. Обобщенная структура АСУ ТП

2. Типовые структуры АСУ ТП

3. Децентрализация и распределенные АСУ ТП

1. В соответствии с ГОСТ 20.003–84 *автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП)* предназначены для выработки и реализации управляющих воздействий на технологический объект управления и представляют собой человеко-машинные системы, обеспечивающие автоматизированный сбор и обработку информации, необходимой для оптимизации управления технологическим объектом в соответствии с принятым критерием.

Технологический объект управления (ТОУ) — это совокупность технологического оборудования и реализованного на нем по соответствующим инструкциям или регламентам технологического процесса производства.

Совместно функционирующие ТОУ и управляющая им АСУ ТП образуют *автоматизированный технологический комплекс (АТК)*.

АСУ ТП являются частным видом систем управления, которые представляют, в свою очередь, особый класс систем, характеризующихся наличием самостоятельных функций и целей управления и необходимой для реализации этого специальной системной организацией.

Обобщенная блок-схема АСУ ТП изображена на рис.1.

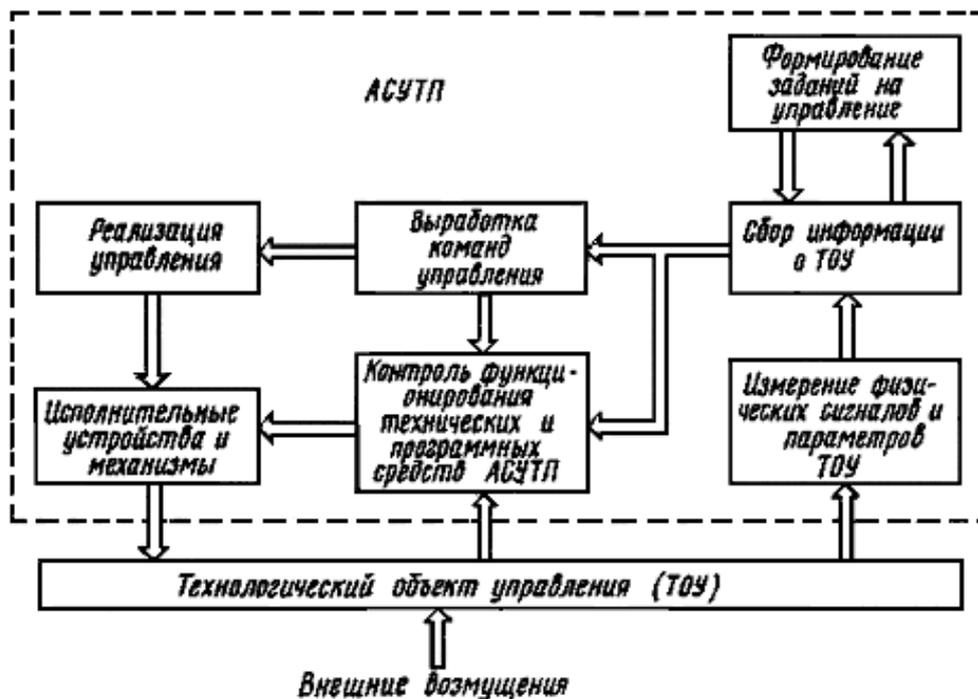


Рисунок 1 – Обобщенная блок-схема АСУ ТП

АСУ ТП как компонент общей системы управления промышленным предприятием предназначена для целенаправленного ведения технологических процессов и обеспечения смежных и вышестоящих систем управления оперативной и достоверной технико-экономической информацией. АСУ ТП, созданные для объектов основного и вспомогательного производства, представляют низовой уровень автоматизированных систем управления производством.

