

Министерство образования Российской Федерации

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**

**Кафедра радиотехники и защиты информации  
Кафедра теоретических основ электротехники**

**Т.Н. Зайченко**

**ЭЛЕКТРОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ  
УСТРОЙСТВА  
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ**

**Часть II. Преобразователи формы электрической  
энергии и методы проектирования**

**Учебное пособие**

**2003**

Рецензент: доцент каф. Телевидения и управления Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, канд. техн. наук **В.А. Шалимов**

**Зайченко Т.Н.**

Электропреобразовательные устройства радиоэлектронных средств: Учебное пособие. В 2-х частях. – Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2003. – Часть 2: Преобразователи формы электрической энергии и методы проектирования. – 139 с.

В учебном пособии изложены принципы построения, функционирования и проектирования электропреобразовательных устройств (ЭПУ) радиоэлектронных средств (РЭС).

Во второй части пособия рассматриваются ЭПУ, осуществляющие преобразование энергии с изменением ее формы: химические источники тока, электромашинные и электроакустические преобразователи, а также методы проектирования РЭС и ЭПУ РЭС.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучаемых по дистанционным образовательным технологиям по специальности 200700 – «Радиотехника».

© Зайченко Татьяна Николаевна, 2003

© Томский межвузовский центр  
дистанционного образования, 2003

## 6 ИСТОЧНИКИ ПЕРВИЧНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Если электропитание РЭС не может быть связано с электропитанием от сети промышленной частоты (РЭС переносного типа) либо РЭС относится к первой категории по степени надежности электроснабжения, то в комплект РЭС либо в состав системы электропитания РЭС должен входить и сам источник электроэнергии – источник первичного электропитания.

Источники первичного электропитания должны обеспечивать:

- заданный ток при установленных пределах изменения рабочего напряжения;
- заданное число часов работы в указанном режиме без смены источников электропитания;
- нормальную работу аппаратуры при заданных изменениях температуры и влажности, при этом должны иметь минимальный вес и объем и быть удобными и безопасными при эксплуатации.

Источниками первичного электропитания РЭС являются: электромашинные генераторы, химические источники тока (ХИТ), термоэлектрические генераторы, солнечные и атомные (ядерные) батареи и т.п. [1, 2]. В настоящем пособии рассматриваются основные источники первичного электропитания РЭС – ХИТ и электромашинные генераторы, являющиеся одними из старейших источников электрической энергии.

### 6.1 Общая характеристика и основные показатели ХИТ

*Принцип действия ХИТ.* Возникновение тока в замкнутой цепи ХИТ происходит за счет электрохимического процесса, обусловленного переходом валентных электронов от вещества одного электрода к веществу другого вследствие различия концентрации валентных электронов в веществах разных электродов. Для выравнивания концентраций валентных электронов вещества электродов используется электролит. *Электролитами* называются вещества, водные растворы или расплавы которых содержат подвижные ионы и вследствие этого могут проводить электрический ток. *Истинные электролиты* содержат ионы уже в кристаллической решетке. К ним относятся, в частности, соли и гидроксиды металлов. *Потенциальные электролиты* образуют ионы лишь при реакции с молекулами воды. К данному типу электролитов относятся кислоты и большая часть органических оснований. В качестве электролитов в ХИТ обычно используются растворы солей и кислот в воде или в каком-либо другом растворе.

*Гальваническим элементом* называют ХИТ одноразового действия, который не восстанавливается под действием электрического тока. Полностью разряженный гальванический элемент не восстанавливается и к дальнейшей

работе не пригоден. **Аккумулятором** называют такой ХИТ, который обладает практически реализуемой обратимостью и может быть многократно использован. Аккумуляторы допускают многократный заряд и разряд. В соответствии с принятой в технической литературе терминологией аккумуляторы относятся ко вторичным химическим источникам тока, предназначенным для производства электрической энергии. Аккумуляторы отдают во внешнюю электрическую цепь энергию, запасенную в процессе заряда. Их использование для питания РЭС в ряде случаев более выгодно и целесообразно, чем гальванических элементов.

При включении на заряд положительный полюс аккумулятора подключается к положительному полюсу источника зарядного напряжения. Заряд аккумулятора осуществляется током, идущим в направлении, обратном току разряда. В цепи заряда аккумуляторов предусматривается возможность регулировки зарядного тока, а также измерения зарядного тока с помощью амперметра.

Промышленностью изготавливаются гальванические элементы и аккумуляторы различных электрохимических систем, а также батареи из гальванических элементов и аккумуляторные батареи. Основными **электрохимическими системами** являются никель-кадмиевая, никель-цинковая, никель-металл-гидридная, марганцово-цинковая, ртутно-цинковая, серебряно-цинковая, угольно-цинковая, свинцовая, литий-ионная, литий-полимерная. В зависимости от состава электролита аккумуляторы могут быть **кислотными** и **щелочными**.

ХИТ характеризуются следующими основными параметрами.

**Электродвижущая сила ( $E$ )** – разность потенциалов в вольтах между его положительным и отрицательным выводами при разомкнутой внешней цепи, В.

**Внутреннее сопротивление ( $R_{вн}$ )** – сопротивление, оказываемое источником, при прохождении через него постоянного тока, Ом.

**Разрядное напряжение ( $U_{раз}$ )** – напряжение на нагрузке, которое всегда меньше ЭДС аккумулятора на падение напряжения на внутреннем сопротивлении аккумулятора, В.

**Зарядное напряжение ( $U_з$ )** аккумулятора – напряжение, обеспечиваемое зарядным устройством, В. Зарядное напряжение должно быть больше ЭДС аккумулятора на падение напряжения на внутреннем сопротивлении аккумулятора и зарядного устройства при максимальном зарядном токе.

**Емкость (разрядная аккумулятора)  $Q$**  – это количество электричества в ампер-часах, которое может быть получено от источника тока при данных условиях работы (температуры, разрядного тока  $i_p$  и конечного напряжения):

$$Q = \int_0^{t_p} i_p(t) dt \text{ или } Q = I_p t_p \text{ [А}\cdot\text{ч]},$$

где  $i_p$  – ток разряда;  $I_p$  – среднее значение тока разряда;  $t_p$  – время разряда.

**Зарядная емкость** аккумулятора ( $Q_3$ ) – количество электричества, поглощаемое аккумулятором при заряде – то количество электричества, которое нужно сообщить аккумулятору для восстановления его номинальной емкости:

$$Q_3 = \int_0^{t_3} i_3(t) dt \text{ или } Q_3 = I_3 t_3 \text{ [А}\cdot\text{ч]},$$

где  $i_3$  – ток заряда;  $I_3$  – среднее значение тока заряда;  $t_3$  – время заряда.

Зарядная емкость всегда больше разрядной на 20...40 %.

Различают теоретическую и эксплуатационную емкость ХИТ.

**Теоретической емкостью** называется количество электричества, отдаваемое ХИТ до полного израсходования активного вещества. **Эксплуатационная емкость** (емкость, получаемая практически) определяется допустимым конечным напряжением источника и уменьшается с ростом разрядного тока. Эксплуатационная емкость меньше теоретической. Номинальная емкость соответствует определенному разрядному току и установленному конечному напряжению.

Отношение разрядной емкости к зарядной называется **электрохимическим КПД**:

$$\eta_{\text{эх}} = \frac{Q_p}{Q_3}.$$

**Энергия** ( $W$ ), отдаваемая в нагрузку:

$$W = \int_0^{t_p} u_H(t) i_H(t) dt \text{ [Вт}\cdot\text{ч]}.$$

Отношение разрядной энергии к зарядной называется **энергетическим КПД** (или **отдачей**):

$$\eta = \frac{W_p}{W_3}.$$

**Мощность** ( $P$ ) – средняя за время разряда мощность, отдаваемая в нагрузку:

$$P = (1/t_p) \int_0^{t_p} u_H(t) i_H(t) dt \text{ [Вт]}.$$

**Саморазряд** – бесполезная потеря емкости аккумулятора при разомкнутой внешней цепи. Саморазряд происходит в основном из-за химического

взаимодействия электролита и активных масс электродов. Численно саморазряд показывает, на сколько процентов уменьшилась емкость аккумулятора за единицу времени (сутки, месяц и т.п.).

Кроме этого, химические источники характеризуются рассмотренными в главе 1 удельными мощностными и энергетическими показателями. Важное значение при выборе ХИТ имеют их срок службы, работоспособность при разных температурах, вес и объем, безопасность в процессе эксплуатации.

Значения параметров ХИТ зависят от типа электрохимической системы, сроков и условий его хранения и эксплуатации.

**Разрядные характеристики.** При выборе и применении ХИТ необходимо учитывать форму разрядной кривой (рис. 6.1), которая представляет собой зависимость напряжения ХИТ от времени работы при заданном режиме разряда (непрерывный либо прерывистый) и величине разрядного тока и определяет стабильность разрядного напряжения. В справочниках приведены необходимые сведения по данному вопросу для конкретных ХИТ.

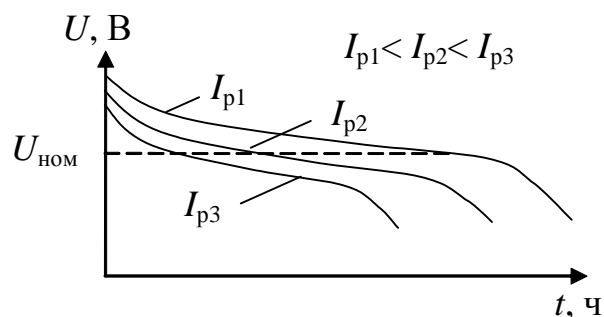


Рис. 6.1 – Разрядные характеристики

В справочной литературе для гальванических элементов приводятся:

- напряжение свежизготовленных элементов и в конце срока хранения;
- продолжительность работы свежизготовленных элементов;
- сопротивление внешней цепи при разряде;
- конечное напряжение разряда;
- емкость;
- разрядные характеристики;
- условия эксплуатации.

Для аккумуляторов в справочной литературе приводятся:

- номинальное напряжение;
- емкость,
- разрядный ток,
- время разряда,
- условия эксплуатации и заряда, количество циклов перезаряда.

Величина емкости (в ампер-часах) в большинстве случаев является элементом условного обозначения аккумулятора.

**Требования, предъявляемые к ХИТ.** ХИТ должны удовлетворять как общим требованиям, предъявляемым к промышленным источникам электрической энергии, так и специфическим требованиям, обусловленным их применением в тех или иных устройствах. Специфическими требованиями,

предъявляемыми к ХИТ, являются минимальный саморазряд и длительный срок сохранности, пологость разрядных характеристик.

## 6.2 Сравнительный анализ ХИТ

Правильный выбор ХИТ для различных случаев применения может быть сделан только при сравнении их эксплуатационных и технико-экономических характеристик, некоторые из которых приведены в табл. 6.1–6.3.

Таблица 6.1 – Основные удельные характеристики ХИТ

Тип ХИТ	$Q$ , А·ч/дм <sup>3</sup>	$W_V$ , Вт·ч/дм <sup>3</sup>	$\frac{Q}{G}$ , А·ч/кг	$W_G$ , Вт·ч/кг
<i>Элементы</i>				
медно-окисный	53	35	80	52
стаканчиковый	63	76	40	48
воздушно-цинковый	67	73	55	60
марганцово-воздушно-цинковый	91	105	46	55
окисно-ртутный (цинк-окись ртути)	270	300	62	68
<i>Щелочные аккумуляторы</i>				
железо-никелевый ламельный	12	14	15	18
кадмиево-никелевый	54	65	32	38
безламельный кадмиево-никелевый	55	69	15	18
дисковый				
кадмиево-никелевый цилиндрический	56	70	19	24
серебряно-цинковый	160	260	80	120
серебряно-кадмиевый	172	220	38	53

Таблица 6.2 – Значения отдачи аккумуляторов

Вид аккумулятора	Отдача по емкости, $\eta_{\text{эк}}$ , %	Отдача по энергии, $\eta$ , %
Свинцовые (кислотные):		
стартерный режим	40	30
длительный режим	82	70
Кадмиево-никелевые:		
ламельные и безламельные	67	50
дисковые	50	40
цилиндрические	70	85
Серебряно-цинковые	100	85

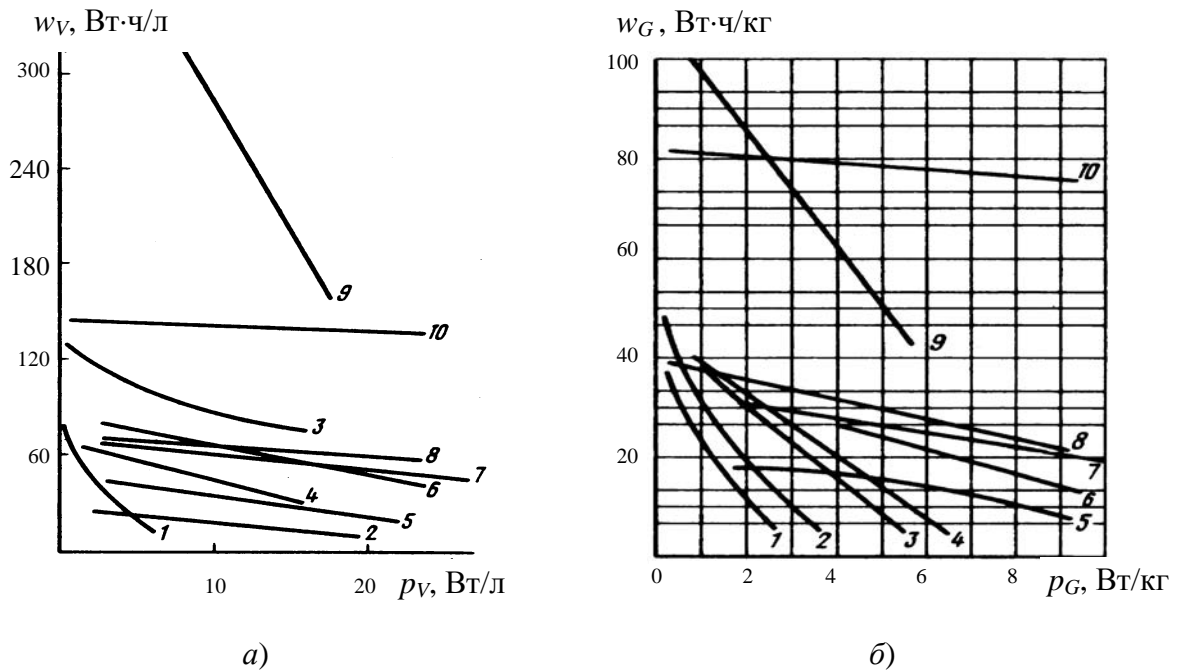
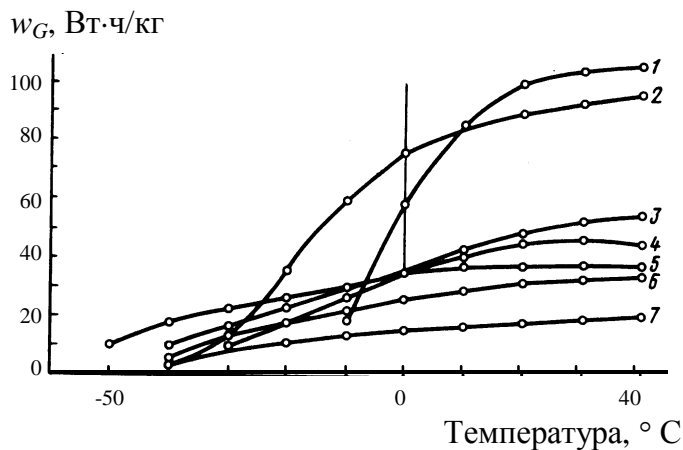


Рис. 6.2 – Зависимость удельных энергетических показателей ХИТ

- 1 – марганцово-цинковые элементы стаканчиковой конструкции;  
 2 – марганцово-цинковые батареи галетной конструкции;  
 3 – марганцово-цинковые герметичные элементы со щелочным электролитом;  
 4 – медно-магниевые батареи; 5 – ламельные никель-кадмиевые аккумуляторы;  
 6 – кислотные радионакальные аккумуляторы; 7 – безламельные никель-кадмиевые аккумуляторы; 8 – прессованные никель-кадмиевые аккумуляторы;  
 9 – ртутно-цинковые элементы; 10 – серебряно-цинковые аккумуляторы



Элементы:

1 – ртутно-цинковые; 3 – герметичные марганцово-цинковые со щелочным электролитом;

Аккумуляторы: 2 – серебряно-цинковые;

4 – никель-цинковые; 5 – безламельные никель-кадмиевые; 6 – кислотные радионакальные; 7 – ламельные никель-кадмиевые

Рис. 6.3 – Зависимость весовой удельной энергии ХИТ от температуры

*Примечание.* Для аккумуляторов кривые относятся к 10-часовому режиму разряда до напряжения 1 В (для кислотного – до 1,7 В); для элементов – к 59-часовому режиму при разряде до напряжения 1 В



**Удельные характеристики.** Основные удельные характеристики ХИТ приведены в табл. 6.1.

Наиболее полно характеризуют свойства ХИТ значения удельной энергии, отдаваемой при определенной мощности. Зависимость весовой удельной энергии химических источников тока от весовой удельной мощности при температуре  $+20^{\circ}\text{C}$  приведена на рис. 6.2, а. Кривые зависимости объемной удельной энергии ХИТ от объемной удельной мощности приведены на рис. 6.2, б. Наиболее высокой удельной энергией на единицу массы обладают ртутно-цинковые элементы и серебряно-цинковые аккумуляторы. Весьма малая зависимость удельной энергии от удельной мощности является характерной особенностью серебряно-цинковой электрохимической системы. У ртутно-цинковых элементов, наоборот, наблюдается весьма сильная зависимость удельной энергии от удельной мощности: при увеличении удельной мощности до  $5 \text{ Вт/кг}$  удельная энергия снижается более чем вдвое. Еще более сильная зависимость удельной энергии от удельной мощности наблюдается у источников тока марганцово-цинковой системы. При увеличении удельной мощности от долей ватта на килограмм всего до  $2 \text{ Вт/кг}$  удельная энергия снижается более чем в два раза у стаканчиковых элементов и галетных батарей. С увеличением разрядного тока удельная энергия снижается для всех элементов в разной степени.

Значения отдачи ХИТ приведены в табл. 6.2.

**Зависимость удельной энергии от температуры.** Для практического применения химических источников тока важное значение имеет зависимость удельной энергии от температуры. У всех без исключения ХИТ с уменьшением температуры, при которой происходит разряд, удельная энергия при одной и той же удельной мощности снижается. У разных типов ХИТ это снижение происходит по-разному. Так, ртутно-цинковые элементы, имеющие при температуре  $+20^{\circ}\text{C}$  самую высокую удельную энергию, при температуре  $-10^{\circ}\text{C}$  являются одними из самых худших источников тока по удельной энергии. Зависимость весовой удельной энергии ХИТ от температуры приведена на рис. 6.3. Также резко снижаются удельные характеристики серебряно-цинковых аккумуляторов: от  $100 \text{ Вт}\cdot\text{ч/кг}$  при  $+20^{\circ}\text{C}$  до  $35 \text{ Вт}\cdot\text{ч/кг}$  при  $-20^{\circ}\text{C}$ .

Эксплуатирующиеся при комнатной температуре никель-цинковые аккумуляторы имеют в два раза большую удельную энергию по сравнению с ламельными никель-кадмиевыми. А при температуре  $-30^{\circ}\text{C}$  они обладают одинаковой удельной энергией.

Наиболее слабая зависимость удельной энергии от температуры наблюдается у безламельных никель-кадмиевых аккумуляторов как с металло-керамическими, так и с прессованными электродами. При понижении температуры от  $+20$  до  $-40^{\circ}\text{C}$  их удельная энергия снижается только на  $50\%$  по сравнению с удельной энергией, отдаваемой ими при температуре  $+20^{\circ}\text{C}$ , и

составляет примерно 18 Вт·ч/кг, т. е. равна удельной энергии ламельных никель-кадмиевых аккумуляторов, работающих при комнатной температуре.

Из графика, приведенного на рис. 6.3, видно, что безламельные никель-кадмиевые аккумуляторы являются единственными ХИТ, которые при довольно форсированном режиме разряда работоспособны при температуре  $-50^{\circ}\text{C}$ , отдавая при этом емкость, составляющую около 30% номинальной.

**Стабильность разрядного напряжения и разрядные характеристики.** Наиболее стабильной разрядной кривой обладают серебряно-цинковые аккумуляторы, заряженные асимметричным переменным током. В этом случае они почти всю емкость отдают при неизменном напряжении. Эти же аккумуляторы, заряженные постоянным током, имеют значительно худшие показатели: при постоянном напряжении отдают емкость, составляющую примерно 60% номинальной. Из всех ХИТ наиболее стабильным разрядным напряжением при сравнительно длительных режимах разряда обладают ртутно-цинковые элементы. При 5-часовом режиме разряда примерно 90% всей емкости они отдают при изменении напряжения в пределах 1,2 ... 1,1 В.

Медно-магниевые элементы при сравнительно коротких режимах разряда отдают около 65% всей емкости при малоизменяющемся напряжении.

Марганцово-цинковые элементы и батареи имеют наихудшие из всех рассмотренных источников тока разрядные характеристики: их напряжение в процессе разряда непрерывно и существенно падает.

Важное значение при выборе ХИТ для конкретных условий эксплуатации РЭС имеют характеристики и параметры, определяющие надежность и долговечность аккумуляторов и батарей, их механическую прочность и другие конструктивные особенности.

**Стоимость.** При выборе ХИТ необходимо учитывать конкретные условия, в которых они будут работать, каким требованиям должны удовлетворять и какова будет их стоимость. Ориентировочные значения относительной стоимости энергии различных ХИТ приведены в табл. 6.3.

Стоимость ХИТ даже в пределах одной электрохимической системы разная и в значительной степени зависит от конструкции и массогабаритных характеристик ХИТ. Установлено, что с уменьшением размеров источника тока стоимость 1 Вт·ч отдаваемой ими энергии увеличивается. Например, при уменьшении фактического объема марганцово-цинковых элементов с 0,42 до 0,018 дм<sup>3</sup> стоимость 1 Вт·ч возрастает ориентировочно в 7 раз. Такой же характер зависимости стоимости от размеров наблюдается у ртутно-цинковых элементов и у герметичных никель-кадмиевых аккумуляторов. Необходимо учитывать также, что в ряде случаев ХИТ с большей начальной стоимостью могут оказаться более выгодными, если их срок службы большой. Так, несмотря на то, что начальная стоимость, например, безламельных никель-кадмиевых аккумуляторов в 25 раз выше стоимости марганцово-цинковых элементов, первые с учетом их большого срока службы могут оказаться дешевле.

Таблица 6.3 – Теоретические параметры ХИТ

Тип ХИТ	Стоимость 1 Вт·ч*	Теоретическая удельная энергия, Вт·ч/кг
Марганцово-цинковые элементы	1	232
Никель-кадмиевые аккумуляторы (ламельные)	6	220
Никель-кадмиевые аккумуляторы (безламельные)	23..27	220
Никель-цинковые аккумуляторы	10	232
Кислотные аккумуляторы	1,5...2	175
Ртутно-цинковые элементы	15	255
Медно-магниевые элементы	20	410
Серебряно-цинковые аккумуляторы	24	459
Герметичные никель-кадмиевые аккумуляторы	70...90	220

\* *Примечание.* Стоимость 1 Вт·ч отдаваемой энергии приведена в относительных единицах с нормированием по отношению к стоимости 1 Вт·ч энергии марганцово-цинковых элементов.

**Область применения.** Все рассмотренные выше характеристики ХИТ обуславливают их применение в РЭС, и каждый ХИТ хорош только в определенных условиях применения.

**Марганцово-цинковые элементы** применяются в РЭС и в аппаратуре средств связи, в том числе малогабаритной и бытовой, переносных магнитофонах, микрокалькуляторах, фонарях, игрушках, часах и т.п., электробытовой аппаратуре. Из-за низкой стоимости они находят очень широкое применение в аппаратуре, к которой не предъявляются какие-либо специальные требования. Одновременно следует заметить, что марганцово-цинковые элементы и батареи на практике часто используются без учета их оптимальных возможностей.

Например, рекомендуемый разрядный ток для элемента 316 равен 1,5...3,5 мА. При данном токе элемент сохраняет работоспособность в течение 170...180 ч. Если этот элемент использовать при разрядном токе 20 мА, то время его работы сокращается до 15 ч, а отдаваемая емкость уменьшается более, чем в два раза.

**Ртутно-цинковые элементы** наиболее эффективно рекомендуется использовать в портативной РЭС, рассчитанной на длительную работу при положительных температурах. По объемной удельной энергии они не имеют себе равных.

**Кислотные аккумуляторы** ввиду их токсичности не применяются

внутри РЭС и используются как стартерные на автотранспорте, в радио и телефонной аппаратуре и аппаратуре средств связи промышленного назначения.

**Щелочные ХИТ** по сравнению с кислотными имеют ряд преимуществ: легче по массе, не боятся вибраций и толчков, не портятся от кратковременных коротких замыканий и от больших зарядных и разрядных токов, могут оставаться долгое время незаряженными. Однако по сравнению с кислотными щелочные ХИТ имеют большую стоимость, значительно меньшее напряжение на одну банку, меньший КПД.

Применение аккумуляторов со щелочным электролитом во многих случаях имеет значительные преимущества по сравнению с применением кислотных аккумуляторов. Эти преимущества проявляются при использовании в переносной аппаратуре, где источники тока должны обладать высокими удельными характеристиками, большой механической прочностью, малым саморазрядом и хорошей работоспособностью в условиях как холодного, так и жаркого климата.

Тип аккумулятора со щелочным электролитом выбирается в зависимости от условий применения:

- никель-кадмиевые и никель-железные аккумуляторы применяются в РЭС, электрических аппаратах, аппаратуре средств связи;

- никель-кадмиевые предназначены для приборов медицинской техники, малогабаритных радиоприемников, других РЭС, устройств автоматики и телемеханики в передвижных объектах связи;

- кадмиево-никелевые герметичные – чаще всех применяются в малогабаритной РЭС:

- дисковые – малогабаритные радиоприемники, слуховые аппараты, микрокалькуляторы, фонари, переносные измерительные приборы;

- цилиндрические – медицинская, полевая, геофизическая и другая РЭС;

- безламельные – в стартерных режимах.

Безламельные никель-кадмиевые (NiCd) аккумуляторы, которые имеют бесспорные преимущества перед никель-цинковыми и серебряно-цинковыми аккумуляторами по сроку службы, надежности и работоспособности при низких температурах, целесообразно использовать для питания устройств, к которым предъявляются высокие требования по климатической устойчивости.

В аппаратуре, для которой массогабаритные характеристики имеют первостепенное значение, но к которой не предъявляются высокие требования по работоспособности при низких температурах, сроку службы и надежности, широко используются никель-цинковые и серебряно-цинковые аккумуляторы, обладающие более высокими показателями по удельной энергии по сравнению с безламельными никель-кадмиевыми аккумуляторами. И здесь

первым отдается преимущество.

**Серебряно-цинковые аккумуляторы** (*Silver Zink (SilZn)*) имеют относительно высокую стоимость, но благодаря своим положительным качествам находят широкое применение. Положительным свойством серебряно-цинковых аккумуляторов является нечувствительность их к большим разрядным токам, но они не допускают параллельного соединения. Аккумулятор типа СЦ–0,5 может без вреда для пластин дать в импульсе ток до 600 А. Аккумуляторы типа СЦ можно разряжать в течение 15 мин почти до полного использования емкости. Глубокий разряд (полная отдача емкости) не оказывает такого губительного влияния, как в случае использования кислотных или щелочных аккумуляторов. Допускается и быстрый заряд серебряно-цинковых аккумуляторов. В течение 15 мин можно зарядить такой аккумулятор до 80% номинальной емкости. Однако лучшие результаты (более полная отдача емкости) получаются при зарядке аккумулятора в течение 10...20 ч. Изменения температуры окружающей среды не оказывают заметного влияния на работу серебряно-цинковых аккумуляторов. Нормальным интервалом температур для аккумуляторов типа СЦ принято считать  $-20...+60$  °С, однако эти аккумуляторы сохраняют свою работоспособность и при температурах  $-60...+80$  °С.

Серебряно-цинковые аккумуляторы имеют преимущества перед никель-цинковыми по удельной энергии и рекомендуются к применению несмотря на их большую стоимость. Никель-цинковые аккумуляторы могут найти применение только в тех случаях, когда к источникам питания РЭС не предъявляются высокие требования по сроку службы, сохранности, работоспособности при низких температурах или когда применение никель-кадмиевых безламельных аккумуляторов не оправдано из-за большой их массы и габаритов, а применение серебряно-цинковых невыгодно с экономической точки зрения.

В переносных радиоприемниках и в РЭС, не ограниченных габаритами и массой, наиболее выгодно применять дешевые никель-кадмиевые аккумуляторы ламельной конструкции.

Для стационарных РЭС и аппаратуры средств связи, когда преимущества щелочных аккумуляторов очень важны для переносных изделий, рекомендуется применять кислотные аккумуляторы, имея в виду экономическую сторону вопроса.

**Свинцово-магниевые элементы** по разрядному напряжению могут заменить никель-кадмиевые аккумуляторы, а медно-цинковые элементы – серебряно-цинковые.

**Перспективные ХИТ.** До настоящего времени были известны два основных типа элементов питания. Это неприхотливые в эксплуатации, недорогие и долговечные, но с весьма скромными рабочими характеристиками *NiCd*

аккумуляторы и серебряно-цинковые (*SilZn*) элементы. При прочих равных условиях время непрерывной работы последних в три раза больше. Однако они удобны не для всех режимов работы, сложны в техобслуживании, недолговечны и дороги.

В настоящее время различными фирмами производятся элементы питания, основанные на новых, недавно разработанных технологиях, а также интерактивные зарядные системы. Новая никель-металл-гидрид (*Nickel Metal Hydride (NiMH)*) технология, разработанная фирмой *Anton/Bauer* – это альтернатива для уже существующей *NiCd*. В течение нескольких лет она была опробована и хорошо себя зарекомендовала в переносных компьютерах и радиомикрофонах. При прочих равных условиях (масса, объем) продолжительность работы с ними по сравнению с *NiCd* на 40 % больше.

Еще одна разработка фирмы – литий-ионные (*Lithium Ion (LiIon)*) батареи. Их выпуск был начат в 1995 году. Энергетическая мощность этих батарей почти вдвое выше *NiCd* и сравнивать ее уместнее с *SilZn*.

Недостатком этих технологий пока является низкое соотношение цена/качество (относительно *NiCd*). Цена единицы мощности у *LiIon* составляет 300 % от *NiCd*, а у *NiMH* – 150 %.

Все вышеперечисленные аккумуляторы фирмы *Anton/Bauer* могут успешно эксплуатироваться совместно с *Anton/Bauer InterActive* зарядной системой. Эта система ориентирована на новые технологии и на возможность их модернизации. Зарядные системы оборудованы жидкокристаллическим дисплеем, на котором отражается информация о подключаемом элементе питания: тип батареи, серийный номер, дата производства, количество уже выполненных с ним циклов перезарядки, мощность, температура, рабочее напряжение и другие данные. Дисплей работает даже при отключении питания. При выпуске новых или модификации уже известных аккумуляторов эти зарядные устройства достаточно просто перепрограммировать.

Новые типы ХИТ имеют высокие удельные характеристики. Так, *воздушно-цинковые элементы* обладают удельной энергией до 500 Вт·дм<sup>3</sup>.

*Элементы с расплавляемым электролитом* работают при повышенной температуре. Электрохимическая система элемента представляет собой систему электродов Li – Cl и электролит, расплавляемый при температуре около 600 °С. удельные характеристики элемента составляют 550 Вт·ч/кг и 825 Вт·ч/дм<sup>3</sup>.

*Элементы с органическим электролитом* (раствор LiClO<sub>4</sub> в этилкарбонате) и электродами Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>, Ag<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub> – Li дают ЭДС, большую 13 В, и имеют удельные характеристики 320...470 Вт·ч/кг и 500...620 Вт·ч/дм<sup>3</sup>.

**Срок службы аккумуляторов** зависит от условий их эксплуатации. Одновременно большое значение для продления срока службы аккумуляторов имеет правильный выбор зарядного и разрядного токов. Чем меньше заряд-

ный ток, тем продолжительней срок службы аккумуляторов при прочих равных условиях. Однако при малом токе заряда время заряда возрастает. Нормированные параметры механических и климатических воздействий на аккумуляторы в процессе их эксплуатации, значения разрядных токов и напряжений и режимы заряда приводятся в справочной литературе [12].

Скорость химических реакций, происходящих в аккумуляторе, зависит от температуры. При повышении температуры на  $10^{\circ}\text{C}$  химическая реакция ускоряется в 2...4 раза, при понижении на  $10^{\circ}\text{C}$  скорость реакции уменьшается, внутреннее сопротивление источника тока увеличивается. Следует отметить, что при больших зарядных и разрядных токах температура внутри аккумулятора резко повышается, что значительно сокращает срок его службы.

При температуре, близкой к замерзанию электролита, химический источник тока прекращает работу, однако с повышением температуры до нормальной емкость аккумулятора полностью восстанавливается. Нельзя допускать замерзания электролита, так как это приводит к механической деформации пластин аккумулятора. Аккумуляторы эксплуатируются и хранятся при более низких температурах при условии повышенной плотности электролита.

Аккумулятор можно разряжать только до определенного напряжения, соответствующего определенному разрядному току, иначе необратимые процессы вызовут уменьшение емкости аккумулятора. Максимальный разрядный ток зависит от типа и емкости аккумулятора. Для щелочных кадмиево- и железо-никелевых аккумуляторов он не превышает  $1/8$  их емкости. Например, для НКН-60 емкостью  $60\text{ А}\cdot\text{ч}$  разрядный ток равен  $60/8=7,5\text{ А}$ . Для кислотных (стартерных, авиационных и накальных) аккумуляторов он составляет  $1/10$  емкости; для кислотных (анодных) аккумуляторов –  $1/30$  емкости.

### 6.3 Выбор ХИТ для переносной РЭС

Основными критериями при выборе элементов питания являются: соответствие рабочих напряжений и мощности, надежность и цена. Процесс подбора элемента питания по критерию соответствия рабочих напряжений ХИТ и оборудования сводится к следующему правилу: полный рабочий интервал элемента питания должен находиться полностью внутри рабочего диапазона питания соответствующего оборудования. На практике это выглядит следующим образом.

**1. Определение рабочего напряжения оборудования.** Обычно рабочее напряжение оборудования можно узнать из описания. Например:

$$U = 11...17\text{ В} \text{ или } U = 12 (-1;+5)\text{ В}.$$

**2. Определение рабочего диапазона элемента питания по напряжению.** Так например, для никель-кадмиевых (*NiCd*) аккумуляторов, наиболее широко применяемых в телеиндустрии, он следующий:

а) при  $U_{\text{ном}} = 12 \text{ В}$   $U = 10 \dots 14 \text{ В}$ ;

б) при  $U_{\text{ном}} = 13 \text{ В}$  или  $U_{\text{ном}} = 13,2 \text{ В}$  –  $U = 11 \dots 15,5 \text{ В}$ ;

в) при  $U_{\text{ном}} = 14 \text{ В}$  или  $U_{\text{ном}} = 14,4 \text{ В}$  –  $U = 12 \dots 17 \text{ В}$ .

**3. Выбор элемента питания.** В соответствии с вышеизложенным правилом, для рассматриваемого примера подходят (б) и (в).

Зная мощность и емкость ХИТ и мощность, потребляемую оборудованием, можно определить общую необходимую энергоемкость ХИТ либо рассчитать время работы аккумулятора. Энергоемкость элемента питания равна произведению мощности, потребляемой оборудованием, и необходимого времени работы оборудования:

$$W = \int_0^{t_p} u_n(t) i_n(t) dt = U_{\text{ном}} Q = P_n t_p \text{ [Вт}\cdot\text{ч]}.$$

Если рассматривать, например, элементы питания на 12 В и 14,4 В, то они имеют емкость 5 А·ч и предназначены для электропитания устройств, потребляющих мощность 24 Вт. Время работы данных аккумуляторов составляет:

для аккумуляторов 12 В/5 А·ч:

$$W = 12 \text{ В} \cdot 5 \text{ А}\cdot\text{ч} = 60 \text{ Вт}\cdot\text{ч};$$

$$t_p = 60 \text{ Вт}\cdot\text{ч} : 24 \text{ Вт} = 2,5 \text{ ч};$$

для аккумуляторов 14,4 В/5 А·ч:

$$W = 14,4 \text{ В} \cdot 5 \text{ А}\cdot\text{ч} = 72 \text{ Вт}\cdot\text{ч};$$

$$t_p = 72 \text{ Вт}\cdot\text{ч} : 24 \text{ Вт} = 3 \text{ ч}.$$

Таким образом, элемент питания 14,4 В работает на 20 % дольше, чем аккумулятор на 12 В.

Технические характеристики ряда аккумуляторных батарей серии *Logic* фирмы *Anton/Bauer*, предназначенных для видеосъемки, приведены в табл. 6.4.

Надежность – параметр, включающий в себя ряд различных условий, основные из которых – технология изготовления и условия эксплуатации. При выборе элементов питания специалисты рекомендуют соблюдать следующие правила.

1. Не стоит пользоваться элементами питания в тонких пластмассовых кожухах, через которые легко прощупываются цилиндрические корпуса батареек: они плохо защищены от механических повреждений. Также плохо



Таблица 6.4 – Технические характеристики батарей серии *Logic* фирмы *Anton/Bauer*

Модель	Напряжение, В	Энергия, Вт·ч	Вес, кг	Мощность, потребляемая оборудованием, Вт/время работы оборудования, ч	Стоимость
DIG PRO PAC 14	14,4	60	2,3	29/2; 19/3; 15/4	\$650
DIG PRO PAC 13	13,2	55	2,1	27/2; 18/3; 14/4	\$635
DIGTRIMPAC 14	14,4	40	1,2	20/2; 13/3	\$420
DIGCOMPAC 14	14,4	40	1,2	20/2; 13/3	\$450
PRO PAC 14	14,4	60	2,3	29/2; 19/3; 15/4	\$495
PRO PAC 13	13,2	55	2,1	27/2; 18/3; 14/4	\$485
TRIMPAC 14	14,4	40	1,2	20/2; 13/3	\$310
TRIMPAC 13	13,2	36	1,1	18/2; 12/3	\$300
COMPAC 14	14,4	40	1,2	20/2; 13/3	\$310
COMPAC 13	13,2	36	1,1	18/2; 12/3	\$300
PRO PAC 90	12,0	48	1,7	14/3	\$380

защищенными от удара считаются элементы питания, выполненные из двух частей, скрепленных винтами. Некоторые производители стараются снизить массу батарейки за счет изготовления более тонкого корпуса. Путь этот явно ошибочный. Без дополнительной защиты такие батарейки создают больше проблем, чем решают.

2. Контакты элементов питания должны иметь низкое сопротивление. Лучше всего, если они позолоченные, точечного типа.

3. Без крайней необходимости не стоит пользоваться элементами питания с кабельными разъемами. Мало того, что эти разъемы имеют высокое сопротивление, они часто являются причиной нарушения контакта.

После заряда аккумулятор «выдает» напряжение, соответствующее верхнему порогу номинального рабочего диапазона. Постепенно, в ходе работы, напряжение падает и опускается до своего нижнего значения. Оборудование при этом может продолжать нормально работать. Ни в коем случае нельзя допускать разряда аккумуляторов ниже этого уровня. При этом в них происходят необратимые химические процессы и, если такое случится, они уже никогда не будут работать на полную мощность и вскоре выйдут из строя.

## 6.4 Способы соединения ХИТ

**Параллельное соединение.** Если емкости одного аккумулятора (элемента) недостаточно, то образуют батарею из нескольких параллельно соединенных аккумуляторов (элементов). При этом необходимо, чтобы напряжения

отдельных источников тока были одинаковыми (емкости могут быть и разными), иначе пойдет уравнивающий ток, который значительно уменьшит емкость батареи. **Большой уравнивающий ток может привести к порче источников тока.** При параллельном соединении емкость батареи  $Q_6$  равна сумме емкостей  $n$  источников тока, емкостью  $Q_i$  каждый, входящих в состав батареи, а ЭДС батареи равна ЭДС одного аккумулятора:

$$Q_6 = \sum_{i=1}^n Q_i ; E_6 = E_1.$$

**Последовательное соединение.** При последовательном соединении ЭДС батареи равна сумме ЭДС отдельных аккумуляторов (элементов), а ее емкость равна наименьшей емкости источника, входящего в состав батареи:

$$E_6 = \sum_{i=1}^n E_i ; Q_6 = Q_{i \min}.$$

При этом не следует образовывать группы из аккумуляторов разных типов.

Для обеспечения нормальной работы химических источников тока необходимо строго соблюдать специальные инструкции по их эксплуатации.

## 6.5 Классификация и принципы действия электромашинных генераторов

Электромашинные генераторы служат для преобразования механической энергии в электрическую энергию. Принцип действия генераторов основан на явлении электромагнитной индукции. Источником механической энергии (приводным двигателем) генераторов систем электропитания обычно являются двигатели внутреннего сгорания.

Электромеханические устройства, осуществляющие взаимное преобразование механической и электрической энергии, называются **электрическими машинами** [1, 2].

**Электромашинным генератором** называется электрическая машина, предназначенная для преобразования механической энергии в электрическую. Электрическая машина, предназначенная для обратного преобразования, называется **электрическим двигателем**.

В основе принципа действия электрических машин лежат одинаковые физические законы и явления:

1. Если проводник перемещать в магнитном поле, то в нем будет наводиться ЭДС  $E$ , величина которой, согласно формулировке закона электромагнитной индукции Фарадея, прямо пропорциональна плотности поля (индукции  $B$ ), активной длине проводника в поле  $l$  и скорости перемещения проводника  $v$ :

$$E \text{ [В]} = B \text{ [Тл]} v \text{ [м/с]} l \text{ [м]}.$$

Для определения направления ЭДС следует воспользоваться правилом «правой руки» (рис. 6.3, *а*).

2. Проводник с током, помещенный в магнитное поле, будет выталкиваться с электромагнитной силой  $F_{\text{эм}}$ , величина которой согласно закону Ампера прямо пропорциональна индукции  $B$ , току  $I$  и активной длине проводника  $l$ :

$$F_{\text{эм}} \text{ [Н]} = B \text{ [Тл]} l \text{ [м]} I \text{ [А]}.$$

Направление силы  $F_{\text{эм}}$  можно определить по правилу «левой руки» (рис. 6.3, *б*).

Электромагнитная сила направлена противоположно движению проводника и является тормозящей по отношению к движущей силе  $F$ .

Указанные явления существуют одновременно. Так, в движимом электромагнитной силой  $F_{\text{эм}}$  проводнике с током индуцируется ЭДС. Если проводник перемещается в магнитном поле с целью генерирования в нем ЭДС, то ток, возникающий при замыкании цепи проводника, обуславливает электромагнитную силу, препятствующую движению.

По *характеру ЭДС* генераторов и *роду питания* двигателей электрические машины подразделяются на машины *постоянного* и *переменного* тока.

По *мощности* электрические машины подразделяются на микромашины (мощность от долей ватта до 500 вт), машины малой мощности (0,5...10 кВт), машины средней мощности (от 10 до нескольких сотен киловатт) и машины большой мощности (свыше нескольких сотен киловатт).

Стационарная (неподвижная) часть машины называется *статором*, а подвижная – *ротором*. При этом не имеет значения, что перемещается – магнитное поле или проводники, важно иметь их относительное перемещение. Отсюда вытекает многообразие конструктивных исполнений электрических машин. Магнитное поле может создаваться частью машины, расположенной как на статоре, так и на роторе. Конструктивно большинство электрических машин построено на принципе вращательного движения ротора.

На рис. 6.4, *а*, *б* магнитное поле создается полюсами  $N - S$ , расположенными на статоре, и является стационарным. Внутри этого поля вращаются проводники  $I$ , расположенные в пазах *ротора*.

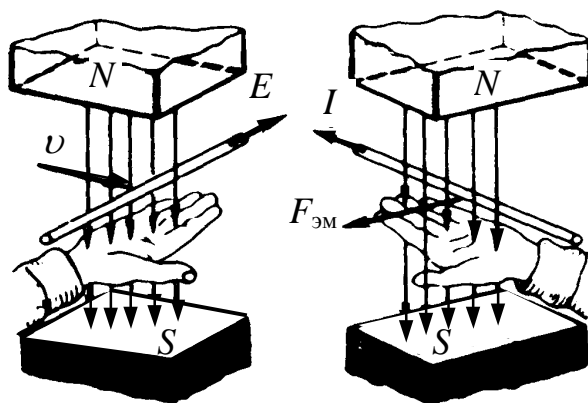


Рис. 6.3 – Определение направления ЭДС и электромагнитной силы:  
*а* – правило правой руки;  
*б* – правило левой руки

На рис. 6.4, *а* концы витка *1* присоединены к двум контактными *кольцам*, с которыми в процессе вращения взаимодействуют *щетки 3*, соединяющие проводники с внешней цепью. При вращении витка кольца вращаются вместе с витком, а щетки неподвижны. Если ротор привести во вращение, то в проводниках обмотки ротора будет индуцироваться переменная ЭДС. Следовательно, рассмотренная машина является *генератором переменного тока*.

На рис. 6.4, *б* концы витка *1* присоединяются к двум контактными *полукольцам (сегментам) 2*, называемым *коллекторными пластинами*, с которыми в процессе вращения взаимодействуют *щетки 3*, соединяющие проводники с внешней цепью. При вращении витка коллекторные пластины вращаются вместе с витком, а щетки неподвижны. Так выполняются машины постоянного тока. Если ротор привести во вращение, то в проводниках обмотки ротора будет индуцироваться постоянная пульсирующая ЭДС, т.е. получим *генератор постоянного тока*.

Следует отметить, что *коллектор* – механический преобразователь частоты или фаз – могут иметь и машины переменного тока. Поэтому существует деление машин на *коллекторные* и *бесколлекторные*.

Если в электромашине на рис. 6.4, *в* ротором будет создано вращающееся магнитное поле, то в проводниках, расположенных на статоре, также будет индуцироваться переменная ЭДС. Поэтому данная машина также является *генератором переменного тока*.

Реальные конструкции выглядят значительно сложнее, чем представлено на рис. 6.4, иллюстрирующем принципы действия электромашиных генераторов. Число пазов с обмотками достигает нескольких десятков, увеличива-

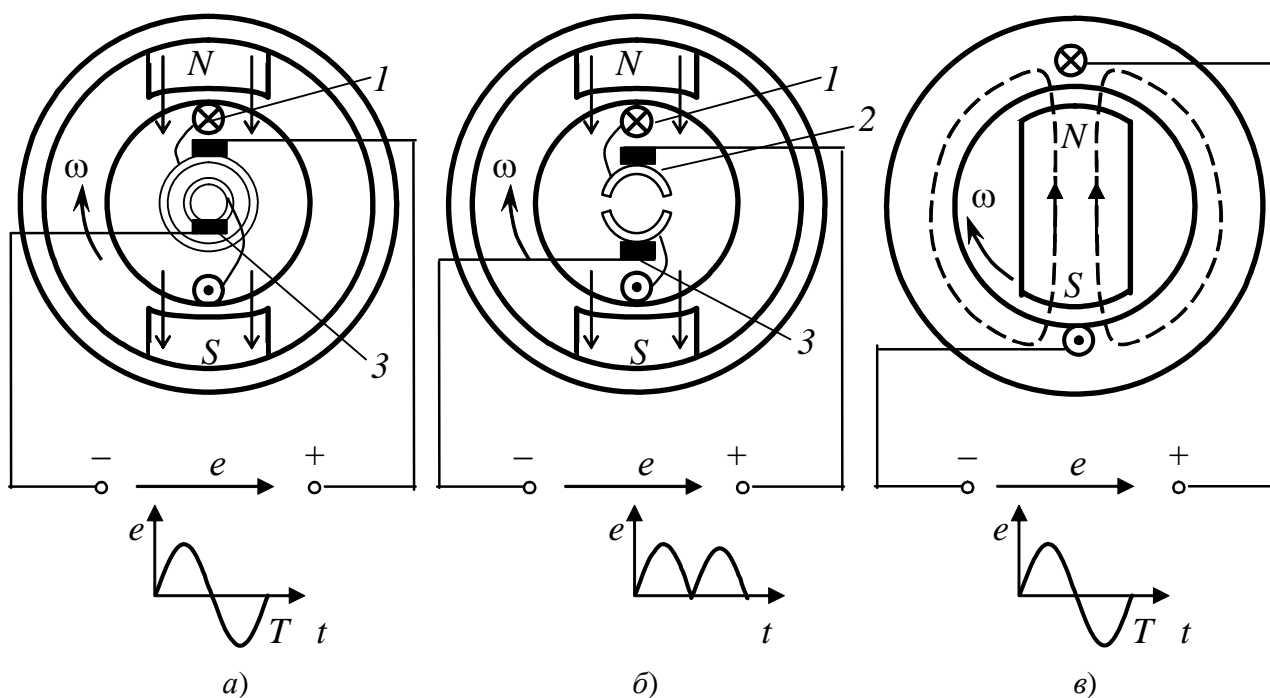


Рис. 6.4 – Принципы действия электромашиных генераторов

ется число пар полюсов  $N - S$ , полукольца на рис. 6.4, б превращаются в **коллектор** из множества пластин, по паре на каждую секцию обмотки якоря и т.д. Магнитное поле может создаваться электромагнитным путем – обмоткой возбуждения (ОВ).

Частота ЭДС генераторов переменного тока определяется скоростью вращения ротора  $n$  и числом пар полюсов ( $N - S$ ) магнитного поля  $p$ :

$$f[\text{Гц}] = \frac{n[\text{об/мин}]p}{60}.$$

Рассмотренные явления в модели электрической машины позволяют сделать следующие выводы [6]:

1. Для любой электрической машины является обязательным **наличие электропроводящей среды** (проводников обмоток) **и магнитного поля**, имеющих **возможность взаимного (относительного) перемещения**.

2. При работе электрической машины как в режиме генератора, так и в режиме двигателя наблюдается **одновременное индуцирование ЭДС** в проводнике, пересекающем магнитное поле, и **возникновение силы**, действующей на проводник в магнитном поле, при протекании по нему тока.

3. Взаимное преобразование механической и электрической энергий в электрической машине может происходить в любом направлении, то есть одна и та же электрическая машина может быть как генератором, так и двигателем. Это свойство ЭМ называют **обратимостью**.

Исходя из вышесказанного, можно выделить два способа создания ЭДС в электромашинных генераторах – путем перемещения проводников в неподвижном магнитном поле и перемещения магнитного поля относительно неподвижных проводников – и три основных типа генераторов:

– **генераторы переменного тока** (см. рис. 6.4, а) и **постоянного тока** (ГПТ) (см. рис. 6.4, б) – ЭДС индуцируется в проводниках, расположенных на роторе, вращающемся в неподвижном магнитном поле статора (создаваемым постоянным магнитом или электромагнитом);

– **генераторы переменного тока** – ЭДС индуцируется в проводниках, расположенных на статоре, вращающемся во вращающемся магнитном поле ротора (создаваемом постоянным магнитом или электромагнитом) (см. рис. 6.4, в).

Поскольку величина ЭДС электромашинных генераторов пропорциональна скорости, то, помимо своего непосредственного назначения, связанного с генерацией электрической энергии, генераторы могут применяться в качестве датчиков скорости – тахометров.

О свойствах генератора принято судить по его характеристикам. Основными характеристикам генераторов являются:

– характеристика холостого хода;

- внешняя характеристика;
- регулировочная характеристика.

Эксплуатационные характеристики генератора зависят от схемы его включения и способа электропитания ОВ.

Различают два способа электропитания ОВ:

– независимое – для электропитания ОВ используется отдельный источник электроэнергии;

– самовозбуждение – специальный источник электроэнергии для электропитания ОВ отсутствует.

Различают включение генераторов по схемам независимого, параллельного и смешанного возбуждения.

## 6.6 Электромашинные генераторы постоянного тока

### 6.6.1 ГПТ независимого возбуждения

В ГПТ независимого возбуждения (ГПТ НВ) ОВ питается от постороннего источника электропитания и электрически не связана с обмоткой якоря (рис. 6.5, а). Последовательно с ОВ включают регулировочный реостат  $R_B$ , с помощью которого изменяют ток возбуждения  $I_B$ , магнитный поток возбуждения  $\Phi_B$ , а следовательно, ЭДС  $E$  и выходное напряжение генератора  $U$ .

*Характеристикой холостого хода* называется зависимость ЭДС генератора  $E_0$  от тока возбуждения  $I_B$  при постоянной и номинальной частоте вращения  $n$  и отсутствии тока в якоре, т.е. при отключенной нагрузке  $R_H$ :

$$E_0 = f(I_B) \text{ при } n = n_{\text{ном}} = \text{const}; I = 0.$$

При увеличении тока  $I_B$ , пока магнитная система машины не насыщена (участок 1 характеристики), ЭДС  $E_0$  растет пропорционально току  $I_B$ , затем по мере насыщения магнитной цепи рост  $E_0$  замедляется и при полном магнитном насыщении почти совсем прекращается. При уменьшении тока возбуждения процесс протекает в обратном направлении, т.е. ЭДС уменьшается, однако величина ее, соответствующая любому току возбуждения, при этом будет больше, чем при увеличении тока возбуждения (нисходящая кривая 2 лежит выше восходящей 1). Последнее объясняется наличием остаточного магнетизма (гистерезиса). Этим же явлением объясняется и то, что при  $I_B = 0$  ЭДС якоря равна не нулю, а некоторой величине  $E_{\text{ост}}$ , наведенной магнитным потоком остаточного магнетизма. В качестве расчетной характеристики холостого хода обычно принимается средняя между восходящей и нисходящей ветвями кривая (кривая 3 на рис. 6,5, б).

По характеристике холостого хода определяются номинальные значения тока возбуждения  $I_{\text{в ном}}$  и ЭДС холостого хода  $E_{0 \text{ ном}}$  (в точке перегиба характеристики холостого хода).

**Внешней характеристикой** называется зависимость напряжения на зажимах генератора  $U$  от тока нагрузки (тока якоря)  $I$  при постоянных и номинальных токе возбуждения  $I_{\text{в}}$  и частоте вращения  $n$  (рис. 6.5, в):

$$U = f(I) \text{ при } I_{\text{в}} = I_{\text{в ном}} = \text{const}; n = n_{\text{ном}} = \text{const}.$$

Характеристика называется внешней потому, что она характеризует зависимость «внешних» величин:  $U$  от  $I$ . Она является одной из важнейших характеристик, определяющих эксплуатационные свойства генератора.

При подключении на зажимы якоря нагрузки  $R_{\text{н}}$  в цепи якоря возникает ток  $I$ . При этом напряжение  $U$  на выходе генератора становится меньше ЭДС

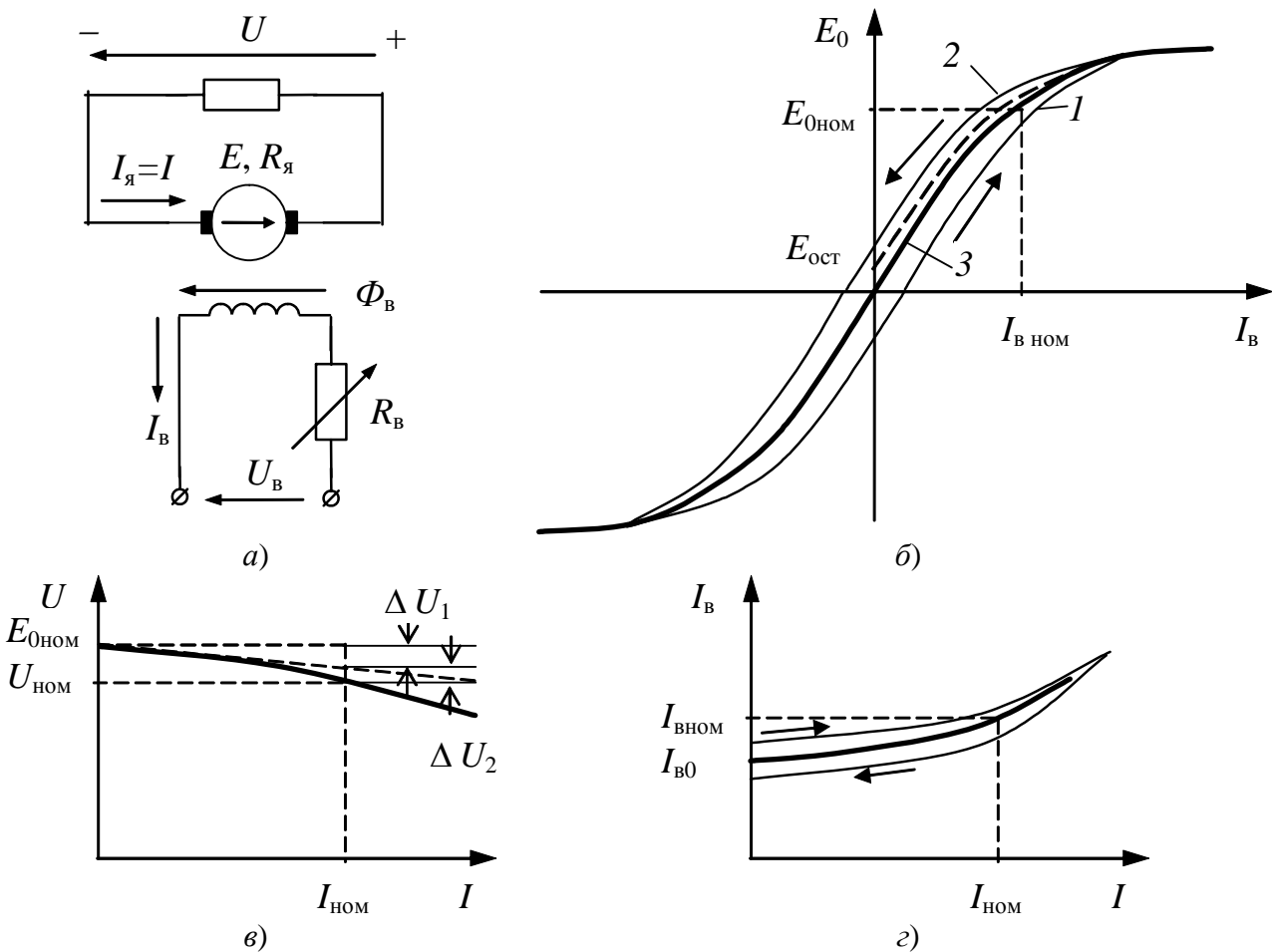


Рис. 6.5 – Генератор постоянного тока независимого возбуждения:  
 а – схема включения; б – характеристика холостого хода;  
 в – внешняя характеристика; г – регулировочная характеристика

холостого хода. При увеличении тока нагрузки  $I$  (что происходит при уменьшении  $R_n$ ) повышается падение напряжения на внутреннем сопротивлении цепи якоря, что приводит к снижению напряжения генератора  $U$ . Однако это не единственная причина уменьшения напряжения генератора.

При работе генератора под нагрузкой по обмотке якоря протекает ток, создающий свое магнитное поле. Явление воздействия магнитного потока обмотки якоря на основной магнитный поток возбуждения называется **реакцией якоря**. В результате взаимодействия двух магнитных потоков под одной половиной полюса магнитный поток ослабляется, а под другой – усиливается. Вследствие насыщения магнитной системы машины ослабление больше, чем усиление, что приводит к снижению потока  $\Phi_v$  машины и ЭДС  $E$  обмотки якоря, а следовательно, и к уменьшению напряжения  $U$  на его зажимах. С увеличением тока якоря  $I$  размагничивающее действие реакции якоря возрастает.

Таким образом, причиной уменьшения напряжения на зажимах генератора является:

– во-первых, падение напряжения на внутреннем сопротивлении цепи якоря  $\Delta U_1 = I \sum R_{я}$ ;

– во-вторых, размагничивающее действие реакции якоря  $\Delta U_2 = \Delta E_{р\text{я}}$ .

Таким образом:

$$U = E_{0\text{ном}} - \Delta U_1 - \Delta U_2 = IR_n.$$

Напряжение  $U_{\text{ном}}$ , соответствующее номинальному току нагрузки  $I_{\text{ном}}$ , называется **номинальным напряжением генератора**.

Изменение напряжения генератора  $\Delta U_{\text{ном}}$  при изменении нагрузки от холостого хода до номинальной обычно выражается в процентах от  $U_{\text{ном}}$ :

$$\Delta U_{\text{ном}} = \frac{E_{0\text{ном}} - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} 100.$$

У генераторов независимого возбуждения  $\Delta U_{\text{ном}} < 10\%$ . Небольшая величина изменения напряжения – достоинство генератора независимого возбуждения.

**Регулировочной характеристикой** генератора называется зависимость тока возбуждения  $I_v$  от тока нагрузки  $I$  при постоянном напряжении генератора  $U$  и постоянной частоте вращения  $n$  (рис. 6.5, з):

$$I_v = f(I) \text{ при } U = U_{\text{ном}} = \text{const}; n = \text{const}.$$

Так как цепи возбуждения и якоря генератора независимого возбуждения электрически не связаны, то, строго говоря,  $I_v$  не зависит от  $I$ . Зависимость  $I_v = f(I)$  не нужно понимать буквально. Регулировочная характеристика показывает, как нужно изменять ток возбуждения для того, чтобы при из-



менении тока нагрузки напряжение на зажимах генератора оставалось неизменным, равным номинальному. Потребность в поддержании постоянным напряжения генератора при изменяющемся токе нагрузки возникает на практике очень часто. В этих случаях знание регулировочной характеристики необходимо.

Внешняя характеристика показывает, что напряжение генератора с ростом нагрузки уменьшается. Величина ЭДС генератора, а следовательно, и напряжение на выходе генератора могут изменяться двумя способами: изменением магнитного потока возбуждения или изменением частоты вращения  $n$ . На практике чаще используется первый способ.

Единственным (при  $n = \text{const}$ ) способом поддержания напряжения постоянным является увеличение тока возбуждения. При этом повышается поток  $\Phi_{\text{в}}$ , а следовательно, и ЭДС  $E_0$ . Таким образом, увеличивая ток  $I_{\text{в}}$ , можно скомпенсировать падение напряжения на внутреннем сопротивлении цепи якоря  $\Delta U_1$ , уменьшение потока  $\Phi_{\text{в}}$  за счет реакции якоря  $\Delta U_2$  и поддерживать напряжение  $U$  генератора постоянным.

На то, каким образом нужно изменять  $I_{\text{в}}$ , и указывает регулировочная характеристика.

Основной недостаток генераторов независимого возбуждения, несколько ограничивающий их применение, – необходимость в постороннем источнике постоянного тока.

### 6.6.2 ГПТ параллельного возбуждения

В генераторе параллельного возбуждения ОВ включена параллельно обмотке якоря (рис. 6.6, а). Для питания обмотки возбуждения этого генератора не требуется постороннего источника питания.

Напряжение на ОВ подается с зажимов якоря того же генератора. Ток в ОВ равен:

$$I_{\text{в}} = U / R_{\text{в}} .$$

Работа генератора основана на принципе самовозбуждения.

**Принцип самовозбуждения** заключается в том, что магнитная система генератора, будучи однажды намагниченной, сохраняет небольшой магнитный поток, за счет остаточного магнетизма  $\Phi_{\text{ост}}$ . При вращении якоря этот поток наводит в обмотке якоря небольшую ЭДС  $E_{\text{ост}}$ , под действием которой в цепи возбуждения возникает небольшой ток  $I_{\text{в}}$ . Если МДС возбуждения создаст поток, направленный согласно с потоком  $\Phi_{\text{ост}}$ , то произойдет увеличение магнитного потока машины. Это, в свою очередь, приведет к дальнейшему повышению ЭДС генератора, а следовательно, и тока возбуждения и т.д. Процесс постепенного нарастания ЭДС продолжается до тех пор, пока

напряжение генератора не достигнет вполне определенной величины, зависящей от параметров генератора.

Процесс самовозбуждения иллюстрирует рис. 6.6, б, где 1 – характеристика холостого хода; 2 – вольтамперная характеристика цепи возбуждения  $E_0 = I_B R_B$ . Будем считать, что самовозбуждение происходит при холостом ходе.

Сопротивление цепи возбуждения, при котором углы наклона вольтамперной характеристики и начальной части характеристики холостого хода к оси абсцисс одинаковы, называется *критическим*  $R_{кр}$  (вольтамперная характеристика при  $R_B = R_{кр}$  на рис. 6.6, б – прямая 3).

Пересечение характеристик ( $R_B < R_{кр}$ ) свидетельствует о возможности самовозбуждения генератора. В данном случае ток в цепи возбуждения  $I_B$  будет увеличиваться, что вызовет увеличение  $E_0$ , а следовательно, и  $I_B$ . Это будет происходить до тех пор, пока характеристика холостого хода не пересечется с вольтамперной характеристикой (точка А). В точке А процесс самовозбуждения закончится, а значения ЭДС и тока возбуждения будут равны некоторым установившимся значениям  $I_{B\text{уст}}$ ,  $E_{0\text{уст}}$ . Номинальное значение сопротивления возбуждения равно:

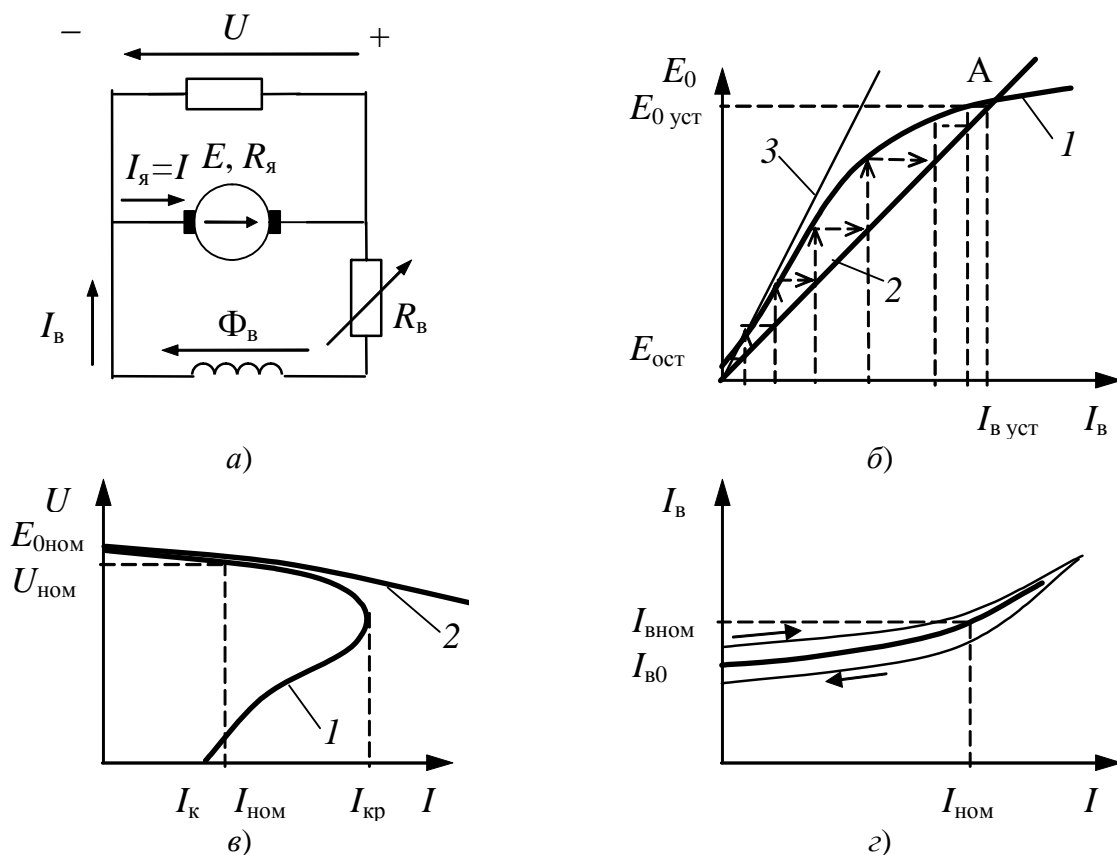


Рис. 6.6 – Генератор постоянного тока параллельного возбуждения:  
 а – схема включения; б – характеристика холостого хода;  
 в – внешняя характеристика; г – регулировочная характеристика

$$R_{B \text{ ном}} = \frac{E_{0 \text{ ном}}}{I_{B \text{ ном}}} .$$

Величина ЭДС  $E_0$ , до которой самовозбудится генератор, зависит от угла наклона вольт-амперной характеристики, то есть от сопротивления цепи возбуждения  $R_B$ . Чем больше сопротивление  $R_B$ , тем меньше ЭДС  $E_0$ , до которой самовозбуждается генератор. При некотором сопротивлении, большем критического, генератор вообще не самовозбуждается.

Как следует из сказанного, самовозбуждение генератора с параллельным возбуждением возможно лишь при соблюдении следующих условий:

- 1) магнитная цепь машины должна иметь поток остаточного магнетизма;
- 2) магнитный поток, создаваемый ОВ, должен быть направлен *согласно* с потоком остаточного, магнетизма;
- 3) электрическое сопротивление цепи возбуждения должно быть меньше критического.

**Внешняя характеристика** генератора параллельного возбуждения (рис. 6.6, в, кривая 1) идет ниже, чем внешняя характеристика генератора независимого возбуждения (кривая 2). Увеличение тока нагрузки у генератора параллельного возбуждения сопровождается более резким падением выходного напряжения.

Объясняется это тем, что в генераторе параллельного возбуждения ток возбуждения  $I_B$  при увеличении нагрузки не остается неизменным, как имело место в генераторе независимого возбуждения, а уменьшается из-за снижения напряжения (за счет падения напряжения на внутреннем сопротивлении цепи якоря и размагничивающего влияния реакции якоря). Уменьшение тока  $I_B$  вызывает снижение магнитного потока  $\Phi_B$ , а следовательно, и ЭДС генератора. Таким образом, в генераторе параллельного возбуждения уменьшение выходного напряжения при увеличении тока нагрузки происходит за счет:

- падения напряжения на внутреннем сопротивлении якоря;
- размагничивающего действия реакции якоря;
- уменьшения тока возбуждения.

Этими же факторами объясняется и то, что при постепенном уменьшении сопротивления нагрузки ток нагрузки увеличивается лишь до критического значения  $I_{кр}$ , а затем начинает уменьшаться. Реакция якоря и уменьшение тока в обмотке возбуждения приводят машину к такому состоянию, при котором даже небольшое уменьшение сопротивления нагрузки сопровождается значительным понижением ЭДС. В итоге ЭДС начинает уменьшаться быстрее, чем сопротивление нагрузки, и ток в цепи генератора падает.

Номинальное изменение напряжения  $U_{\text{ном}}$  у генератора параллельного возбуждения больше, чем у генератора независимого возбуждения, и составляет 15–30% номинального напряжения.

**Регулировочная характеристика** снимается при  $U = \text{const}$ . В данном случае третий фактор падения напряжения не проявляется, а поэтому регулировочные характеристики генераторов параллельного и независимого возбуждения одинаковы.

### 6.6.3 Генератор последовательного возбуждения

У ГПТ последовательного возбуждения ток возбуждения равен току якоря (току нагрузки), поэтому его свойства определяются лишь внешней характеристикой (рис. 6.7).

При разомкнутой цепи якоря ЭДС генератора равна остаточной. С появлением тока выходное напряжение растет до некоторого значения  $U_{\text{кр}}$ , обусловленного магнитным насыщением машины. При дальнейшем увеличении тока нагрузки напряжение на выходе ГПТ уменьшается, так как основной магнитный поток вследствие насыщения почти не увеличивается, а падение напряжения в цепи якоря и размагничивающее действие реакции якоря продолжают возрастать. В результате внешняя характеристика при  $I_{\text{кр}} > I_{\text{кр}}$  становится падающей.

Как видно из графика внешней характеристики, напряжение на выходе генератора значительно изменяется при изменении тока нагрузки. Это обстоятельство ограничивает применение генераторов последовательного возбуждения.

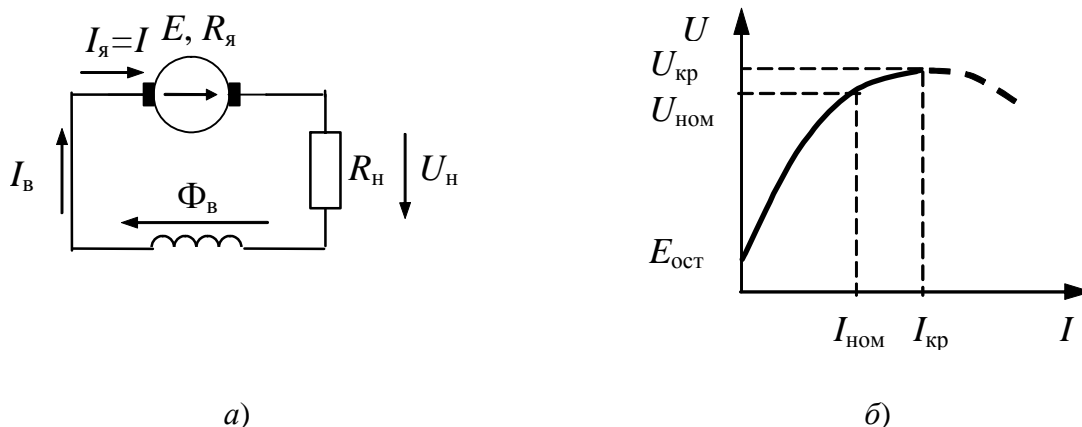


Рис. 6.7 – Генератор постоянного тока последовательного возбуждения:  
а – схема включения; б – внешняя характеристика

### 6.6.4 Генератор смешанного возбуждения

В ГПТ смешанного возбуждения магнитный поток создается параллельной (80–85 %) и последовательной (15–20 %) ОВ (рис. 6.8, *а*). Наличие двух ОВ при их согласном включении позволяет получить почти не меняющееся напряжение на выходе генератора при изменении нагрузки. Так, если ГПТ работает в режиме холостого хода, то магнитный поток создается только параллельной ОВ; с появлением нагрузки возникает магнитный поток от последовательной ОВ, который подмагничивает машину, компенсируя при этом размагничивающее действие реакции якоря и падение напряжения в цепи якоря. Таким образом, внешняя характеристика ГПТ становится жесткой (рис. 6.8, *б*, кривая 2).

Увеличивая число витков последовательной ОВ, можно добиться компенсации падения напряжения не только на внутреннем сопротивлении генератора, но и в проводах линии, соединяющей ГПТ с нагрузкой. Внешняя характеристика при этом соответствует кривой 1.

При встречном включении ОВ выходное напряжение резко уменьшается с ростом тока (кривая 3), что объясняется размагничивающим действием последовательной ОВ, МДС которой направлена против МДС, параллельной ОВ. ГПТ смешанного возбуждения с согласным включением ОВ применяют для питания силовой нагрузки в случаях, когда требуется постоянство напряжения в линии.

### 6.7 Электромашинные генераторы переменного тока

В большинстве случаев для электропитания РЭС применяются *синхронные* электромашинные генераторы переменного тока с неподвижной рабочей обмоткой переменного тока (обмоткой якоря) и вращающейся ОВ, так как в данном случае:

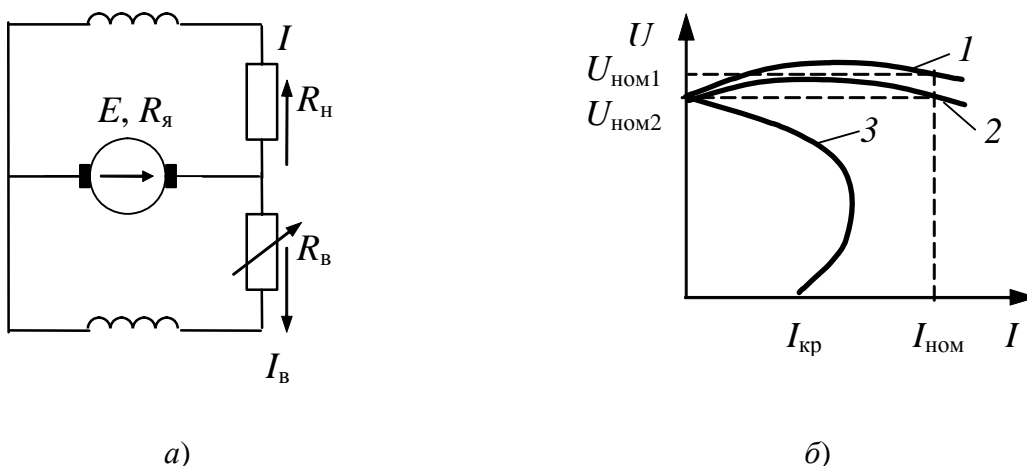


Рис. 6.8 – Генератор постоянного тока смешанного возбуждения:  
*а* – схема включения; *б* – внешняя характеристика

- увеличивается эксплуатационная надежность изоляции;
- упрощается соединение рабочей обмотки с нагрузкой;
- уменьшаются потери мощности и повышается коэффициент полезного действия генератора.

Простейший трехфазный генератор имеет три одинаковые и сдвинутые друг относительно друга в пространстве на 120 градусов обмотки, которые называются фазными обмотками генератора (рис. 6.9, *а*). Начала фазных обмоток (начала фаз) обозначаются буквами *A*, *B*, *C*, концы фазных обмоток (концы фаз) – буквами *X*, *Y*, *Z*. ОВ соединяется с источником электроэнергии постоянного тока посредством двух контактных колец и прилегающих к ним щеток. Мгновенные значения ЭДС трехфазного генератора графически выражаются в виде трех синусоид, сдвинутых друг относительно друга по фазе на 120 градусов (рис. 6.9, *б*, *в*). За положительное направление ЭДС принимается направление от концов фаз генератора к их началам.

**Типы трехфазных систем.** Каждая фаза генератора содержит источник электроэнергии и может быть самостоятельно подключена на нагрузку (рис. 6.10, *а*). Такая трехфазная система является **шестипроводной**. Если нагрузки фаз одинаковы по величине и характеру, то нагрузка называется **симметричной**, иначе – **несимметричной**. Симметричной нагрузкой для трехфазного генератора является трехфазная нагрузка: трехфазные электродвигатели, трансформаторы, электрические печи. Несимметричными нагрузками являются нагрузка освещения, РЭС, электроприемники бытового назначения.

Шестипроводную трехфазную систему можно заменить **четырепроводной**, если концы фаз генератора и концы фаз нагрузок соединить в отдельные узлы, которые называются **нейтральными**, или **нулевыми**, точками,

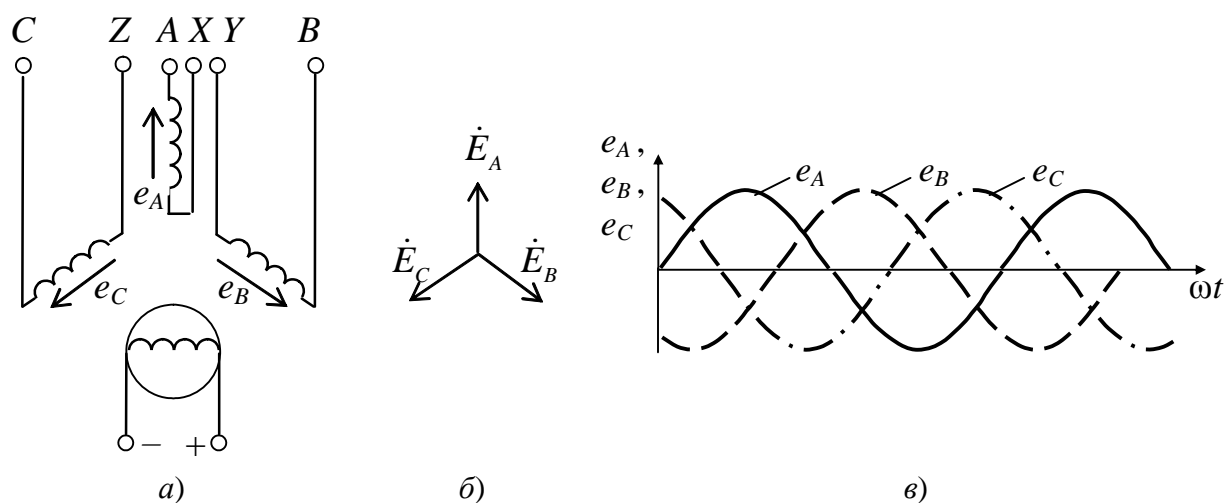


Рис. 6.9 – Трехфазный синхронный генератор с независимым возбуждением (*а*), векторная (*б*) и временные (*в*) диаграммы ЭДС

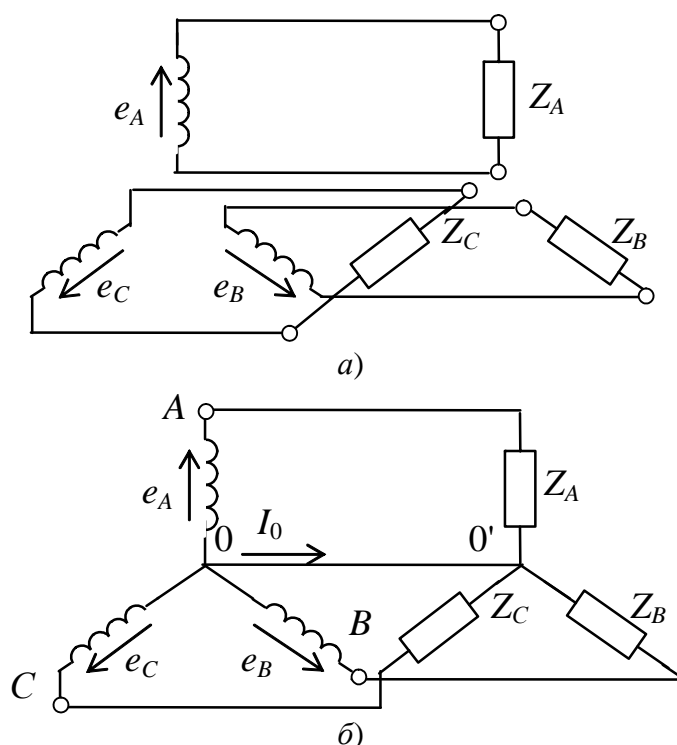


Рис. 6.10 – Шестипроводная (а) и четырехпроводная (б) трехфазные системы

а провод, соединяющий между собой эти точки, называется **нейтральным (нулевым) проводом** (рис. 6.10, б). Такое соединение называется **соединением звездой с нулевым проводом** и обозначается  $Y_0$ .

При соединении фазных нагрузок звездой ток в нулевом проводе равен сумме фазных токов. При симметричной нагрузке ток в нулевом проводе равен нулю, поэтому четырехпроводная сеть заменяется **трехпроводной**.

Трехпроводную трехфазную систему можно получить и при соединении фазных обмоток генератора треугольником, однако для генераторов данное соединение применяется крайне редко.

Несимметричная нагрузка включается в трехфазную сеть звездой с нулевым проводом. Ток в нулевом проводе не равен нулю.

**Схемы включения.** Так же как и для ГПТ, различаются схемы включения синхронных генераторов с независимым возбуждением и с самовозбуждением (рис. 6.11)

**Эксплуатационные характеристики.** В отличие от ГПТ, вид внешней и регулировочной характеристик генератора переменного тока зависит от характера нагрузки (активная  $R$ , емкостная  $C$  или индуктивная  $L$ ) (рис. 6.12).

**Внешняя характеристика.** При активной нагрузке уменьшение тока нагрузки сопровождается ростом выходного напряжения, что объясняется

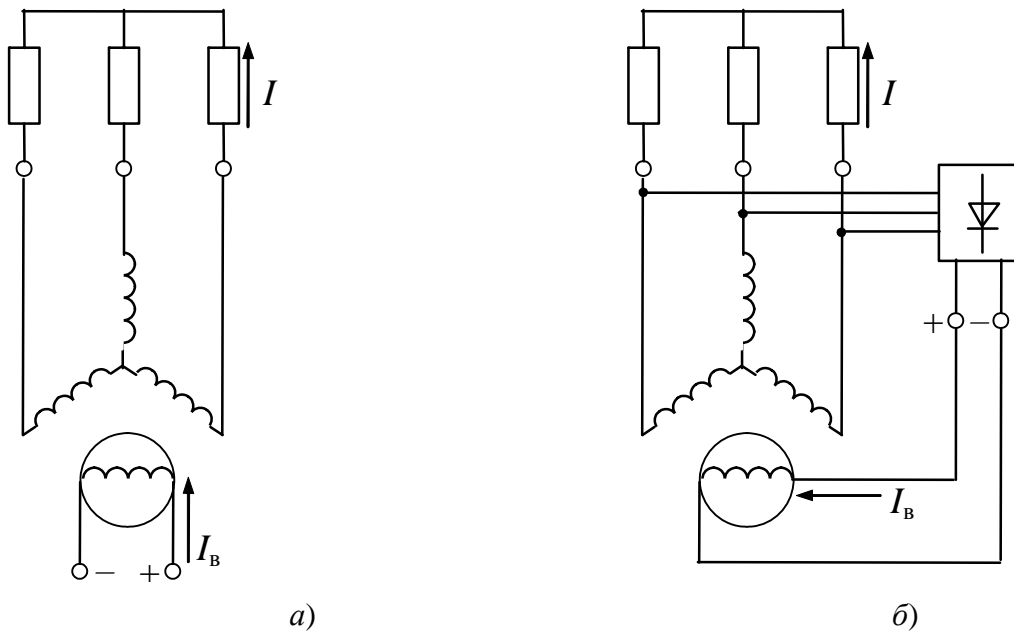


Рис. 6.11 – Синхронный генератор с независимым возбуждением (а) и с самовозбуждением (б)

уменьшением падения напряжения в обмотке статора и ослаблением размагничивающего действия реакции якоря. При *индуктивной* нагрузке увеличение напряжения более интенсивно, так как с уменьшением тока нагрузки ослабляется размагничивающее действие реакции якоря. Однако в случае *емкостной* нагрузки уменьшение тока сопровождается уменьшением напряжения, что объясняется ослаблением подмагничивающего действия реакции якоря.

**Регулировочная характеристика.** В соответствии с характером внешней характеристики для поддержания неизменным выходного напряжения в случае активной и индуктивной нагрузки ток возбуждения следует повышать (причем при индуктивной нагрузке – в большей мере), а при емкостной нагрузке ток возбуждения необходимо понижать.

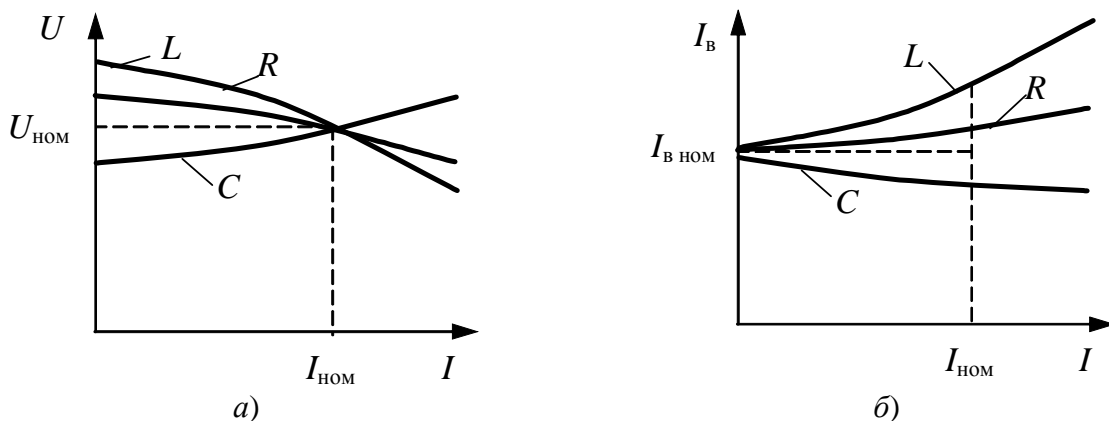


Рис. 6.12 – Внешняя (а) и регулировочная (б) характеристики синхронного генератора



## 7 ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ И ЭЛЕКТРОПРИВОДА

### 7.1 Классификация и принципы действия электрических двигателей

Функционирование ряда РЭС – радиостанций, аудиовизуальной (видеомагнитофонов, телекамер, проигрывателей компакт-дисков) и вычислительной (персональных компьютеров) техники, и т.д. – связано с необходимостью обеспечения различных движений. Это перемещение и вращение антенных систем, перемещение магнитной ленты за счет вращения видеоголовок и катушек компакт-кассет, вращение компакт-дисков; приведение в действие механизмов загрузки кассет и дисков; заправки-расправки магнитной ленты в лентопротяжный механизм и осуществление его переключений в различные режимы работы; фокусировка и отслеживание дорожки записи при считывании информации с компакт-диска, а также охлаждение элементов и устройств путем принудительного обдува воздухом (в том числе ИВЭП персональных компьютеров) и т.п. Решение этих и других задач обеспечивается различными видами электрических двигателей, для управления которыми разработано большое число микросхем – драйверов, контроллеров, схем управления.

Целью курса «Электропреобразовательные устройства РЭС» в части изучения электромашинных преобразователей электрической энергии в механическую является:

- изучение принципов действия двигателей;
- изучение основных расчетных соотношений, описывающих работу двигателей, и способов регулирования двигателей;
- изучение особенностей работы двигателей в различных режимах (номинальный, пуск, торможение, реверс) и способов их обеспечения.

Знание этих вопросов позволит в дальнейшем осуществлять качественное проектирование и квалифицированный сервис РЭС: выбирать тип двигателя, обеспечивать его электропитание и управление.

*Электрическим двигателем* называется электрическая машина, предназначенная для преобразования электрической энергии в механическую. Физические законы и явления, лежащие в основе принципа действия электрических машин, были рассмотрены в п. 6.5. Электрические двигатели переменного тока делятся на *синхронные* и *асинхронные* (несинхронные). В синхронных машинах угловая скорость ротора и угловая скорость магнитного поля статора равны друг другу. В асинхронных машинах угловая скорость ротора не равна угловой скорости магнитного поля статора.

На рис. 7.1, *а* стационарным является магнитное поле полюсов  $N - S$ , расположенных на статоре. Внутри этого поля вращаются проводники  $1$ , расположенные в пазах **ротора**. Концы витка  $1$  присоединяются к двум контактным полукольцам (сегментам)  $2$ , называемым **коллекторными пластинами**, с которыми в процессе вращения взаимодействуют **щетки**  $3$ , соединяющие проводники с внешней цепью. При вращении витка коллекторные пластины вращаются вместе с витком, а щетки неподвижны. Если обмотку ротора подключить к источнику постоянного напряжения, то ротор придет во вращение и получим двигатель.

Если в электромашине на рис. 7.1, *б* статором будет создано вращающееся магнитное поле (способы его создания будут рассмотрены в главе 9), которое увлечет за собой постоянное поле  $N - S$  ротора, то получим синхронный (ротор вращается синхронно с полем статора) двигатель.

Широко распространены электрические двигатели, принцип действия которых представлен на рис. 7.1, *в*. У них нет явно выраженных полюсов ни на статоре, ни на роторе, но, так же как и в предыдущем случае, статором создается вращающееся магнитное поле. В результате в проводниках, находящихся на роторе, индуцируется ЭДС и если они замкнуты, то по ним протекает ток, обеспечивающий крутящий момент. Ротор раскручивается, но его скорость не достигает скорости вращения поля статора, поскольку в отсутствии взаимного перемещения проводников и магнитного поля в проводниках не будет индуцироваться ЭДС, и исчезнет крутящий момент. Поскольку ротор вращается асинхронно (не одинаково) с полем статора, машину называют асинхронной.

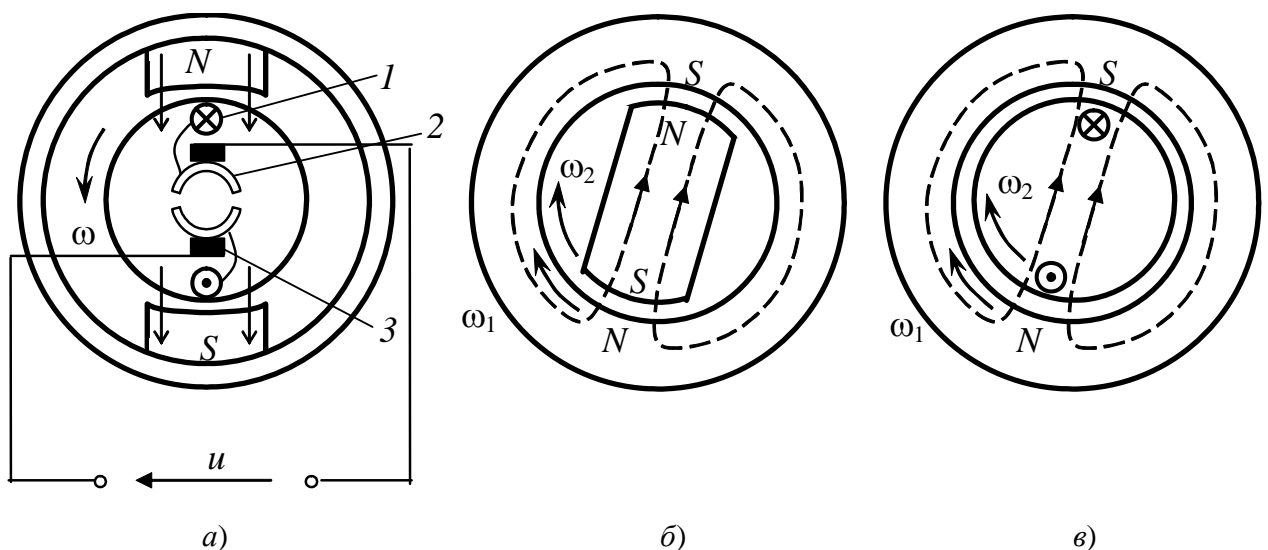


Рис. 7.1 – Принципы действия электрических двигателей

Исходя из вышесказанного, можно выделить три способа создания вращающего момента в двигателях и три основных типа двигателей:

– **двигатели постоянного тока** (ДПТ) – вращающий момент создается за счет взаимодействия проводников с током, расположенных на роторе, с неподвижным магнитным полем статора (создаваемым постоянным магнитом или электромагнитом) (см. рис. 7.1, а);

– **синхронные двигатели** (СД) переменного тока – вращающий момент создается за счет взаимодействия вращающегося магнитного поля статора (создаваемого многофазной системой переменного тока) с постоянным магнитным полем ротора (см. рис. 7.1, б);

– **асинхронные двигатели** (АД) переменного тока – вращающий момент создается за счет индуцирования вращающимся магнитным полем статора ЭДС в замкнутых проводниках ротора и последующего взаимодействия этих проводников с магнитным полем статора (см. рис. 7.1, в).