2. Локальные системы контроля, регулирования и управления ЛСКРУ (рис.2) эффективны при автоматизации технологически независимых объектов с компактным расположением основного оборудования и несложными целями управления (стабилизация, программное управление) при хорошо

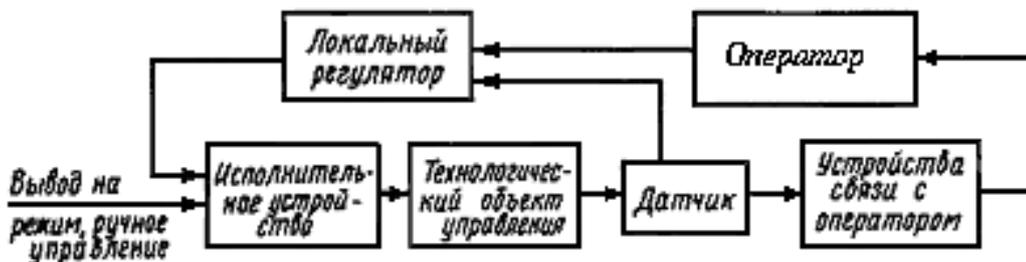


Рисунок 2 – Типовая структура ЛСКРУ

отработанной технологии и стационарных условиях эксплуатации. Локальные регуляторы (ЛР) могут быть аналоговыми, цифровыми, одно- или многоканальными. Наличие человека-оператора в системе позволяет использовать эту структуру на объектах с невысоким уровнем механизации и надежности технологического оборудования, осуществлять общий контроль за выполнением технологического процесса и ручное управление (РУ).

Структура ЛСКРУ соответствует классической структуре систем управления: содержит датчики измеряемых переменных (Д) на выходе ТООУ, автоматические регуляторы, исполнительные устройства (ИУ), передающие команды управления (в том числе, оператор в режиме ручного управления) на регулирующие органы ТООУ. Устройство связи с оператором состоит, как правило, из измерительных, сигнализирующих и регистрирующих приборов.

Обработка информации и формирование оптимальных управлений осуществляются человеком с помощью управляющей вычислительной машины (УВМ). УВМ в этом случае является многоканальным информационно-управляющим устройством в системе автоматизированного управления технологическим процессом.

В зависимости от распределения информационных и управляющих функций между человеком и УВМ, между УВМ и средствами контроля и регулирования возможны различные принципы построения АСУ ТП. Наибольшее распространение в промышленной практике нашли три принципа построения АСУ ТП: централизованные АСУ ТП, АСУ ТП с супервизорным управлением и децентрализованные распределенные АСУ ТП.

Типовая структура централизованной АСУ ТП (рис.3) включает в себя устройство связи с объектом (УСО) и УВМ, осуществляющую централизованное управление одним или несколькими технологическими процессами. Надежность всего комплекса определяется в этом случае надежностью УСО и УВМ, и при выходе их из строя нормальное функционирование технологического оборудования невозможно.

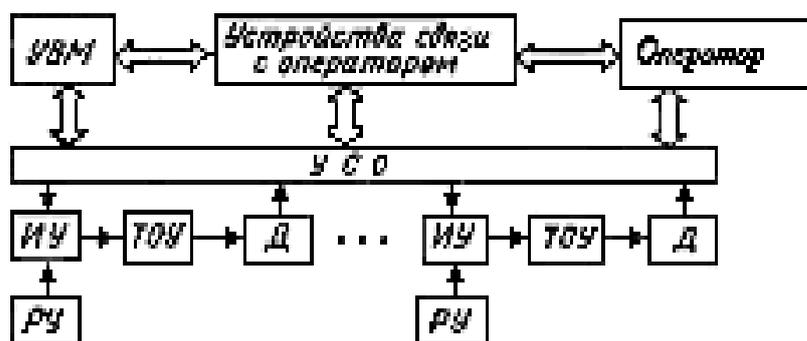


Рисунок 3 – Типовая структура централизованной АСУ ТП

Более широкими возможностями и лучшей надежностью обладают АСУ ТП, в которых непосредственное регулирование объектами ТП осуществляют ЛР, а УВМ выполняет функции «советчика» в так называемом супервизорном режиме.

Типовая структура супервизорной АСУ ТП изображена на рис. 4. По

данным, поступающим от датчиков (Д) локальных подсистем через УСО, УВМ выработывает значение уставок в виде сигналов, поступающих непосредственно на входы систем автоматического регулирования.