В РЭС БН нашли широкое применение бесконтактные двигатели постоянного тока и шаговые двигатели.

**Бесконтактный двигатель постоянного тока** (БДПТ) – это ДПТ, в котором щеточно-коллекторный узел заменен полупроводниковым коммутатором. Существуют два подхода к рассмотрению БДПТ – как разновидности ДПТ и как разновидности СД.

**Шаговые двигатели** (ШД) – это двигатели, в которых ротор перемещается на определенный угол-шаг. В качестве ШД могут быть использованы различные типы электрических машин: синхронные двигатели (с постоянными магнитами, реактивные двигатели, субсинхронные), асинхронные с неполной клеткой на роторе, сельсины, редуктосины и т.п. В РЭС в качестве ШД используются синхронные двигатели с постоянными магнитами.

## 7.2 Обобщенная схема электропривода

В большинстве случаев движение нагрузки (количественные показатели движения) не может быть обеспечено при помощи одного только двигателя, поскольку возникает необходимость:

– согласования мощности  $P_m$  [Вт], момента  $M_m$  [Н·м] и скорости  $\omega_m$  [рад/с] механизма с мощностью  $P_d$ , моментом  $M$  и скоростью  $\omega_d$  двигателя (в общем случае  $P_m \neq P_d$ ,  $M_m \neq M_d$ ,  $\omega_m \neq \omega_d$ );

– регулирования скорости вращения нагрузки  $\omega_m$ ;

– обеспечения стабильности скорости;

– осуществления торможения и изменения направления вращения (реверс).

В этих случаях реализуют целый комплекс, состоящий из двигателя, преобразовательных устройств и элементов систем автоматики и управления – электропривод. **Электроприводом** называется электромеханическая система,

состоящая из электродвигательного, преобразовательного, передаточного и управляющего устройств, предназначенная для приведения в движение исполнительных органов рабочей машины и управления этим движением. Традиционно электропривод рассматривается в виде обобщенной функциональной схемы (рис. 7.2), в состав которой входят электрический двигатель (ЭД), силовой преобразователь (СП), система управления (СУ), измерительная система (ИС), передаточное устройство (ПУ), источник электрической энергии (ИЭЭ) и нагрузка (Н).

Передаточное устройство обеспечивает преобразование и согласование скорости, момента и мощности двигателя и нагрузки. Основным параметром передаточного устройства является передаточное число  $i$ :

$$i = \frac{\omega_{\text{д}}}{\omega_{\text{м}}}$$

При отсутствии потерь в передаточном звене:

$$M_{\text{м}} \omega_{\text{м}} = M_{\text{с}} \omega,$$

где  $M_{\text{с}}$  – момент сопротивления – момент нагрузки, приведенный к валу двигателя, который равен:

$$M_{\text{с}} = \frac{M_{\text{м}}}{i} \text{ при отсутствии потерь в передаточном устройстве;}$$

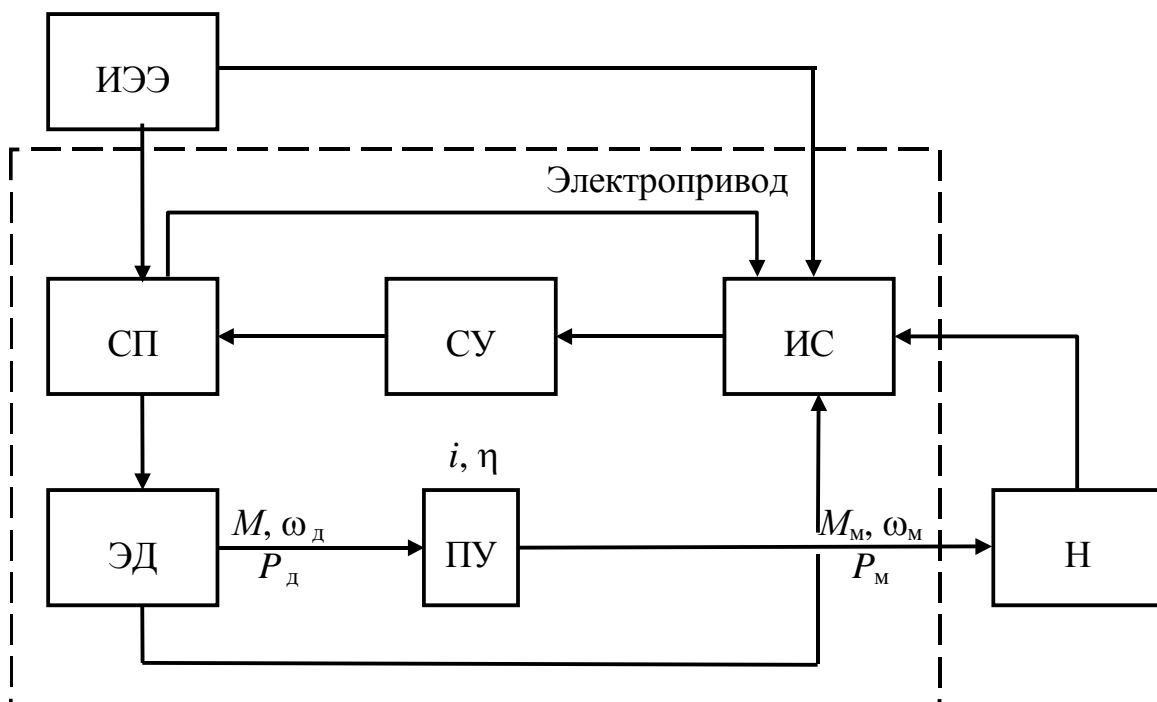


Рис. 7.2 – Обобщенная функциональная схема электропривода

$$M_c = \frac{M_m}{i\eta} \text{ при наличии потерь,}$$

где  $\eta$  – КПД передаточного устройства.

В случае передачи энергии от двигателя к нагрузке при наличии потерь выполняется равенство:

$$M_m \omega_m = \eta M_c \omega_d.$$

Если  $\omega_m = \omega_d$  и возможно непосредственное соединение двигателя и нагрузки, то передаточное устройство не используется. В этом случае говорят о **прямоприводном** двигателе.

В ряде РЭС, например, видеоманитофонах, прямоприводные двигатели применяются в электроприводах ведущего вала и блока вращающихся видеоголовок. Двигатели ведущего вала обеспечивают перемещение магнитной ленты, вращение компакт-диска и т.п. при высокой скорости вращения.

Силовой преобразователь осуществляет преобразование параметров электрической энергии (величины и полярности питающего напряжения и т.п.) для реализации управления двигателем. Схема управления обеспечивает подачу на силовой преобразователь команд управления двигателем – вращения вперед, вращения назад, останова. Измерительная система предназначена для измерения электромеханических параметров двигателя и нагрузки.

Схемная реализация конкретного электропривода определяется большим количеством факторов: требованиями к технико-экономическим показателям, типом источника электроэнергии и характером нагрузки и т.п.

### 7.3 Основные показатели и характеристики электродвигателей и электропривода

В процессе проектирования электропривода обычно требуется обеспечить совокупность технико-экономических показателей, как в статическом, так и динамическом режиме. Основные из них:

- $P_m, M_m, \omega_m$  – мощность, момент и скорость нагрузки;
- $P, M, \omega$  – мощность, момент и скорость двигателя, требуемые для обеспечения заданных  $P_m, M_m, \omega_m$  (здесь и далее для упрощения не будем использовать нижний индекс «д» для обозначения величин, относящихся к двигателю);
- $\Delta P$  [Вт],  $\eta$  – потери мощности и КПД;
- $t_{пп}$  [с] – длительность переходного процесса (пуска, торможения, изменения скорости).

Кроме этого, электропривод ведущего вала должен обеспечивать малую неравномерность скорости вращения и низкий уровень акустических шумов.

Общими требованиями к электроприводу являются небольшие габариты, масса и потребляемая мощность, высокая надежность и низкая стоимость.

Номинальные скорости и отклонения средней скорости от номинальной, так же как и напряжения питания, определяются соответствующими нормативными документами. Например:

– скорость вращения диска электропроигрывателей (ГОСТ 18631–73):

$33 \frac{1}{3}$ ; 45,11;  $16 \frac{2}{3}$ ; 77,92 об/мин;

– скорость движения ленты в бытовых катушечных магнитофонах (ГОСТ 24631–73 [14]):

19,05; 9,53; 4,76; 2,38 см/с;

– скорость движения ленты в бытовых кассетных магнитофонах (ГОСТ 24631–73 [14]):

4,76; 2,38 см/с;

– скорость вращения магнитных головок при скорости лента-головка (в знаменателе) в форматах профессиональной аналоговой видеозаписи:

$\frac{250}{41,27}$ ;  $\frac{150}{24,0}$ ;  $\frac{50}{21,29}$ ;  $\frac{25}{8,54}$  об/с;

5,75; 5,9 м/с;

– скорость вращения барабана магнитных головок при скорости лента-головка в форматах профессиональной цифровой видеозаписи:

$\frac{150}{35,6}$ ;  $\frac{100}{30,4}$ ;  $\frac{75}{19,08}$  об/с;

м/с;

– скорость вращения магнитных головок в форматах бытовой видеозаписи – 25 об/с при скорости лента-головка:

4,85; 5,83; 3,12; м/с;

– скорость воспроизведения компакт-диска: 1,4 и 1,2 м/с; от начала до конца воспроизведения скорость вращения компакт-диска изменяется от 500 до 200 об/мин.

При исследовании двигателей и электропривода удобно пользоваться статическими и динамическими характеристиками двигателей и нагрузки.

Статические характеристики представляют собой зависимость:

– скорости от момента  $\omega = f(M)$ , являющуюся механической характеристикой (МХ);

– скорости от тока  $\omega = f(I)$ , являющуюся электромеханической (скоростной) характеристикой.

Динамические характеристики представляют собой зависимости скорости, момента и тока от времени:  $\omega = f(t)$ ;  $M = f(t)$ ,  $I = f(t)$ .

Примеры статических характеристик электродвигателей представлены на рис. 7.3, 7.4. С точки зрения стабилизации скорости и ограничения тока двигателя, идеальной является характеристика 1. Ее верхний горизонтальный участок соответствует стабильной скорости двигателя при изменении момента нагрузки, а вертикальный – ограничению тока (поскольку момент пропорционален силе и току).

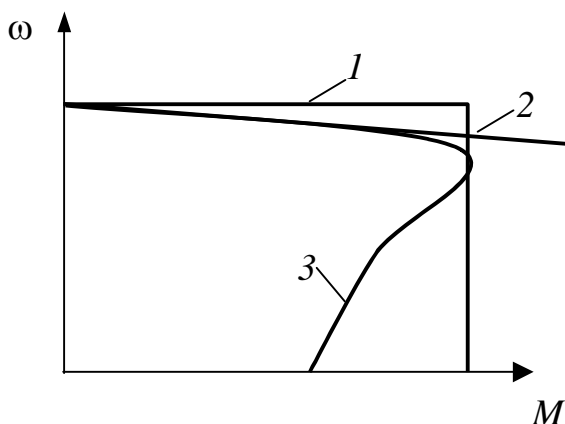


Рис. 7.3 – Механические характеристики двигателей:  
а – идеальная; б – ДПТ с независимым возбуждением; в – АД

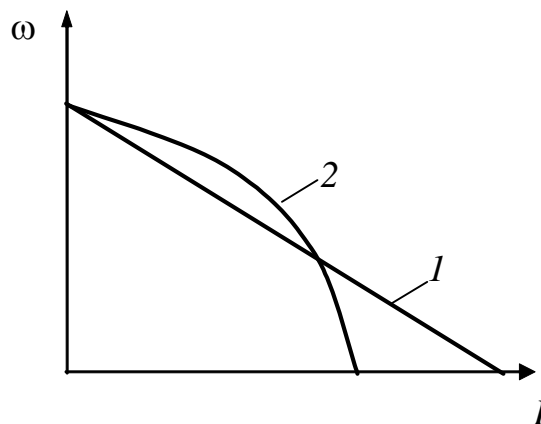


Рис. 7.4 – Электромеханические характеристики двигателей:  
а – ДПТ с независимым возбуждением; б – АД

Различают естественную и искусственные (регулируемые) характеристики [6].

**Естественной** характеристикой называют зависимость скорости вращения двигателя от момента либо тока при номинальных параметрах питающей сети, нормальной схеме включения (отсутствии добавочных сопротивлений в цепях двигателя). Так, зависимость  $\omega = f(M)$  называется естественной механической характеристикой (ЕМХ).

Все остальные характеристики двигателя, полученные при условиях, отличных от номинальных, т.е. при питании от сети с напряжением, отличным от номинального, при наличии добавочных сопротивлений или при включении по специальным схемам, называются **искусственными**. Зависимость  $\omega = f(M)$  называется искусственной механической характеристикой (ИМХ).

Каждый двигатель имеет одну единственную естественную характеристику и множество искусственных. Далее будем обозначать величины на естественной характеристике с индексом «е», а величины на искусственной характеристике – с индексом «и».

Двигатель имеет совокупность **паспортных данных**. Ими являются номинальные значения:

- питающего напряжения  $U_n$  [В] и частоты  $f_n$  [Гц] питающего напряжения для двигателей переменного тока;
- тока  $I_n$  [А];
- скорости вращения  $\omega_n$  [рад/с];
- момента  $M_n$  [Н·м];
- механической мощности на валу  $P_n$  [Вт];
- потока возбуждения  $\Phi_{вн}$  [Вб];
- КПД  $\eta_n$ .

Большинство этих значений можно определить по каталогам либо паспорту двигателя. Там же даются значения перегрузочной способности двигателя по току  $\lambda_I$  и моменту  $\lambda_M$ , характеризующие максимально допустимые значения тока и момента двигателя:

$$I_{\text{доп}} = \lambda_I I_n, M_{\text{доп}} = \lambda_M M_n.$$

На рис. 7.5 приведены статические характеристики двигателей с указанием на них характерных точек, соответствующих:

- номинальному режиму работы 1 (режим работы с номинальной нагрузкой:  $M = M_n, \omega = \omega_n$ );
- режиму идеального холостого хода 2 ( $M = 0, \omega = \omega_0$ ; реальный холостой ход:  $M = M_{\text{хх}} \approx 0, \omega \approx \omega_0$ );
- началу пуска 3 ( $\omega = 0, M = M_{\text{пуск}}; I = I_{\text{пуск}} = I_{\text{кз}}$ ).

Следует обратить внимание, что в момент пуска двигателя при  $\omega = 0$  пусковой ток больше номинального (для ДПТ с независимым возбуждением намного больше), поэтому он называется током короткого замыкания.

Статический момент нагрузок может быть постоянным, зависеть от скорости, скорости и перемещения одновременно, быть функцией времени. Примеры МХ нагрузок приведены на рис. 7.6.

Момент нагрузки типа 1 создается потенциальными силами типа сил тяжести и сил упругой деформации. Для них изменение направления перемещения не приводит к изменению знака момента. Характеристика вида 2 соответствует моменту сопротивления, создаваемому силами трения, которые всегда противодействуют движению и поэтому с изменением направления движения изменяется знак момента сопротивления. Нелинейная зависимость вида 3 характерна для вентиляторной нагрузки. Линейная зависимость 4 присуща генераторной нагрузке. Характеристика 5, для которой с увеличением момента сопротивления снижается скорость движения, имеет место в механизмах типа главных двигателей обрабатывающих станков.



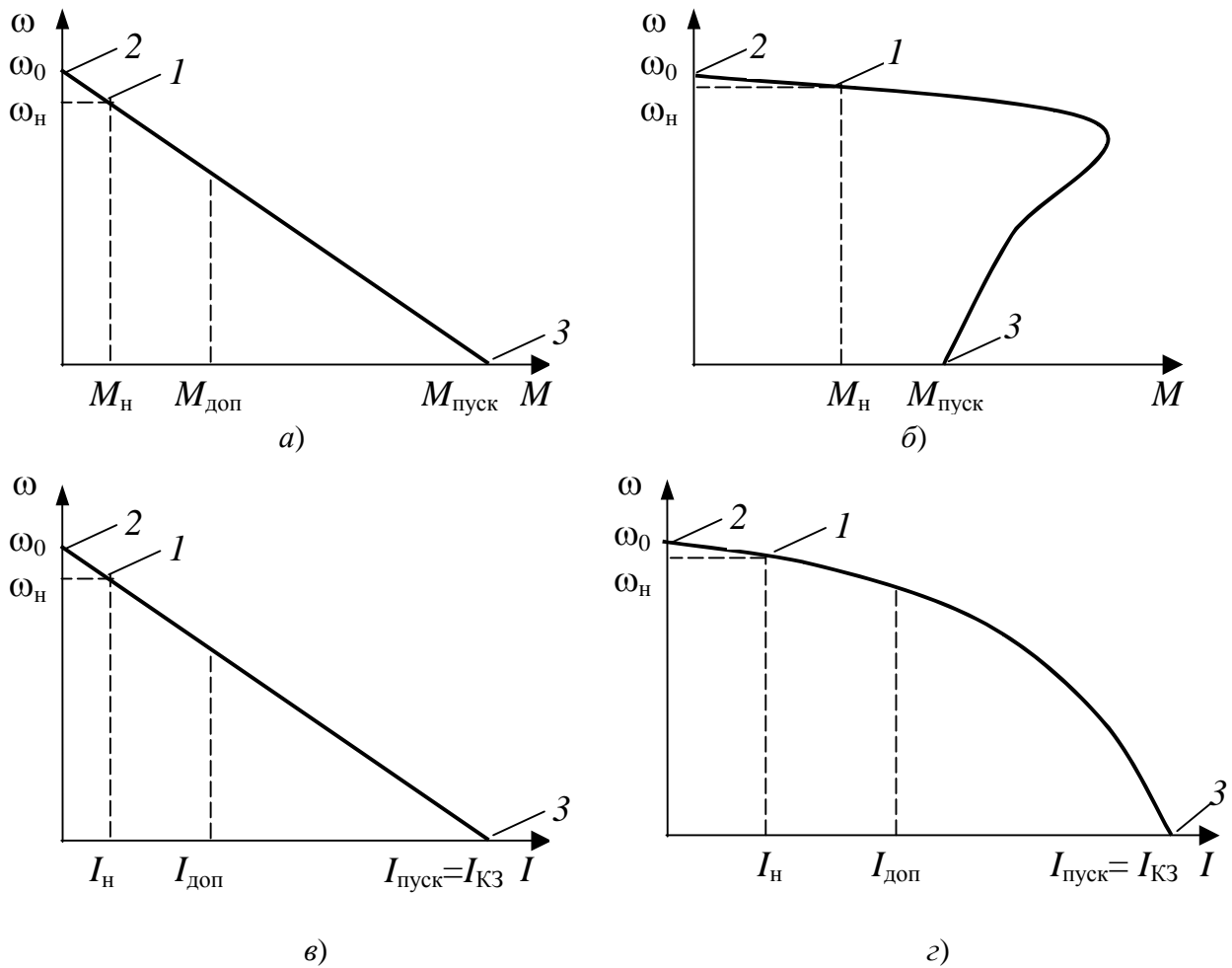


Рис. 7.5 – Статические характеристики ДПТ с независимым возбуждением (а, в) и АД (б, г)

Более сложный характер имеет нагрузка, создаваемая антенной системой. В данном случае нагрузочный момент зависит от угла поворота механизма и его положения. Такой момент называют **позиционным**. Так момент сопротивления радиолокационной антенны зависит от ее положения относительно направления ветра. В некотором диапазоне углов поворота механизма нагрузочный момент может помогать двигателю вращать антенну, а в другом – наоборот, препятствовать двигателю.

В результате операции приведения МХ нагрузок  $M_M = f(\omega_M)$  могут быть преобразованы в зависимость вида:

$$M_c = f(\omega).$$

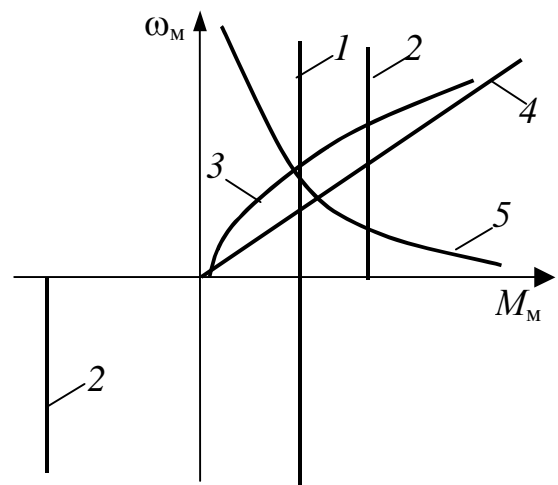


Рис. 7.6 – Механические характеристики нагрузок

## 7.4 Уравнение вращательного движения и его решение

### *Уравнение вращательного движения*

Важное место при проектировании электропривода занимает исследование установившихся и переходных процессов: приема и сброса нагрузки, изменения скорости, разгона и торможения.

Уравнение вращательного движения имеет вид:

$$M_{\text{дин}} = J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega}{2} \frac{dJ}{dt}, \quad (7.1)$$

где  $J$  – приведенный к валу двигателя момент инерции всей электромеханической системы двигатель – нагрузка, кг·м<sup>2</sup>;  $M_{\text{дин}}$  – динамический момент, Н·м.

Приведенный к валу двигателя момент инерции равен:

$$J = J_{\text{д}} + J'_{\text{м}},$$

где  $J_{\text{д}}$  – момент инерции двигателя, кг·м<sup>2</sup>;  $J'_{\text{м}} = \frac{J_{\text{м}}}{i^2 \cdot \eta}$  [кг·м<sup>2</sup>] – момент инерции механизма  $J_{\text{м}}$ , приведенный к валу двигателя.

Динамический момент является суммой момента двигателя и приведенного к валу двигателя момента нагрузки с учетом их знаков (направлений действия):

$$M_{\text{дин}} = \pm M \pm M_{\text{с}}.$$

Значение момента инерции двигателей  $J_{\text{д}}$  приводится в справочниках, а также может быть определено экспериментально. Значение момента инерции механизма  $J_{\text{м}}$  может быть рассчитано аналитически либо также может быть определено экспериментально.

Частным случаем уравнения движения при  $J = \text{const}$  является уравнение вида:

$$M_{\text{дин}} = J \frac{d\omega}{dt}.$$

Уравнение движения позволяет определить закон изменения скорости и момента, длительность переходных процессов, а также, наоборот, рассчитать момент инерции на основании экспериментально полученных данных.

### *Установившееся и неустойчивое движение*

Установившееся движение соответствует режиму работы двигателя и механизма с постоянной скоростью, т.е.  $\frac{d\omega}{dt} = 0$ . В данном случае  $M_{\text{дин}} = 0$  и  $M = M_{\text{с}}$ .

Неустановившееся движение имеет место, когда моменты двигателя и нагрузки отличаются друг от друга:

- при  $M_{\text{дин}} > 0$   $\frac{d\omega}{dt} > 0$ , следовательно, движение будет идти с ускорением;
- при  $M_{\text{дин}} < 0$   $\frac{d\omega}{dt} < 0$ , следовательно, движение будет идти с замедлением.

нием.

Введенное понятие МХ позволяет просто и удобно выполнить проверку установившегося движения. Для этого характеристики двигателя 1 и нагрузки 2, 3 совмещаются в одном квадранте (рис. 7.7). Точка их пересечения, в которой моменты двигателя и нагрузки равны, будет соответствовать установившемуся движению со скоростью  $\omega_{\text{уст}}$ .

Установившееся движение не всегда является устойчивым.

### **Устойчивость движения**

Под **устойчивостью** системы «двигатель – нагрузка» понимается свойство поддерживать движение с установившейся скоростью  $\omega_{\text{уст}}$  при возможных небольших отклонениях от нее.

С этих позиций для примера, представленного на рис. 7.7, режим работы, соответствующий точке *A*, является устойчивым, а точке *B* – неустойчивым.

Для варианта МХ АД 1 и МХ нагрузки 3, приведенного на рис. 7.7, при небольшом снижении скорости на участке МХ двигателя ниже точки *B* будет действовать отрицательный динамический момент, и скорость двигателя будет падать вплоть до остановки. При небольшом увеличении скорости на участке МХ выше точки *B* будет действовать положительный динамический момент, скорость двигателя будет расти. Процесс разгона закончится в точке *C*.

Таким образом, любой из установившихся режимов работы АД на участке МХ, обозначенном пунктиром, будет неустойчивым.

### **Решение уравнения движения**

Цель решения уравнения движения – исследование характера изменения момента и скорости двигателя во времени (временных диаграмм  $M(t)$ ,  $\omega(t)$ , тока двигателя  $I(t)$ ), длительности переходного процесса (торможения, пуска, изменения скорости)  $t_{\text{пн}}$ .

Решение уравнения движения (7.1) зависит от динамического момента. Различают три случая.

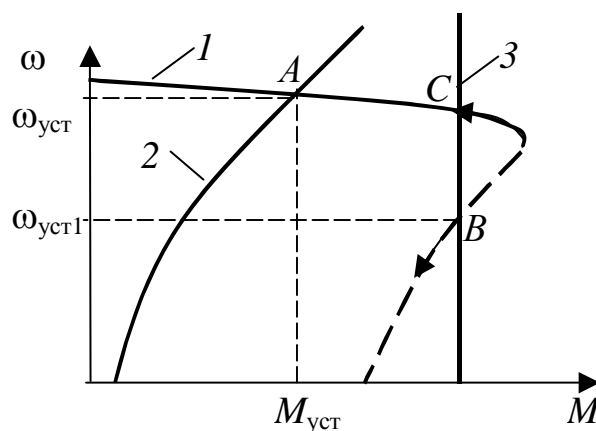


Рис. 7.7 – Механические характеристики для определения установившегося движения

1.  $M_{\text{дин}} = \text{const}$  – динамический момент постоянен.

Здесь:

$$t_{\text{пп}} = J \frac{\omega_{\text{кон}} - \omega_{\text{нач}}}{M_{\text{дин}}},$$

где  $\omega_{\text{нач}}$ ,  $\omega_{\text{кон}}$  – значение скорости в начале и конце переходного процесса.

В данном случае  $M(t)$ ,  $\omega(t)$  – линейные функции времени.

2.  $M_{\text{дин}}(\omega)$  – линейная функция скорости.

В этом случае:

$$t_{\text{пп}} = T_{\text{м}} \ln \frac{M_{\text{уст}} - M_{\text{нач}}}{M_{\text{уст}} - M_{\text{кон}}} = T_{\text{м}} \ln \frac{\omega_{\text{уст}} - \omega_{\text{нач}}}{\omega_{\text{уст}} - \omega_{\text{кон}}}, \quad (7.2)$$

где  $T_{\text{м}} = \frac{J}{\beta + \beta_{\text{с}}}$  – постоянная времени;  $\beta = \frac{\Delta M}{\Delta \omega}$ ,  $\beta_{\text{с}} = \frac{\Delta M_{\text{с}}}{\Delta \omega_{\text{с}}}$  – жесткость механических характеристик двигателя и нагрузки соответственно.

Следует отметить, что для двигателей РЭА  $T_{\text{м}} \leq 1$  с [22].

Часто можно положить  $\beta_{\text{с}} \approx 0$ , тогда:

$$T_{\text{м}} = \frac{J}{\beta}.$$

В данном случае  $M(t)$ ,  $\omega(t)$  – экспоненциальные функции времени.

Очевидно, что формулой (7.2) нельзя воспользоваться, если знаменатель обращается в нуль, то есть переходный процесс идет до конца:  $\omega_{\text{кон}} = \omega_{\text{уст}}$  или  $M_{\text{кон}} = M_{\text{уст}}$ . В этом случае  $t_{\text{пп}}$  принимается равной:

$$t_{\text{пп}} = (3...5) T_{\text{м}}.$$

3.  $M_{\text{дин}}(\omega)$  – произвольная функция.

Аналитических решений не существует, задача решается численными или графоаналитическими методами.  $M(t)$ ,  $\omega(t)$  – нелинейные функции.

В ряде РЭС, например, аудиовизуальных систем, необходимо обеспечить стабильную скорость перемещения магнитного носителя, что обеспечивается за счет стабильности скорости вращения магнитных головок. Так, стабильность частоты вращения двигателей в устройствах видеозаписи составляет тысячные доли процента. Существуют различные способы стабилизации скорости, как механические, так и электронные.

Одним из способов обеспечения стабильности скорости, т.е. малых отклонений скорости от номинального значения, является использование в электромеханической системе маховика с большим моментом инерции  $J$ . В этом случае отклонения скорости будут малы, поскольку:

$$\Delta\omega = \frac{M_{\text{дин}} \Delta t}{J}.$$

В РЭС БН низкого класса сложности используются центробежные регуляторы, в которых группы контактов под действием центробежных сил замыкаются и тем самым отключают двигатель от источника электропитания.

Широкое применение для стабилизации скорости ДПТ находят рассмотренные в четвертой главе полупроводниковые стабилизаторы напряжения.

Для повышения быстродействия электромеханической системы стремятся уменьшить постоянную времени за счет момента инерции. Основными типами малоинерционных микромашин являются двигатели с полым ротором и печатной обмоткой якоря. Двигатели с печатной обмоткой имеют дисковый ротор из изоляционного материала, по обе стороны которого располагается печатная обмотка. Печатная обмотка выполняется из фольги, щетки скользят непосредственно по обмотке. Двигатель с печатной обмоткой имеет торцевую конструкцию.

## 8 КОЛЛЕКТОРНЫЕ ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### 8.1 Конструктивное исполнение ДПТ

В РЭС используются два типа двигателей постоянного тока: коллекторные двигатели постоянного тока, принцип действия которых рассмотрен в п. 7.1, и бесконтактные двигатели постоянного тока (БДПТ).

Существуют два подхода к рассмотрению БДПТ: как электрической машины постоянного тока и как синхронной машины. В данном учебном пособии БДПТ будет рассмотрен как синхронный двигатель в девятой главе.

В электрических машинах постоянного тока основной магнитный поток  $\Phi_{\text{в}}$  может создаваться двумя способами: ампер-витками ОВ (в мощных электрических машинах) и постоянными магнитами (в маломощных машинах) (рис. 8.1). В системах электропривода малой мощности применяются коллекторные ДПТ с постоянными магнитами.

Характеристики ДПТ с ОВ зависят от схемы включения машины (способа включения ОВ): с независимым возбуждением (НВ), то же с постоянными магнитами; с параллельным, последовательным или смешанным возбуждением.

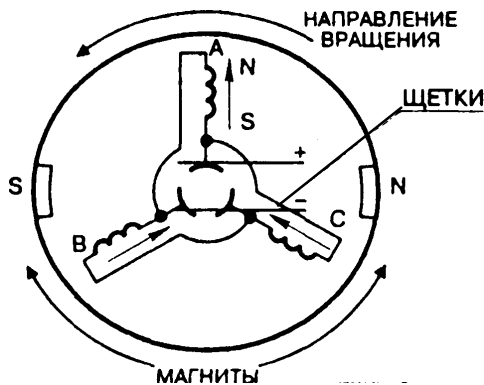


Рис. 8.2 – Устройство двигателя с трехполюсным ротором

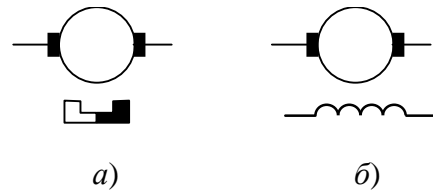


Рис. 8.1 – Условные обозначения ДПТ: с постоянными магнитами (а); с электромагнитом (б)

В подавляющем большинстве магнитофонов установлен ДПТ с трехполюсным ротором (рис. 8.2) [22]. Стрелкой указано направление магнитного поля, которое будем считать совпадающим с направлением тока. К северному полюсу магнита притягивается обмотка, ток в которой протекает к центру. Как видно из рисунка, полюса ротора, расположенные сверху (в данный момент полюс А), будут всегда притягиваться к южному полюсу магнита, расположенные снизу – к северному.

### 8.2 Механическая характеристика ДПТ НВ

Очевидно (так как  $F = BIl$ ), что регулировать скорость можно, изменяя величину магнитного потока или тока путем изменения напряжения источника питания либо добавочных сопротивлений. Схема включения ДПТ с НВ с добавочными сопротивлениями (последовательное  $R_{\text{п}}$  и шунта  $R_{\text{ш}}$ ) представ-

лена на рис. 8.3. Здесь  $U$  – напряжение питания;  $\Phi_B$  – магнитный поток возбуждения;  $E$  – ЭДС, индуцируемая в цепи якоря;  $R_я$  – сопротивление якоря (обмотки, расположенной на роторе, и щеточно-коллекторного узла).

Система уравнений для данной цепи имеет вид:

$$U = E + I R_я + I_п R_п ;$$

$$U = I_ш R_ш + I_п R_п ;$$

$$I = I_ш + I_п ;$$

$$E = K_E \Phi_B \omega ;$$

$$M = K_M \Phi_B I ,$$

где  $R_я$  – сопротивление якоря;  $K_E$ ,  $K_M$  – конструктивные коэффициенты по ЭДС и моменту соответственно.

Отсюда можно получить выражения для МХ:

$$\begin{aligned} \omega(M) &= \frac{U}{C \Phi_{B^*}} K_ш - M \frac{R_я + R_п K_ш}{(C \Phi_{B^*})^2} ; \\ \omega(M) &= \frac{U}{C \Phi_{B^*}} K_ш - I \frac{R_я + R_п K_ш}{C \Phi_{B^*}} , \end{aligned} \quad (8.1)$$

где  $K_ш = \frac{R_ш}{R_ш + R_п}$  – коэффициент шунта;  $\Phi_{B^*} = \frac{\Phi_B}{\Phi_{вн}}$  – относительное значение магнитного потока возбуждения;  $C = K_M \Phi_{вн} = K_E \Phi_{вн}$  – электромашинная постоянная;  $\Phi_{вн}$  – номинальный поток возбуждения.

Очевидно, что:

$$E_H = K_E \Phi_{вн} \omega_H = C \omega_H ;$$

$$M_H = K_M \Phi_{вн} I_H = C I_H .$$

Тогда:

$$C = \frac{E_H}{\omega_H} = \frac{U_H - I_H R_я}{\omega_H} .$$

Для ДПТ характеристики могут быть представлены в виде:

$$\omega(M) = \omega_0 - \Delta\omega(M)$$

или

$$\omega(I) = \omega_0 - \Delta\omega(I) .$$

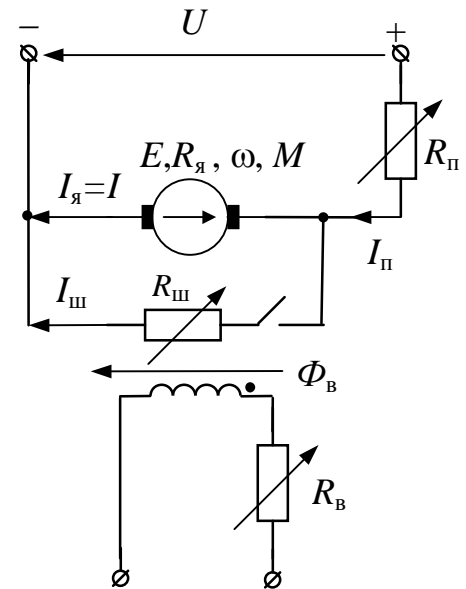


Рис. 8.3 – ДПТ с НВ

Тогда первое слагаемое в выражениях для характеристик – это скорость холостого хода (рис. 8.4):

$$\omega_0 = \frac{U}{C\Phi_{в*}} K_{ш},$$

второе – снижение скорости при соответствующем значении момента либо тока:

$$\Delta\omega(M) = M \frac{R_{я} + R_{п} K_{ш}}{(C\Phi_{в*})^2}$$

или

$$\Delta\omega(I) = I \frac{R_{я} + R_{п} K_{ш}}{C\Phi_{в*}}.$$

При этом естественные характеристики имеют вид:

$$\begin{aligned} \omega(M) &= \frac{U}{C} - M \frac{R_{я}}{C^2}; \\ \omega(M) &= \frac{U}{C} - I \frac{R_{я}}{C}. \end{aligned} \quad (8.2)$$

Снижение скорости при номинальном моменте на естественной характеристике равно (см. рис. 8.4):

$$\Delta\omega_{н} = \omega_{0e} - \omega_{н}.$$

### 8.3 Потери мощности и КПД электропривода с ДПТ

КПД ДПТ равен отношению мощности  $P$ , развиваемой двигателем, к потребляемой мощности:

$$\eta = \frac{P}{P + \Delta P},$$

где  $\Delta P$  – потери в электроприводе.

Полезная мощность зависит от момента  $M$  и скорости двигателя и при данном значении  $\omega(M)$  и равна:

$$P = \omega(M)M.$$

Основную долю потерь в электроприводе составляют потери в электродвигателе и элементах схемы его включения. Потери в механической передаче, силовом преобразователе и системе управления существенно меньше, и

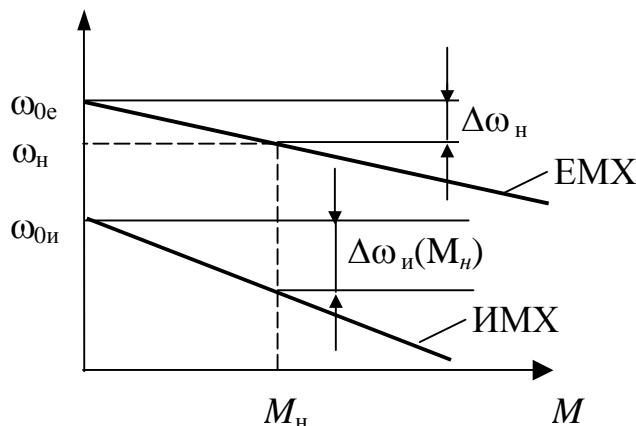


Рис. 8.4 – Естественная и искусственная характеристики ДПТ НВ



ими на этапе оценки энергетических показателей в учебных целях будем пренебрегать.

В общем объеме потерь  $\Delta P$  выделяют две составляющих – постоянные  $\Delta P_{\text{пост}}$  и переменные  $\Delta P_{\text{пер}}$  потери:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{пост}} + \Delta P_{\text{пер}}.$$

Постоянные потери – это потери мощности, не зависящие от тока двигателя (потери в стали магнитопровода, механические потери от трения в подшипниках, вентиляционные потери, потери в обмотке возбуждения), они зависят от скорости:

$$\Delta P_{\text{пост}} = \Delta P_{\text{пост.н}} \left( \frac{\omega}{\omega_{\text{н}}} \right)^2,$$

где  $\Delta P_{\text{пост.н}}$  – номинальные постоянные потери.

Переменные потери – потери, выделяемые в добавочных сопротивлениях и обмотке цепи якоря двигателя:

$$\Delta P_{\text{пер}} = \Delta P_{\text{пер.н}} \left( \frac{I}{I_{\text{н}}} \right)^2 \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{ш}} K_{\text{ш}}}{R_{\text{я}}} + \frac{U^2 K_{\text{ш}}}{R_{\text{ш}}},$$

где  $\Delta P_{\text{пер.н}}$  – номинальные переменные потери.

Номинальные постоянные и переменные потери всегда можно определить, зная номинальную мощность и КПД двигателя:

$$\Delta P_{\text{пер.н}} = I_{\text{н}}^2 R_{\text{я}};$$

$$\Delta P_{\text{пост.н}} = \Delta P_{\text{н}} - \Delta P_{\text{пер.н}};$$

$$\Delta P_{\text{н}} = P_{\text{н}} \cdot \frac{1 - \eta_{\text{н}}}{\eta_{\text{н}}}.$$

Номинальная мощность определяется для  $\omega = \omega_{\text{н}}$  и  $M = M_{\text{н}}$  на ЕМХ. Она приводится в паспортных данных двигателя и равна:

$$P_{\text{н}} = \omega_{\text{н}} M_{\text{н}}.$$

Значение номинального КПД:

$$\eta_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{P_{\text{н}} + \Delta P_{\text{н}}}$$

также приводится в паспорте.

При проектировании электропривода РЭА приходится решать задачи пуска, торможения, изменения направления вращения (реверса) двигателей.

При этом необходимо обеспечить безопасную работу двигателей в данных режимах и требуемую длительность переходных процессов.

## 8.4 Сравнительный анализ способов регулирования скорости ДПТ НВ

При выборе способа регулирования скорости принимаются во внимание следующие основные показатели:

- диапазон регулирования скорости;
- стабильность скорости, связанная с жесткостью МХ;
- плавность регулирования скорости;
- направление регулирования скорости – вверх (скорость увеличивается) или вниз (скорость уменьшается) по сравнению с работой на ЕМХ;
- потери мощности и КПД.

На рис. 8.5 представлены ИМХ ДПТ НВ для случаев:

- $U \neq U_n$ ,  $\Phi_b = \Phi_{вн}$ ,  $R_n$  и  $R_{ш}$  – отсутствуют (рис. 8.5, а);
- $U = U_n$ ,  $\Phi_b = \Phi_{вн}$ ,  $R_n \neq 0$ ,  $R_{ш}$  – отсутствует (рис. 8.5, б);
- $U = U_n$ ,  $\Phi_b \neq \Phi_{вн}$ ,  $R_n$  и  $R_{ш}$  – отсутствуют (рис. 8.5, в);
- $U = U_n$ ,  $\Phi_b = \Phi_{вн}$ ,  $R_n \neq 0$ ,  $R_{ш} \neq 0$  (рис. 8.5, г).

Большое значение при выборе способа регулирования имеет КПД. Для управления двигателями, потребляющими больше нескольких ватт, требуются схемы, имеющие высокий КПД, так как в противном случае отвод тепла от схемы управления потребует громоздких радиаторов.

Руководствуясь приведенными выше критериями и графиками статических характеристик, можно сделать следующие выводы.

**При изменении напряжения якоря** можно регулировать скорость как на холостом ходу, так и под нагрузкой. Данный способ регулирования скорости ДПТ НВ считается наилучшим, так как сохраняется высокая стабильность скорости (ИМХ идет параллельно ЕМХ без изменения жесткости), диапазон регулирования скорости большой, причем остаются неизменными потери мощности в якорной цепи. Однако регулировать скорость можно только вниз от номинальной (так как нельзя увеличивать напряжение якоря больше номинального), а для реализации данного способа регулирования необходимы специальные устройства – полупроводниковые регуляторы постоянного напряжения.

**Добавочное сопротивление в цепи якоря** увеличивает крутизну ИМХ по сравнению с ЕМХ, а стабильность скорости снижается. Скорость можно регулировать только под нагрузкой, скорость холостого хода при этом не меняется. Диапазон регулирования скорости реально получается небольшим, а потери мощности пропорциональны величине добавочного сопротивления. Хо-

тя данный способ регулирования энергетически невыгоден, он находит широкое применение на практике.

**При изменении потока возбуждения** можно регулировать скорость как на холостом ходу, так и под нагрузкой, причем регулировать скорость можно только вверх от номинальной (так как нельзя увеличивать больше номинального ток обмотки возбуждения ввиду ее перегрева). Диапазон регулирования скорости ограничен условиями механической прочности двигателя. Так, уве-

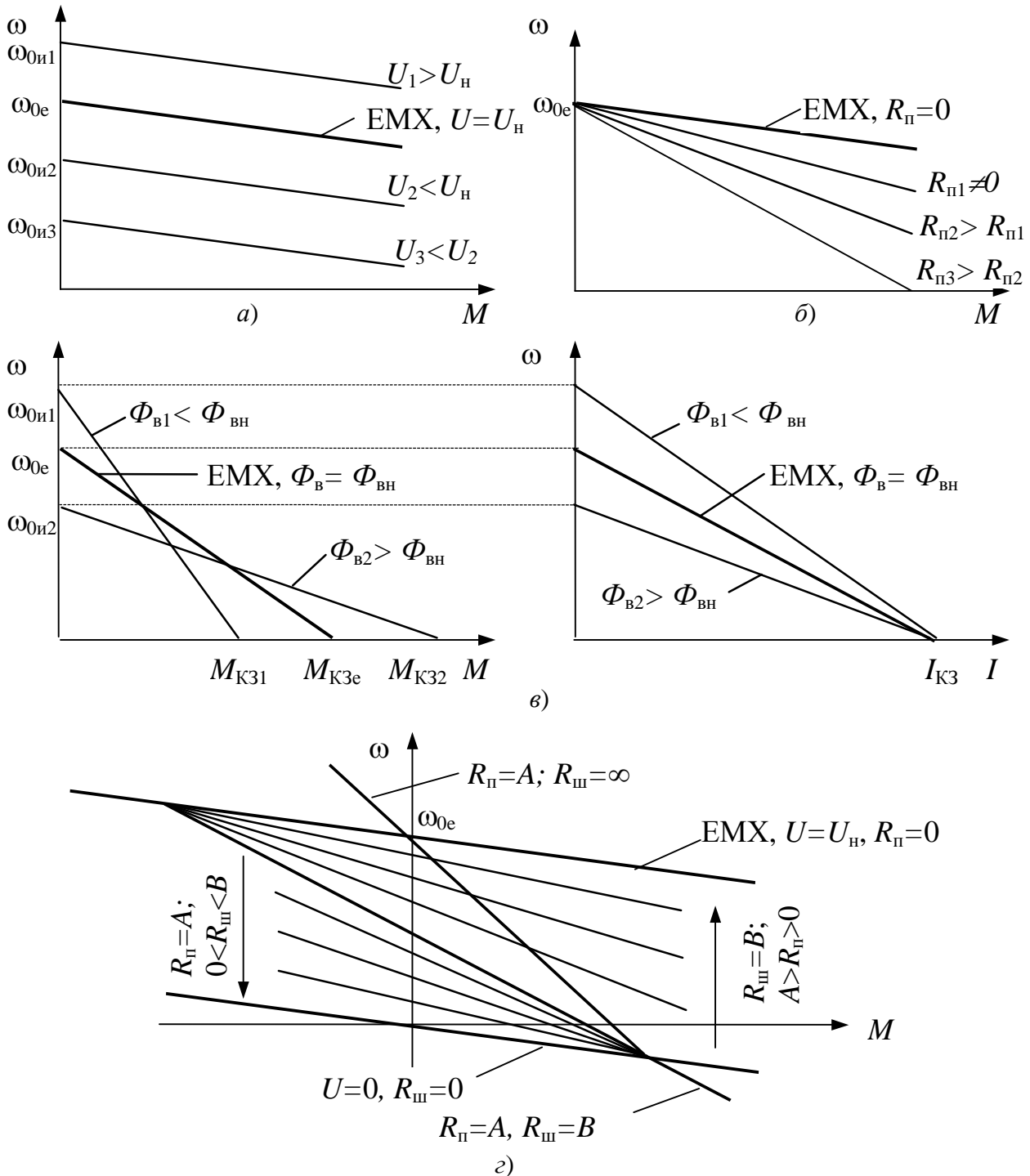


Рис. 8.5 – Семейства характеристик ДПТ НВ

личить скорость относительно номинального значения можно для машин обычного исполнения – не более, чем в два раза, а для машин специального исполнения – в три раза. Пусковой ток не зависит от потока возбуждения (см. рис. 8.5, в), поскольку  $I_{кз} = \frac{U - (E = 0)}{R_{я}}$ , а момент короткого замыкания зависит от него:  $M_{кз} = CI_{кз} \Phi_{в*}$ , и пусковые свойства ДПТ НВ при ослаблении потока возбуждения ухудшаются.

В электроприводе РЭА данный способ регулирования не реализуем, поскольку применяются маломощные двигатели с постоянными магнитами.