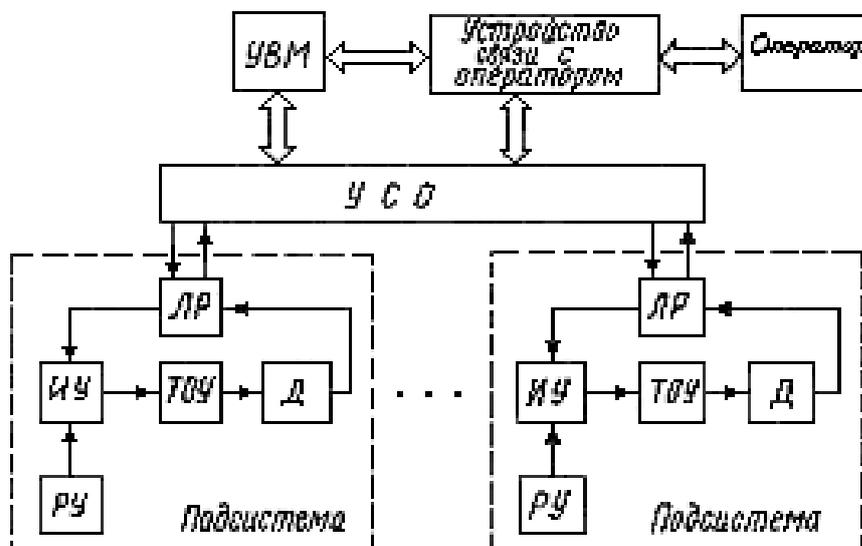


Рисунок 4 – Типовая структура АСУ ТП с супервизорным режимом работы УВМ

Основная задача супервизорного управления – автоматическое поддержание процесса вблизи оптимальной рабочей точки. Кроме того, супервизорное управление позволяет оператору-технологу использовать плохо формализуемую информацию о ходе технологического процесса, вводя через УВМ коррекцию уставок, параметров алгоритмов регулирования в локальные контуры. Работа информационно-измерительной части системы супервизорного управления практически не отличается от рассмотренной выше системы. Функции оператора в этом случае сводятся лишь к наблюдению, а его вмешательство необходимо только в аварийных ситуациях.

3. Переход от централизованных систем управления к децентрализованным вызван возрастанием мощности отдельных технологических агрегатов, их усложнением, повышением требований по быстродействию и точности к их работе. Централизация систем управления экономически оправдана при сравнительно небольшой информационной мощности (число каналов контроля и регулирования) ТРУ и его территориальной сосредоточенности. При большом числе каналов контроля, регулирования и управления, большой длине линий связи в АСУ ТП децентрализация структуры системы управления становится принципиальным методом повышения живучести АСУ ТП, снижения стоимости и эксплуатационных расходов.

Наиболее перспективным направлением децентрализации АСУ ТП следует признать автоматизированное управление процессами с распределенной архитектурой, базирующееся на функционально-целевой и топологической

децентрализации объекта управления.

Функционально-целевая децентрализация – это разделение сложного процесса или системы на меньшие части – подпроцессы или подсистемы по функциональному признаку (например, переделы технологического процесса, режимы работы агрегатов и т.д.), имеющие самостоятельные цели функционирования.

Топологическая децентрализация означает возможность территориального (пространственного) разделения процесса на функционально-целевые подпроцессы. При оптимальной топологической децентрализации число подсистем распределенной АСУ ТП выбирается так, чтобы минимизировать суммарную длину линий связи, образующих вместе с локальными подсистемами управления сетевую структуру.

Технической основой современных распределенных систем управления, обусловившей возможность реализации таких систем, являются микропроцессоры и микропроцессорные системы.

В распределенных АСУ ТП приняты в основном три топологические структуры взаимодействия подсистем: звездообразная (радиальная); кольцевая (петлевая); шинная (магистральная) или их комбинации. Организация связи с датчиками и исполнительными устройствами носит индивидуальный и преимущественно радиальный характер.

Радиальная структура взаимодействия подсистем (рис.5,а) отражает традиционно применявшийся способ соединения устройств с выделенными линиями связи и характеризуется следующими особенностями:

а) существуют отдельные, не связанные между собой линии, объединяющие центральную подсистему (ЦП) с локальными системами автоматики $ЛА_i$;

б) технически просто реализуются устройства сопряжения $УС_1—УС_m$ локальной автоматики. Центральное устройство связи УСЦ представляет собой набор модулей типа $УС_i$ по числу линий либо достаточно сложное устройство мультиплексирования каналов передачи информации;

в) обеспечиваются максимальные скорости обмена по отдельным линиям при достаточно высокой производительности вычислительных устройств на уровне ЦП;

г) надежность подсистемы связи в значительной степени зависит от надежности и живучести технических средств ЦП. Выход из строя ЦП практически разрушает подсистему обмена, так как все потоки информации замыкаются через верхний уровень.