*Одновременное включение последовательного и шунтирующего сопротивлений* позволяет регулировать скорость ДПТ НВ на холостом ходу и под нагрузкой, при этом увеличивается жесткость ИМХ. Существенным недостатком данного способа регулирования является значительное уменьшение КПД за счет потерь мощности в активных сопротивлениях.

Таким образом, с точки зрения стабильности скорости и КПД, наилучшими показателями обладают характеристики, полученные при изменении напряжения питания двигателя. Поэтому в электроприводе РЭА реализуется именно этот способ регулирования.

Управление ДПТ сводится к подаче на него требуемого напряжения заданной полярности, так как величина напряжения задает скорость, а полярность – направление вращения. С учетом требований малых потерь мощности и высокого КПД эта задача решается с помощью широтно-импульсной модуляции, схемы с которой имеют теоретически 100% КПД. Обычно действуют одним из двух способов: первый – применение управляемого импульсного стабилизатора, второй – подача широтно-модулированных импульсов на двигатель, так как двигатель имеет значительную индуктивную составляющую импеданса. Для подачи импульсов на двигатель применяются мощные быстродействующие ключевые или логические схемы, так как длительность фронта существенно влияет на КПД схем с широтно-импульсной модуляцией.

При проектировании электропривода РЭС приходится решать задачи пуска, торможения, изменения направления вращения (реверса) двигателей. При этом необходимо обеспечить безопасную работу двигателей в данных режимах и требуемую длительность переходных процессов.

## 8.5 Пуск в ход ДПТ НВ

Для запуска (начала вращения) ДПТ НВ необходимо наличие магнитного потока и напряжения якоря.

Основной проблемой пуска ДПТ является большой пусковой ток (ток короткого замыкания) при включении на номинальное напряжение, превышающий допустимые значения и потому требующий ограничения. Большой пусковой ток имеет место ввиду того, что ЭДС двигателя:

$$E = C \Phi_{в*} \omega$$

равна нулю при  $\omega = 0$  либо мала при малых значениях скорости вращения. Соответственно ток двигателя, определяемый как:

$$I = \frac{U - E}{R_{я}},$$

при пуске может принимать значения, большие номинального тока  $I_n$ .

При пуске на ЕМХ пусковой ток двигателя равен:

$$I_{\text{пуск.е}} = I_{\text{КЗе}} = \frac{U_n}{R_{я}}$$

и требует ограничения, поскольку

$$I_{\text{пуск.е}} = I_{\text{КЗе}} = (10 \dots 20) I_n,$$

в то время как ДПТ имеет перегрузочную способность  $\lambda_M = \lambda_I$ , характеризующую допустимое кратковременное превышение момента (тока):

$$\lambda_M = \lambda_I = \frac{M_{\text{доп}}}{M_n} = \frac{I_{\text{доп}}}{I_n} = 2 \dots 3.$$

Решение проблемы ограничения тока до значения  $I_{\text{пуск}}$  может быть получено путем ограничения тока за счет снижения напряжения питания:

$$U_{\text{пуск}} = I_{\text{пуск}} R_{я}$$

или включением последовательного пускового сопротивления:

$$R_{\text{пуск}} = \frac{U_n}{I_{\text{пуск}}} - R_{я}.$$

В соответствии с уравнением движения, чем меньше динамический ускоряющий момент (разница между текущим значением тока (момента) и его установившимся значением), тем медленнее идет процесс разгона (по экспоненте). Поэтому для увеличения динамического момента пусковой ток принимается равным допустимому  $I_{\text{пуск}} = I_{\text{доп}}$ .

На рис. 8.6 приведены пусковые диаграммы при пуске двигателя с ограничением и регулированием питающего напряжения (а) и пусковым реостатом, секционированным на три ступени (б). Существуют методики, позволяющие рассчитать требуемые значения напряжений и сопротивлений [6] для выбранных значений токов пуска и переключения.

Пусковой ток  $I_{\text{пуск}}$  выбирается из условия:

$$I_n < I_{\text{пуск}} \leq I_{\text{доп}} = \lambda_I I_n;$$

обычно

$$I_{\text{пуск}} = (2 \dots 2,5) I_n.$$

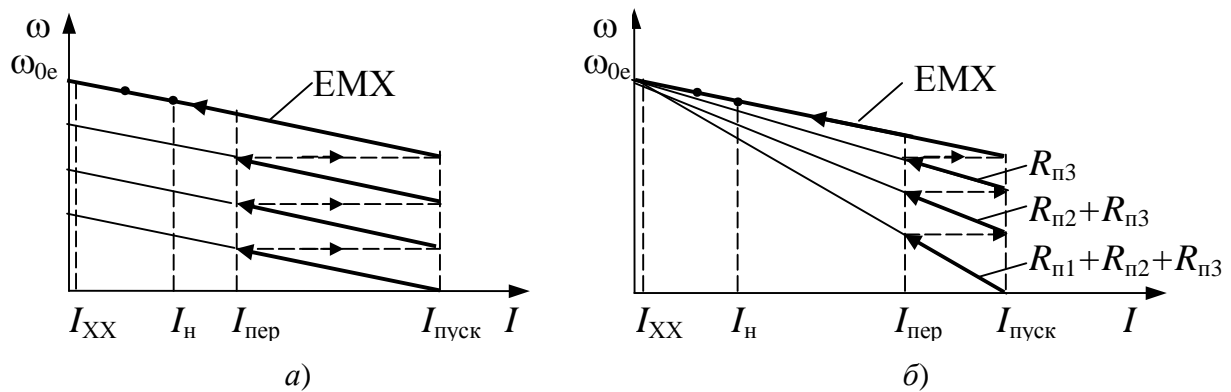


Рис. 8.6 – Пусковые диаграммы ДПТ НВ при пуске с ограничением напряжения (а) и пусковым реостатом (б)

Ток переключения выбирают из условия:

$$I_{\text{пер}} = (1,2 \dots 1,5) I_H.$$

Для равномерного разгона с постоянным ускорением нужно обеспечить постоянство пускового тока (рис. 8.7), что возможно, если плавно обратно пропорционально скорости уменьшать сопротивление либо увеличивать напряжение.

## 8.6 Торможение ДПТ НВ

Существуют различные способы торможения двигателей.

Двигатель может быть остановлен путем отключения его от источника питания. Такой способ остановки называется выбегом. В литературе по управлению РЭС такой способ торможения называется «режимом останова». В данном случае тормозной динамический момент создается моментом сил трения и моментом сопротивления нагрузки, а момент двигателя равен нулю.

Для определения времени торможения выбегом можно воспользоваться уравнением движения в приращениях (формула (7.1) при  $J = \text{const}$ ). Тогда получим:

$$t_{\text{выб}} = J \frac{\Delta \omega}{M_{\text{дин}}} = J \frac{(\omega_{\text{кон}} = 0) - \omega_{\text{нач}}}{(M = 0) - (M_c = M_{\text{нач}})} = J \frac{\omega_{\text{нач}}}{M_{\text{нач}}},$$

где  $\omega_{\text{нач}}$ ,  $M_{\text{нач}}$  – значения скорости и момента в начале торможения в момент отключения питания.

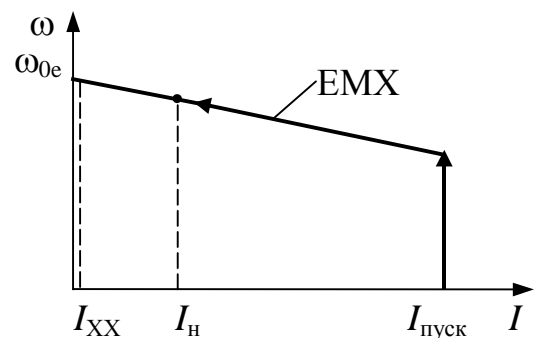


Рис. 8.7 – Пуск ДПТ НВ при постоянном пусковом токе

Так например, при торможении без нагрузки:

$$\omega_{\text{нач}} = \omega_0 \text{ и } M_{\text{нач}} = M_{\text{ХХ}};$$

при торможении с номинальной нагрузкой:

$$\omega_{\text{нач}} = \omega_{\text{н}} ; M_{\text{нач}} = M_{\text{н}}.$$

Очевидно, что чем больше тормозной динамический момент  $M_{\text{дин}}$ , тем меньше время торможения. Увеличить тормозной момент можно путем изменения направления момента двигателя  $M$ . Этого можно добиться, реализовав один из видов электрического торможения двигателя. Для изменения направления момента требуется изменение направления тока двигателя, т.е. перевод двигателя в режим генератора. Направления скорости  $\omega$ , момента  $M$  и тока  $I$  двигателя представлены на рис. 8.8.

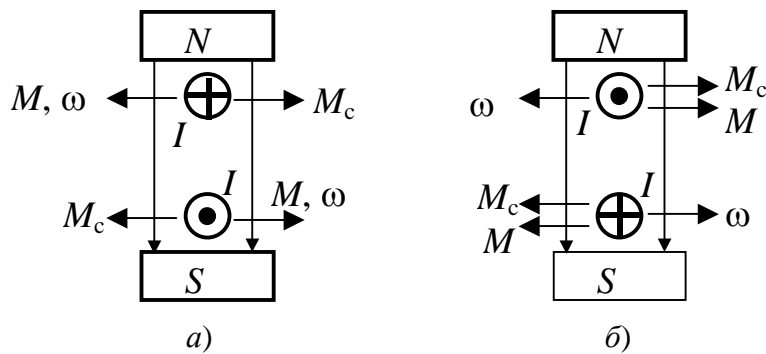


Рис. 8.8 – Момент двигателя в двигательном и генераторном режимах:

*a* – двигательный режим; *б* – после перевода двигателя в генераторный режим

**Динамическое торможение** (ДТ) (рис. 8.9, *a*) – это режим работы двигателя в режиме автономного генератора, когда двигатель отключен от сети, вращается по инерции и работает генератором. Цепь якоря ДПТ может быть замкнута накоротко ( $R_{\text{ДТ}} = 0$ ), либо в нее может быть включено активное со-

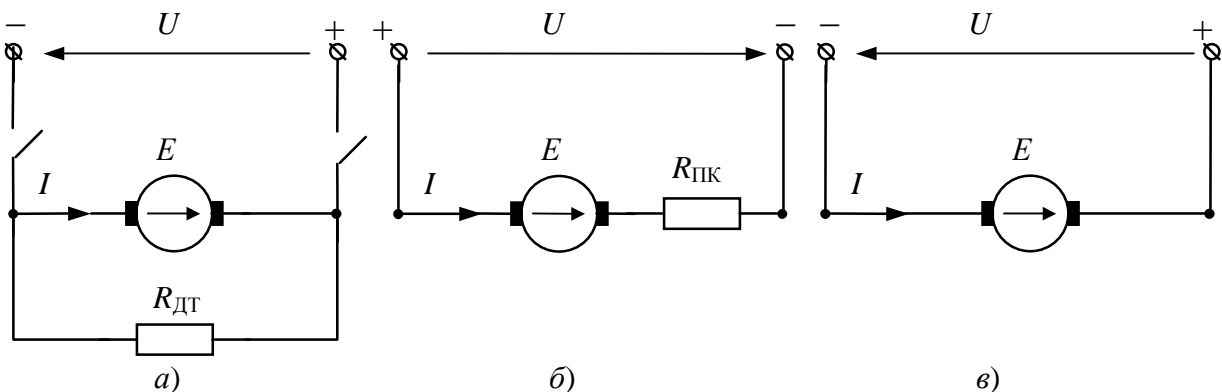


Рис. 8.9 – Способы включения ДПТ в режиме торможения:

*a* – динамическое торможение; *б* – торможение противовключением;  
*в* – рекуперативное торможение

противление  $R_{ДТ}$ . Электрическая энергия рассеивается в виде тепла в резисторах якорной цепи. Требуется ограничение тока, который в момент начала торможения при  $M_c \leq M_n$  и  $R_{ДТ} = 0$  может достигать значений, близких к току короткого замыкания на ЭМХ (рис. 8.10, а).

**Торможение противовключением (ПК)** (рис. 8.9, б) – генераторный режим работы двигателя при последовательном соединении с сетью. Достигается изменением полярности питающего напряжения либо направлением тока возбуждения. Последний способ не реализуем для ДПТ с постоянными магнитами. Энергия, и потребляемая из сети, и вырабатываемая самим двигателем, рассеивается в виде тепла в резисторах якорной цепи. Требуется ограничение тока, который в момент начала торможения при  $M_c \leq M_n$  и  $R_{ПК} = 0$  может достигать значений, в два раза больших тока короткого замыкания на ЭМХ (рис. 8.10, б).

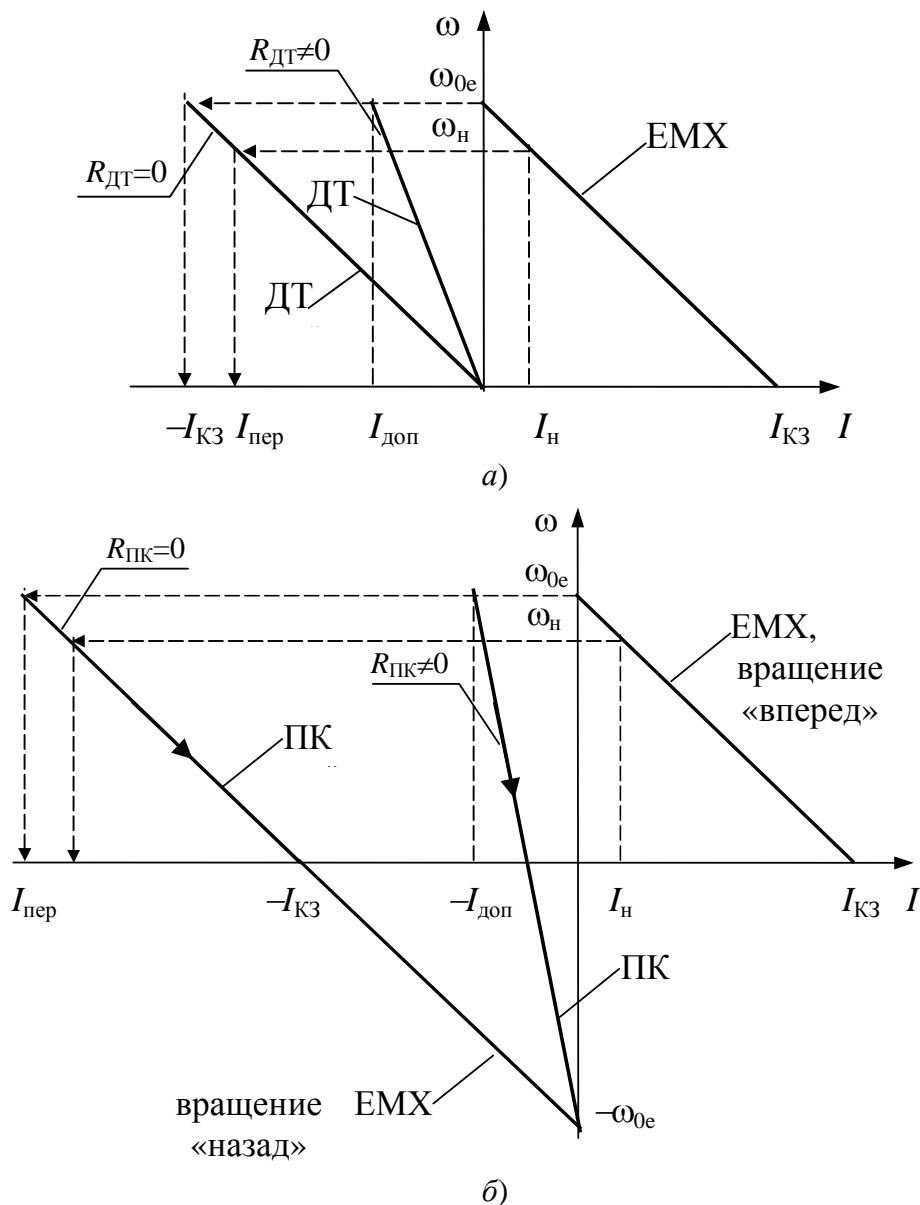


Рис. 8.10 – Характеристики динамического торможения ДПТ НВ:  
а – динамическое торможение; б – торможение противовключением



**Рекуперативное торможение** (рис. 8.9, в) – генераторный режим работы двигателя параллельно с сетью. Торможение сопровождается возвратом электрической энергии в сеть и применяется в электромеханических системах большой мощности; для торможения ДПТ в РЭС не применяется.

По временным показателям (по длительности торможения) наихудший способ торможения – выбегом, далее идут динамическое и торможение противовключением.

Ограничить ток двигателя в момент переключения можно за счет добавочных сопротивлений:

$$\text{– сопротивление динамического торможения: } R_{\text{ДТ}} \approx \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{доп}}} - R_{\text{я}};$$

$$\text{– сопротивление противовключения: } R_{\text{ПК}} = \frac{U_{\text{н}} + E}{I_{\text{доп}}} - R_{\text{я}} \approx \frac{2U_{\text{н}}}{I_{\text{доп}}} - R_{\text{я}}.$$

Для определения длительностей переходных процессов как пуска, так и торможения, следует воспользоваться формулой:

$$t_{\text{пп}} = T_{\text{м}} \ln \frac{M_{\text{уст}} - M_{\text{нач}}}{M_{\text{уст}} - M_{\text{кон}}} = T_{\text{м}} \ln \frac{I_{\text{уст}} - I_{\text{нач}}}{I_{\text{уст}} - I_{\text{кон}}} = T_{\text{м}} \ln \frac{\omega_{\text{уст}} - \omega_{\text{нач}}}{\omega_{\text{уст}} - \omega_{\text{кон}}}.$$

Величина постоянной времени  $T_{\text{м}}$  при постоянном моменте сопротивления в соответствии с выражением для статических механических характеристик (8.1) равна:

$$T_{\text{м}} = \frac{J}{\beta} = J \frac{\Delta\omega}{\Delta M} = J \frac{\Delta\omega(M_{\text{н}})}{M_{\text{н}}} = J \frac{M_{\text{н}} \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{п}} K_{\text{ш}}}{(C\Phi_{\text{в}^*})^2}}{M_{\text{н}}} = J \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{п}} K_{\text{ш}}}{(C\Phi_{\text{в}^*})^2}.$$

Для машин с постоянными магнитами при неизменном потоке возбуждения  $\Phi_{\text{в}^*} = 1$ , поэтому:

$$T_{\text{м}} = J \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{п}} K_{\text{ш}}}{C^2}.$$

Для ИМХ при изменяемом напряжении питания:

$$T_{\text{м}} = T_{\text{ме}} = J \frac{R_{\text{я}}}{C^2}.$$

Рассмотренным выше ЕМХ, ИМХ (см. рис. 8.5, б, з), в том числе тормозных режимов (см. рис. 8.10), соответствуют различные величины последовательно включенных сопротивлений, поэтому и значения постоянных времени на этих характеристиках будут отличаться, причем чем круче ИМХ, тем больше ее постоянная времени и тем дольше длится переходный процесс на этой характеристике.

Время пуска ДПТ  $t_{\text{пуск}}$  определяется как сумма длительностей переходных процессов на всех ступенях и переходного процесса на естественной характеристике  $t_{\text{ппе}}$ :

$$t_{\text{пуск}} = \sum_{i=1} t_{\text{ппи}} + t_{\text{ппе}} ;$$

$$t_{\text{ппи}} = T_{\text{ми}} \ln \frac{M_{\text{уст}} - M_{\text{нач}}}{M_{\text{уст}} - M_{\text{кон}}} = T_{\text{ми}} \ln \frac{I_{\text{уст}} - I_{\text{нач}}}{I_{\text{уст}} - I_{\text{кон}}} = T_{\text{ми}} \ln \frac{M_{\text{уст}} - M_{\text{пуск}}}{M_{\text{уст}} - M_{\text{пер}}} = T_{\text{ми}} \ln \frac{I_{\text{уст}} - I_{\text{пуск}}}{I_{\text{уст}} - I_{\text{пер}}} ;$$

$$T_{\text{ми}} = J \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{пи}} K_{\text{ш}}}{C^2} ; t_{\text{ппе}} \approx 4 T_{\text{ме}} .$$

Так как длительности переходных процессов  $t_{\text{ппи}}$  зависят от установившегося значения момента (тока, скорости), то время пуска зависит от режима запуска: с нагрузкой либо вхолостую, причем последнее всегда меньше.

Аналогично времена динамического торможения  $t_{\text{ДТ}}$  и торможения противовключением  $t_{\text{ПК}}$  зависят от постоянной времени, от начального, установившегося и конечного значений моментов (токов):

$$t_{\text{ДТ}} = T_{\text{ДТ}} \ln \frac{M_{\text{уст}} - M_{\text{ДТ нач}}}{M_{\text{уст}} - M_{\text{ДТ кон}}} = T_{\text{ДТ}} \ln \frac{I_{\text{уст}} - I_{\text{ДТ нач}}}{I_{\text{уст}} - I_{\text{ДТ кон}}} ;$$

$$t_{\text{ПК}} = T_{\text{ПК}} \ln \frac{M_{\text{уст}} - M_{\text{ПК нач}}}{M_{\text{уст}} - M_{\text{ПК кон}}} = T_{\text{ПК}} \ln \frac{I_{\text{уст}} - I_{\text{ПК нач}}}{I_{\text{уст}} - I_{\text{ПК кон}}} ;$$

$$T_{\text{ДТ}} = J \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{ДТ}}}{C^2} ; T_{\text{ПК}} = J \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{ПК}}}{C^2} ;$$

$$M_{\text{ДТ кон}} = 0 ; I_{\text{ДТ кон}} = 0 ;$$

$$M_{\text{ПК кон}} = -\frac{M_{\text{доп}}}{2} ; I_{\text{ПК кон}} = -\frac{I_{\text{доп}}}{2} .$$

Значения момента и тока зависят от того, в каком режиме работал двигатель до начала торможения (см. рис. 8.10). Если двигатель работал на ЕМХ при  $M_{\text{с}} \leq M_{\text{н}}$ , то приблизительно можно считать:

$$M_{\text{ДТ нач}} = M_{\text{ПК нач}} \approx -M_{\text{доп}} ; I_{\text{ДТ нач}} = I_{\text{ПК нач}} \approx -I_{\text{доп}} .$$

Время любого из видов торможения ДПТ с нагрузкой меньше, чем без нагрузки.

## 9 ДВИГАТЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

К двигателям переменного тока относятся синхронные и асинхронные двигатели. В СД угловая скорость ротора жестко связана с частотой сети. Они широко используются в устройствах видео- и звукозаписи, звуковом кино, там, где требуется стабильная скорость вращения. В АД жесткой связи скорости вращения ротора и частоты сети не существует, поэтому они используются там, где требования по стабильности скорости невелики.

Принцип действия двигателей переменного тока основан на взаимодействии магнитного поля ротора с вращающимся магнитным полем статора.

### 9.1 Вращающееся магнитное поле электродвигателей переменного тока

Статор двигателей переменного тока имеет обмотку, образующую *вращающееся магнитное поле*. Вращающееся магнитное поле может быть создано:

- трехфазной системой переменного тока (фазные ЭДС трехфазной системы сдвинуты в пространстве на 120 электрических градусов) – для этого необходимы три обмотки, оси которых сдвинуты в пространстве на 120 градусов;

- двухфазной системой переменного тока (фазные ЭДС двухфазной системы сдвинуты в пространстве на 90 электрических градусов) – для этого необходимы две обмотки, оси которых сдвинуты в пространстве на 90 градусов.

Принцип создания вращающегося магнитного поля трехфазной системой переменного тока иллюстрирует рис. 9.1. Здесь имеются 3 обмотки, сдвинутые в пространстве по окружности статора на 120°. Их начала обозначены буквами  $A, B, C$ , а концы –  $X, Y, Z$ . Стрелкой в центре указан вектор магнитной индукции вращающегося магнитного поля и его полюса  $N - S$ .

Будем обозначать скорость вращения магнитного поля –  $\omega_0$ , рад/с или  $n_0$ , об/мин, а скорость вращения ротора –  $\omega$ , рад/с или  $n$ , об/мин. При этом:

$$n = \omega \frac{60}{2\pi} \approx 9,55\omega.$$

Вращающееся магнитное поле может иметь одну и более пар полюсов, что зависит от конструктивного исполнения обмотки статора. Вращающееся магнитное поле, создание которого рассмотрено на рис. 9.1, имеет одну пару полюсов  $N - S$ . За один период напряжения сети оно поворачивается на 360 градусов, то есть его скорость вращения равна:

$$\omega_0 = 2\pi f \text{ [рад/с]} \text{ или } n_0 = 60f \text{ [об/мин]}.$$

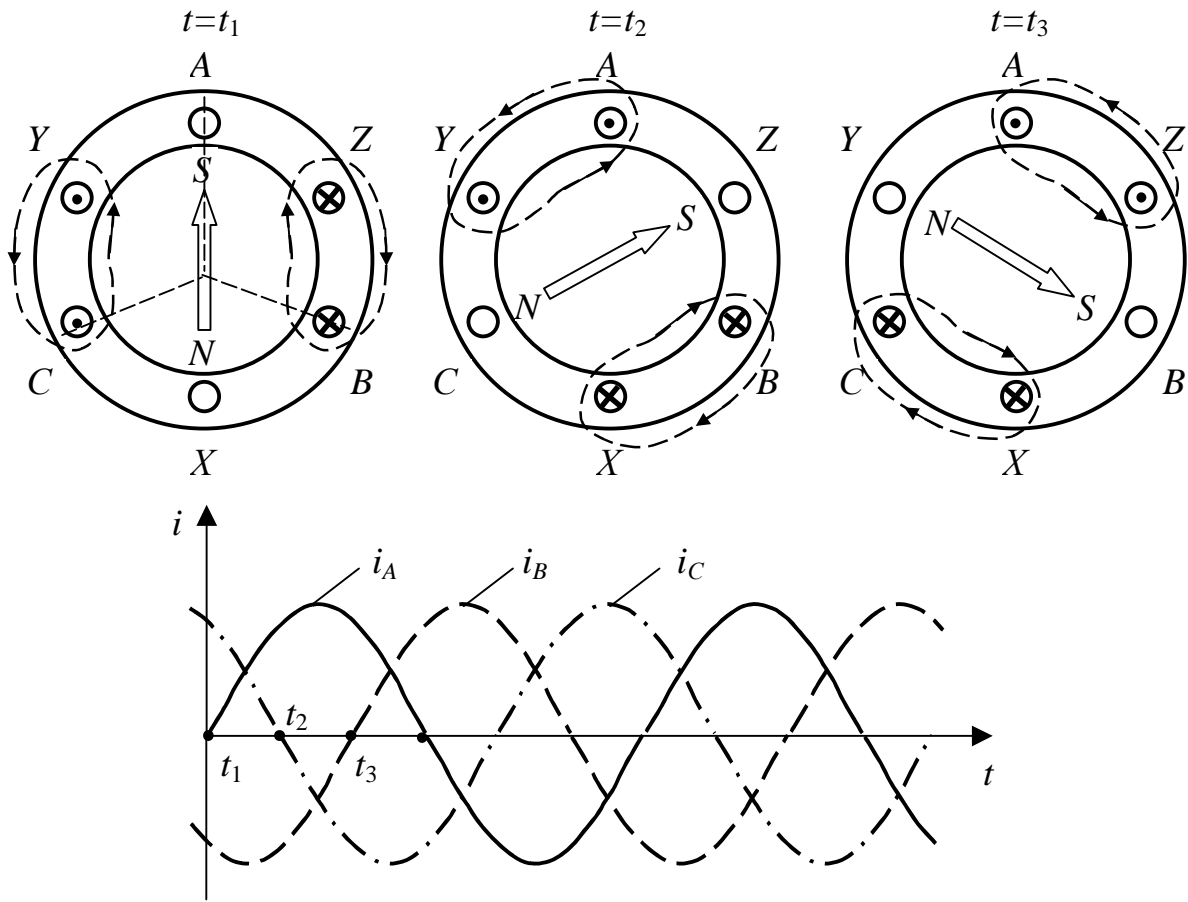


Рис. 9.1 – Вращающееся магнитное поле статора трехфазного двигателя

Чтобы магнитное поле имело несколько пар полюсов, необходимо обмотку статора разделить на части. На рис. 9.2 представлена картина магнитного поля с двумя парами полюсов  $N - S$ , создаваемого трехфазной обмоткой статора, обмотка каждой фазы которой состоит из двух частей. Начала и концы частей обозначены нижними индексами 1 и 2.

В общем случае для  $p$  пар полюсов скорость вращения магнитного поля равна:

$$\omega_0 = \frac{2\pi f}{p} \text{ [рад/с]} \text{ или } n_0 = \frac{60f}{p} \text{ [об/мин]}.$$

Отсюда следует, что скорость вращения магнитного поля строго фиксирована, зависит от числа пар полюсов и частоты сети. Для целого  $p=1, 2, \dots$  и  $f=50$  Гц равна соответственно:

3000, 1500, 1000, 750, ... , об/мин.

Отсюда следуют два важных вывода.

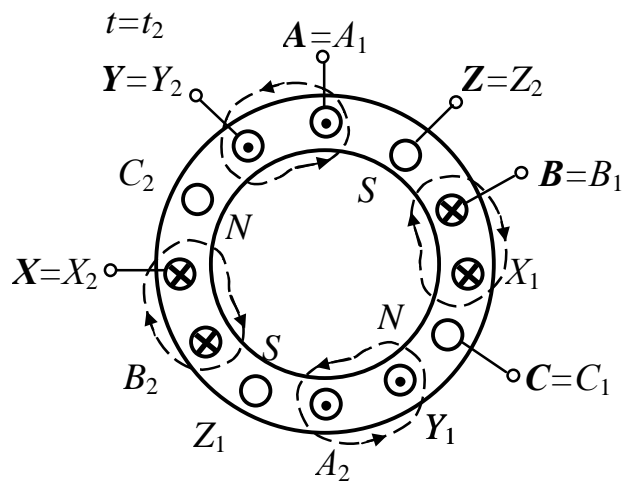


Рис. 9.2 – Картина магнитного поля с двумя парами полюсов

1. Управлять скоростью двигателя можно, изменяя скорость вращения магнитного поля статора.

2. Для изменения вращения ротора необходимо изменить направление вращения магнитного поля статора

Регулировать скорость вращения магнитного поля статора можно изменением числа пар полюсов, для чего двигатель должен иметь специальное конструктивное исполнение, либо изменением частоты питающего напряжения, для чего необходимы специальные устройства, преобразователи частоты – инверторы. Последний способ позволяет регулировать скорость плавно и в большом диапазоне, что определяется возможностями инвертора; первый – только дискретно. Отечественной промышленностью выпускаются двухскоростные (со скоростями вращения магнитного поля статора 3000/1500, 1500/750, 1000/500 и т.д. об/мин), трехскоростные (1500/1000/750, 1000/750/500 об/мин) и четырехскоростные (3000/1500/1000/500, 1500/1000/750/500) АД. Эти двигатели предусматривают изменение схемы соединения обмоток статора с помощью переключателя, в результате чего образуется разное число пар полюсов.

Существуют и другие способы регулирования частоты АД, но частотное регулирование является наилучшим.

Изменение направления вращения магнитного поля достигается изменением чередования фаз.

## 9.2 Синхронные двигатели

Принципиальное отличие СД малой мощности друг от друга состоит в конструкции ротора, в зависимости от которой различают СД с постоянными магнитами, гистерезисные, реактивные, субсинхронные СД и СД с катящимся или волновым ротором. В электроприводе малой мощности применяются СД с постоянными магнитами.

Принцип работы СД с постоянными магнитами основан на взаимодействии вращающегося магнитного поля обмотки статора с полем постоянных магнитов, расположенных на роторе (см. рис. 7.2, в). Если числа пар полюсов статора и ротора равны, а скорости вращения полей одинаковы, то возникает постоянное электромагнитное притяжение разноименных полюсов статора и ротора. Под действием вращающего момента ротор вращается в направлении вращения магнитного поля статора. Очевидно, что для изменения направления вращения ротора необходимо изменить направление вращения магнитного поля статора.

В РЭС применяются двухфазные и трехфазные СД. Рассмотрим способ создания вращающегося магнитного поля в микродвигателях.

### Создание вращающегося магнитного поля в микродвигателях

Электропитание РЭС осуществляется от однофазной либо трехфазной сети переменного тока. Для создания вращающегося магнитного поля необходима двухфазная либо трехфазная система переменного тока. Многофазное напряжение может быть получено путем преобразования постоянного напряжения, которое в свою очередь формируется устройствами вторичного или первичного электропитания, с помощью полупроводниковых преобразователей напряжения – инверторов (см. п. 5.1). Причем для электропитания двигателей используются простейшие инверторы с выходным напряжением прямоугольно-ступенчатой и прямоугольной формы.

Статор синхронной машины имеет явно выраженные полюса и обмотки возбуждения, как у ДПТ. На рис. 9.3, а, б представлен статор СД с двухфазной обмоткой возбуждения, расположенной на четырех полюсах статора. Чтобы обмотками возбуждения создавалось вращающееся магнитное поле, их нужно запитать током определенного направления так, как показано на рис. 9.3, а. Порядок переключения (коммутации) фаз  $A$  и  $B$  обмотки в виде временной диаграммы токов в этих фазах  $i_A$  и  $i_B$  изображен на рис. 9.3, в. Условно приведенный способ переключения можно представить в виде последова-

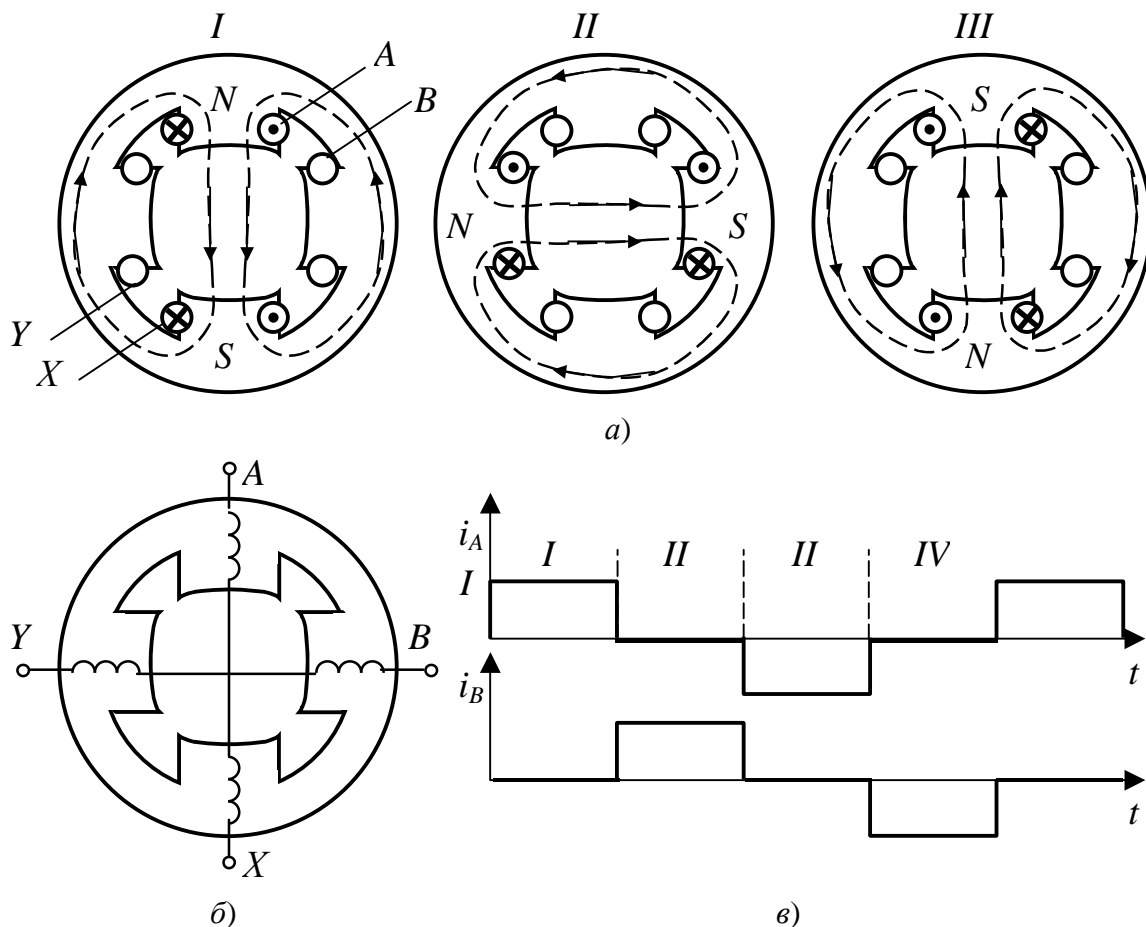


Рис. 9.3 – Вращающееся магнитное поле, создаваемое двухфазной обмоткой

тельности  $+A$ ,  $+B$ ,  $-A$ ,  $-B$ . Поскольку ток фазы меняется от  $+I$  до  $-I$ , то такое управление называется *разнополярным*. Если ток фазы меняется от 0 до  $+I$ , то такое управление называется *однополярным*.

Каждому направлению тока в фазах соответствует определенное положение оси магнитного потока. Поскольку ток обмоток имеет прямоугольную форму, а оси обмоток сдвинуты в пространстве на  $90^\circ$ , то магнитный поток вращается с дискретным шагом, равным  $90^\circ$ . Для изменения направления вращения магнитного поля необходимо изменить полярность включения одной из фаз, не меняя очередность их коммутации.

При переключении обмоток в последовательности  $(+A, +B)$ ,  $(-A, +B)$ ,  $(-A, -B)$ ,  $(+A, -B)$  шаг вращения магнитного поля также равен  $90^\circ$ , но момент двигателя будет в  $\sqrt{2}$  раз выше, поскольку в создании момента участвуют две обмотки.

При переключении обмоток в последовательности  $+A$ ,  $(+A, +B)$ ,  $+B$ ,  $(+B, -A)$ ,  $-A$ ,  $(-A, -B)$ ,  $-B$ ,  $(-B, +A)$  шаг вращения равен  $45^\circ$ .

Таким образом, при последовательной подаче импульсов напряжения на катушки полюсов будет происходить скачкообразное *перемещение оси магнитного потока на шаг*, величина которого зависит от числа фаз и способа коммутации обмоток.

Шаг поворота оси магнитного поля статора  $\alpha_s$  равен:

$$\alpha_s = \frac{2\pi}{n_y},$$

где  $n_y$  – число устойчивых электрических состояний, зависящее от способа коммутации и числа фаз машины.

### **Функциональные схемы коммутаторов**

Для возбуждения обмоток СД необходим инвертор, принцип действия которого заключается в попеременном подключении начал и концов обмоток к положительному либо отрицательному полюсу источника питания или отключении обмотки от источника в соответствии с порядком коммутации фаз.

Первый вариант полупроводникового коммутатора для коммутации обмоток по закону, представленному на рис. 9.3, в, приведен на рис. 9.4. Его функциональная схема аналогична схеме однофазного инвертора, рассмотренного в п. 5.1. Отличие схемы, приведенной в п. 5.1 (схема инвертора, работающего на активную нагрузку), состоит в том, что, поскольку обмотки двигателя представляют собой индуктивную нагрузку для инвертора и ток обмотки не может измениться скачком, то в схему включены обратные диоды. Так например, при переключении пар транзисторных ключей с  $(K_1, K_4)$  на  $(K_2, K_3)$  пара диодов  $(VD2, VD3)$  обеспечит кратковременное протекание тока после коммутации в прежнем направлении. При переключении пар транзи-

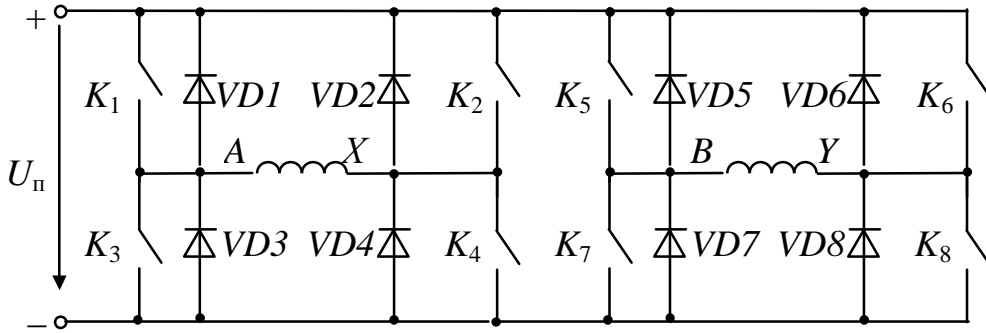


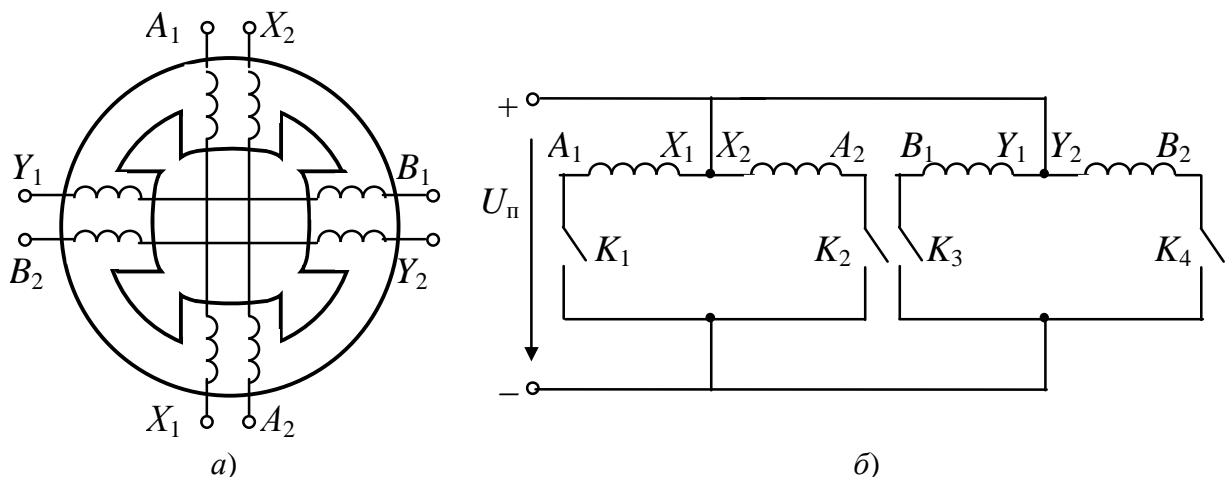
Рис. 9.4 – Полупроводниковый коммутатор на восьми ключах

сторных ключей с ( $K_2$ ,  $K_3$ ) на ( $K_1$ ,  $K_4$ ) протекание тока в прежнем направлении будет обеспечивать пара диодов ( $VD1$ ,  $VD4$ ). Аналогично работают обратные диоды при коммутации ключей  $K_5 - K_8$ .

Недостатком схемы коммутатора на рис. 9.4 является большое число ключей. Уменьшить количество ключей позволяет несколько иное конструктивное исполнение обмотки двигателя. Так, если обмотку каждой фазы разделить на две секции – две секции  $A_1 - X_1$  и  $A_2 - X_2$  обмотки фазы  $A$  и две секции  $B_1 - Y_1$  и  $B_2 - Y_2$  обмотки фазы  $B$  – и расположить на полюсах так, как показано на рис. 9.5, *а* (так называемый **четырёхсекционный** двигатель), то коммутатор можно выполнить на четырех ключах (рис. 9.5, *б*). В данном случае получим однополярную коммутацию, поскольку ток через каждую секцию обмотки протекает в одном направлении.

Аналогичным образом работают трехфазные СД. Их коммутатор выполняется по схеме трехфазного инвертора и имеет другой алгоритм работы полупроводниковых ключей.

Управление коммутацией ключей осуществляется специальными схемами управления по сигналам датчиков положения ротора.

Рис. 9.5 – Схема четырехсекционного двигателя (*а*) и коммутатора на четырех ключах (*б*)



### 9.3 Вентильный двигатель или бесконтактный двигатель постоянного тока

#### Структурная схема БДПТ

С целью улучшения свойств ДПТ были созданы двигатели с бесконтактным коммутатором, называемые бесконтактными двигателями постоянного тока. Отличие БДПТ от коллекторных двигателей традиционной конструкции состоит в том, что у них щеточно-коллекторный узел заменен полупроводниковым коммутатором (инвертором), управляемым сигналами, поступающими с бесконтактного датчика положения ротора. Рабочая обмотка двигателя – обмотка якоря – расположена на сердечнике статора, а постоянный магнит – на роторе. Такое описание конструкции БДПТ соответствует исполнению СД.

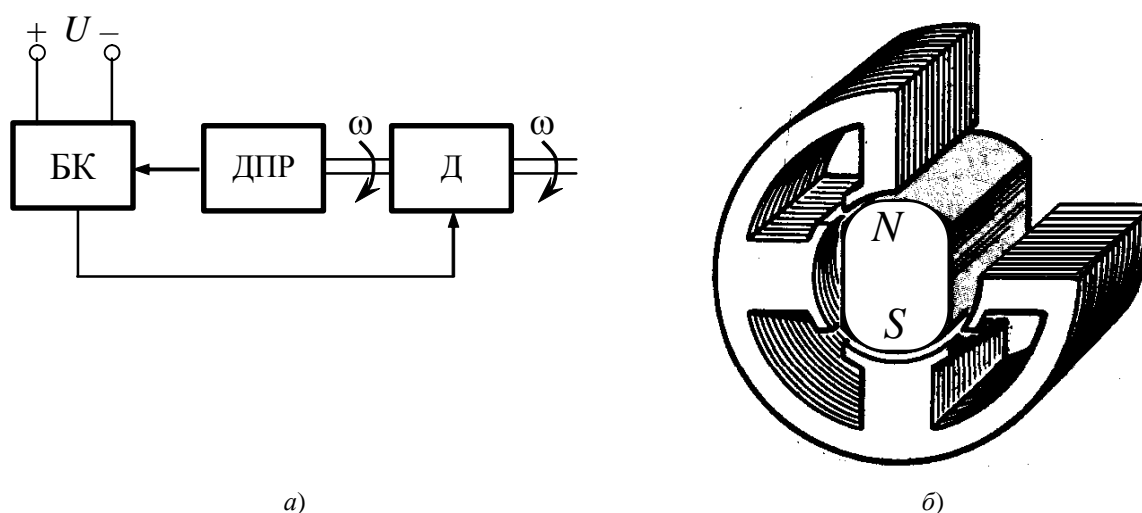


Рис. 9.6. Структурная схема (а) и магнитная система (б) четырехфазного бесконтактного двигателя постоянного тока

Вал двигателя *Д* (рис. 9.6, а) механически соединен с датчиком положения ротора *ДПР*, сигнал от которого поступает в блок коммутатора – коммутатор *БК*. Подключение секций обмотки якоря к источнику постоянного тока происходит через элементы блока коммутатора *БК*. Назначение *ДПР* – выдавать управляющий сигнал в блок коммутатора в соответствии с положением полюсов постоянного магнита относительно секций обмотки якоря.

#### Датчики положения ротора

В качестве датчиков положения ротора применяют различные чувствительные бесконтактные элементы с минимальными размерами и потребляемой мощностью и большой кратностью минимального и максимального сигналов, чтобы не вызывать нарушений в работе блока коммутатора. Чувствительные элементы *ДПР* должны надежно работать при внешних воздействиях (температура, влажность, вибрации и т. п.), на которые рассчитан двигатель. Такие свойства присущи ряду чувствительных элементов (датчиков):

индуктивных, трансформаторных, магнитодиодов и т.п. Наиболее целесообразно использовать датчики ЭДС Холла.

Датчик Холла (рис. 9.7) представляет собой тонкую полупроводниковую пластину с нанесенными на ней контактными площадками, к которым припаяны выводы 1, 2, подключенные к источнику напряжения  $U_1$ , и выводы 3, 4, с которых снимают выходной сигнал  $U_2$ . Если в цепи 1–2 проходит ток  $I$ , а датчик находится в магнитном поле, вектор индукции  $B$  которого перпендикулярен плоскости пластины датчика, то в датчике наводится ЭДС и на выводах 3–4 появляется напряжение  $U_2$ . Величина ЭДС зависит от тока  $I$  и магнитной индукции  $B$ , а полярность – от направления тока  $I$  в цепи 1–2 и направления вектора магнитной индукции  $B$ .

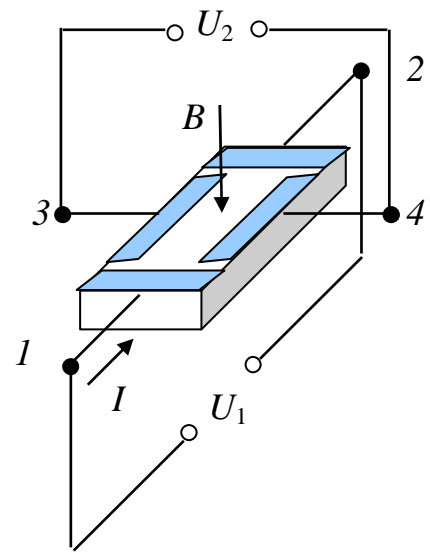


Рис. 9.7 – Датчик ЭДС Холла

Величина ЭДС зависит от тока  $I$  и магнитной индукции  $B$ , а полярность – от направления тока  $I$  в цепи 1–2 и направления вектора магнитной индукции  $B$ .

### Принцип работы БДПТ

БДПТ с датчиками Холла и коммутатором, выполненным на транзисторах  $VT1$ – $VT4$ , представлен на рис. 9.8.

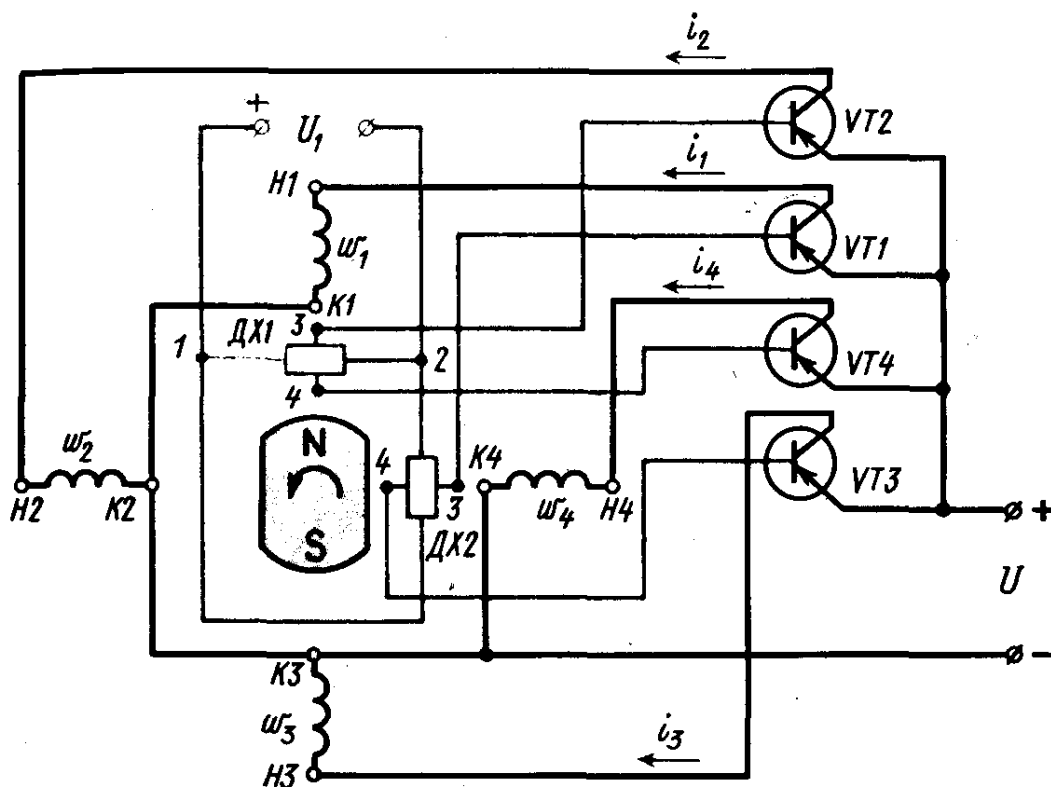


Рис. 9.8 – Принципиальная схема бесконтактного двигателя постоянного тока с четырехфазной обмоткой якоря

Четыре обмотки  $\varpi_1-\varpi_4$  расположены на явно выраженных полюсах сердечника якоря. Датчики Холла ДХ1 и ДХ2 установлены в пазах полюсных наконечников двух смежных полюсов. Силовые транзисторы VT1–VT4 работают в релейном (ключевом) режиме. Сигнал на открытие транзистора поступает от соответствующего датчика Холла (датчика положения ротора). Питание датчиков Холла (выводы 1–2) осуществляется от источника напряжения  $U_1$ .

Каждая обмотка фазы выполнена из двух катушек, расположенных на противоположащих полюсах сердечника статора и соединенных последовательно (рис. 9.9). Если по какой-либо из обмоток фазы статора проходит ток от начала  $H1-H4$  к концу  $K1-K4$ , то полюса сердечника статора приобретают полярность соответственно S и N.

При положении ротора, показанном на рис. 9.8, в зоне магнитного полюса N находится датчик ДХ1. При этом на выходе датчика появляется сигнал, при котором транзистор VT2 переходит в открытое состояние. В обмотке фазы статора  $\varpi_2$  появляется ток  $i_2$ , протекающий от H2 к K2. При этом полюса статора 2 и 4 приобретают полярность S и N. (рис. 9.10, а). В результате взаимодействия магнитных полей статора и ротора (постоянного магнита) появляется электромагнитный момент M, вращающий ротор.

После поворота ротора относительно оси полюсов статора 1–3 на некоторый угол  $\alpha$  против часовой стрелки датчик ДХ2 окажется в зоне магнитного полюса ротора S, при этом по сигналу с датчика ДХ2 включается транзистор

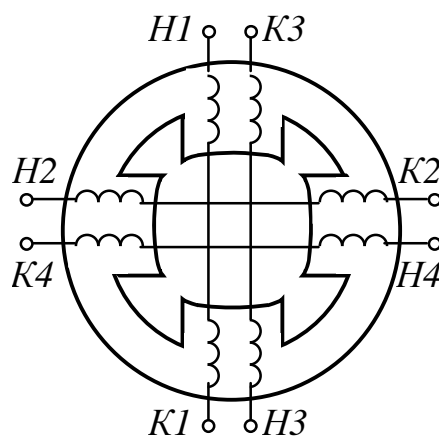


Рис. 9.9 – Расположение обмоток фаз на полюсах статора

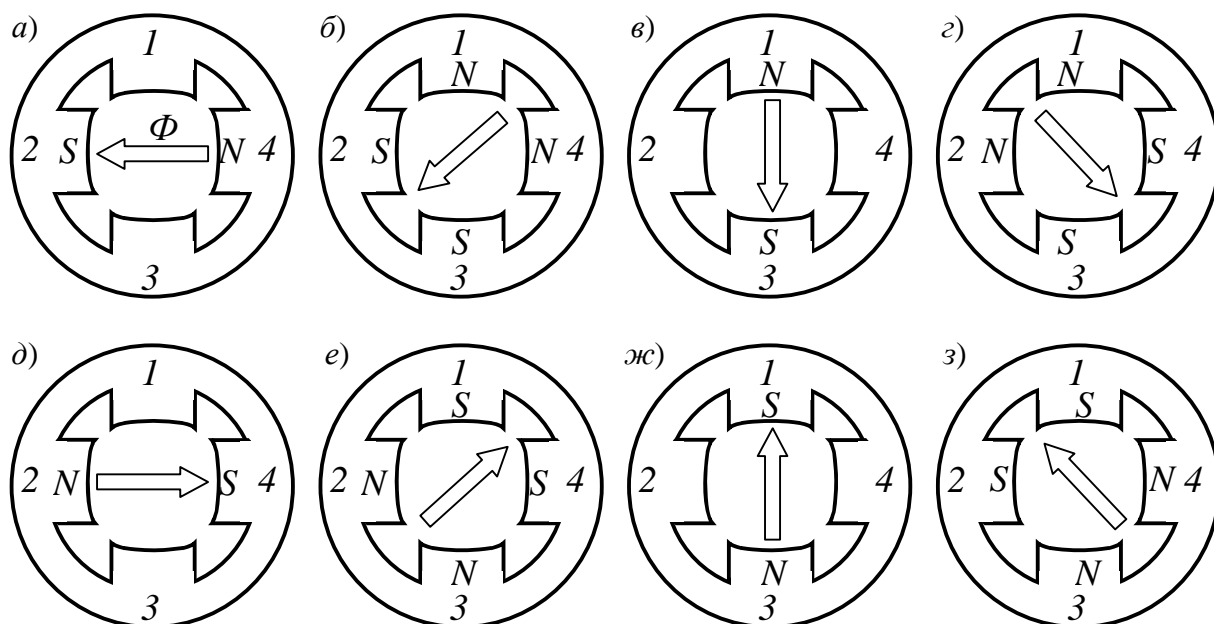


Рис. 9.10 – Образование магнитного потока в четырехфазном БДПТ

Таблица 9.1 – Алгоритм работы БДПТ с датчиками Холла

Позиция на рис. 9.10	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>	<i>г</i>	<i>д</i>	<i>e</i>	<i>ж</i>	<i>з</i>	<i>a</i>
Открыты транзисторы	<i>VT2</i>	<i>VT2, VT3</i>	<i>VT3</i>	<i>VT3, VT4</i>	<i>VT4</i>	<i>VT4, VT1</i>	<i>VT1</i>	<i>VT1, VT2</i>	<i>VT2</i>
Ток проходит по фазным катушкам	$\omega_2$	$\omega_2, \omega_3$	$\omega_3$	$\omega_3, \omega_4$	$\omega_4$	$\omega_1, \omega_4$	$\omega_1$	$\omega_1, \omega_2$	$\omega_2$
Угол поворота вектора потока статора	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	360°

*VT3*. В фазной катушке  $\omega_3$  возникает ток  $i_3$  и полюса 3 и 1 приобретают полярность *S* и *N*. При этом магнитный поток статора  $\Phi$  создается совместным действием МДС обмоток фаз  $\omega_2$  и  $\omega_3$ . Вектор этого потока повернут относительно оси полюсов 2–4 на угол 45° (рис. 9.10, б). Ротор, продолжая вращение, занимает положение по оси полюсов статора 2–4. При этом датчик *ДХ1* попадает в межполюсное пространство ротора, а датчик *ДХ2* останется в зоне полюса *S* ротора. В результате транзистор *VT2* закрывается, транзистор *VT3* останется открытым и магнитный поток  $\Phi$ , создаваемый МДС обмотки фазы  $\omega_3$ , поворачивается относительно оси полюсов 2–4 еще на 45° (рис. 9.10, в). После того, как ось вращающегося ротора пересечет ось полюсов статора 2–4, датчики *ДХ1* и *ДХ2* окажутся в зоне полюса ротора *S*, что приведет к включению транзисторов *VT3* и *VT4*. Дальнейшую работу элементов схемы БДПТ до завершения вектором потока  $\Phi$  одного оборота можно проследить по табл. 9.1 и рис. 9.10, г–з.

На рис. 9.11 показано устройство БДПТ с датчиками Холла. Датчики Холла 3 размещены в специальных пазах полюсных наконечников 1 сердечника статора. Постоянный магнит 2 не имеет центрального отверстия для посадки на вал, он закладывается в тонкостенную гильзу и закрывается привариваемыми фланцами двух полуосей. Такая конструкция ротора позволяет избежать выполнения центрального отверстия в постоянном магните, что часто является причиной брака (трещины, сколы и т.п.). Блок коммутатора БК расположен на панелях 5, отделен от двигателя перегородкой 4 и закрыт металлическим колпаком 6, через который выведены провода 7 для подключения двигателя в сети постоянного тока. Подобная конструкция применена в БДПТ полезной мощностью от 1 до 120 Вт.

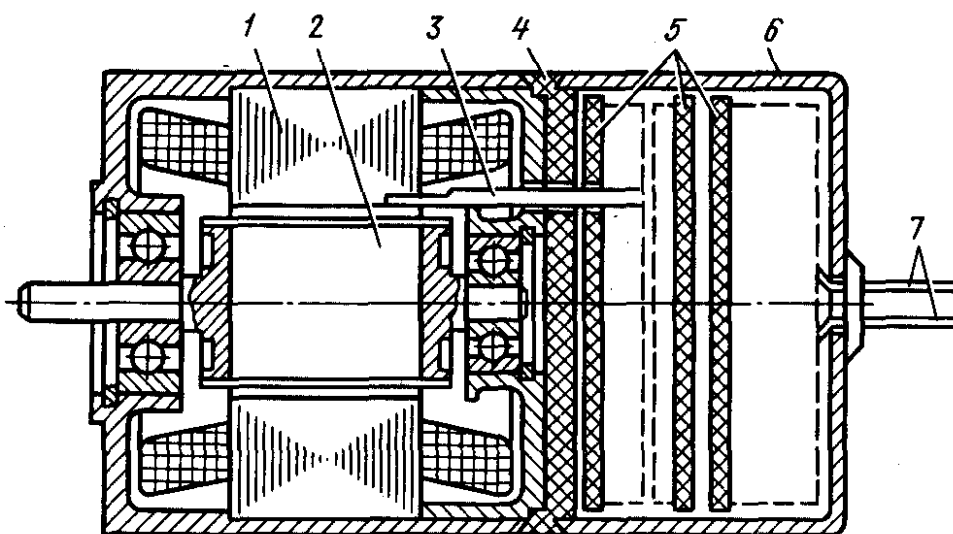


Рис. 9.11 – Устройство БДПТ с четырехфазным статором

Изменение направления вращения (реверс) двигателя осуществляется изменением полярности напряжения  $U_1$  в токовой цепи датчиков Холла. Изменение полярности напряжения  $U$  на входе двигателя недопустимо, так как при этом прекращается работа блока коммутатора.

Коэффициент полезного действия БДПТ по сравнению с коллекторными двигателями постоянного тока выше, что объясняется отсутствием щеточно-коллекторного узла, а значит, электрических потерь в щеточном контакте и механических потерь в коллекторе.

К достоинствам БДПТ относятся также высокая надежность и долговечность, что объясняется отсутствием у них щеточно-коллекторного узла, т. е. их бесконтактностью. Двигатели могут работать в условиях широкого диапазона температур окружающей среды, в вакууме, в средах с большой влажностью и т. п., где применение коллекторных двигателей недопустимо из-за неработоспособности щеточно-коллекторного узла.

Недостаток БДПТ – повышенная стоимость, обусловленная наличием полупроводникового блока коммутатора, чувствительных элементов (датчиков ЭДС Холла) и постоянного магнита.

### ***Конструктивное исполнение малоинерционных БДПТ***

Для повышения быстродействия малоинерционные двигатели выполняются с печатной обмоткой из фольги и имеют торцевую конструкцию.

Типичной конструкцией, позволяющей уменьшить габариты двигателя и сделать его плоским, является конструкция с осевым рабочим зазором. Особенности такого двигателя являются наличие магнитной системы торцевого типа с магнитным потоком, направленным вдоль оси вращения двигателя, и плоских катушек статора, расположенных между магнитом ротора и ярмом статора (рис. 9.12).

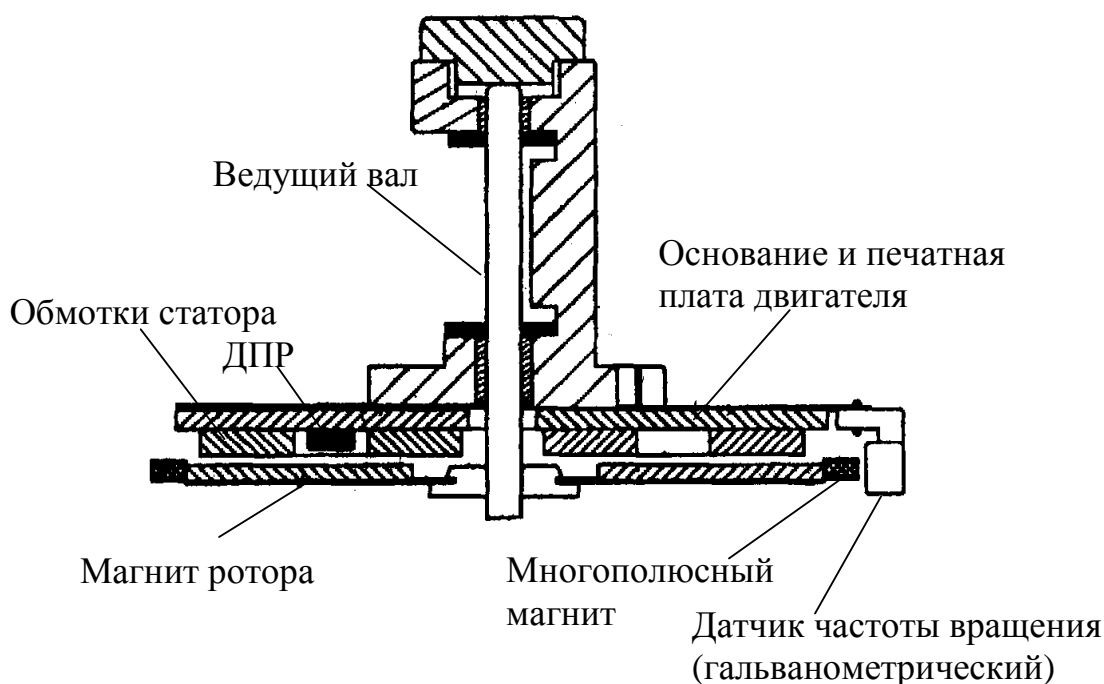


Рис. 9.12 – Конструкция двигателя торцевого типа

Вращающий момент в двигателе создается в результате взаимодействия магнитного потока в промежутке между полюсами магнита ротора и основанием статора с проводниками обмотки, по которым протекает электрический ток. Управление коммутацией катушек обмотки статора в зависимости от положения полюса магнита ротора осуществляется специальной схемой (драйвером) по сигналам датчиков положения ротора.

Катушки имеют многослойную намотку одним или двумя проводами с числом витков 60...100. Катушки статора после намотки пропитывают лаком, получая монолитную бескаркасную обмотку, и приклеивают ее к печатной плате, расположенной на основании двигателя (рис. 9.13).

Большое число катушек статора, как и полюсов магнита ротора, способствует равномерности скорости вращения. Однако широкое распространение получили БДПТ с небольшим числом катушек, так как увеличение их числа приводит к усложнению конструкции самой катушки, статора и схемы драйвера, а следовательно, к удорожанию узла в целом.

ДПР располагаются в непосредственной близости от магнита ротора, часто прямо внутри катушек статора (рис. 9.12, 9.13).

Помимо датчика положения ротора, в БДПТ применяются датчики частоты вращения.

Датчик частоты вращения представляет собой устройство, преобразующее механическое вращение вала двигателя в сигнал, пропорциональный скорости вращения ротора. По принципу действия эти датчики можно разделить: на индукционные, основанные на индуцировании электрического сигнала в обмотке изменяющимся магнитным потоком (аналог – магнитная головка); гальваноманетные, основанные на использовании чувствительных элемен-

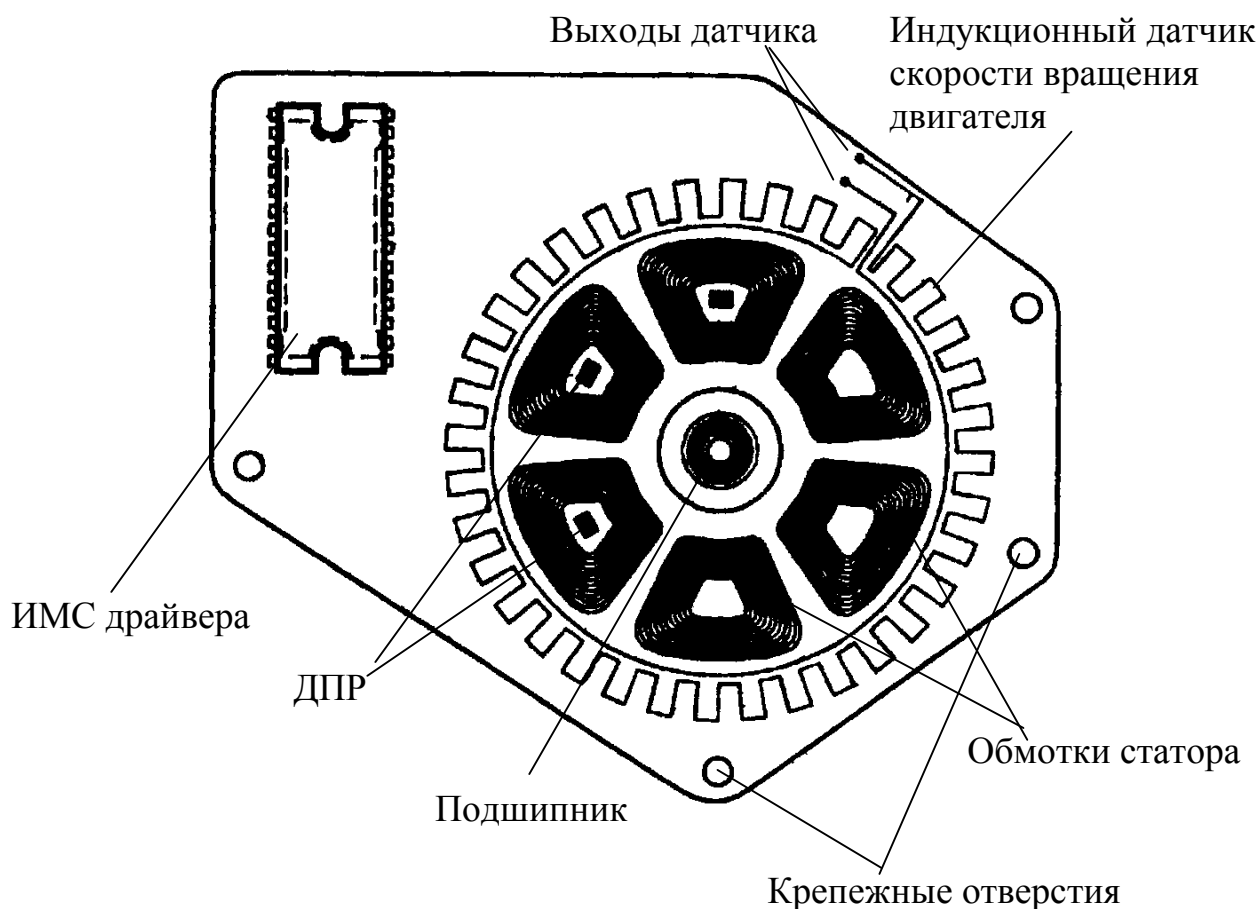


Рис. 9.13 – Статор двигателя торцевого типа

тов, реагирующих на изменение напряженности магнитного поля; оптические, основанные на принципе модуляции светового потока. Все три типа датчиков применяются в БДПТ.

Наибольшее распространение получили гальваномагнитные и индукционные датчики. Примером датчика первого типа служит датчик скорости вращения двигателя ведущего вала (ВВ). Модулирующим элементом здесь является многополюсный магнит кольцевой формы, расположенный на роторе двигателя, а чувствительным элементом является датчик Холла, мимо которого вращается модулирующий элемент. При вращении двигателя создается переменный магнитный поток, под действием которого на выходе датчика Холла возникает синусоидальный сигнал, пропорциональный скорости вращения вала двигателя. Для достижения приемлемой амплитуды сигнала зазор между магнитной системой и рабочей поверхностью датчика устанавливается очень малым (десятые доли миллиметра).

Примером датчика индукционного типа служит датчик положения двигателя блока вращающихся головок (БВГ). Модулирующим элементом этого датчика является постоянный магнит, укрепленный на наружной поверхности ротора, а чувствительным элементом является магнитная головка, закрепленная на неподвижном основании двигателя БВГ.

Конструкция индукционного датчика скорости вращения двигателя ВВ отличается от применяемых в двигателях БВГ. Примером таких датчиков служат датчики с меандровой обмоткой, нашедшие широкое применение в видеомагнитофонах фирмы *Hitachi*. Здесь модулирующим элементом является кольцевой многополюсный магнит, установленный на роторе двигателя ВВ, а чувствительным элементом – обмотка в виде меандра, нанесенная печатным способом на плату и расположенная под модулирующим элементом. Кроме датчика, на плате крепятся обмотки статора двигателя и устанавливается драйвер (интегральная микросхема (ИМС)) (см. рис. 9.13). Принцип действия датчика скорости вращения индукционного типа двигателя ВВ такой же, как у гальванометрического, рассмотренного ранее.

## 9.4 Асинхронные двигатели

Принцип действия АД состоит в том, что вращающееся магнитное поле статора пересекает проводники обмотки ротора и индуцирует в них ЭДС. На роторе имеются проводники (обмотка или короткозамкнутые на торцах стержни), по которым под действием этой ЭДС может протекать ток. В результате взаимодействия вращающегося магнитного поля статора с проводниками с током, находящимися на роторе, создается вращающий момент, под действием которого ротор начинает вращаться в направлении вращения магнитного поля статора. Очевидно, что для изменения направления вращения ротора необходимо изменить направление вращения магнитного поля статора.

Номинальная скорость вращения ротора  $n_n$  несколько отличается от скорости вращения магнитного поля статора  $n_0$ :  $n_n \approx n_0$ , но  $n_n < n_0$ .

Скорость  $n_0$  в справочниках не приводится, но она определяется по ряду стандартных скоростей: 3000, 1500, 1000 и т.д. об/мин.

Поскольку вращающееся магнитное поле может быть создано трехфазной либо двухфазной системой переменного тока, то существуют:

- трехфазные АД с тремя фазными обмотками статора;
- двухфазные АД с двумя обмотками;
- однофазные АД.

Трехфазные АД в зависимости от конструктивного исполнения ротора подразделяются на АД с фазным ротором (рис. 9.14, а) и АД с короткозамкнутым ротором (рис. 9.14, б). В трехфазных АД с фазным ротором на роторе находятся фазные обмотки, которые соединяют между собой так, что образуется трехфазная система. Концы обмоток выводятся на кольца,

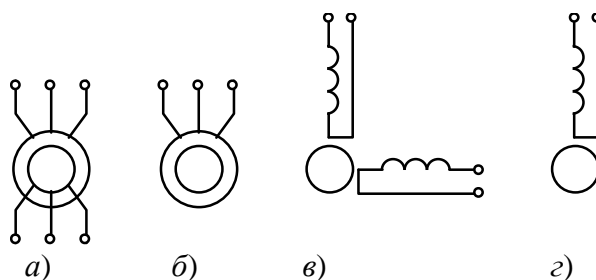


Рис. 9.14 – Условные обозначения АД



расположенные на валу, и имеется доступ к обмоткам через скользящие по кольцам щетки.

Короткозамкнутая обмотка АД с короткозамкнутым ротором выполняется по типу беличьего колеса и состоит из массивных стержней, соединенных на концах кольцами, в результате чего доступ к обмотке невозможен.

Трехфазные АД применяются в мощных системах электропривода РЭС.

Двухфазные АД (рис. 9.14, в) – АД с двумя обмотками на статоре и короткозамкнутым ротором – применяются в системах электропривода малой мощности, например в бытовых сетевых магнитофонах. Для электропитания двухфазных АД от однофазной сети переменного тока одна из обмоток подключается непосредственно к однофазной сети, а другая – через фазосдвигающий элемент. Обычно фазосдвигающим элементом является емкость, отсюда название АД – конденсаторный (двухфазный) двигатель.

АД может работать и при пульсирующем магнитном поле, которое создается одной фазной обмоткой статора. Однако такой однофазный АД (рис. 9.14, в) имеет нулевой пусковой момент, поэтому для его пуска в ход необходимо приложить внешний вращающий момент либо создать вращающееся магнитное поле на время разгона, либо иметь специальное конструктивное исполнение АД – АД с экранированными полюсами – за счет которого создается вращающееся магнитное поле. Во втором случае необходимо иметь, кроме рабочей обмотки статора, вторую (пусковую) обмотку, которая включается только на время пуска. В качестве однофазного АД может быть использован любой трехфазный АД, у которого две последовательно соединенные фазы образуют рабочую обмотку, а третья фаза – пусковую.

Одним из основных показателей работы АД является *скольжение*:

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}.$$

Скольжение показывает, на какую величину проскальзывает ротор относительно магнитного поля статора.

В соответствии с принципом действия АД представляет собой вращающийся трансформатор, поэтому при расчете параметров АД и выводе его МХ используется схема замещения фазы АД (рис. 9.15).

В схеме замещения приняты обозначения:

$U_{1\phi}$  – действующее значение фазного питающего напряжения (напряжение, приложенное к обмотке, для трехфазных АД зависит от схемы соединения обмоток);

$R_1, R_2$  – активные сопротивления обмоток статора и ротора;

$R'_2$  – активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к цепи статора;

$X_{1s}, X_{2s}$  – индуктивные сопротивления цепей статора и ротора от потоков рассеяния;

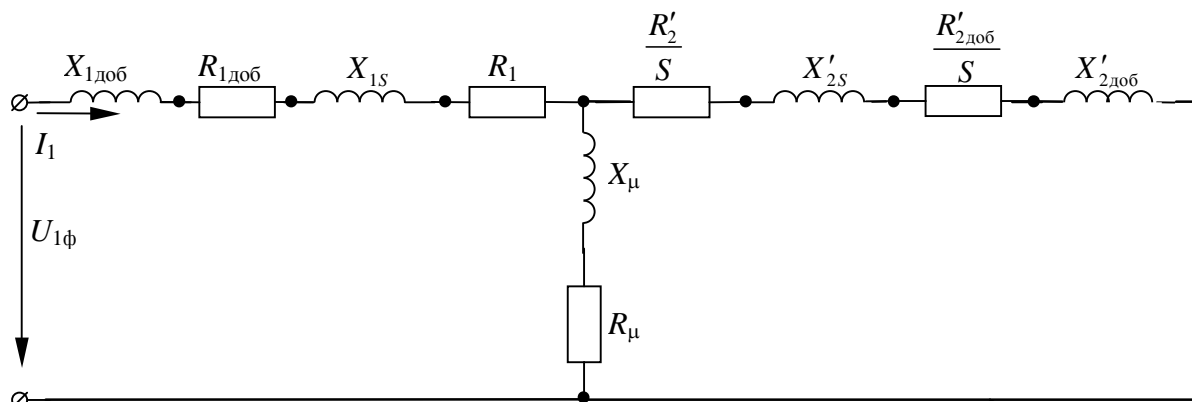


Рис. 9.15 – Схема замещения фазы АД с учетом добавочных сопротивлений

$X'_{2S}$  – индуктивное сопротивление цепи ротора, приведенное к цепи статора;

$X_S = X_{1S} + X'_{2S}$  – суммарное реактивное сопротивление рассеяния;

$X_\mu$  – индуктивное сопротивление току намагничивания;

$R_\mu$  – активное сопротивление току намагничивания;

$R_{1доб}$ ,  $R_{2доб}$  – добавочные активные сопротивления, включенные в цепь статора и ротора;

$X_{1доб}$ ,  $X_{2доб}$  – добавочные реактивные сопротивления, включенные в цепь статора и ротора;

$R'_{2доб}$ ,  $X'_{2доб}$  – добавочные сопротивления в цепи ротора, приведенные к цепи статора.

МХ АД имеет достаточно сложный аналитический и графический вид (рис. 9.16) [6]:

$$M(S) = \frac{2M_k(1+\varepsilon)}{\frac{S_k}{S} + \frac{S}{S_k} + 2\varepsilon};$$

$$M_k = \frac{mU_{1\phi}^2}{2\omega_0 \left[ \sqrt{(X_S + X_{1доб} + X'_{2доб})^2 + (R_1 + R_{1доб})^2} \pm (R_1 + R_{1доб}) \right]};$$

$$\omega_0 = \frac{2\pi f}{p};$$

$$S_k = \frac{R'_2 + R'_{2доб}}{\sqrt{(X_S + X_{1доб} + X'_{2доб})^2 + (R_1 + R_{1доб})^2}};$$

$$\varepsilon = \frac{R_1 + R_{1доб}}{\sqrt{(X_S + X_{1доб} + X'_{2доб})^2 + (R_1 + R_{1доб})^2}} = S_k \frac{R_1 + R_{1доб}}{R'_2 + R'_{2доб}}.$$

Здесь  $M_k$  – критический момент (максимально допустимый момент АД);  $S_k$  – критическое скольжение (скольжение, соответствующее критическому моменту);  $f$  – частота питающего напряжения;  $m$  – число фаз АД; в формуле для критического момента знак «+» соответствует двигательному режиму работы; знак «-» – генераторному.

Следует обратить внимание, что чем больше число фаз  $m$ , тем больше максимальный момент и соответственно мощность двигателя.

Очевидно, что регулировать скорость АД можно, изменяя величину питающего напряжения, его частоту, величину добавочных сопротивлений в цепи статора и ротора. В РЭС БН с асинхронным электроприводом регулировку скорости ведомых узлов обычно осуществляют, изменяя передаточное число приводного редуктора.

Примеры МХ АД представлены на рис. 9.16. Вид МХ однофазного АД свидетельствует о том, что его пусковой момент равен нулю.

На ЕМХ номинальной скорости АД  $\omega_n$  соответствует номинальное скольжение  $S_n$ , а критическому моменту  $M_{ке}$  – критическое скольжение  $S_{ке}$ .

По сравнению с ДПТ асинхронный двигатель имеет меньшую область работоспособности, ограниченную величиной критического момента, и меньший пусковой момент. Поэтому:

- при  $M_c > M_k$  АД останавливается;
- при  $M_c > M_n$  АД не может запуститься.

Из схемы замещения вытекает, что токи обмоток статора  $I_1$  и приведенный ротора  $I'_2$  приблизительно равны:

$$I_1 \approx I'_2 \approx \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{(X_S + X_{1доб} + X'_{2доб})^2 + \left(R_1 + R_{1доб} + \frac{R'_2 + R'_{2доб}}{S}\right)^2}}.$$

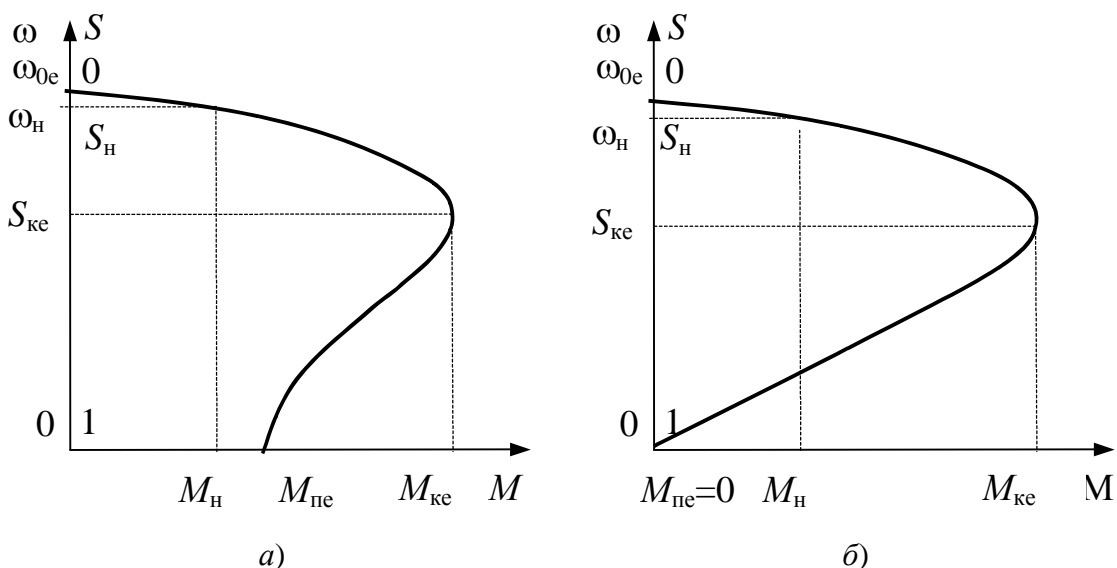


Рис. 9.16 – Механические характеристики трехфазного(а) и однофазного (б) АД

Ток АД при  $S = 1$  ( $\omega = 0$ ) представляет собой пусковой ток:

$$I_{1п} \approx I'_{2п} \approx \frac{U_{1ф}}{\sqrt{(X_S + X_{1доб} + X'_{2доб})^2 + (R_1 + R_{1доб} + R'_2 + R'_{2доб})^2}}.$$

Пусковой ток на ЭМХ при отсутствии добавочных сопротивлений равен:

$$I_{1пе} = \frac{U_{1фн}}{\sqrt{X_S^2 + (R_1 + R'_2)^2}}.$$

Пусковой ток АД в 4...8 раз больше номинального (см. рис. 7.5, з), что меньше, чем у ДПТ, но все равно нежелательно как для двигателя (приведет к преждевременному старению изоляции), так и для источника электропитания.

Номинальные данные АД (номинальное питающее напряжение  $U_{1фн}$ , номинальная скорость, пусковой ток  $I_{1пе}$ , перегрузочная способность по моменту  $\lambda_m$ ) позволяют определить [6]:

$$S_{ке} = 1,2 S_n \left( \lambda_m + \sqrt{\lambda_m^2 - 0,85} \right);$$

$$R'_2 = \frac{S_{ке} U_{1фн}}{\sqrt{S_{ке}^2 (1 + 2\gamma)} I_{1пе}};$$

$$X_S = \sqrt{\left( \frac{U_{1фн}}{I_{1пе}} \right)^2 - (R_1 + R'_2)^2} = \sqrt{\left( \frac{U_{1фн}}{I_{1пе}} \right)^2 - (R'_2 (1 + \gamma))^2},$$

где  $\gamma = R_1 / R'_2 = 0,8 \dots 1,2$  (при неизвестном  $\gamma$  в инженерных расчетах полагают  $\gamma = 1$ ).

### ***Конструктивное исполнение асинхронных микродвигателей***

Следует отметить, что промышленностью изготавливаются и асинхронные микродвигатели малой мощности. Статор этих АД состоит из наружной и внутренней частей. Внутренний статор служит для уменьшения магнитного сопротивления магнитной системы машины. Ротор АД может быть массивным либо полым (в виде стакана). В двигателях с полым ротором мощностью менее 1...1,5 Вт часто обмотки размещают на внутреннем статоре, что позволяет уменьшить габариты и массу двигателя.

Поскольку скорость АД в существенной мере зависит от нагрузки (см. рис. 9.16), то АД применяются в тех устройствах, где не предъявляются высокие требования по стабильности скорости. Для микромашин это вентиляторы, бытовые электротехнические устройства и т.д. Следует отметить, что и в качестве электродвигателей вентиляторов ряда РЭС применяются синхронные машины.

## 10 ЗАЩИТА ОТ ПОМЕХ, ПЕРЕГРУЗОК И ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ

### 10.1 Защита устройств электропитания от перегрузок

Источники электропитания на полупроводниковых приборах обладают повышенной чувствительностью к перегрузкам, коротким замыканиям нагрузки и кратковременным перенапряжениям на входе. Поэтому для их надежной работы в условиях эксплуатации необходима специальная электрическая защита.

#### 10.1.1 Принципы и методы защиты от перегрузок

Одним из средств повышения надежности, ремонтпригодности и долговечности является защита средств электропитания от перегрузок и короткого замыкания. Причинами электрических и тепловых перегрузок, которые могут привести к выходу из строя устройство электропитания, являются:

– *внешние аварийные ситуации*: короткое замыкание в цепи нагрузки, нарушение работы первичных источников электропитания;

– *внутренние аварийные ситуации*: включение и выключение устройств электропитания, отказы узлов и элементов.

*Цель защиты* узлов и элементов устройства электропитания – *сохранение их работоспособности* после устранения аварий и перегрузок и восстановление нормального режима эксплуатации. Защита предотвращает развитие внутренней аварии и упрощает ремонт устройства электропитания после отказа. Устройства защиты должны обладать достаточным *быстродействием* и *чувствительностью*, то есть должны срабатывать быстрее, чем защищаемые элементы и устройства выходят из строя под действием перегрузки.

Различают два вида защит:

– *общая защита* – полностью отключает устройство электропитания от источника электроэнергии при появлении перегрузки;

– *индивидуальная защита* – обеспечивает отключение или устранение перегрузки отдельных узлов и элементов устройства.

По принципу реализации защиты методы защиты являются *схемными*. *Схемные методы защиты* основаны на построении специальных схем, которые при возникновении перегрузки автоматически переходят в состояние, при котором нормальное функционирование устройства электропитания нарушается, но это неопасно для отдельных элементов схемы.

По принципу реакции на перегрузку *методы защиты* подразделяют на пассивные и активные. *Пассивные методы защиты* основаны на введении в схемы специальных устройств, которые при появлении перегрузки либо ограничивают ток или напряжение в месте перегрузки, либо вообще отключают

устройство электропитания или элемент, причем срабатывание пассивных устройств защиты происходит непосредственно за счет самой перегрузки, то есть энергии возникшего возмущения. **Активные методы защиты** отличаются от пассивных тем, что возникшее возмущение воздействует на исполнительный элемент защиты не непосредственно, а **через некоторое управляющее устройство**. Последнее обеспечивает усиление возникшего возмущения, что обеспечивает высокую чувствительность активных схем защиты.

Примерами пассивных защитных устройств являются предохранители, автоматические выключатели, стабилитроны, резисторы, катушки индуктивности, *RC*-цепочки.

**Плавкий предохранитель**, включенный последовательно с защищаемым элементом, узлом либо устройством электропитания в целом разрывает цепь при превышении током некоторого значения. Предохранитель осуществляет функцию защиты только в том случае, если его время срабатывания меньше допустимого времени перегрузки защищаемого элемента. Время срабатывания (разрыва цепи) предохранителя  $t_{\text{сраб}}$  зависит от коэффициента (кратности) перегрузки предохранителя:

$$K = \frac{I_m}{I_{\text{НОМ}}},$$

где  $I_m$  – максимальный ток;  $I_{\text{НОМ}}$  – номинальный ток предохранителя.

Характеристики, показывающие, как зависит время срабатывания от коэффициента перегрузки, называются перегрузочными ампер-секундными характеристиками (рис. 10.1).

При выборе предохранителя необходимо, чтобы его перегрузочная характеристика располагалась ниже перегрузочной характеристики защищаемого элемента. В то же время предохранитель не должен сгорать от бросков тока, возникающих при штатных переходных процессах известной длительности.

**Катушка индуктивности**, включенная последовательно с защищаемым элементом, ограничивает скачки токов.

***RC*-цепочка, стабилитрон**, включенные параллельно с защищаемым элементом, ограничивают броски напряжений.

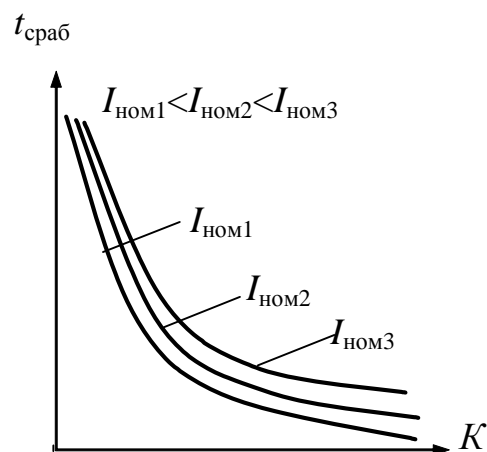


Рис. 10.1 – Перегрузочные ампер-секундные характеристики предохранителя


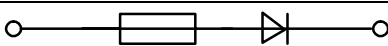
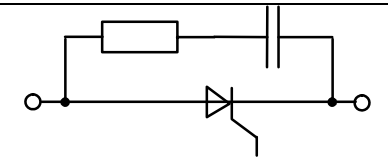
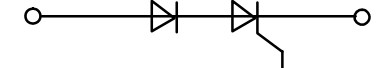
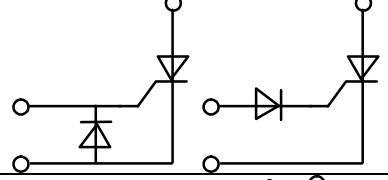
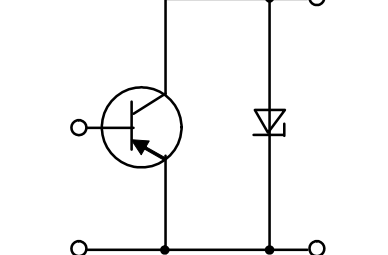
### 10.1.2 Индивидуальная защита элементов и узлов

Для разработки устройств защиты необходимо знать перегрузочную способность элементов устройств электропитания.

**Пассивные элементы** устройств электропитания – резисторы, дроссели, трансформаторы и т.п. – весьма инерционны в тепловом отношении, имеют большую тепловую постоянную времени, устойчивы к перегрузкам, поэтому они обычно не требуют высокого быстродействия от устройств защиты.

Наиболее чувствительными даже к кратковременным перегрузкам являются **полупроводниковые приборы**, применяемые в устройствах электропитания. Если ток и напряжение полупроводникового прибора превышают предельно допустимые значения, то происходит тепловой или электрический пробой, который разрушает *p-n*-переход. Поэтому полупроводниковые приборы, как правило, обеспечиваются индивидуальной защитой (табл. 10.1).

Таблица 10.1 – Варианты индивидуальной защиты полупроводниковых приборов

	Схема защиты	Назначение и принцип защиты
Диод		Ограничение скачков тока за счет ЭДС самоиндукции катушки индуктивности
		Разрыв цепи при превышении током некоторого значения за счет срабатывания быстродействующего предохранителя
Тиристор		Защита от перенапряжений в процессе коммутации
		Снижение пиков обратного напряжения
		Защита управляющего электрода от отрицательных обратных напряжений и обратных токов
Транзистор		Защита от перенапряжения

На рис. 10.2 приведена схема для защиты трехфазного выпрямителя от скачков напряжения в сети.

RC-цепочки подключены к выходным обмоткам трехфазного трансформатора (схема звезда-звезда) по схеме треугольник.

Для защиты от коротких замыканий в самом трансформаторе или его вторичной цепи необходимо отключение всего выпрямителя от сети переменного тока. Данная функция реализуется посредством автоматического выключателя.