Распределенная система с радиальной структурой является двухуровневой системой, где на нижнем уровне в подсистемах реализуются необходимые функции контроля, регулирования, управления, а на втором — в ЦП координирующая микроЭВМ (или мини-ЭВМ) кроме координации работы микроЭВМ-сателлитов осуществляет оптимизацию задач управления ТОУ, распределение энергии, управляет технологическим процессом в целом, вычисляет технико-экономические показатели и т.п. Вся база данных в распределенной системе с радиальной структурой должна быть доступной

координирующей микроЭВМ для прикладных программ управления на верхнем уровне. Вследствие этого координирующая микроЭВМ работает в режиме реального времени и должна управляться с помощью языков высокого уровня.

На рис.5 (б, в) изображены кольцевая и шинная топологии взаимодействия уровней. Эти структуры имеют ряд достоинств по сравнению с радиальной:

а) работоспособность подсистемы связи, включающей в себя канал и устройства связи, не зависит от исправности технических средств на уровнях автоматизации;

б) имеются возможности подключения дополнительных устройств и контроля всей подсистемы с помощью специальных средств;

в) необходимы значительно меньшие затраты кабельной продукции.

За счет обмена информацией между ЛА_i через канал связи и УС («каждый с каждым») появляется

дополнительная возможность динамического перераспределения функций координации совместной работы подсистем ЛА по нижним уровням в случае выхода из строя ЦП. Шинная (в меньшей степени кольцевая) структура обеспечивает широковещательный режим обмена между подсистемами, что является важным преимуществом при реализации групповых команд управления. Вместе с тем шинная и кольцевая архитектура предъявляет уже значительно более высокие требования к «интеллекту» устройств сопряжения, а следовательно, повышенные единовременные затраты на реализацию базовой сети.

Сравнивая кольцевую и шинную топологии подсистемы связи, следует отметить, что организация кольцевой структуры менее дорогостоящая, чем шинная. Однако надежность всей подсистемы с кольцевой системой связи определяется надежностью каждого устройства сопряжения и каждого отрезка линий связи. Для повышения живучести необходимо применение двойных колец или дополнительных линий связи с обходными путями. Работоспособность

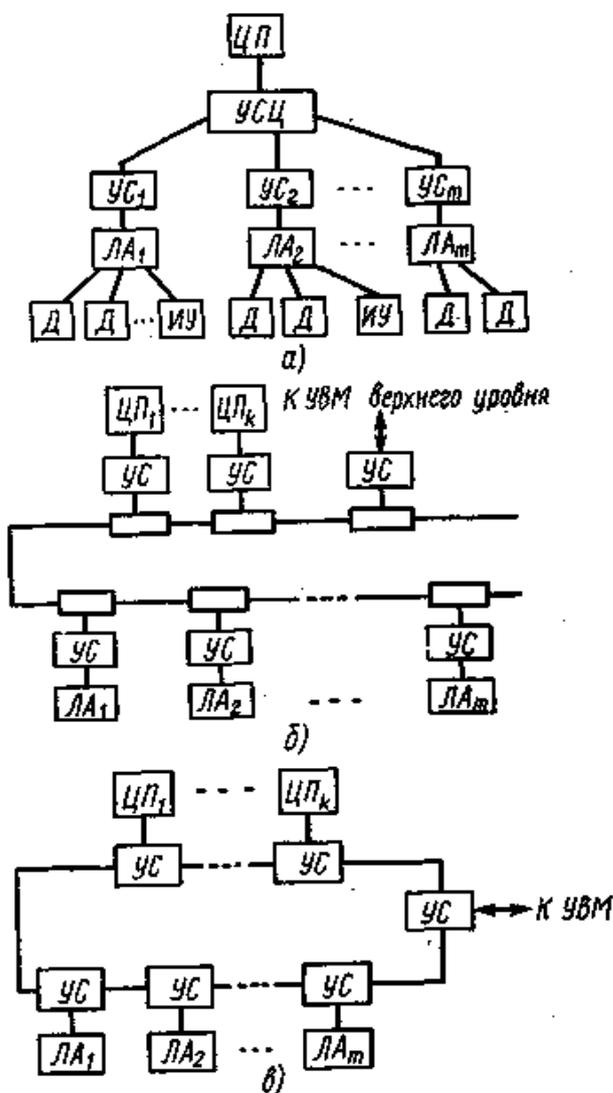


Рисунок 5 – Типовые структуры распределенных АСУ ТП:

а — радиальная, б — магистральная, в — кольцевая

физического канала передачи для шинной архитектуры с трансформаторной развязкой не зависит от исправности устройств сопряжения, однако, как и для кольца, выход из строя любого устройства сопряжения в наихудшем случае приводит к полностью автономной работе отказавшего узла подсистемы, т. е. к потере функции управления от уровня ЦП автоматикой отказавшего узла.

Явным методом повышения живучести всей системы автоматики в случае отказа устройств согласования в подсистеме связи является дублирование устройств согласования в узлах подсистемы. В кольцевой структуре такой подход уже подразумевается при организации двойных колец и обходных путей. Если надежность непрерывного физического канала для нижней топологии не вызывает сомнений, то возможно дублирование только устройств сопряжения без применения резервного магистрального кабеля.

Более дешевым способом повышения надежности подсистемы связи является использование комбинированных структур, сочетающих в себе достоинства радиальных и кольцевых (магистральных) топологий. Для кольца число радиальных связей может быть ограничено двумя-тремя линиями, реализация которых дает простое и недорогое решение.

Оценка таких показателей распределенных АСУ ТП, как *экономические* (затраты на кабельную продукцию, трассировку кабеля, на разработку или приобретение сетевых средств, в том числе устройства связи и т. п.), *функциональные* (использование групповых операций передачи, интенсивность обмена, возможность обмена «каждый с каждым»), а также *показатели унификации и возможности эволюции* сети (возможность простого включения дополнительных узлов-абонентов, тенденции к применению в АСУ ТП) и показатели *надежности сети* (отказ канала связи и устройств связи или сопряжения), позволяет сделать следующие выводы:

а) наиболее перспективной в смысле развития и использования является магистральная организация подсистемы связи;

б) функциональные возможности магистральной топологии не уступают возможностям кольцевой и радиальной;

в) надежность показатели магистральной структуры достаточно удовлетворительные;

г) магистральная топология распределенной АСУ ТП требует больших единовременных затрат на создание и внедрение канала связи и устройств сопряжения.

Во многом благодаря этим особенностям магистральной структуры и модульной организации аппаратных и программных средств в современных АСУ ТП *магистрально-модульный принцип* построения технического обеспечения нашел преимущественное распространение.

Применение промконтроллеров различного уровня позволяет эффективно и экономно реализовать принцип функциональной и топологической децентрализации АСУ ТП. Тем самым можно значительно повысить надежность и живучесть системы, сократить дорогостоящие линии связи, обеспечить гибкость функционирования и расширить область применения в народном хозяйстве комплексов технических средств, основным элементом

которых является микроЭВМ или микропроцессор. В таких распределенных системах управления большое значение приобретает *стандартизация интерфейсов*, т.е. установление и применение единых норм, требований и правил, гарантирующих информационное объединение технических средств в типовых структурах АСУ ТП.

Рекомендуемая литература

1. Эм Г.А. Элементы систем автоматики: Учеб. пособие. – Караганда, Изд-во КарГТУ, 2007. С.16-31.

2. Проектирование систем автоматизации технологических процессов: Справ.пособие / [А.С. Клюев, Б.В. Глазов, А.Х. Дубровский, А.А. Клюев]; Под ред. А.С. Клюева. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 464 с.: ил.

3. Родионов В.Д., Терехов В.А., Яковлев В.Б. Технические средства АСУ ТП: Учеб. пособие для вузов / Под ред. В.Б. Яковлева. – М.: Высш. шк., 1989. С.29-72.

Контрольные задания для СРС [1-3]

1. Проанализировать современное состояние и перспективы развития современных АСУ ТП.

2. Изучить основные варианты топологий распределенных АСУ ТП.