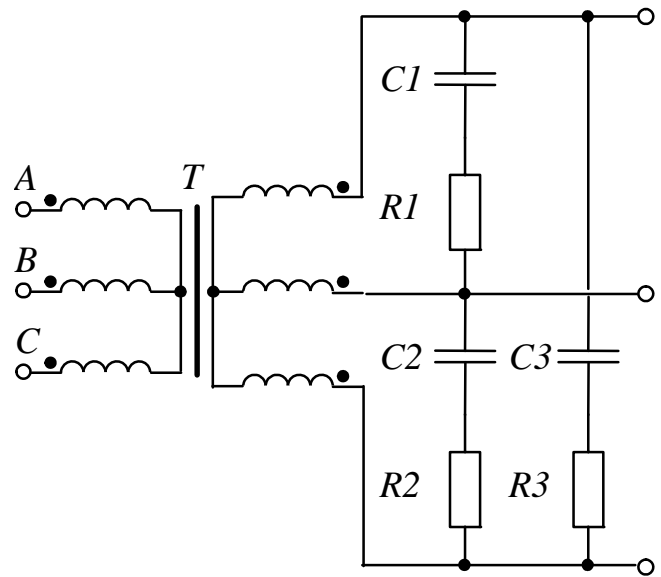


Рис. 10.2 – Защита от скачков напряжения сети с помощью RC-цепочек

### 10.1.3 Общая активная защита устройства электропитания

Рассмотрим принцип построения защиты в схеме выпрямителя с симисторным регулированием (рис. 10.3).

При запортом симисторе выпрямитель вырождается в обычный мостовой выпрямитель, работающий на емкостную нагрузку.

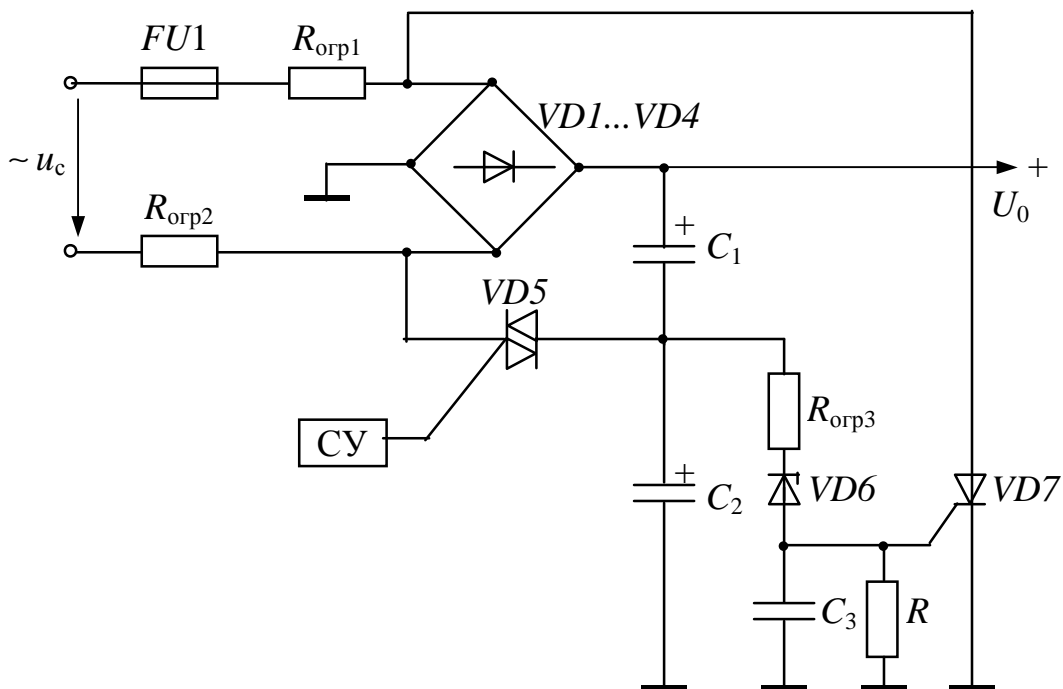


Рис. 10.3 – Удвоитель напряжения с симисторным регулированием и защитой от перенапряжения



При полностью открытом тиристоре схема вырождается в мостовой удвоитель. Два из четырех диодов моста при этом заперты и не работают. Схема управления позволяет коммутировать тиристор в нужный момент, чтобы отрабатывать изменение напряжения питающей сети. Это позволяет поддерживать напряжение  $U_0$  в заданных пределах (около 300 В).

При выходе из строя симистора (пробое) или отказе схемы управления возможна ситуация, когда при наибольшем  $U_c$  выпрямитель будет работать как удвоитель. Напряжение  $U_0$  при этом возрастет до 600 В, что неминуемо вызовет неисправности в питаемых от выпрямителя устройствах. Поэтому такая схема снабжается защитой от возможного перенапряжения.

При срабатывании защиты отпирается тиристор  $VD7$ , и протекающий через него ток вызывает выгорание предохранителя  $FU1$ . Таким образом, обесточивается весь выпрямитель и делается невозможным повторное включение при неустраненной неисправности.

Порог срабатывания защиты зависит от величины напряжения стабилизации выбранного стабилитрона  $VD6$ . До тех пор пока напряжение на конденсаторе  $C_2$  не превысит напряжения стабилизации  $U_{ст\ VD6}$ , стабилитрон будет заперт, и ток управляющего электрода тиристора  $VD7$  будет отсутствовать. Конденсатор  $C_3$  предотвращает ложные срабатывания от помех при переключениях. Резисторы  $R_{огр1}$  и  $R_{огр2}$  (порядка 2..3 Ом) ограничивают максимальный ток заряда конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$  при включении ИВЭП, а также тиристора  $VD7$  при срабатывании защиты.

В реальных схемах вместо  $R_{огр3}$  применяют делитель напряжения с дополнительным фильтром напряжения управления защитой. Это позволяет выбрать в качестве порогового низковольтный маломощный стабилитрон и дополнительно защитить схему от помех.

Другие схемы защиты рассматривались при изложении материала о непрерывных компенсационных стабилизаторах.

## 10.2 Защита от помех

**Источниками помех** в системах электропитания являются:

- трансформаторно-выпрямительные блоки;
- устройства стабилизации.

**Каналы распространения помех** – электромагнитное излучение и электрические провода.

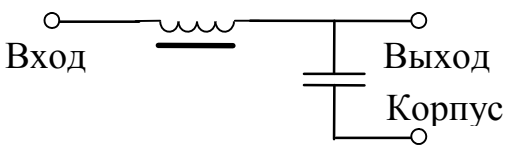
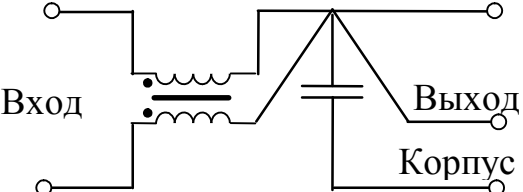
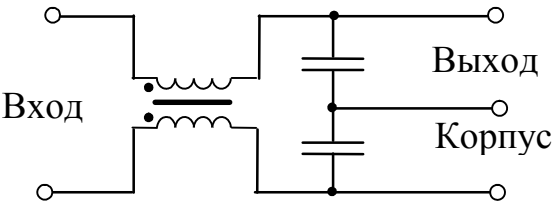
Для снижения помех до уровней, обеспечивающих нормальную работу устройств РС, должен применяться **ряд мер**, к которым относятся:

- шунтирование диодов сетевых выпрямителей конденсаторами;
- применение защитного фильтра в сети переменного тока;
- соблюдение норм и правил прокладки проводов, их экранирования и заземления;

– включение помехоподавляющих фильтров во входные и выходные цепи устройств стабилизирующего электропитания.

Электрические схемы помехозащитных фильтров представлены в табл. 10.2. Дроссели фильтров выполняются на ферритовых кольцах, обмотка дросселей имеет одну или две нитки и содержит семь витков. В фильтрах применяются керамические конденсаторы. Элементы фильтров размещаются в экранирующих или в отдельных отсеках (ячейках) корпуса ИВЭП.

Таблица 10.2 – Схемы помехозащитных фильтров

Область применения	Схема
Однопроводной выход; ток нагрузки до 3 А	
Однопроводной выход; ток нагрузки свыше 3 А	
Выходные каналы, гальванически не связанные с общей шиной и корпусом	

### 10.3 Элементы электробезопасности

Для предотвращения поражения людей электрическим током токоведущие части электроустановок и РЭС изолируют. Состояние изоляции считается удовлетворительным, если сопротивление между токоведущей частью и землей не менее 500 кОм.

Во время эксплуатации электроустановок и РЭС может произойти пробой изоляции и токоведущая часть замкнется на корпус, поэтому для предотвращения несчастных случаев корпуса электроустановок и РЭС заземляют и зануляют.

Поражение электрическим током происходит при замыкании электрической цепи через тело человека. Величина тока зависит от сопротивления тела человека  $R_{\text{ч}}$ , которое может быть весьма различным, зависит от состояния кожи и может составлять  $R_{\text{ч}} = 1 \dots 100$  кОм. Обычно для оценки тока замы-

кания принимают среднерасчетное  $R_{\text{ч}} = 2$  кОм. При расчете величины тока короткого замыкания учитывается состояние обуви  $R_{\text{об}}$  человека и пола  $R_{\text{пол}}$ , на котором он стоит. Так, если обувь сырая или подбита гвоздями, а пол сырой, то  $R_{\text{об}} = R_{\text{пол}} \div 0$ . Если человек обут в специальную резиновую обувь и стоит на деревянном полу, то  $R_{\text{об}} \div 45$  кОм;  $R_{\text{пол}} \div 98$  кОм.

К смерти может привести длительное действие тока 25...50 мА и фибрилляционный ток величиной 100 мА и выше.

### 10.3.1. Защитное заземление в сетях с изолированной нейтралью

В сетях переменного тока *с изолированным нулевым проводом (нейтралью)*, то есть в трехпроводных сетях, в целях обеспечения электробезопасности применяют *заземление*. Защитному заземлению подлежат станины и корпуса электрических машин, светильников и выключателей и т.п.

*Замыкание одной фазы сети на корпус в электроустановке без заземления* (рис. 10.5, а) создает большое напряжение между корпусом и землей. Человек, стоящий на земле, коснувшись корпуса, попадает под напряжение, опасное для жизни.

Если в этом случае другая фаза сети имеет пробой изоляции и замыкается на землю, то стоящий на земле человек, коснувшись корпуса, попадает под линейное напряжение, которое при соединении обмоток генератора по схеме звезда в  $\sqrt{3}$  раз больше фазного. Ток двухфазного короткого замыкания в этом случае равен:

$$I_3 = \frac{U_{\text{ф}}}{R_{\text{ч}}} = \frac{220}{2000} = 0,11 \text{ А.}$$

Такой ток смертельно опасен.

*Замыкание одной фазы сети на корпус при наличии заземлителя* (рис. 10.4, б). При пробое фазы на корпус заземленного устройства тело человека шунтируется заземлителем с сопротивлением  $R_3 = 4...8$  Ом. В этом случае касание корпуса оборудования безопасно: напряжение замыкания в данном случае

$$U_3 = \frac{U_{\text{л}} R_3}{R_3 + R_{\text{ч}}} = \frac{380 \cdot 4}{4 + 2000} = 0,8 \text{ В.}$$

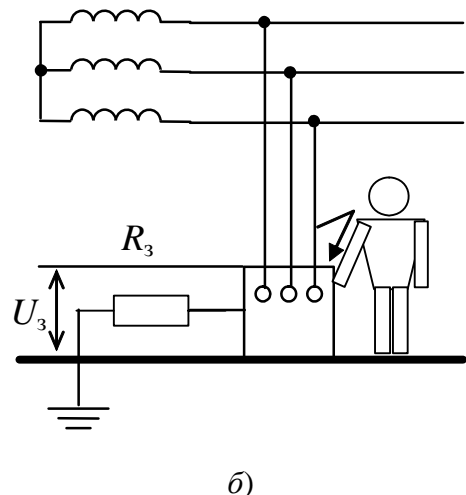
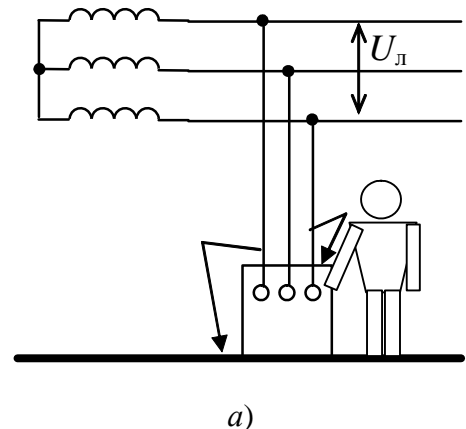


Рис. 10.4 – Схема электробезопасности при заземлении электроустановки

При соблюдении норм рабочего заземления однофазное замыкание на корпус в сетях с изолированной нейтралью не представляет опасности.

**Замыкание двух фаз сети на корпус при наличии заземлителя.** В сетях с изолированной нейтралью **опасным** является одновременное замыкание двух фаз одной сети на корпуса двух электроустановок (рис. 10.5). При этом напряжение сети распределится пропорционально сопротивлению рабочих заземлений обеих электроустановок.

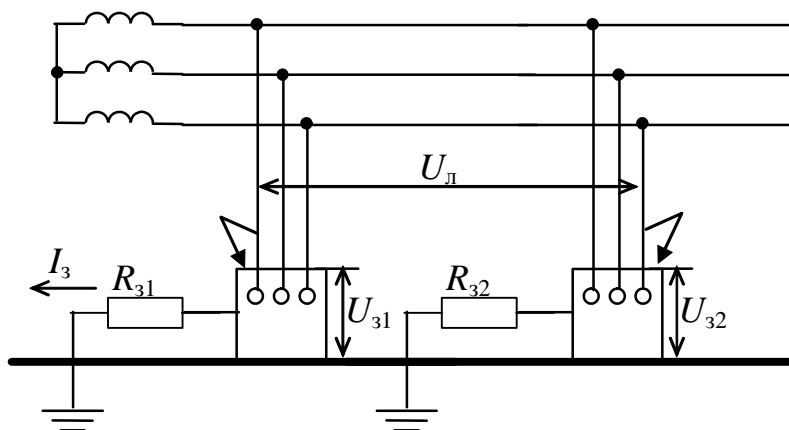


Рис. 10.5 – Схема электробезопасности при заземлении двух электроустановок

При линейном напряжении  $U_{л} = 380$  В;  $R_{з1} = 4$  Ом;  $R_{з2} = 6$  Ом ток замыкания составит:

$$I_{з} = \frac{U_{л}}{R_{з1} + R_{з2}} = \frac{380}{4 + 6} = 38 \text{ А},$$

а напряжения замыкания на электроустановках:

$$U_{з1} = 38 \cdot 4 = 152 \text{ В}; U_{з2} = 38 \cdot 6 = 228 \text{ В}.$$

Такое напряжение является опасным для обслуживающего персонала.

**Защитному заземлению подлежат** металлические конструкции электроустановок, корпуса и станины электрических машин, сердечники трансформаторов, корпуса и приводы электрических аппаратов, металлические оболочки и стальные трубы кабелей и проводов, металлические опоры и т.п.

**В заземлении не нуждаются:**

- электроустановки при напряжении 380 В и ниже в отапливаемых помещениях без повышенной опасности с деревянным полом;
- электроустановки при номинальном напряжении 127 В переменного тока и 110 В и ниже постоянного тока во всех помещениях, кроме сырых и с горючими и взрывчатыми веществами;
- арматура подвесных и опорных изоляторов, осветительная арматура, установленная на деревянных опорах;

- корпуса электроизмерительных приборов, реле, установленных на щитах и на стенах камер распределительных устройств;
- конструкции, по которым проложены кабели с заземленными оболочками.

### 10.3.2 Защитное заземление сетей с заземленной нейтралью

В четырехпроводной сети переменного тока *нейтраль (нулевой провод) заземляется*.

В случае *однофазного прикосновения* в сети с заземленной нейтралью (рис. 10.6) образуется последовательная цепь из сопротивлений тела человека, обуви, пола и заземления нейтрали. К этой цепи приложено фазное напряжение. Если человек стоит на сырой земле или на проводящем полу в сырой или подбитой гвоздями обуви, то ток, проходящий через человека, смертельно опасен:

$$I_3 = \frac{U_{\phi}}{R_{\text{ч}} + R_{\text{пол}} + R_{\text{об}}} \cdot \frac{220}{2000} = 0,11 \text{ А.}$$

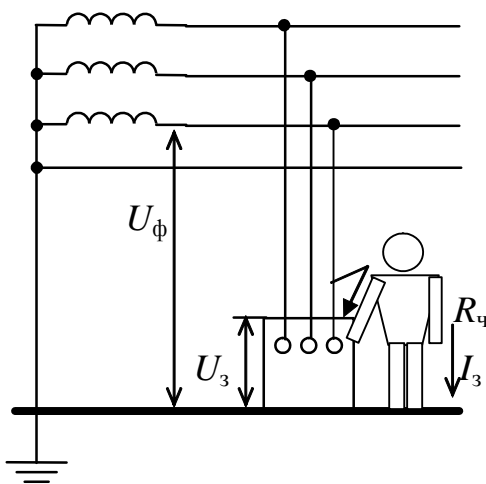


Рис. 10.6 – Однофазное прикосновение в сети с заземленной нейтралью

Если же человек обут в специальную обувь и находится на сухом полу, то ток равен:

$$I_3 \cdot \frac{220}{2000 + 45000 + 98000} = 0,0015 \text{ А}$$

и неопасен для человека.

В четырехпроводной сети переменного тока с заземленной нейтралью корпуса электроустановок подключаются к нейтрали, то есть выполняется так называемое *зануление электроустановок* (рис. 10.7).

Подключение корпусов электроустановок к заземленной нейтрали (рис. 10.7) **обеспечивает автоматическое отключение аварийного участка** цепи при замыкании фазы на корпус за счет срабатывания защит: предохранителя либо автомата. **Если ток короткого замыкания будет недостаточным для отключения электроприбора, то его корпус окажется под опасным напряжением.**

Фазное напряжение сети распределяется пропорционально сопротивлению фазного и нулевого проводов. Если человек касается корпуса, то он попадает под напряжение, приходящееся на нулевой провод (см. рис. 10.7).

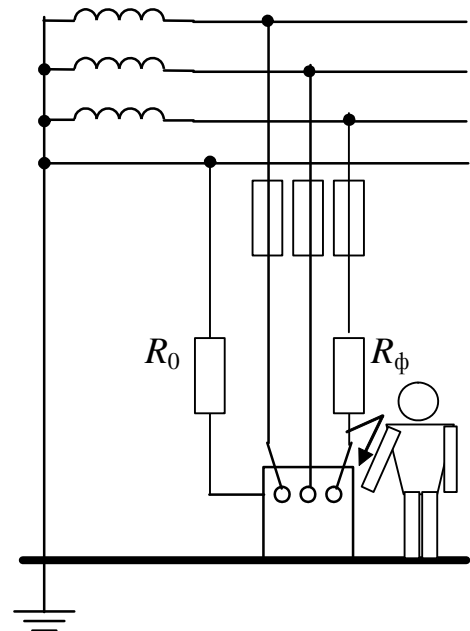


Рис. 10.7 – Схема зануления

**Замыкание фазы на корпус при обрыве нулевого провода является опасным:** при касании корпуса электрооборудования человек попадает под фазное напряжение сети (см. рис. 10.6).

Для снижения напряжения касания при замыкании фазы на корпус применяется одновременное заземление нейтрали и электроустановки (**повторное заземление**) (рис. 10.8). При этом фазное напряжение распределится пропорционально сопротивлениям заземления нейтрали  $R_{31}$  и заземления электроустановки  $R_{32}$ . При  $R_{31} = R_{32} = 4$  Ом получим:

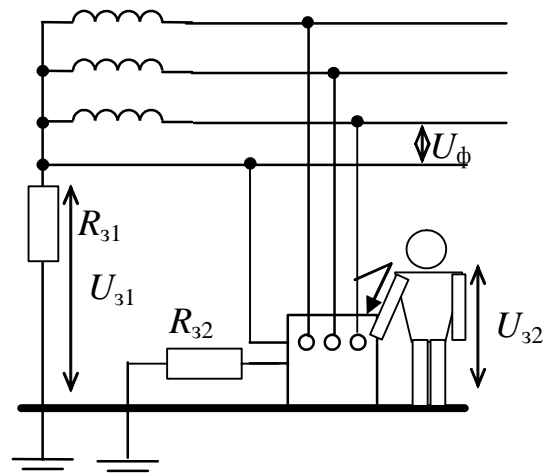


Рис. 10.8 – Схема повторного заземления

$$U_{31} = \frac{U_{\phi} R_{31}}{R_{31} + R_{32}} = \frac{220 \cdot 4}{4 + 4} = 110 \text{ В}; \quad U_{32} = \frac{U_{\phi} R_{32}}{R_{31} + R_{32}} = \frac{220 \cdot 4}{4 + 4} = 110 \text{ В}.$$

Таким образом, человек, касаясь корпуса электроустановки, попадает под опасное, но меньшее фазного, напряжение.

**Зануление одних электроустановок и заземление других в одной электросети запрещается.** При заземлении одной электроустановки и занулении других замыкание фазы на корпус заземленной электроустановки создает на ней и **на всем зануленном оборудовании** опасные напряжения (рис. 10.9).

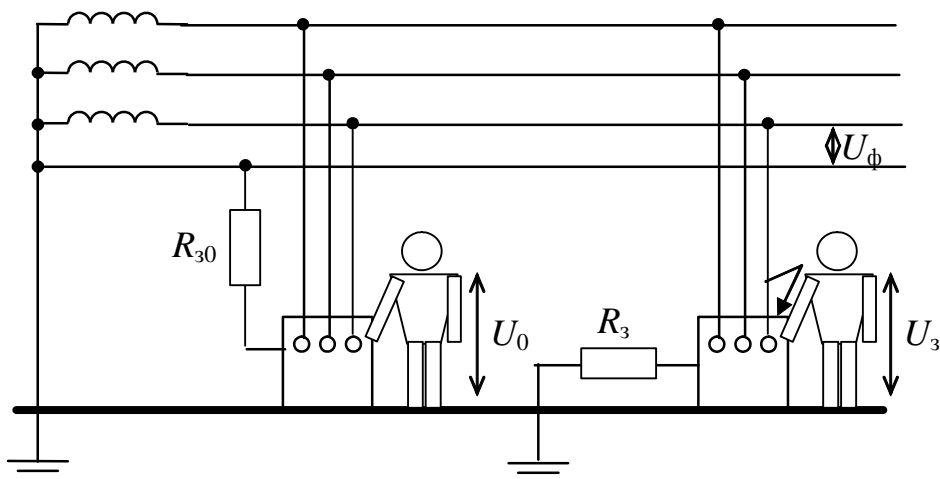


Рис. 10.9 – Схема одновременного заземления и зануления электроустановки в одной сети

В данном случае ток замыкания определится по формуле:

$$I_3 = \frac{U_a}{R_3 + R_{30}},$$

где  $R_3$  – сопротивление заземления электроустановки;  $R_{30}$  – сопротивление заземления зануленной системы.

Напряжения касания к корпусу заземленной и зануленной установок равны соответственно:

$$U_3 = \frac{U_\phi R_3}{R_3 + R_{30}}; \quad U_0 = \frac{U_\phi R_0}{R_3 + R_{30}}.$$

При  $U_\phi = 220$  В;  $R_3 = 6$  Ом;  $R_0 = 4$  Ом получим:

$$U_3 = \frac{220 \cdot 6}{6 + 4} = 132 \text{ В}; \quad U_0 = \frac{220 \cdot 4}{6 + 4} = 88 \text{ В}.$$

Эти напряжения являются опасными для обслуживающего персонала.

## 11 ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ (ЭАП)

### 11.1 Классификация и основные характеристики ЭАП

#### 11.1.1 Классификация ЭАП

*Акустика* – раздел физики, в рамках которого изучаются упругие колебания и волны, распространяющиеся в твердых, жидких и газообразных средах. В зависимости от частоты колебания делят на *звуковые* (16 Гц ... 20 кГц), *инфразвуковые* (менее 16 Гц) и *ультразвуковые* (свыше 20 кГц).

Акустика – одна из самых древних областей знания. Она возникла за несколько веков до нашей эры как учение о звуке, то есть об упругих волнах, воспринимаемых человеческим ухом. До начала 20 века акустика развивалась как раздел механики, но диапазон исследуемых волн расширился и охватил области ниже и выше области слышимых частот. Новый этап развития акустики начался в двадцатые годы двадцатого века в связи с развитием радиотехники и радиовещания, которые вызвали необходимость разработки методов и средств преобразования электромагнитной энергии в акустическую и обратно.

С учетом особенностей физических процессов и прикладного значения в акустике выделяют следующие основные разделы:

- электроакустика – физика преобразования звуковых колебаний в электрические и обратно;
- гидроакустика, атмосферная акустика, геоакустика – физика зарождения и распространения звуковых волн в водной среде, атмосфере, земной коре;
- архитектурная акустика – физика распространения звука в помещении;
- музыкальная акустика – физика звучания музыкальных инструментов;
- физическая акустика, кристаллоакустика – физика распространения волн в веществе;
- акустика движущихся сред – физика звуковых явлений при движении среды или источников и приемников звука.

При этом электроакустика связана со всеми другими областями акустики, так как аппаратура для различных видов акустических измерений, как правило, базируется на преобразовании акустических сигналов в электрические, а способы излучения звука в большинстве случаев базируются на преобразовании электрической энергии в акустическую.

*Электроакустический преобразователь* (ЭАП) – устройство, предназначенное для преобразования электромагнитной энергии в акустическую (энергию упругих колебаний) и обратно.

ЭАП строятся на базе электромеханических преобразователей. *Электромеханический преобразователь* – это устройство, предназначенное для преобразования электрических колебаний в механические и наоборот. Элек-



тромеханический преобразователь содержит электрическую цепь и механическую колебательную систему. Электрическая сторона характеризуется током и напряжением, а механическая – силой и колебательной скоростью. Если механическая колебательная система содержит *элементы, предназначенные для излучения или приема звуковых колебаний*, то электромеханический преобразователь называется электроакустическим.

Часть механической колебательной системы, предназначенная для возбуждения звуковых волн в окружающем воздухе, называется *диффузором*. Диффузор изготавливается из специальной бумаги (мягкой бумажной массы), имеет форму конуса и гибкое крепление, позволяющее совершать колебательное движение в одном направлении.

Тонкая пластинка, работающая на изгиб и закрепленная по внешнему контуру, предназначенная для возбуждения и приема звуковых колебаний, называется *мембраной*.

Таким образом, в ЭАП имеет место в основном двойное преобразование энергии:

– *электромеханическое*, в результате которого часть подводимой к преобразователю электрической энергии переходит в энергию колебаний некоторой механической системы;

– *механоакустическое*, при котором за счет колебаний механической системы в среде создается звуковое поле.

В зависимости от направления преобразования различают:

– *ЭАП-излучатели* – ЭАП, осуществляющие возбуждение акустических колебаний в упругих средах;

– *ЭАП-приемники* – ЭАП, осуществляющие прием акустических колебаний.

В зависимости от типа возбуждаемых (или принимаемых) акустических колебаний различают ЭАП объемных акустических волн и поверхностных волн.

Устройство, предназначенное для преобразования электрической энергии в звуковую (воспринимаемую человеческим ухом), называется *громкоговорителем*. Электроакустическое устройство, предназначенное для преобразования звуковой энергии в электрическую, называется *микрофоном*.

Большинство ЭАП *обратимы*, т.е. могут работать и как излучатели, и как приемники.

В обратимых ЭАП при электромеханическом преобразовании преобладает в основном преобразование в механическую энергию либо энергии электрического поля, либо энергии магнитного поля. Такие ЭАП подразделяют на следующие основные группы:

– **электромагнитные** – действие ЭАП основано на колебаниях ферромагнитного сердечника в переменном магнитном поле и явлении электромагнитной индукции;

– **электродинамические** – их работа основана на взаимодействии переменного электрического тока с магнитным полем (излучатели) и на явлении электромагнитной индукции (приемники);

– **электростатические** – их действие основано на изменении электрической емкости воздушного конденсатора при колебаниях одного из электродов (в основном приемники);

– **пьезоэлектрические** – действие ЭАП основано на прямом и обратном пьезоэффекте,

– **магнитострикционные** – их действие основано на прямом и обратном эффекте магнитострикции.

Существуют ЭАП, не имеющие механической колебательной системы и возбуждающие акустические колебания непосредственно в среде. Примерами таких ЭАП-излучателей являются электроискровой излучатель, возбуждающий интенсивные звуковые колебания в результате искрового разряда в жидкости, а также излучатель, действие которого основано на электрострикции жидкостей. Эти излучатели необратимы и применяются редко.

К особому классу ЭАП относятся необратимые ЭАП-приемники, принцип действия которых основан на изменении электрического сопротивления чувствительного элемента под действием звукового давления, например, угольный микрофон.

ЭАП широко используют для излучения и приема звука в РЭС связи и звуковоспроизведения, РЭС систем контроля (в качестве датчиков) и т.п.

### 11.1.2 Эксплуатационные характеристики ЭАП-приемников

Основными техническими характеристиками ЭАП-приемников являются:

– **рабочий диапазон частот**  $f_{\min} \dots f_{\max}$  – диапазон частот, определяемый техническими условиями на данный тип ЭАП;

– **чувствительность**  $E$  – величина ЭДС (при работе без нагрузки) или напряжения, развиваемого на сопротивлении нагрузки, при воздействии на чувствительный элемент ЭАП звукового давления, равного одному ньютону на квадратный метр, мВ м<sup>2</sup>/Н;

– **частотная характеристика**  $E = E(f)$  – зависимость чувствительности от частоты (рис. 11.1);

– **неравномерность частотной характеристики** – выраженное в децибелах отношение значений максимальной чувствительности к минимальной, измеренных в рабочем диапазоне частот:

$$M = 20 \lg \frac{E_{\max}}{E_{\min}};$$

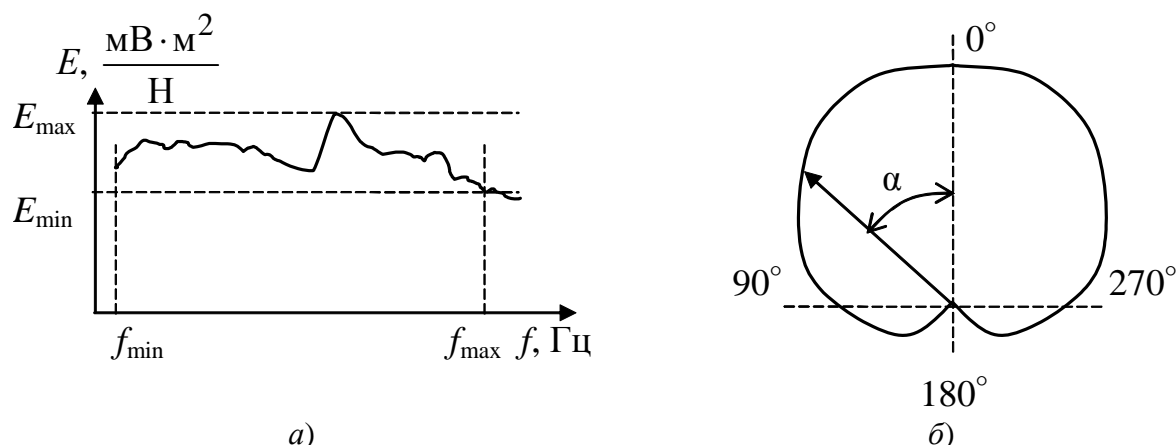


Рис. 11.1 – Характеристики ЭАП: частотная (а) и характеристика направленности (б)

– *характеристика направленности (диаграмма направленности)* – графическое изображение направленного действия ЭАП в полярной системе координат.

Характеристика направленности определяет способность ЭАП-приемника реагировать на акустические колебания в зависимости от местонахождения их источника и направления приходящих колебаний. Она характеризуется изменением уровня выходного напряжения ЭАП при смене направлений, по которым звуковые волны приходят к чувствительному элементу. Диаграммы направленности графически изображаются кривыми, являющимися геометрическим местом точек, определяющих уровни выходных напряжений микрофона (или его чувствительности) для разных углов  $\alpha$ , образованных направлением приходящей к чувствительному элементу звуковой волны и перпендикулярной к его поверхности осью.

По характеристикам направленности ЭАП-приемники принято разделять на три группы: ненаправленные, двусторонне направленные и односторонне направленные.

ЭАП *ненаправленного действия* называется такой ЭАП, чувствительность которого остается постоянной независимо от направления, по которому приходят к его чувствительному элементу звуковые волны. Характеристика направленности такого ЭАП в полярной системе координат имеет *форму круга*. Практически не существует ЭАП, для которых характеристика оставалась бы правильной окружностью на всех частотах. Это вызвано тем, что с повышением частоты, когда длина волны становится соизмеримой с габаритами ЭАП, экранирующее действие корпуса ЭАП неизбежно влияет на характеристику направленности. Так, на частоте  $f = 10$  кГц длина волны становится равной

$$\lambda = c/f = 340/10000 = 0,034 \text{ м} = 3,4 \text{ см},$$

где  $C = 340$  м/сек – скорость распространения звука в воздухе. Поэтому у большинства ЭАП, являющихся ненаправленными на низших частотах звукового диапазона, на частотах свыше 1000 Гц появляется направленность, которая становится значительной для высших слышимых частот (10...15 кГц). Поэтому говорить о ненаправленности ЭАП можно лишь условно. Этим термином пользуются для определения таких ЭАП, которые в области низких частот имеют характеристику направленности, близкую к окружности.

*Двунаправленные* ЭАП имеют одинаковую чувствительность с фронтальной и тыловой сторон подвижного элемента, а чувствительность их в поперечном направлении равна нулю. Диаграмма направленности этих ЭАП имеет *форму восьмерки*.

*Односторонне направленные* ЭАП практически не воспринимают звуковые колебания, приходящие с фронтальной стороны. Характеристика направленности подобных ЭАП по форме близка к *кардиоиде* (см. рис. 11.1, б), поэтому их часто называют кардиоидными ЭАП.

### 11.1.3 Особенности конструктивного исполнения микрофонов

Различные характеристики направленности достигаются применением особых конструкций микрофонов.

*Приемники давления.* Если к чувствительному элементу микрофона звуковая волна имеет доступ только с одной стороны (рис. 11.2, а), тогда на него действует сила  $F$ , пропорциональная величине звукового давления  $p$  перед микрофоном и площади мембраны (диафрагмы)  $S$ :

$$F = pS.$$

Такие микрофоны принято называть приемниками давления. Если размеры такого микрофона малы, то его характеристика направленности имеет, практически, форму круга с отклонением от него только на высших звуковых частотах.

*Приемники градиента давления.* В данном случае микрофон сконструирован так, чтобы звуковые волны подходили к подвижной системе с обеих сторон (рис. 11.2, б). Здесь результирующая внешняя сила  $F$ , действующая на приемник звука, пропорциональна разности давлений, воздействующих с двух сторон на чувствительный элемент. Эта разность давлений возникает за счет разных расстояний, которые проходят звуковые волны до фронта и тыла микрофона.

$$F = (p_1 - p_2)S,$$

где  $p_1, p_2$  – давления соответственно с фронтальной и тыльной сторон чувствительного элемента.

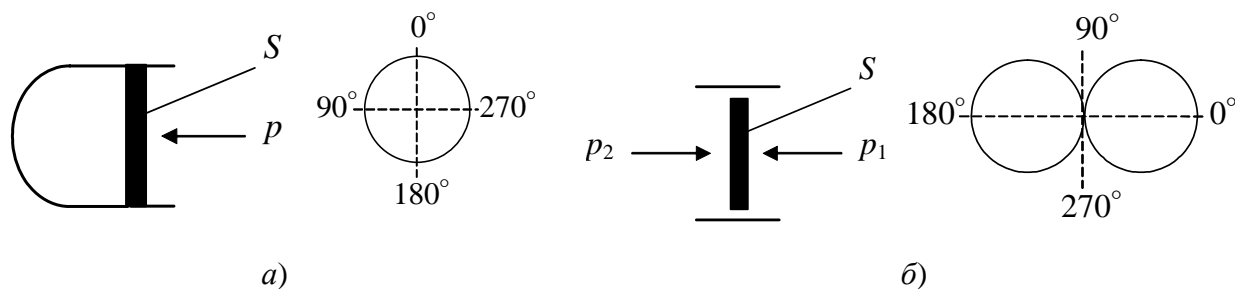


Рис. 11.2 – Схематическое изображение и диаграммы направленности микрофонов: приемника давления (а) и приемника градиента давления (б)

Такие микрофоны принято называть приемниками градиента давления, иначе – приемниками скорости.

Очевидно, что в этом случае действующая на систему сила максимальна тогда, когда звуковая волна движется параллельно оси слева или справа, и равна нулю, когда приходит перпендикулярно оси микрофона и путь ее к обеим сторонам приемника одинаков (при  $p_1 = p_2$   $F = 0$ ).

Если скомбинировать в одной общей конструкции два микрофона, один из которых является приемником давления, а другой – приемником градиента давления, и электрически соединить их между собой, то можно получить микрофоны с различными характеристиками направленности, в том числе и кардиоидные.

Действительно, если сложить напряжения, возникающие на выходе двух расположенных очень близко друг от друга микрофонов с разными характеристиками направленности – кругом и восьмеркой, то напряжения, возникающие при падении звуковой волны с фронта, будут в одинаковых фазах и сложатся. При падении звуковой волны с тыла возникнут противофазные напряжения, которые будут взаимно уничтожаться. Результирующая характеристика получится в виде кардиоиды (рис. 11.3).

Сочетанием двух односторонне направленных комбинированных микрофонов можно создать микрофон с остронаправленной характеристикой в форме так называемой гиперкардиоиды (рис. 11.4).

#### 11.1.4 Основные характеристики ЭАП-излучателей

Основными техническими характеристиками ЭАП-излучателей являются:

- **диапазон** воспроизводимых звуковых частот;
- **номинальная электрическая мощность** – наибольшая мощность, при подведении которой в виде синусоидального тока звуковой частоты вносимые нелинейные искажения не превосходят допустимой техническими условиями величины (т.е. коэффициент гармоник не превышает допустимых пределов), ВА;

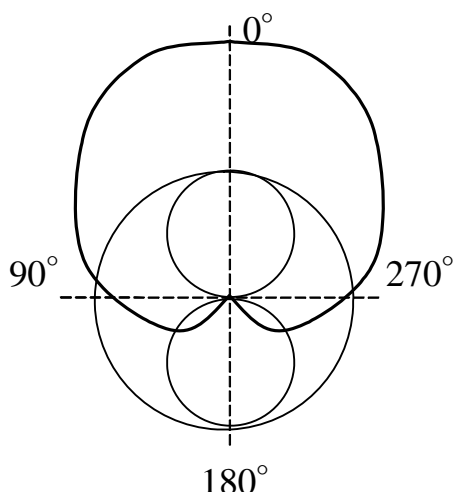


Рис. 11.3 – Сложение диаграмм направленности в виде круга и восьмерки для получения кардиоиды

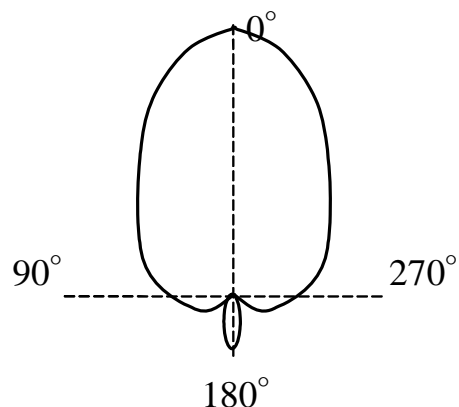


Рис. 11.4 – Диаграмма направленности в форме гиперкардиоиды

– **чувствительность** – давление, измеренное на расстоянии одного метра от ЭАП при подведении к звуковой катушке напряжения, создающего в катушке при частоте 1000 Гц электрическую мощность, равную 0,1 ВА,  $\text{Н/м}^2$ ;

– **частотная характеристика** – зависимость чувствительности от частоты сигнала:

– **характеристика направленности** – определяет рабочее пространство, которое покрывает своим излучением громкоговоритель;

– **коэффициент полезного действия** – отношение излучаемой звуковой мощности к подводимой электрической мощности.

## 11.2 ЭАП электромагнитного типа

Принцип действия ЭАП электромагнитного типа (электромагнитных преобразователей) основан на явлении электромагнитной индукции. В их основе лежат два физических явления.

1. Если по неподвижной катушке с якорем (подвижным магнитом) пропустить переменный ток, то якорь будет совершать колебательное движение (рис. 11.5).

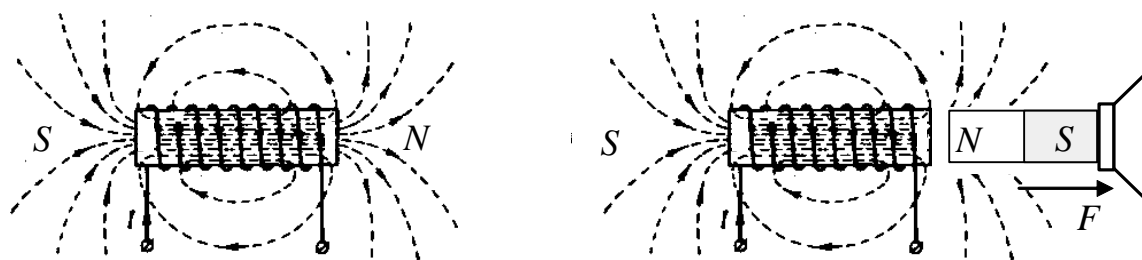


Рис. 11.5 – К вопросу о принципе действия электромагнитных преобразователей

2. Если якорь катушки привести в колебательное движение, то изменяющийся магнитный поток, создаваемый магнитом, вызовет возникновение ЭДС самоиндукции в обмотке.

Если в первом случае якорь жестко соединить с диффузором, то получаемые механические колебания вызовут появление звуковых волн в окружающей среде. Таким способом получают ЭАП-излучатель.

Если якорь катушки привести в колебательное движение действием внешней силы (например, при воздействии звуковой волны на диффузор), то колебания якоря вызовут изменения магнитного потока, создаваемого магнитом. Это, в свою очередь, вызовет возникновение ЭДС самоиндукции в обмотке и появление электрического напряжения на концах катушки. Таким способом получают ЭАП-приемник.

Качественные показатели электромагнитных ЭАП невысокие.

### 11.3 ЭАП электродинамического типа

Принцип действия ЭАП электродинамического типа основан на явлении электромагнитной индукции.

В *электродинамическом громкоговорителе* (рис. 11.6, а) подвижная катушка  $K$  жестко связана с диффузором  $Д$ . Электропитание катушки осуществляется от усилителя электрических сигналов звуковой частоты через понижающий трансформатор. Сила взаимодействия тока в катушке и магнитного поля постоянного магнита  $M$  вызывает колебания диффузора и появление звуковых волн в окружающем пространстве.

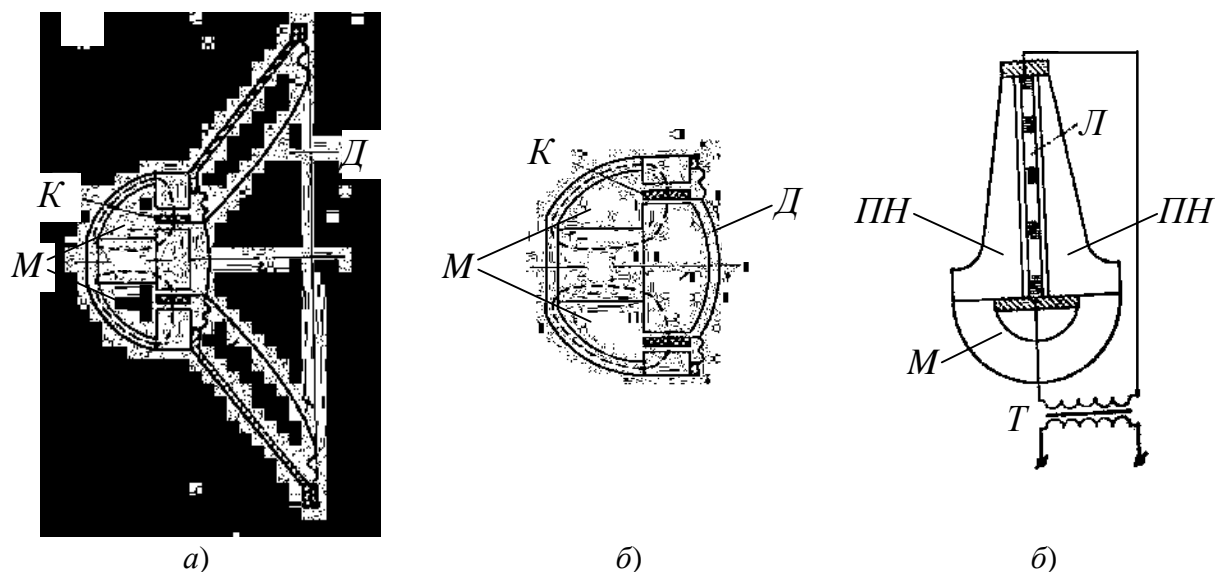


Рис. 11.6 – Схематическое изображение ЭАП электродинамического типа: громкоговорителя (а), катушечного микрофона (б) и ленточного микрофона (в)

В *электродинамическом катушечном микрофоне* (рис. 11.6, б) вместо диффузора применяется куполообразная диафрагма  $D$ . Колебания диафрагмы и жестко связанной с ней катушки происходят под действием звуковых волн от любого источника звука. При этом витки катушки пересекают линии магнитного поля, созданного постоянным магнитом  $M$ , и на концах катушки возникает электрическое напряжение. Это напряжение подается на вход усилителя сигналов звуковых частот.

К достоинствам катушечных микрофонов относятся удовлетворительные качественные показатели, прочность, небольшие габариты и вес, относительно малая по сравнению с другими микрофонами восприимчивость к вибрациям и тряске, что дает возможность использовать этот тип микрофона как в студиях, так и во внестудийных условиях, как для речевых передач, так и для профессиональной звукозаписи.

Промышленностью изготавливаются ненаправленные и односторонне-направленные катушечные микрофоны.

В *ленточном электродинамическом микрофоне* (рис. 11.6, в) звуковые волны воспринимаются тонкой гибкой (гофрированной) металлической лентой  $L$ , помещенной между полюсными наконечниками  $ПН$  магнита  $M$ . При колебании ленты на ее концах возникает электрическое напряжение, подаваемое через повышающий трансформатор  $T$  на вход усилителя.

Если металлический кожух ленточного микрофона перфорирован, что позволяет звуковой волне воздействовать на ленточку как с фронта, так и с тыла, то микрофон будет приемником градиента давления и будет иметь характеристику направленности в виде восьмерки.

Односторонняя направленность работы ленточного микрофона достигается следующим образом (рис. 11.7): с одной (задней) стороны ленточка наполовину закрывается прилегающей длинной трубой. Чтобы исключить возникновение отражения волны от конца трубы, что может исказить работу микрофона, труба, для уменьшения размеров выполненная в виде спирали, заполняется поглощающим звук материалом.

Таким образом, та часть ленточки, которая с задней стороны закрыта акустическим лабиринтом, работает как приемник давления, а открытая ее часть — как приемник градиента давления. В целом же этот микрофон будет иметь кардиоидную характеристику.

Качественные показатели ленточных микрофонов отвечают требованиям современного радиовещания.

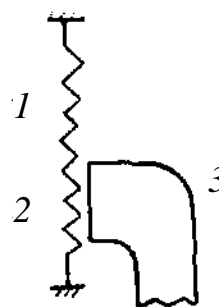


Рис. 11.7 – Акустически комбинированный ленточный микрофон:

1 – часть ленточки, работающая как приемник градиента давления;

2 – часть ленточки, работающая как приемник давления;

3 – акустический лабиринт



Ленточные микрофоны имеют хорошие качественные показатели, примерно одинаковую с катушечными микрофонами чувствительность, широкий спектр воспроизводимых частот, малую неравномерность частотной характеристики. Благодаря этому они могут успешно использоваться для музыкальных звукозаписей и передач. Однако микрофоны этого типа сравнительно тяжелы и громоздки. Работа с ними на открытом воздухе исключена, так как ленточка может легко повредиться от порывов ветра; весьма высокая чувствительность этих микрофонов к толчкам, вибрациям и т.п., хорошо прослушиваемым через громкоговоритель, делает необходимым подвешивание ленточных микрофонов на антивибрационных конструкциях.

## 11.4 ЭАП электростатического типа

ЭАП электростатического типа является конденсаторный микрофон. Звукоприемником служит капсуль, представляющий собой плоский воздушный конденсатор. Одна из его пластин массивна и неподвижна. Другая, легкая и упругая, расположена на расстоянии 20-40 мкм от первой и колеблется по действием звуковой волны. Эта подвижная пластина играет роль мембраны.

Капсуль находится под постоянным поляризующим напряжением. Для этого он подключен к источнику постоянного тока. Последовательно с капсулем в цепь включен резистор, сопротивление которого выполняет функции нагрузки (рис. 11.8).

При колебаниях мембраны емкость конденсатора изменяется. Как известно, емкость между двумя параллельными проводящими пластинами равна

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d},$$

где  $d$  – расстояние между пластинами;  $S$  – площадь пластины;  $\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная ( $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м);  $\epsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды между пластинами.

Поэтому, когда пластины капсуля сближаются, емкость конденсатора увеличивается и происходит его заряд, а когда расстояние между пластинами увеличивается, то емкость уменьшается и конденсатор разряжается.

При этом зарядно-разрядный ток проходит через сопротивление нагрузки, величина которого бывает до 1000 МОм и больше. Создаваемое на сопро-

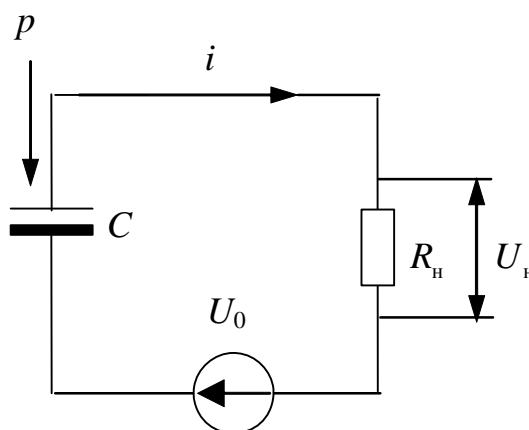


Рис. 11.8 – Принцип работы конденсаторного микрофона

тивлении нагрузки переменное напряжение является электрическим отображением изменений звукового давления, действующего на мембрану конденсаторного микрофона.

Большая величина сопротивления нагрузки необходима потому, что сопротивление капсулы переменному току  $X_C = 1/2\pi fC$ , как и всякое емкостное сопротивление, растет с понижением частоты и при сигнале с частотой 50 Гц и емкостью капсулы 100 пФ достигает величины около 32 МОм: Чтобы чувствительность микрофона не уменьшилась на низших частотах звукового диапазона вследствие шунтирования капсулы сопротивлением нагрузки, последнее должно быть существенно больше 30 МОм.

Большая величина сопротивления нагрузки исключает возможность обычного присоединения микрофона к усилителю с помощью кабеля. Даже сравнительно короткий кабель длиной 1...2 м резко снижает чувствительность микрофона (особенно на высших звуковых частотах) и является причиной возрастания уровня наводимых помех.

Конденсаторные микрофоны имеют высокую чувствительность, широкую полосу воспроизводимых частот и равномерную частотную характеристику.

Конденсаторные микрофоны выпускаются со сменными характеристиками направленности, причем во многих конструкциях изменение направленности может осуществляться *дистанционно*, например, в РЭС звукозаписи, телевидения и радиовещания – с пульта звукорежиссера. Для этого применяются акустически комбинированные ЭАП – капсулы, имеющие два подвижных электрода. Подвижные электроды представляют собой мембраны – круглые ободы с натянутыми на них высокополимерными пленками, покрытыми молекулярным слоем золота. Между ними расположен неподвижный электрод с глухими отверстиями, увеличивающими чувствительность ЭАП, и сквозными каналами, соединяющими друг с другом сквозные объемы под мембранами (рис. 11.9).

Различные способы включения такого капсулы в схему дают возможность получить любые диаграммы направленности конденсаторного микрофона.

Например, в электрическую цепь может быть включена только одна из мембран, на которую подается поляризующее напряжение  $U_0$  относительно

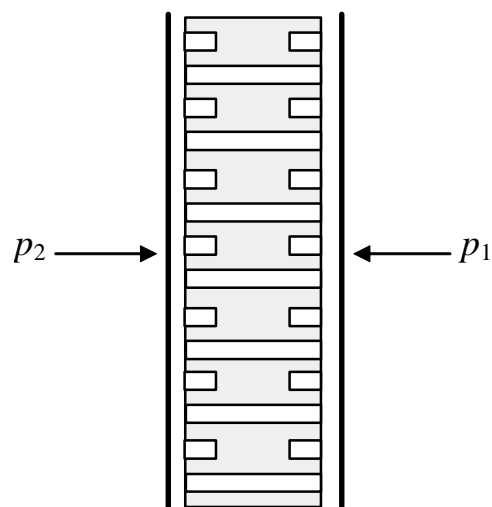


Рис. 11.9 – Схематическое изображение акустически комбинированной капсулы конденсаторного микрофона

неподвижного электрода. В этом случае вторая мембрана отключена и в создании напряжения на выходе микрофона не участвует (рис. 11.10). Включенный таким образом капсульт имеет кардиоидную характеристику направленности, так как его можно рассматривать как комбинированный приемник давления и градиента давления. Действительно, каково бы ни было фактическое движение подвижных электродов-мембран, его можно представить как результат сложения двух колебаний: одного – пропорционального звуковому давлению и второго – пропорционального разности давлений с фронта и с тыла микрофона. Колебания, образующиеся под действием звукового **давления**, для двух мембран являются **противофазными**, т.е. мембраны, преодолевая упругость заключенного между ними воздуха, либо сближаются с неподвижным электродом, либо отдаляются от него, двигаясь всегда в противоположных направлениях; при этом величина перемещений не зависит от направления, по которому пришла к микрофону звуковая волна.

Вместе с тем, мембраны и заключенный между ними воздух можно рассматривать и как единую механическую систему, состоящую из двух связанных между собой поршней. Если звуковая волна за счет разности расстояний от источника звука приходит к левой и правой мембранам неодновременно, то давление, действующее на обе мембраны в какой-либо момент, неодинаково. За счет этой разности давлений, или **градиента давления**, возникает усилие, перемещающее всю систему в сторону меньшего давления, в результате чего одна из мембран приближается к неподвижному электроду, а другая отдаляется от него, или наоборот. Колебания обеих мембран **синфазны**, то есть в любой момент времени они движутся в одну сторону.

Разница давлений со стороны фронта и тыла микрофона (градиент давления) зависит, как уже было сказано, от направления прихода звуковой волны. Она максимальна, если звук приходит перпендикулярно плоскости мембраны, и равна нулю, если источник звука находится от микрофона сбоку (в этом случае путь, проходимый волной к фронту и тылу микрофона, одинаков и разницы между давлениями нет). Соответственно и амплитуда колебаний мембраны, зависящая от градиента давления, меняется по тому же закону.

Таким образом, рассмотренный капсульт является приемником градиента давления и можно предположить, что он будет иметь характеристику направленности в виде восьмерки. В действительности обе составляющие колебательного движения мембран, складываясь между собой, придают капсульту

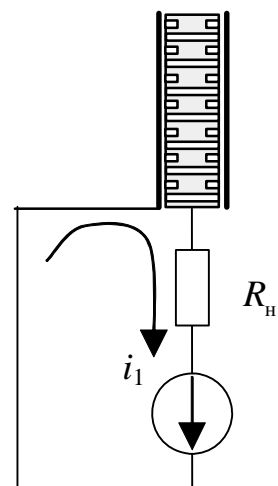


Рис. 11.10 – Капсульт, включенный для работы с кардиоидной характеристикой

кардиоидную характеристику направленности, то есть делают его односторонне направленным.

Для доказательства этого рассмотрим физическую сущность работы акустически комбинированного капсуля (рис. 11.11).

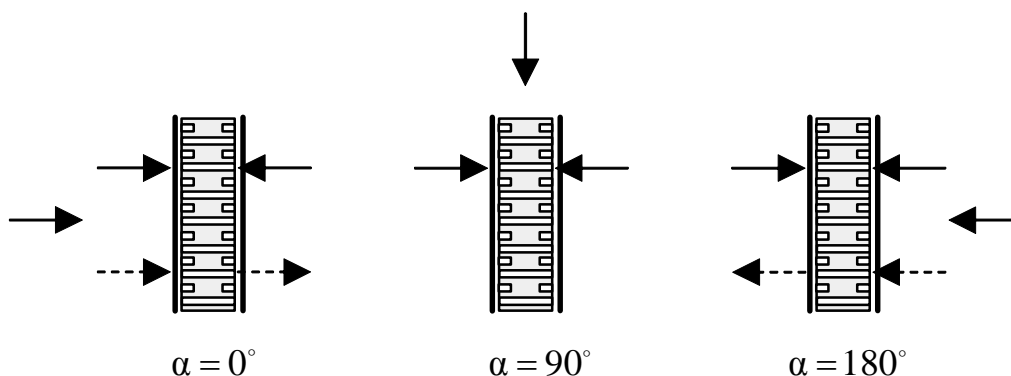


Рис. 11.11 – К вопросу о действии акустически комбинированного приемника звука

Как уже сказано, колебания обеих мембран можно рассматривать как результат сложения следующих колебаний: противофазных, вызванных наличием силы, пропорциональной звуковому давлению, и синфазных, обусловленных градиентом давления. Будем изображать противофазные колебания сплошными стрелками, а синфазные – пунктирными и рассмотрим случай, когда в электрическую цепь по-прежнему включена одна мембрана, например, левая.

Если звук пришел к микрофону слева (это направление мы примем за начало отсчета углов падения звуковых волн на микрофон, т. е.  $\alpha = 0^\circ$ ), то обе составляющие колебаний левой мембраны направлены в одну сторону и мембрана колеблется с удвоенной амплитудой. Правая же мембрана при этом неподвижна, так как составляющие ее колебания имеют противоположные направления и взаимно гасятся.

При приходе звука сбоку ( $\alpha = 90^\circ$ ) в результате отсутствия градиента давления синфазные перемещения отсутствуют и амплитуда колебаний левой мембраны вдвое меньше, чем в первом случае. Правая мембрана также колеблется, однако она в электрическую цепь не включена и в создании напряжения на выходе микрофона не участвует.

При расположении источника звука справа от микрофона (т.е.  $\alpha = 180^\circ$ ) с удвоенной амплитудой колеблется правая мембрана, но, как уже сказано, микрофон при этом никакого напряжения не развивает.

Таким образом, за счет электрической асимметрии микрофона достигается кардиоидная характеристика направленности.

Так как обе мембраны совершенно одинаковы по своему действию, то, если переключить поляризующее напряжение на правую мембрану, рабочая

сторона кардиоиды повернется на  $180^\circ$ , то есть фронт микрофона будет с другой стороны.

Из вышеизложенного ясно, что акустически комбинированный капсульт можно рассматривать как два равноценных односторонне направленных приемника звука. Если эти два приемника соединить электрически, а это возможно при подаче поляризирующего напряжения на обе мембраны и включении для них общей нагрузки (рис. 11.12), то в зависимости от полярности приложенного к мембранам напряжения можно получить любую характеристику направленности капсуля.

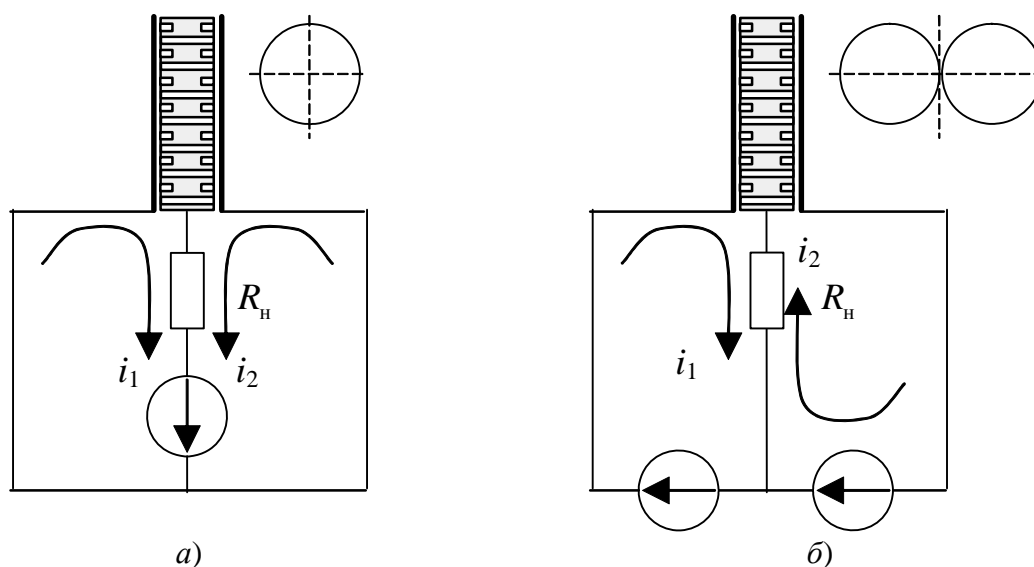


Рис. 11.12 – Включение акустически комбинированного капсуля для работы:  
*a* – с круговой характеристикой направленности;  
*б* – с характеристикой в виде восьмерки

Действительно, если по отношению к неподвижному электроду обе мембраны находятся под напряжением одинакового знака (см. рис. 11.12, *a*), то в общей нагрузке при любом расположении источника звука развиваются напряжения в одной фазе. Микрофон работает как ненаправленный, и его характеристика направленности представляет собой круг.

Если же по отношению к неподвижному электроду обе мембраны находятся под напряжением разного знака (см. рис. 11.12, *б*), то переменные напряжения звуковой частоты, возникающие в нагрузке в результате колебаний левой и правой мембран, противофазны. Характеристика направленности микрофона в этом случае – восьмерка.

При эксплуатации конденсаторных микрофонов следует соблюдать меры предосторожности, связанные с особенностями их конструктивного исполнения. Так как во время работы капсульт находится под напряжением, двигать и переставлять микрофон рекомендуется только при отключенном электропитании. Иначе сотрясения могут послужить причиной пробоя кон-

денсатора и выхода микрофона из строя. По этой же причине не следует для пробы перед работой дуть в микрофон.

**Электретные микрофоны.** *Электретами* называются диэлектрик с постоянной поляризацией. Данный материал способен сохранять постоянную электрическую поляризацию, как магнит сохраняет намагниченность. Поэтому электреты можно использовать в конденсаторных микрофонах для создания электрического поля без внешнего источника напряжения. Таким образом, по принципу действия электретные микрофоны подобны конденсаторным микрофонам с тем отличием, что роль неподвижной обкладки конденсатора и одновременно источника постоянного электрического поля играет пластинка из электрета. Срок службы электретов может быть очень большим – до 100 и более лет, но зависит от температуры и влажности: с увеличением температуры в  $n$  раз срок службы снижается приблизительно во столько же раз.

В РЭС звуко- и видеозаписи наибольшее применение получили конденсаторные, электретные и электродинамические микрофоны. Некоторые модели переносной аппаратуры звуко- и видеозаписи имеют встроенные микрофоны обычно электретного типа. В камкордерах микрофон встроен в лицевой части над объективом и может иметь изменяемую диаграмму направленности в зависимости от расположения объекта съемки.

## 11.5 ЭАП пьезоэлектрического и магнитострикционного типа

ЭАП пьезоэлектрического и магнитострикционного типа основаны на изменении электрических свойств материалов под воздействием деформации и, наоборот, геометрических и механических изменениях материала под воздействием электрического либо магнитного полей.

**Пьезоэлектрический преобразователь** – это устройство, преобразующее механические колебания в электрические (или наоборот) с использованием пьезоэлектрического эффекта.

**Пьезоэлектрический эффект** – явление возникновения *электрических зарядов* на поверхности тела под действием механических напряжений (прямой пьезоэффект) и возникновения механических деформаций под воздействием электрического поля (обратный пьезоэффект) (рис. 11.3).

Пьезоэффектом обладают многие кристаллические вещества и керамика, полученная в результате термической обработки соответствующих веществ: кварц, турмалин, сегнетова соль, сульфат лития, титанат бария и т.п.

Ферромагнитные материалы под действием магнитного поля также испытывают определенные изменения – геометрические (изменение размеров с изменением объема или без него, кручение, изгиб) или механические (изменение модуля Юнга). И наоборот, любое механическое напряжение, вызванное, например, воздействием измеряемой силы, изменяет кривую намагничи-

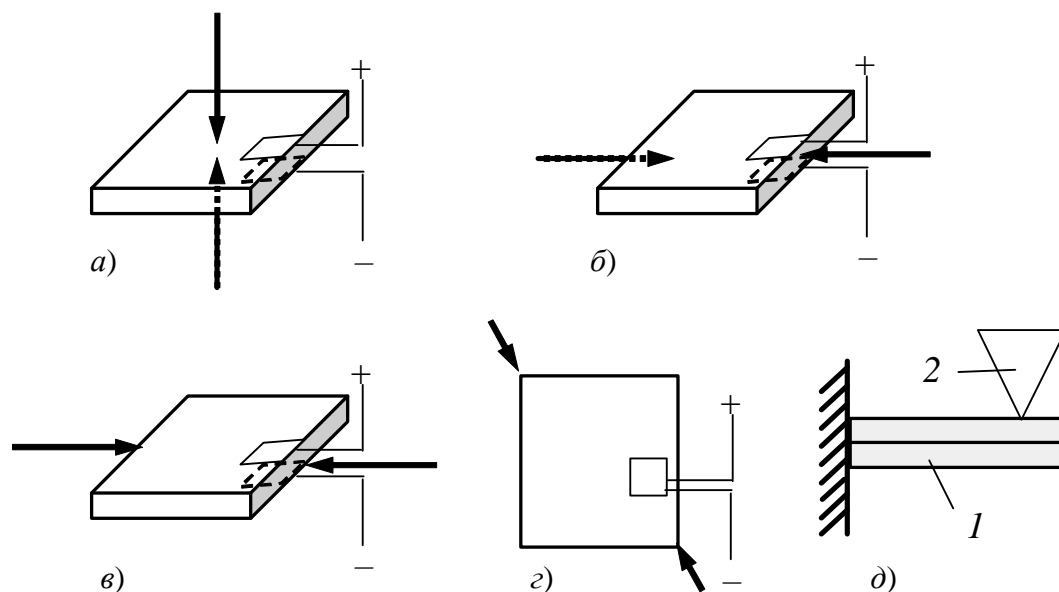


Рис. 11.13 – Типичные деформации и поляризации пьезоэлектрической пластинки (а – г) и схема конструкции воздушного микрофона: 1 – пьезокерамика; 2 – диффузор

вания, так что становится возможным использование изменения магнитной проницаемости или остаточной индукции для определения силы.

Явление изменения размеров и формы тела при его намагничивании называется *магнитострикцией*. Явление, обратное магнитострикции, называется *магнитоупругим эффектом*, или *эффектом Виллари*.

Прямые магнитострикционные эффекты используются в ультразвуковых излучателях, в которых ферромагнитный элемент обычно работает в условиях механического резонанса; обратный магнитострикционный – в приемниках ультразвука.

ЭАП пьезоэлектрического типа используются в пьезоэлектрических звукоснимателях, микрофонах, громкоговорителях, датчиках механических величин, излучателях.

Пьезоэлектрические и магнитострикционные ЭАП обладают высокими чувствительностью и надежностью.

## 11.6 Особенности эксплуатации ЭАП и принципы построения РЭС на базе ЭАП

### 11.6.1 Эксплуатация ЭАП-приемников в РЭС звукозаписи, телевидения и радиовещания

Рассмотрим особенности применения ЭАП-приемников на примере использования микрофонов в РЭС звукозаписи, телевидения и радиовещания. Важнейшей эксплуатационной характеристикой микрофона является характеристика направленности.

Например, если требуется передать голоса сидящих за круглым столом собеседников, то в данном случае, очевидно, самым удобным окажется микрофон с характеристикой направленности в виде круга. Для двух беседующих людей, расположенных друг к другу лицом, наиболее подходящим будет двусторонне направленный микрофон с характеристикой в виде восьмерки. Двусторонне направленный микрофон также значительно ослабляет мешающее действие шумов от источников, расположенных сбоку от беседующих. Но при этом следует помнить, что двусторонне направленный микрофон нельзя приближать к лицу ближе, чем на 50-80 см, так как приемники градиента давления в случае их расположения вблизи от источников звука повышают свою чувствительность на низких частотах звукового диапазона. Этот так называемый эффект ближней зоны при неумелом использовании микрофона может стать причиной заметных частотных искажений, выражающихся в подчеркивании низших звуковых частот и «бубнений».

При художественных записях и передачах широкое распространение получили микрофоны с кардиоидной характеристикой, т.е. односторонне направленные микрофоны. Их устанавливают в студиях, когда необходимо с помощью нескольких микрофонов создавать разные звуковые планы для отдельных исполнителей, подбирать искусственно микшированием нужный баланс громкостей, отстраиваться от действия отраженных звуковых волн и т.п.

Однонаправленные микрофоны очень удобны для проведения репортажей из помещений с большим уровнем собственных шумов, например, из заводских цехов и т.п. Располагая такой микрофон на сравнительно небольшом расстоянии от выступающего и правильно ориентируя его, можно добиться заметного преобладания голоса над посторонним шумом и отсутствия значительных помех при прослушивании передачи.

### **11.6.2. Эксплуатация ЭАП-излучателей в РЭС звуковоспроизведения, телевидения и радиовещания**

Рассмотрим особенности применения ЭАП-излучателей на примере использования громкоговорителей в РЭС звуковоспроизведения, телевидения и радиовещания.

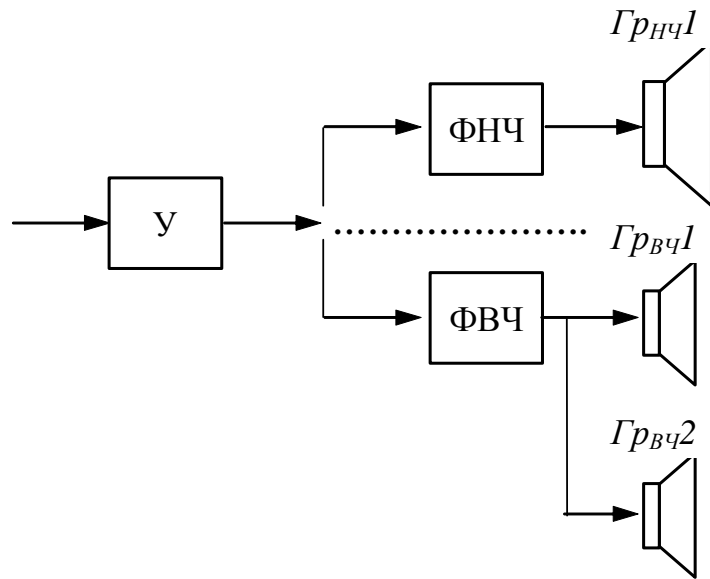
Чем более широкий диапазон звуковых частот воспроизводится громкоговорителем и чем ровнее его частотная характеристика, тем лучше громкоговоритель. Однако создать громкоговорители с совершенно ровной частотной характеристикой не удастся. Причем для них допускается неравномерность частотной характеристики значительно большая, чем для усилительных устройств. Она лежит в пределах 12-15 дБ, в то время как для усилителей частотные искажения не превышают 2 дБ.

Частотную характеристику громкоговорителя во многом определяют его размеры и механические свойства подвижной системы. При этом, с конст-



Рис. 11.14 – Схема включения громкоговорителя на выход мощного усилителя через фильтры:

У – усилитель;  
 ФВЧ – фильтр высших частот;  
 ФНЧ – фильтр низших частот;  
 Гр<sub>ВЧ</sub> – громкоговоритель высокочастотный;  
 Гр<sub>НЧ</sub> – громкоговоритель низкочастотный



руктивной точки зрения, требования к равномерности излучения низших и высших частот звукового диапазона противоречивы: низшие частоты излучаются хорошо при большом размере конуса и большой массе звуковой катушки, высшие же частоты, наоборот, хорошо излучаются при малом излучателе и малой массе подвижной системы. Поэтому для воспроизведения высших звуковых частот используются малогабаритные громкоговорители, а для низших – громкоговорители больших размеров. При этом звуковой сигнал с выхода усилителя попадает на специальные разделительные фильтры и уже с них, разделившись на несколько полос (полосы низших, средних и высших частот), – на соответствующие громкоговорители (рис. 11.14).

Разделение на полосы частот необходимо еще и потому, что низшие частоты при прочих равных условиях имеют большие амплитуды и могут повредить высокочастотный излучатель.

При размещении громкоговорителей следует иметь в виду, что низшие частоты звукового диапазона всегда создают в помещении практически ненаправленное звуковое поле, т.е. интенсивность их излучения одинакова в любом направлении. Высшие же частоты обладают резкой направленностью излучения, которая максимальна в направлении акустической оси громкоговорителя и резко спадает при прослушивании звука под углом к этой оси.

Чтобы звуковая картина не изменялась при различном размещении слушателей, часто в составе электроакустических систем используются два или более высокочастотных излучателей, которые конструктивно располагаются с учетом необходимости перекрытия звуковым полем пространства (рис. 11.15).

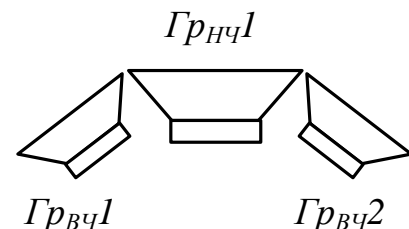


Рис. 11.15 – Размещение громкоговорителей

Следует отметить, что в громкоговорителях воспроизведения верхних звуковых частот применяются пьезоэлектрические ЭАП.

### 11.6.3 Принципы построения ультразвуковых дальномерных систем

Принцип действия ультразвуковых дальномерных приборов основан на определении расстояния до цели путем измерения времени, затрачиваемого на его прохождение ультразвуковым сигналом, и пересчета его на расстояние при известной скорости распространения ультразвука в воздухе.

*Дальномерная система при разнесенных излучателе и приемнике.* На рис. 11.16, *а* приведена блок-схема ультразвукового дальномера при разнесенных излучателе и приемнике, а на рис. 11.16, *б* – соответствующие временные диаграммы. Нетрудно видеть, что в обоих случаях принцип работы

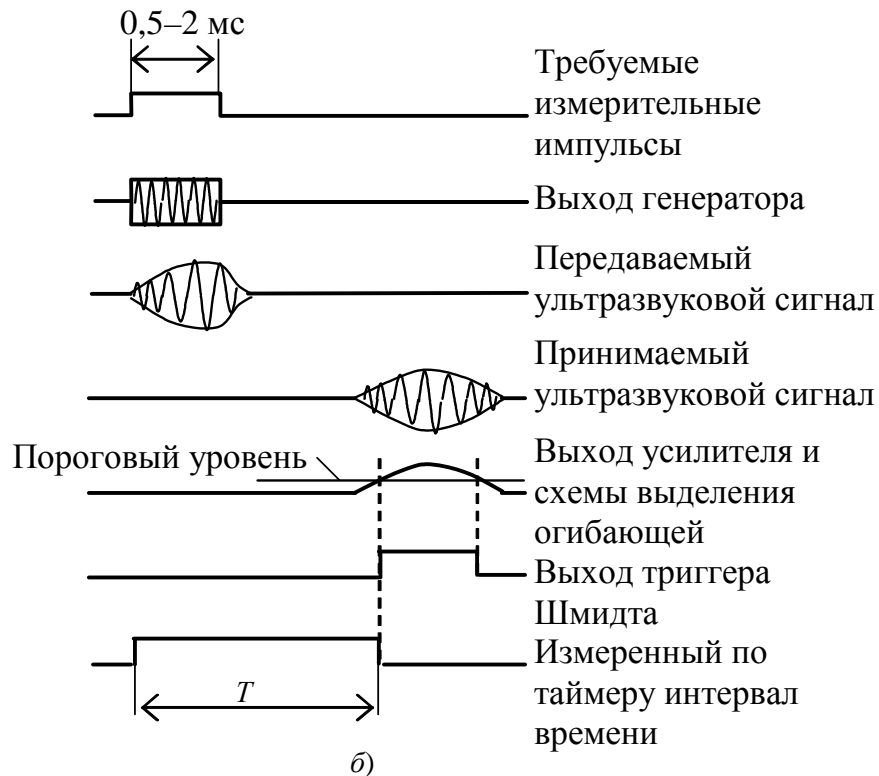
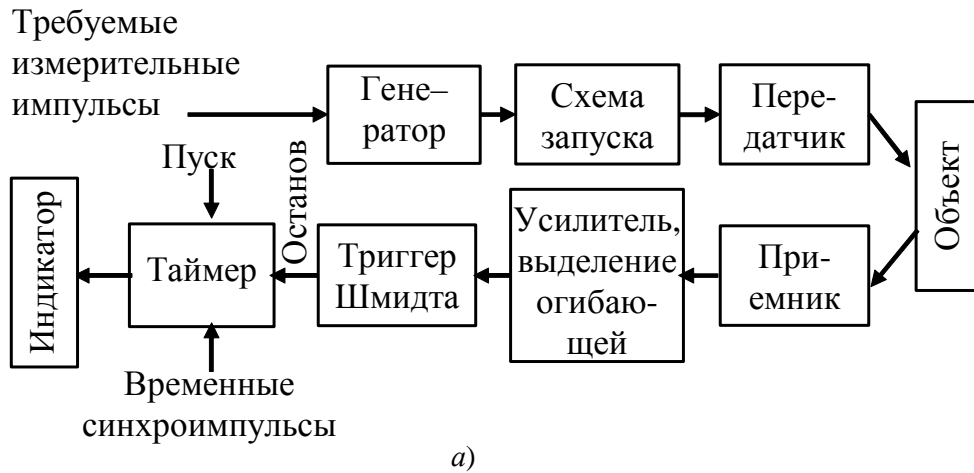


Рис. 11.16 – Структурная схема ультразвукового дальномера (*а*) и соответствующие временные диаграммы (*б*)

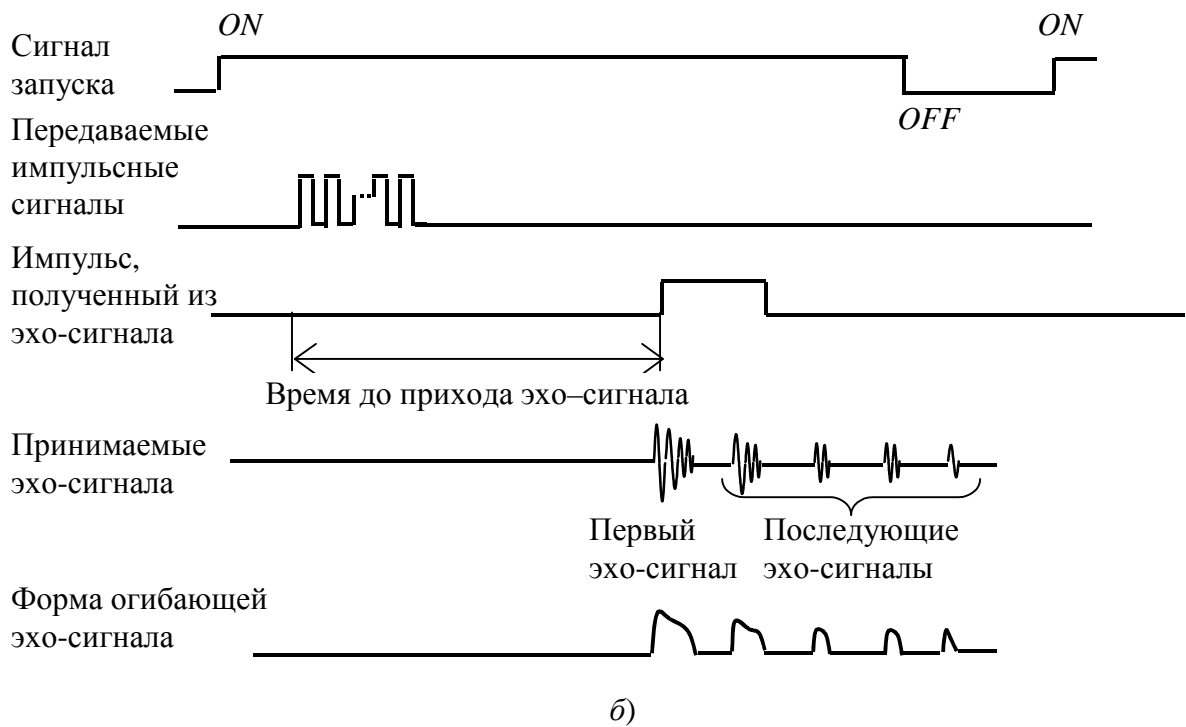
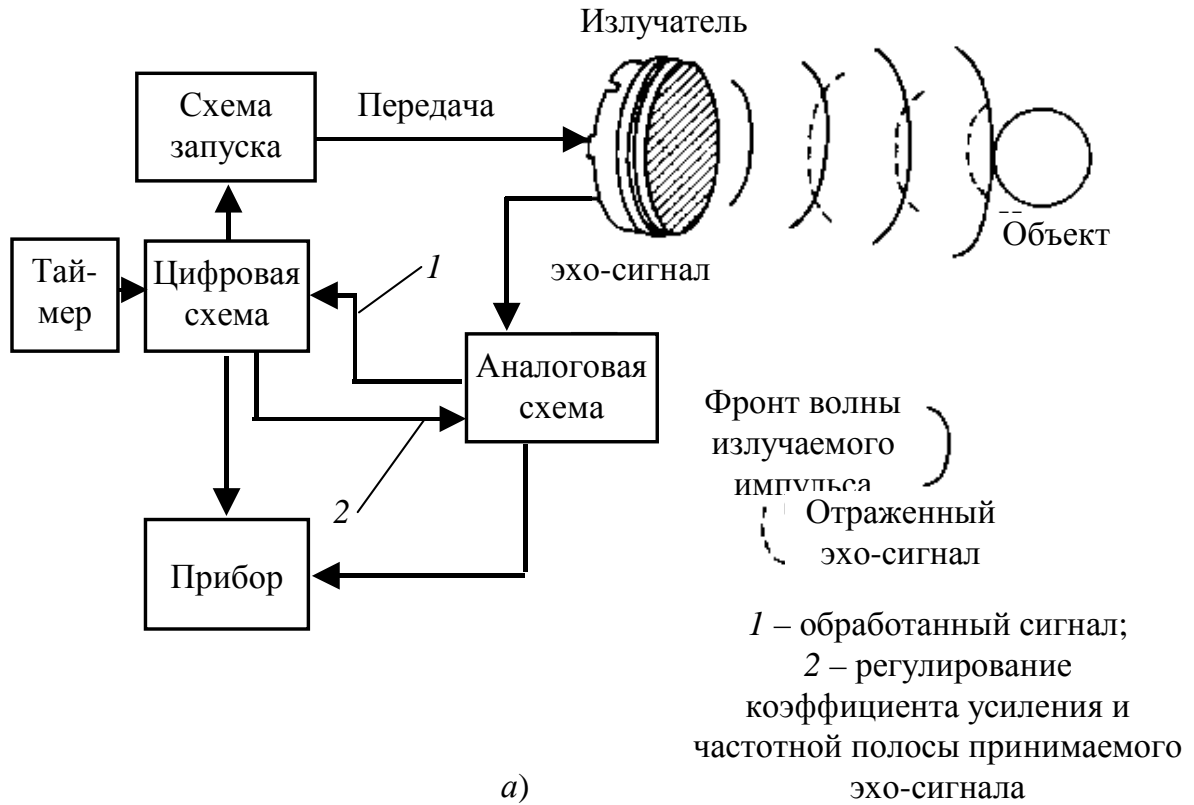


Рис. 11.17 – Структурная схема ультразвукового дальномера (а) и соответствующие временные диаграммы (б)

один и тот же. Форма излучаемого сигнала зависит от характеристик излучателя. Серийно выпускаемые излучатели общего применения (рис. 11.16, б) характеризуются довольно затянутым передним фронтом этого сигнала. В результате пороговая схема дает существенные расхождения в определении момента прихода эхо-сигнала после его усиления и детектирования (выделения огибающей).

**Дальномерная система на базе обратимого ЭАП.** Если расстояние между излучателем и приемником сравнительно мало, то акустическая волна, отраженная от цели, улавливается приемником в виде эхо-сигнала. Зная время распространения сигнала (до цели и обратно), нетрудно определить расстояние до цели.

На рис. 11.17 иллюстрируется принцип определения расстояния ультразвуковым дальномером для автоматической фокусировки фототелевизионных камер фирмы *Polaroid*.

Для излучателя и приемника использован один и тот же ЭАП. На рис. 11.17, б приведены временные диаграммы сигналов, поясняющие принцип работы прибора. Пусковой сигнал ОН определяет момент излучения ультразвукового сигнала. Излучаются 56 импульсных сигналов на одной из четырех несущих частотах: 60, 57, 53, 50 кГц. Использование четырех несущих частот для работы прибора вызвано различной степенью отражения ультразвукового сигнала от объектов (различной формы и материала) и, как следствие, неустойчивым приемом отраженных эхо-сигналов. Отраженная от объекта волна (штриховые линии на рис. 11.17, а) вызывает вибрацию мембраны ЭАП, инициируя в нем ЭДС. После усиления аналоговой схемой и выделения огибающей принятого сигнала подсчитывается число импульсов таймера, накопленных за отрезок времени до прихода первого эхо-сигнала, и по ним определяется время.

## 12 МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭПУ РЭС

Профессиональная деятельность инженера по специальности 200700 «Радиотехника» включает исследования и разработки, направленные на создание и обеспечение функционирования РЭС, в том числе:

- в области проектной деятельности – разработку структурных и функциональных схем РЭС с использованием средств компьютерного проектирования, проведением проектных расчетов;

- в области научно-исследовательской деятельности – построение математических моделей объектов и процессов; выбор метода их исследования и разработка алгоритма его реализации; моделирование объектов и процессов с целью анализа и оптимизации их параметров с использованием имеющихся средств исследований, включая стандартные пакеты прикладных программ.

В этой связи в заключительной главе учебного пособия рассматриваются методы проектирования и исследования ЭПУ РЭС, являющихся неотъемлемой составной частью РЭС.

### 12.1 Задачи проектирования РЭС и ЭПУ РЭС

**Проектирование** – процесс составления описания, необходимого для создания в заданных условиях еще не существующего объекта на основе первичного описания этого объекта и (или) алгоритма его функционирования путем преобразования (в ряде случаев неоднократного) первичного описания, оптимизации заданных характеристик объекта и алгоритма его функционирования, устранения некорректностей первичного описания и последовательного представления описаний (при необходимости) на различных языках (ГОСТ 22482-77).

Проектирование как процесс формирования описаний объекта, относящихся к определенному аспекту, подразделяется на *этапы*. В соответствии с тремя основными аспектами описаний технических объектов – функциональным, конструкторским и технологическим – различают функциональное, конструкторское и технологическое проектирование.

**Функциональное проектирование** – совокупность проектных процедур, связанная с изучением и преобразованием описаний функционального аспекта, где функциональный аспект описания – описание процессов функционирования и определяемых этим процессом свойств проектируемого объекта. Функциональное проектирование связано с разработкой структурных, функциональных и принципиальных схем.

**Конструкторское проектирование** – совокупность проектных процедур, направленная на получение описаний конструкций объекта, т.е. его формы, формы и взаимного расположения в пространстве элементов объекта

и их связей, а также расчет значений параметров, непосредственно определяемых структурными и геометрическими свойствами.

**Технологическое проектирование** – совокупность проектных процедур, направленная на получение описаний технологии изготовления объекта, т.е. на определение состава и последовательностей технологических операций и переходов, типов и режимов работы используемого технологического оборудования, приспособлений и инструмента.

В соответствии с требованиями Государственного образовательного стандарта основная профессиональная деятельность инженера специальности «Радиотехника» связана с **функциональным проектированием** (ФП) РЭС.

Проектирование как процесс, развивающийся во времени, подразделяется на стадии:

- научно-исследовательских работ (предпроектных исследований, технического задания, технического предложения);
- эскизного проекта (опытно-конструкторских работ);
- технического проекта;
- рабочего проекта;
- испытаний;
- внедрения.

При этом все этапы жизненного цикла проектирования сложных систем целесообразно сопровождать моделированием их функциональных свойств. На стадии научно-исследовательских работ – для выбора наилучшего из конкурирующих вариантов как всей системы, так и ее отдельных блоков, изучения поведения в штатных и нештатных ситуациях и аварийных режимах. На этапе опытно-конструкторских работ и испытаний для составления программы испытаний, оценки возникающих отклонений в поведении и характеристиках.

К основным проектным процедурам этапа ФП РЭС относятся: формирование исходного описания (технического задания), расчеты параметров и характеристик в соответствии с типовыми проектными методиками, анализ и синтез, оформление проектной документации этапа ФП (рис. 12.1).

**Синтез** – это проектные процедуры, заканчивающиеся получением новых описаний проектируемого объекта или его частей. Различают:

- **структурный синтез** – синтез, при котором определяется *структура* проектируемого объекта: состав элементов объекта и их связей между собой;
- **параметрический синтез** – синтез, целью которого является определение числовых значений параметров проектируемого объекта при заданной структуре.

Синтез предполагает решение задач анализа и выполнение проектных расчетов. Методики расчета типовых узлов излагаются в технической литературе, применительно к проектированию ЭПУ РЭС это пособия [1–4].

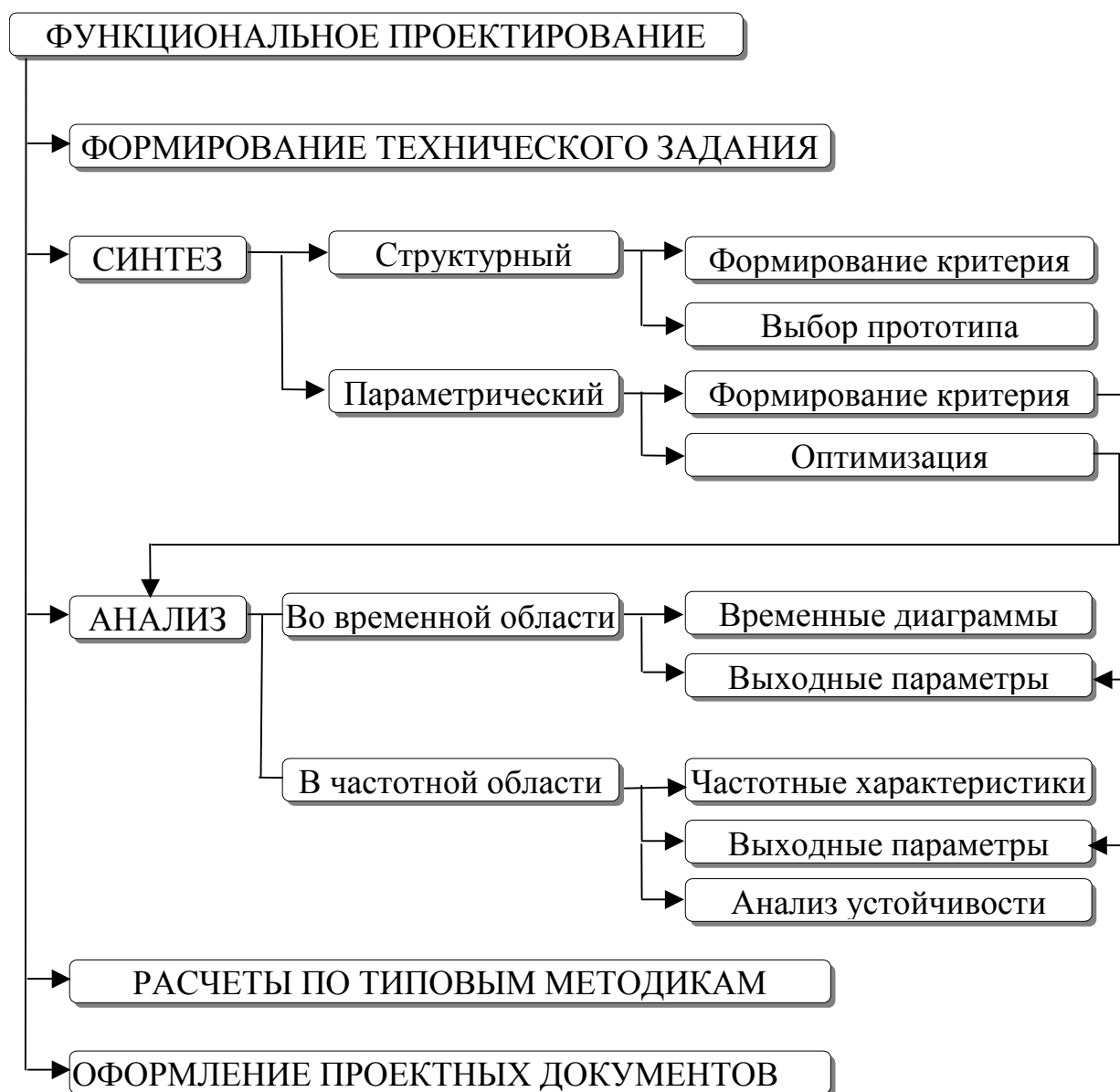


Рис. 12.1 – Задачи функционального проектирования РЭС

**Анализ** – это проектная процедура или группа проектных процедур, имеющая целью получение информации о свойствах (исследование свойств) проектируемого объекта.

Типовыми задачами анализа РЭС, которые решаются путем проведения натуральных экспериментов либо математического моделирования, являются исследование установившихся и переходных режимов, анализ устойчивости. Проектная процедура анализа подразделяется на два вида:

– **анализ во временной области** – вид анализа, при выполнении которого определяются зависимости фазовых переменных от времени при заданных внешних воздействиях; целью анализа является построение динамических характеристик (характеристик переходных процессов);

– *анализ в частотной области* – вид анализа, при выполнении которого определяются зависимости фазовых переменных от частоты при заданных внешних воздействиях; целью анализа является получение частотных характеристик.

## 12.2 Методы, технологии и инструментальные средства проектирования ЭПУ РЭС

Центральную часть выполнения проекта составляют методы, технологии и инструментальные средства проектирования.

**Метод проектирования** – это организованная совокупность процессов создания ряда моделей, которые описывают различные аспекты разрабатываемой системы с использованием четко определенной нотации.

Метод является совокупностью концепций и теоретических основ, нотаций и процедур. Методы реализуются через конкретные *технологии* и поддерживающие их *инструментальные средства*.

**Технология проектирования** – совокупность технологических операций проектирования в их последовательности и взаимосвязи, приводящая к разработке проекта.

Современные методы проектирования основаны на взаимодействии человека и ЭВМ и являются *автоматизированными*. Автоматизированное проектирование включает три основных этапа:

1. Сбор множества альтернативных решений и их исследование.
2. Проведение всей последовательности испытаний на моделях, отбраковка ненужных.
3. Устранение внутренних противоречий и определение одного решения, удовлетворяющего всем критериям.

Необходимый для принятия решения объем информации на каждом уровне проектирования может быть обеспечен только на базе применения ЭВМ, современных информационных технологий и инструментальных средств: средств автоматизированного моделирования и проектирования.

С позиций системного анализа вся проектно-исследовательская деятельность является *моделированием* – замещением одного объекта другим с целью получения информации о свойствах объекта-оригинала с помощью объекта-заместителя (*модели*). Для исследования процессов функционирования используются натурный эксперимент и моделирование – математическое, машинное, физическое.

**Математической моделью** объекта называется любое формализованное (записанное с помощью математических, т.е. условных однозначно трактуемых символов) описание, отражающее состояние или поведение объекта с



требуемой степенью точности. **Машинное моделирование** является реализацией математического на базе технических средств – аналоговых вычислительных машин, цифровых (электронных) вычислительных машин (ЭВМ), аналого-цифровых вычислительных систем. **Физическое моделирование** предполагает исследование объектов одной физической природы с помощью объектов, имеющих другую физическую природу, но одинаковое с первыми математическое описание.

В связи с бурным развитием средств вычислительной техники наиболее широкое распространение получили математическое моделирование на ЭВМ и компьютерное моделирование – математическое моделирование на персональном компьютере. В процессе проектирования – создания и преобразования моделей объекта – используются статические и динамические модели. Статические модели и характеризуют состояние объекта в некоторый момент времени, они отражают состав и структуру объекта. Динамические модели характеризуют функционирование объекта.

В настоящее время на практике при исследовании и разработке РЭС применяются инструментальные средства, имеющие различную степень автоматизации.

**Системы математических расчетов** автоматизируют выполнение проектных расчетов, а также исследование динамических моделей, но предполагают формирование математической модели самим разработчиком. Системы моделирования математических задач используются в тех случаях, где в исследованиях РЭС и их элементов преобладает научный аспект: при разработке новых математических моделей в рамках научных исследований при изучении теоретических вопросов преобразования энергии.

**Системы автоматизированного моделирования (САМ) и проектирования (САПР)**. Эффективное решение задач проектирования сложных систем требует автоматизации проектных процедур на основе применения проблемно ориентированного программного обеспечения в виде САПР и САМ, которые обеспечивают автоматическое формирование математической модели на основе статической модели состава и структуры. Степень автоматизации в САПР и САМ выше, чем в системах математических расчетов. В современных САПР и САМ формализованное представление объекта осуществляется в общепринятом для соответствующей предметной области виде: в форме чертежей принципиальных, функциональных, структурных и т.п. схем, что удобно для инженера-разработчика технических систем.

Классификация инструментальных средств, применяющихся при проектировании РЭС и ЭПУ РЭС, представлена на рис. 12.2.

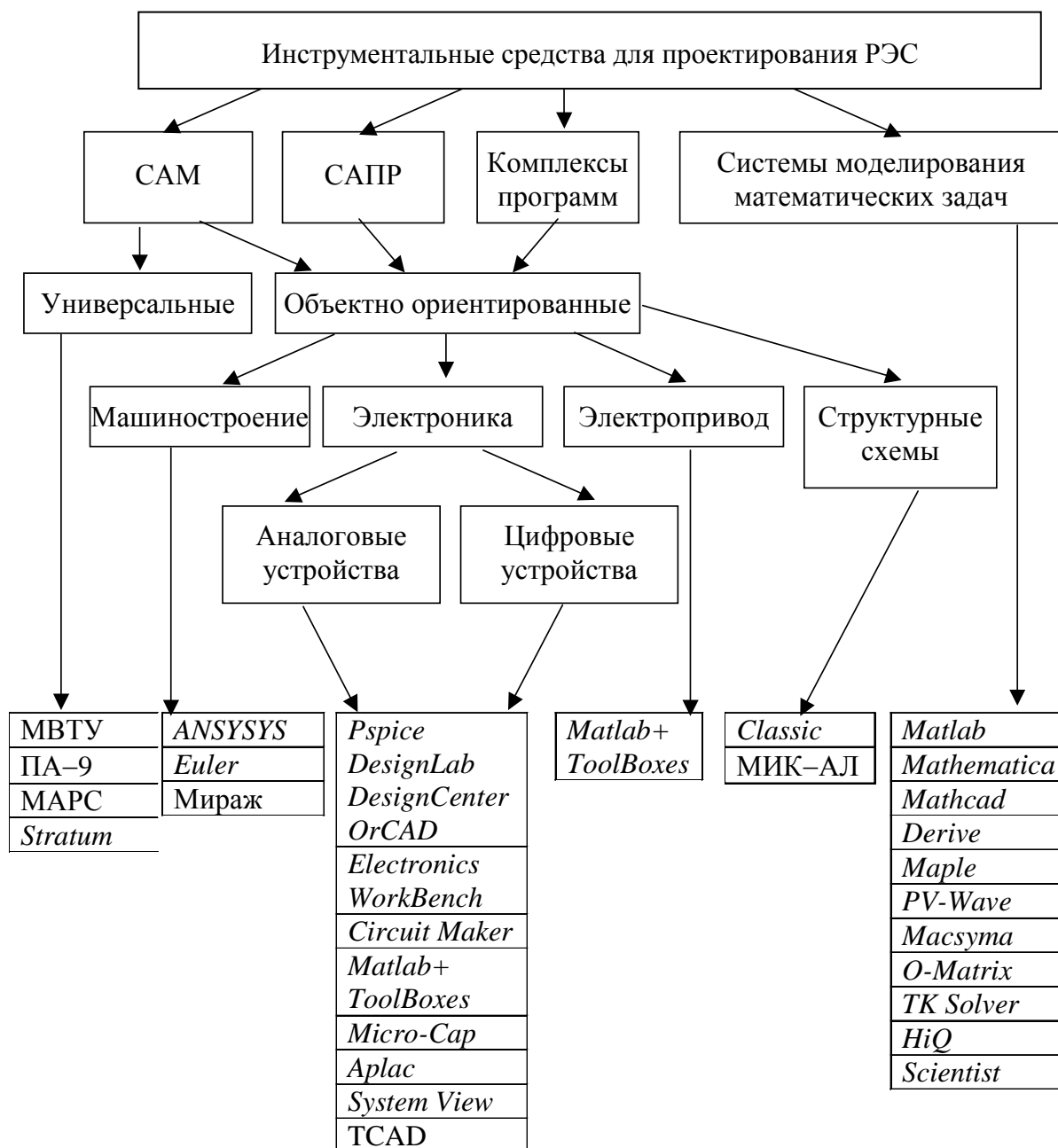


Рис. 12.2 – Классификация инструментальных средств, применяющихся при исследовании и проектировании РЭС

По спектру решаемых задач и способу формализованного представления исследуемого объекта комплексы программ можно разбить на четыре группы:

– системы автоматизированного моделирования – решают задачи анализа и оптимизации;

– САПР (CAD/CAM-системы), составной частью которых являются САМ, – обеспечивают выполнение процесса проектирования в целом либо отдельных его этапов;

– специализированные комплексы программ, предназначенные для решения узкого круга задач соответствующей предметной области;

– системы моделирования математических задач – обеспечивают работу с математическими объектами (формулами, числами, графиками), решая спектр задач математических вычислений, символьных преобразований, решения систем уравнений, программирования и т.п.

В соответствии с объектной и проблемной ориентацией САМ делятся на универсальные и объектно ориентированные, предназначенные для моделирования устройств и систем произвольного либо строго определенного типа (в области машиностроения, радиоэлектроники, систем автоматического управления) соответственно.

САПР и специализированные комплексы программ всегда являются объектно ориентированными.

САПР можно объединить в две большие группы:

– САПР в области радиоэлектроники – обеспечивают моделирование и оптимизацию радиоэлектронных схем;

– САПР в области машиностроения (САПР общего назначения и специализированные, ориентированные на определенный вид производства) – предназначены для геометрического моделирования, прочностных расчетов, оформления конструкторской документации.

**Особенности РЭС и ЭПУ РЭС** как объекта проектирования. Выбор программного обеспечения для автоматизированного исследования ЭПУ РЭС и РЭС в целом с учетом особенностей функционирования ЭПУ затрудняется их **физической неоднородностью** и необходимостью моделирования на **различных уровнях**: на уровне **принципиальных** (электрических, электро-кинематических, акустических) и **структурных** схем. При этом САПР и системы моделирования радиоэлектронных схем не допускают моделирования на уровне структурных схем. И, наоборот, САМ структурных схем не позволяют использовать аппарат принципиальных схем. Кроме того, в САПР радиоэлектронных схем отсутствуют модели электромеханических устройств и ЭАП, а САПР в области машиностроения не позволяют проводить динамический анализ механических систем с учетом электрических процессов в электромеханических устройствах. Машиностроительные САПР могут иметь приложения для конструкторского-технологического проектирования электротехнических устройств, но не решают основной задачи ФП – моделирования физических процессов.

Методом изучения физических процессов в электромагнитных, механических (твердых) и акустических (газообразных) системах, а также тепловых процессов является **метод аналогий**. Метод аналогий основан на сходстве математических выражений, описывающих процессы в этих системах и в электрических цепях.

Выделяют два вида аналогий:

– *анalogии компонентных уравнений* – одинаковость формы компонентных уравнений (уравнений математических моделей элементов объекта на макроуровне) для простых элементов в системах различной физической природы;

– *анalogии топологических уравнений* – одинаковость формы топологических уравнений для систем различной физической природы.

Множество базовых элементов электрических цепей включает источники тока и ЭДС, сопротивление, емкость и индуктивность.

## 12.3 Моделирование электромагнитных процессов

### 12.3.1 Электромагнитные аналогии

Состояние исследуемого объекта произвольной физической природы характеризуется множеством значений величин, получивших название фазовых переменных. Фазовыми переменными, характеризующими состояние ЭПУ РЭС, а также РЭС в целом, являются напряжения и токи, магнитные потоки и напряженности магнитного поля, силы, моменты, скорости, давления, температуры и т.п.

При исследовании магнитных процессов фазовыми переменными являются магнитный поток и напряженность магнитного поля.

Магнитная система является одним из основных элементов ряда ЭПУ – электрических машин (генераторов, двигателей и т.п.), ЭМЭ. В магнитную систему входят:

– источники магнитного поля – обмотки с током, возбуждающие магнитное поле, постоянные магниты;

– система магнитопроводов из ФММ, по которым замыкается магнитный поток.

При анализе магнитных цепей магнитную систему представляют эквивалентной схемой. Магнитные цепи бывают неразветвленные и разветвленные, однородные и неоднородные, симметричные и несимметричные.

*Неразветвленной магнитной цепью* называют цепь, через элементы которой замыкается один и тот же магнитный поток. В *разветвленной магнитной цепи* содержатся ветви, в каждой из которых замыкаются свои магнитные потоки. В *однородной магнитной цепи*, образованной замкнутым магнитопроводом, магнитный поток находится в однородной среде. *Неоднородной* называют магнитную цепь, состоящую из участков, имеющих разные сечения, воздушные зазоры, ферромагнитные тела с различными магнитными свойствами.

При формировании модели магнитной цепи используются следующие законы:

– *первый закон Кирхгофа для магнитной цепи* – алгебраическая сумма магнитных потоков в любом узле магнитной цепи равна нулю;

– *второй закон Кирхгофа для магнитной цепи* – алгебраическая сумма падений магнитного напряжения вдоль любого замкнутого контура магнитной цепи равна алгебраической сумме МДС, действующих в этом контуре;

– *закон Ома для неразветвленной магнитной цепи* – магнитный поток ненасыщенного участка магнитной цепи равен отношению МДС  $F$ , действующей на этом участке магнитной цепи, к его магнитному сопротивлению  $\mathfrak{R}_\mu$ :

$$\Phi = \frac{F}{\mathfrak{R}_\mu},$$

где  $\mathfrak{R}_\mu = \frac{L_\mu}{\mu_a S_\mu}$ ;  $\mu_a, L_\mu, S_\mu$  – абсолютная магнитная проницаемость, длина и площади сечения участка магнитной цепи.

Здесь падение магнитного напряжения вдоль силовой линии – это произведение напряженности магнитного поля на длину силовой линии.

Очевидно, что аналогия между физическими величинами магнитной и электрической цепей следующая:

Магнитная система	Электрическая система
Падение магнитного напряжения	Напряжение $U$
Магнитный поток $\Phi$	Ток $I$
<i>Компонентные аналогии</i>	
Источник МДС	Источник ЭДС
Магнитное сопротивление	Сопротивление
<i>Топологические аналогии</i>	
Первый закон Кирхгофа для магнитной цепи	Первый закон Кирхгофа для электрической цепи
Второй закон Кирхгофа для магнитной цепи	Второй закон Кирхгофа для электрической цепи

### 12.3.2 Правила построения эквивалентных схем ЭМЭ

Эквивалентная электрическая схема ЭМЭ строится на основании его конструктивного исполнения с учетом основных электротехнических законов. При этом источники МДС заменяются источниками ЭДС, а участки магнитной цепи – магнитными сопротивлениями. *Все элементы схемы, через*

которые проходит один и тот же магнитный поток, размещаются последовательно, а элементы, соответствующие частям общего потока, – параллельно.

В качестве примера на рис. 12.3 представлены эквивалентные схемы рассмотренных в главе 2 дросселя с немагнитным зазором (неразветвленная магнитная цепь) и однофазного двухобмоточного трансформатора, выполненного на стержневом магнитопроводе (разветвленная магнитная цепь).

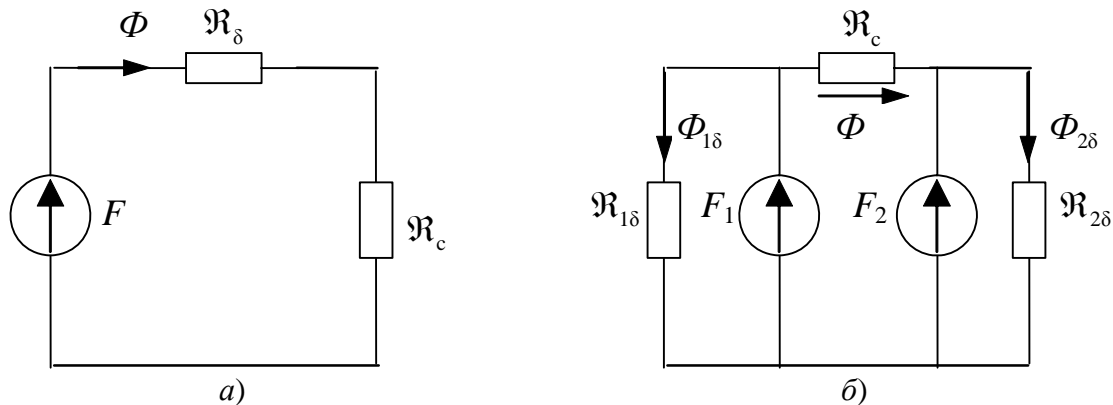


Рис. 12.3 – Эквивалентные схемы замещения дросселя с немагнитным зазором (а) и однофазного двухобмоточного трансформатора (б)

## 12.4 Моделирование механических систем

### 12.4.1 Электромеханические аналогии

При исследовании механической системы фазовыми переменными, характеризующими состояние системы, являются скорость, сила и момент.

Как известно, уравнения поступательного и вращательного движения твердого тела имеют вид:

$$F = m \frac{dv}{dt}; \quad M = J \frac{d\omega}{dt},$$

где  $m$ ,  $J$  – масса и момент инерции твердого тела;  $v$ ,  $\omega$  – скоростью поступательного и вращательного движения;  $F$ ,  $M$  – сила и вращающий динамический момент;  $t$  – время.

Известно, что при малых деформациях почти все тела подчиняются закону Гука:

$$F = k_{\text{уп}} x = \frac{1}{C_{\text{л}}} x = \frac{1}{C_{\text{л}}} \int_0^t v dt; \quad M = k_{\text{ув}} \varphi = \frac{1}{C_{\text{к}}} \varphi = \frac{1}{C_{\text{к}}} \int_0^t \omega dt,$$

где  $x$ ,  $\varphi$  – линейное и угловое смещение точки приложения внешней силы или момента;  $k_{уп}$ ,  $k_{ув}$  – коэффициенты упругости;  $C_{л}$ ,  $C_{к}$  – коэффициенты линейной и крутильной гибкости (податливости).

В механических системах всегда существует рассеяние энергии движения. Обычно его связывают с силами трения, зависящими от многих факторов и подчиняющимися различным законам. В механических системах существенное значение имеет вязкое трение, возникающее при относительном перемещении поверхностей. При этом сила сопротивления пропорциональна скорости перемещения:

$$F = R_x v; \quad M = R_{\omega} \omega,$$

где  $R_x$ ,  $R_{\omega}$  – коэффициенты сопротивления вязких потерь (коэффициенты трения).

Очевидно, что приведенные выше уравнения, описывающие основные процессы в механических системах – движение, деформацию, трение, аналогичны компонентным уравнениям элементов электрических цепей.

Способ соединения элементов определяется характером распределения сил и перемещений. Из многообразия возможных типов соединения элементов выделяют:

- соединение в узел – соединение элементов, в котором скорость каждого элемента равна скорости всей системы, а сила, действующая на всю систему, равна сумме сил, приложенных к каждому элементу;
- соединение в цепочку – соединение элементов, в котором скорость системы равна сумме скоростей отдельных элементов, а сила, приложенная ко всей системе, равна силе, приложенной к каждому из них.

**Соединение в узел.** Примером устройства, где механические элементы соединены в узел, является простая колебательная система, состоящая из массы и пружины (рис. 12.4, а). Уравнение этой системы имеет вид:

$$F_{рез} = m \frac{dv}{dt} = F - F_{тр} - F_{упр}$$

или

$$m \frac{dv}{dt} + R_x v + \frac{1}{C_{л}} \int v dt = F(t).$$

Сходное интегро-дифференциальное уравнение получается для электрической цепи:

- с последовательным соединением электрических элементов, если придерживаться аналогии сила – напряжение  $F \rightarrow u$ , скорость – ток  $v \rightarrow i$  (рис. 12.4, б):

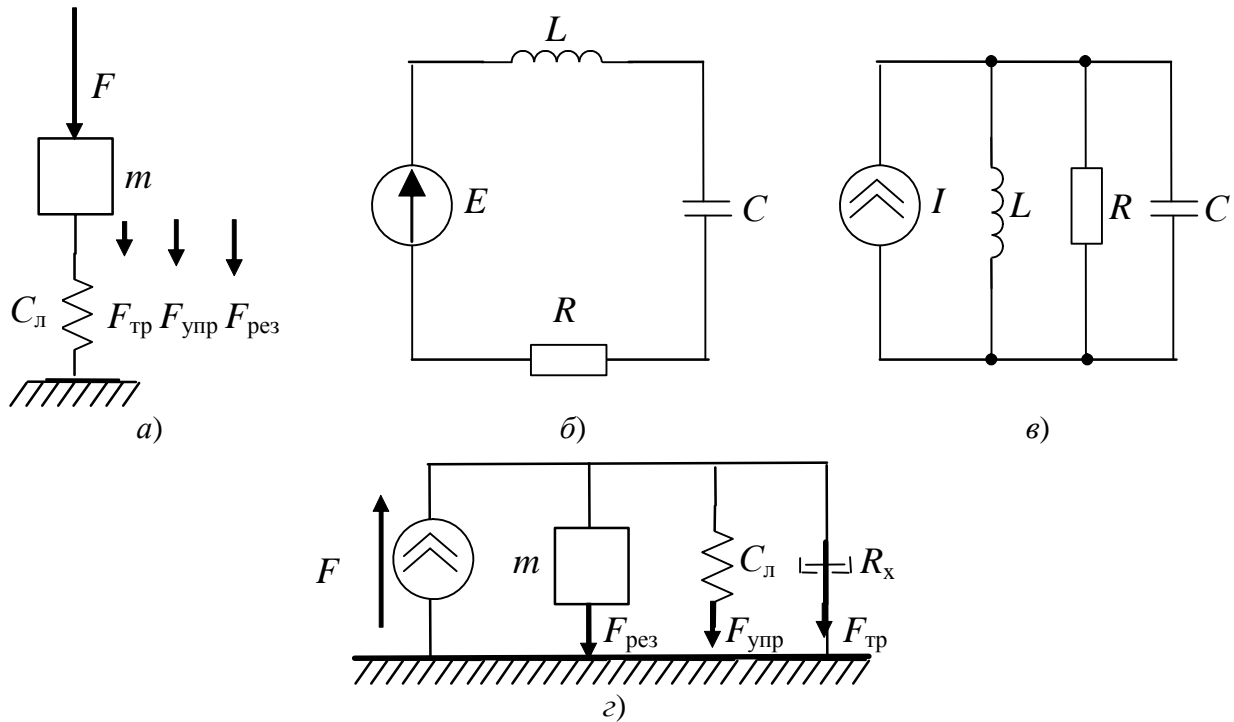


Рис. 12.4 – Механическая система (а) и ее эквивалентные схемы замещения:  
 б – по аналогии сила – напряжение; в – по аналогии сила – ток;  
 г – кинематическая схема механической системы

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int idt = e(t); \text{ где } e = F; L = m; R = R_x; C = C_{\text{л}};$$

– с параллельным соединением электрических элементов, если придерживаться аналогии сила – ток  $F \rightarrow i$ , скорость – напряжение  $v \rightarrow u$  (рис. 12.4, в):

$$C \frac{du}{dt} + \frac{1}{R} u + \frac{1}{L} \int udt = i(t); i = F; C = m; R = \frac{1}{R_x}; L = C_{\text{л}}.$$

**Соединение в цепочку.** Примером устройства, где механические элементы соединены в цепочку, является колебательная система, представленная на рис. 12.5, а. Данная система состоит из пружины 1, сосуда 2, наполненного вязкой жидкостью, и устройства, состоящего из штока 3, проходящего через горловину сосуда, и перфорированного поршня 4. Пружина, механическое сопротивление вязкой жидкости и масса сосуда являются механическими элементами данной колебательной системы, соединенными в цепочку. Параметрами элементов являются жесткость пружины  $c$ ; механическое сопротивление вязкой жидкости  $r$  и масса сосуда  $m$ . Трением сосуда о поверхность подставки пренебрегаем.



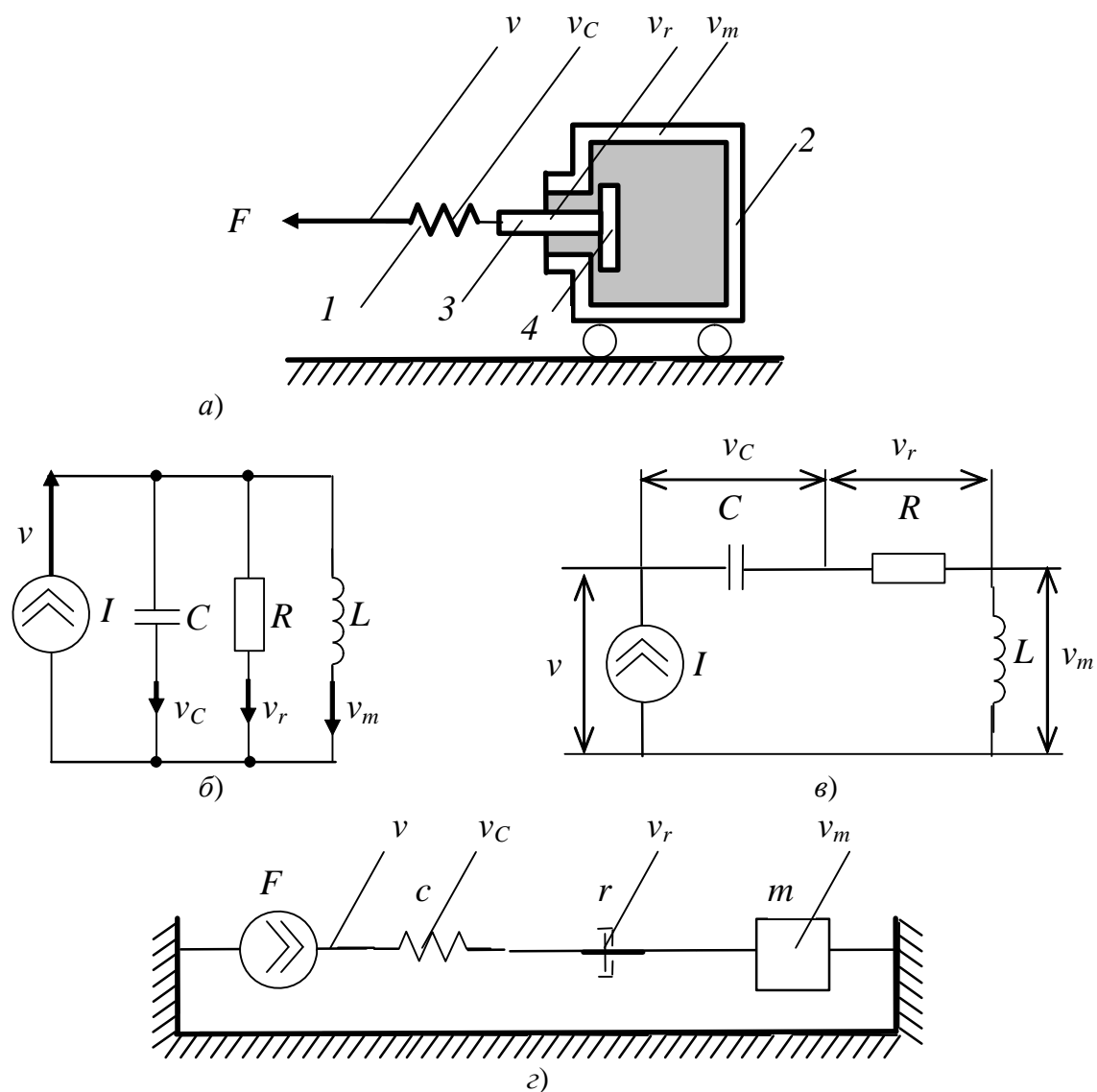


Рис. 12.5 – Механическая система (а) и ее эквивалентные схемы замещения:  
 б – по аналогии скорость – ток; в – по аналогии скорость – напряжение;  
 г – кинематическая схема механической системы

Вследствие того, что элементы соединены в цепочку, внешняя сила в каждый момент времени равна силам, возникающим на каждом из перечисленных элементов, а скорость конца пружины  $v$  равна сумме скоростей движения соответствующих элементов друг относительно друга (левого конца пружины относительно штока  $v_C$ , штока относительно сосуда  $v_r$ , сосуда в неподвижной системе координат  $v_m$ ):

$$v = v_C + v_r + v_m.$$

Представив скорости как функции силы, получим интегро-дифференциальное уравнение относительно силы:

$$c \frac{dF}{dt} + \frac{1}{r} F + \frac{1}{m} \int F dt = v(t).$$

Аналогичное уравнение получается:

– в схеме с параллельным соединением электрических элементов (рис. 12.5, б) для напряжения  $u$ , если придерживаться аналогии скорость – ток  $v \rightarrow i$ , сила – напряжение  $F \rightarrow u$ :

$$C \frac{du}{dt} + \frac{1}{R} u + \frac{1}{L} \int u dt = i(t); \text{ где } i = v; L = m; R = r; C = c;$$




– в схеме с последовательным соединением электрических элементов, если придерживаться аналогии скорость – напряжение  $v \rightarrow u$ , сила–ток  $F \rightarrow i$  (рис. 12.5, в):

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int i dt = e(t); \text{ где } i = F; C = m; R = \frac{1}{r}; L = c.$$

Таким образом, в механике существуют две системы электромеханических аналогий (табл. 12.1). Каждому уравнению баланса сил динамической системы в модели, составленной по первой системе аналогий, соответствует уравнение баланса напряжений определенного замкнутого контура схемы, а в модели по второй системе аналогий – уравнение баланса токов определенного узла схемы. Физэффекты и элементы механических систем имеют общепринятое условное графическое изображение в виде элементов **кинематических принципиальных схем** (см. табл. 12.1). Принципиальная кинематическая схема механической колебательной системы, приведенной на рис. 12.4, а, представлена на рис. 12.4, г, а схемы рис. 12.5, а – на рис. 12.5, з.

Эквивалентные схемы механических систем в виде электрических цепей могут быть построены по двум системам аналогий. При использовании системы обратных аналогий эквивалентная схема механической системы в большей степени соответствует принципиальной кинематической схеме.

Таблица 12.1 – Система электромеханических аналогий

Механическая система (поступательного и вращательного движения)	Электрическая система	
	Система прямых аналогий	Система обратных аналогий
Скорость: линейная $v$ , угловая $\omega$ Сила $F$ , момент $M$	Ток $I$ Напряжение $U$	Напряжение $U$ Ток $I$
<i>Компонентные аналогии</i>		
Инерционность 	Индуктивность $L$	Емкость $C$
Жесткость (податливость) (вал, канат) 	Емкость $C$	Индуктивность $L$
Эффект трения (демпфер, подшипники) 	Сопротивление $R$	Проводимость $Y$
<i>Топологические аналогии</i>		
Уравнение баланса сил (динамического равновесия Даламбера) $\sum F = 0$	Второй закон Кирхгофа $\sum U = 0$	Первый закон Кирхгофа $\sum I = 0$

### 12.4.2 Правила построения эквивалентных схем механических систем

Эквивалентная схема механической системы строится в соответствии со следующими правилами:

1. Выделяется базовый узел, отображающий неподвижную часть объекта (соответствующий инерциальной системе отсчета).
2. Элементы массы (элементы типа емкость) одним полюсом подключаются к базовому узлу. Через второй узел осуществляется их взаимодействие с окружающими элементами механической системы.

3. Элементы упругости (элементы типа индуктивность) включают между соединяемыми твердыми телами.

4. Элементы трения (элементы типа сопротивление) включают между телами, контактирующими посредством трения.

## 12.5 Моделирование ЭАП

### 12.5.1 Электромеханоакустические аналогии

Звуковые волны проявляются главным образом через вызываемые ими изменения давления и скорости. Фазовыми переменными, характеризующими состояние неоднородного по своей физической природе ЭАП, являются токи, напряжения, силы, давления, скорости и объемные расходы. Параметрами состояния газа являются объем, давление и температура.

Сопоставляя уравнения для электрических цепей и уравнения, используемые и для описания акустических явлений, также обнаруживается ряд аналогий.

Рассмотрим акустическую схему, представленную на рис. 12.6, которая состоит из трубки 1 длины  $l$  и сечения  $S$ , капилляра 2 и полости 3 объемом  $V$ . Предположим, что размеры каждого из этих элементов малы по сравнению с длиной звуковой волны  $\lambda$ , что справедливо для элементов микрофона. Поэтому в данной схеме отсутствует явление распространения волн.

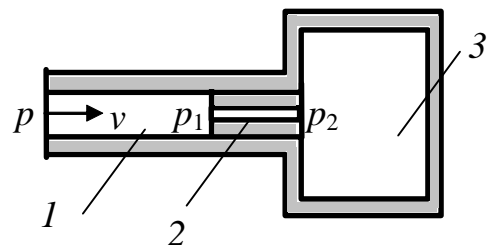


Рис. 12.6 – Простой акустический контур

**Движение газа – акустическая масса.** Рассмотрим колебательное движение газа в трубке. Поскольку  $l \ll \lambda$  и сжатием газа можно пренебречь, то находящийся в трубке газ массой  $m$  перемещается как единое целое под действием разности давлений  $p - p_1$ . Основной закон динамики газа в трубке имеет вид:

$$p - p_1 = \frac{m}{S^2} \frac{dQ}{dt}.$$

Величина  $m_a = \frac{m}{S^2}$  называется акустической массой;  $Q = Sv$  – объемная скорость (расход),  $v$  – линейная скорость частиц среды.

Данное уравнение близко по форме к уравнению движения в механике и уравнению модели катушки индуктивности, что свидетельствует об аналогии между механической массой, акустической массой и индуктивностью.

**Вязкость – акустическое сопротивление.** Падение давления в капилляре, вызванное вязкостью, пропорционально скорости (ламинарное течение). Таким образом, получаем

$$p_1 - p_2 = R_a Q,$$

где  $R_a = \frac{8\eta l \pi}{S^2}$  является аналогом гидравлического сопротивления и называется акустическим сопротивлением.

**Сжатие газа – акустическая емкость.** Из-за малых размеров сжатие газа в полости происходит практически без смещения его центра массы. Процесс сжатия описывается законами термодинамики, если предположить это сжатие адиабатическим (без теплообмена). При изменении объема газа без теплообмена давление и объем постоянной массы газа связаны уравнением Пуассона

$$pV^\gamma = \text{const},$$

где  $\gamma = c_p/c_v$ ;  $c_p$ ,  $c_v$  – молярные теплоемкости газа при постоянном объеме и давлении.

В соответствии с уравнением Пуассона получаем

$$\Delta p/p = -\gamma(\Delta V/V).$$

Подставляя

$$\Delta p = p_2, \quad p \cong P_0 \quad \text{и} \quad \Delta V = -\int Q dt,$$

где  $P_0$  – среднее давление, приходим к уравнению вида:

$$p_2 = (\gamma P_0/V) \int Q dt.$$

Таким образом, член  $V/\gamma P_0$  служит аналогом емкости: упругость или акустическая емкость.

**Акустический канал.** Для представленной на рис. 12.7 схемы дифференциальное уравнение, связывающее давление с расходом  $Q$ , имеет вид

$$p = (p - p_1) + (p_1 - p_2) + p_2$$

или

$$p = \frac{m}{S^2} \frac{dQ}{dt} + RQ + \frac{\gamma P_0}{V} \int Q dt.$$

Это уравнение подобно уравнению модели электрической цепи, состоящей из последовательно включенных источника ЭДС, индуктивности, сопротивления и емкости.

Таким образом, система электроакустических аналогий содержит следующие соответствия:

Акустическая система	Электрическая система
Акустическое давление $P$	Напряжение $U$
Объемная скорость (расход) $Q$	Ток $I$
<i>Компонентные аналогии</i>	
Источник давления	Источник ЭДС
Акустическое сопротивление	Сопротивление
Полная акустическая сжимаемость объема	Емкость
Акустическая масса	Индуктивность

### 12.5.2 Правила построения эквивалентных схем ЭАП

Все электроакустические системы можно условно разделить на три части: акустическую, механическую и электрическую. Руководствуясь изложенными выше принципами, можно составить эквивалентную схему механической и электрической частей ЭАП. При этом *все элементы схемы, через которые проходит один и тот же поток, размещаются последовательно, а элементы, соответствующие частям общего потока, – параллельно*. В большинстве случаев сложение потоков происходит в акустических емкостях.

**Микрофон, чувствительный к давлению.** В микрофонах данного типа флуктуации акустического давления приводят к смещению диафрагмы. Напротив, изменения атмосферного давления не вызывают какого-либо эффекта из-за наличия капиллярного канала для выравнивания давления.

Основными элементами конструкции микрофона являются полость, диафрагма и канал для прохождения воздуха (рис. 12.7). В полость микрофона поступает поток, проходящий через диафрагму с импедансом  $Z_d$  (масса и упругость), и поток, проходящий через капиллярный канал с сопротивлением  $R$ . Отсюда получаем эквивалентную схему ЭАП с двумя цепями.

Сила  $F_d$ , действующая на диафрагму, равна произведению площади диафрагмы на давление:

$$F_d = S_d p_d .$$

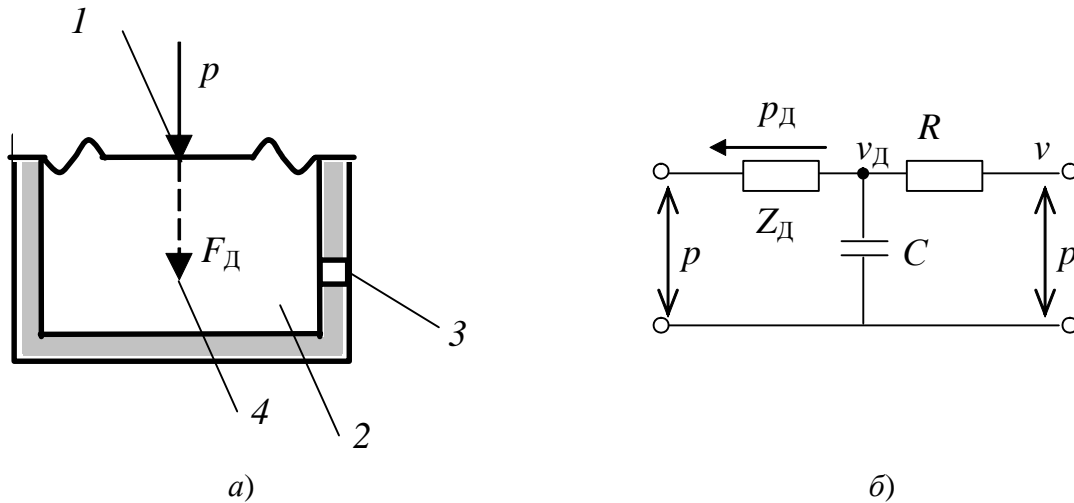


Рис. 12.7 – Микрофон, чувствительный к давлению: конструктивная схема (а) и эквивалентные электрическая схемы замещения (б):  
 1 – диафрагма; 2 – полость; 3 – капиллярный канал;  
 4 – механическая связь с преобразователем

## 12.6 Моделирование тепловых процессов

### 12.6.1 Электрические аналогии

На стадии ФП РЭС и ЭПУ РЭС целесообразно рассчитать их тепловой режим. По результатам теплового расчета необходимо скорректировать схему и параметры компонентов так, чтобы температура РЭС не превышала некоторого допустимого значения. Чтобы найти распределение температуры в некоторой области пространства, необходимо решить уравнение теплопроводности в частных производных при начальных и краевых условиях. Данное уравнение обычно решается численно с помощью метода конечных разностей или метода конечных элементов.

Однако рассчитать тепловой режим РЭС, содержащих большое число полупроводниковых приборов и ЭМЭ – источников тепла, различных радиаторов, предназначенных для теплоотдачи, решая уравнение теплопроводности очень трудно. Это связано с тем, что при таком разнообразии элементов теплоотдачи и тепловыделения на схемных платах переход от уравнения теплопроводности в частных производных к системе алгебраических уравнений трудно формализовать как в методе конечных разностей, так и в методе конечных элементов. Поэтому часто целесообразно применять метод электрических аналогий, в котором тепловые соотношения рассматриваются как аналоги электрических цепей.

Приведем некоторые тепловые модели.

При исследовании тепловых процессов фазовыми переменными являются температура и тепловые потоки.

**Поток тепла через плоскую стенку**  $Q$  можно описать выражением

$$Q = kS(T_1 - T_2) / l,$$

где  $k$  – коэффициент теплопроводности;  $T_1, T_2$  – температуры поверхностей стенки;  $l, S$  – толщина и площадь стенки.

Очевидно, что поток тепла через плоскую стенку можно моделировать процессом протекания тока через резистор. Отношение  $R = kS / l$  представляет собой кондукционное сопротивление.

**Конвекционный поток тепла** описывается выражением

$$Q = (T_1 - T_2) / (1 / hS),$$

где  $h$  – коэффициент теплопередачи.

Отношение  $(1 / hS)$  называется конвекционным тепловым сопротивлением.

Тогда эквивалентная схема потока тепла для простой стенки с учетом конвекции может быть представлена в виде последовательного соединения сопротивлений (рис. 12.8).

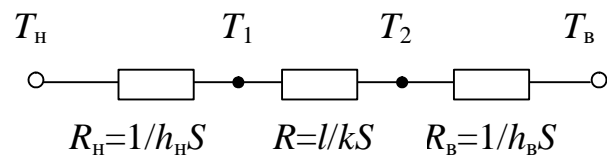


Рис. 12.8 – Эквивалентная схема потока тепла через стенку

Система электротепловых аналогий содержит следующие соответствия:

Тепловая система	Электрическая система
Температура	Напряжение $U$
Тепловой поток	Ток $I$
<i>Компонентные аналогии</i>	
Источник тепла	Источник ЭДС
Теплопроводность тела	Сопротивление
Теплоемкость тела	Емкость

### 12.6.2 Правила построения эквивалентных схем тепловых процессов

Эквивалентная схема тепловой системы строится в соответствии со следующими правилами:

1. Условное тело с температурой  $0^\circ\text{C}$  или  $0\text{ K}$  или произвольная точка тепловой системы, если предполагается выполнять моделирование в относительных температурах, принимаются за базовый узел.

2. Элементы теплоемкости тела (элементы типа емкость) одним полюсом подключаются к базовому узлу. Через второй полюс осуществляется их взаимодействие с окружающими элементами тепловой системы.



3. Элементы теплопроводности тела (элементы типа сопротивление) включают между телами, обменивающимися энергией посредством кондукции или конвекции.

**Тонкая пластинка** является моделью пластинки-ребра радиатора. Ребро, отводящее тепло от источника, представлено на рис. 12.9, а. Тепло от горячей стенки протекает вдоль ребра, а от него путем конвекции – к окружающему воздуху или какому-либо другому бесконечному теплоотводу. В установившемся состоянии тепло, входящее в элемент, должно быть равно теплу, покидающему элемент, в том числе с учетом конвекции  $Q_c$ :

$$Q_x = Q_{x+\Delta x} + Q_c.$$

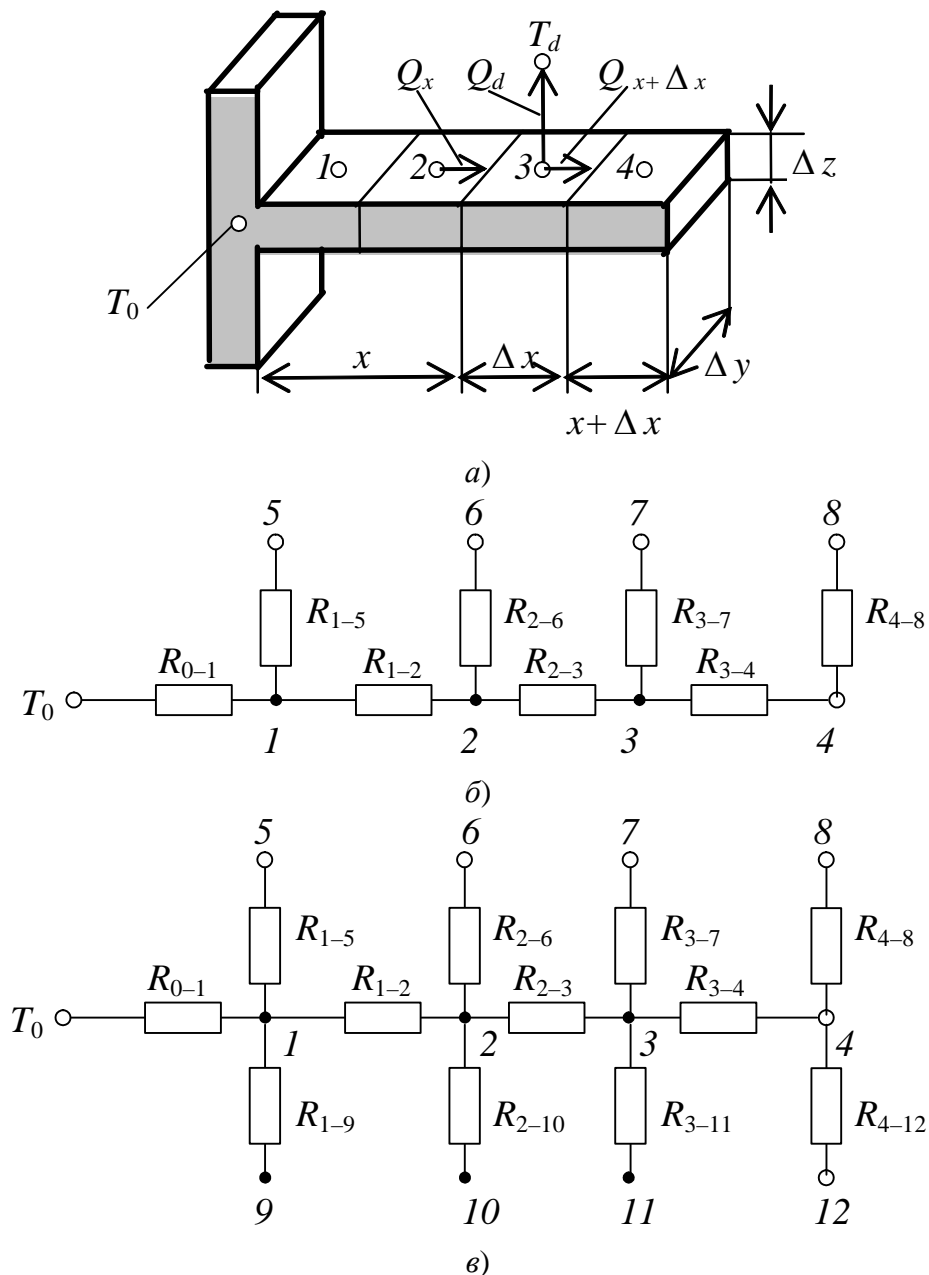


Рис. 12.9 – Моделирование потока тепла через пластинку: конструктивная схема (а) и эквивалентные электрические схемы замещения:

б – при отводе тепла с одной стороны пластинки; в – при отводе тепла с двух сторон

На рис. 12.9, б показана эквивалентная схема ребра, когда отвод тепла конвекцией осуществляется только от одной из его сторон, в то время как другая сторона и конец ребра считаются изолированными.

Кондукционные тепловые сопротивления ребра можно определить следующим образом:

$$R_{0-1} = \Delta x / 2kS; R_{1-2} = R_{2-3} = R_{3-4} = \Delta x / k(S = z \Delta y).$$

Конвекционные тепловые сопротивления ребра равны:

$$R_{1-5} = R_{2-6} = R_{3-7} = R_{4-8} = 1/h(\Delta S = \Delta x \Delta y).$$

Если тепло отводится конвекцией с обеих сторон ребра, то следует изменить эквивалентную схему (рис. 12.9, в). Тепловые сопротивления определяются так же, но для определения кондукционных тепловых сопротивлений следует брать толщину, равную половине толщины ребра:

$$S = z \Delta y / 2.$$

Если тепло рассеивается в окружающий воздух и его температура везде одинакова, то все узлы, соответствующие на рис. 12.9, б, в окружающей среде (5...12), можно объединить в один, которому приписывается температура окружающего воздуха.

**Охлаждаемая плита.** Большие количества тепла от дискретных приборов очень хорошо отводит плита, охлаждаемая воздухом, если эти приборы смонтировать на плите.

Плита состоит из плоскостей, на которые монтируются приборы, и присоединенных к ним ребер, в пространство между которыми принудительно продувается охлажденный воздух (рис. 12.10, а). Эквивалентная электрическая схема теплового процесса приведена на рис. 12.10, б. Сопротивления  $R_{2-3}$ ,  $R_{4-5}$  и другие отражают повышение температуры в движущемся потоке воздуха. Эти сопротивления равны

$$R_{2-3} = R_{4-5} = R_{6-7} = \dots = 1/c_p \varpi,$$

где  $c_p$  – удельная теплоемкость при постоянном давлении;  $\varpi$  – поток охлаждающего воздуха в единицах массы в 1 час.

Если узлы соответствуют областям одинакового размера, то конвекционные сопротивления равны:

$$R_{3-10} = R_{5-11} = R_{7-12} = \dots = 1/c_p \varpi (e^\beta - 1),$$

где  $\beta = hS_c / \varpi c_p$ .

Если плита не имеет ребер, то  $S_c = \Delta x \Delta y$ . Если область, через которую продувается воздух, имеет ребра, к площади поверхности плиты следует добавить площадь поверхности ребер.

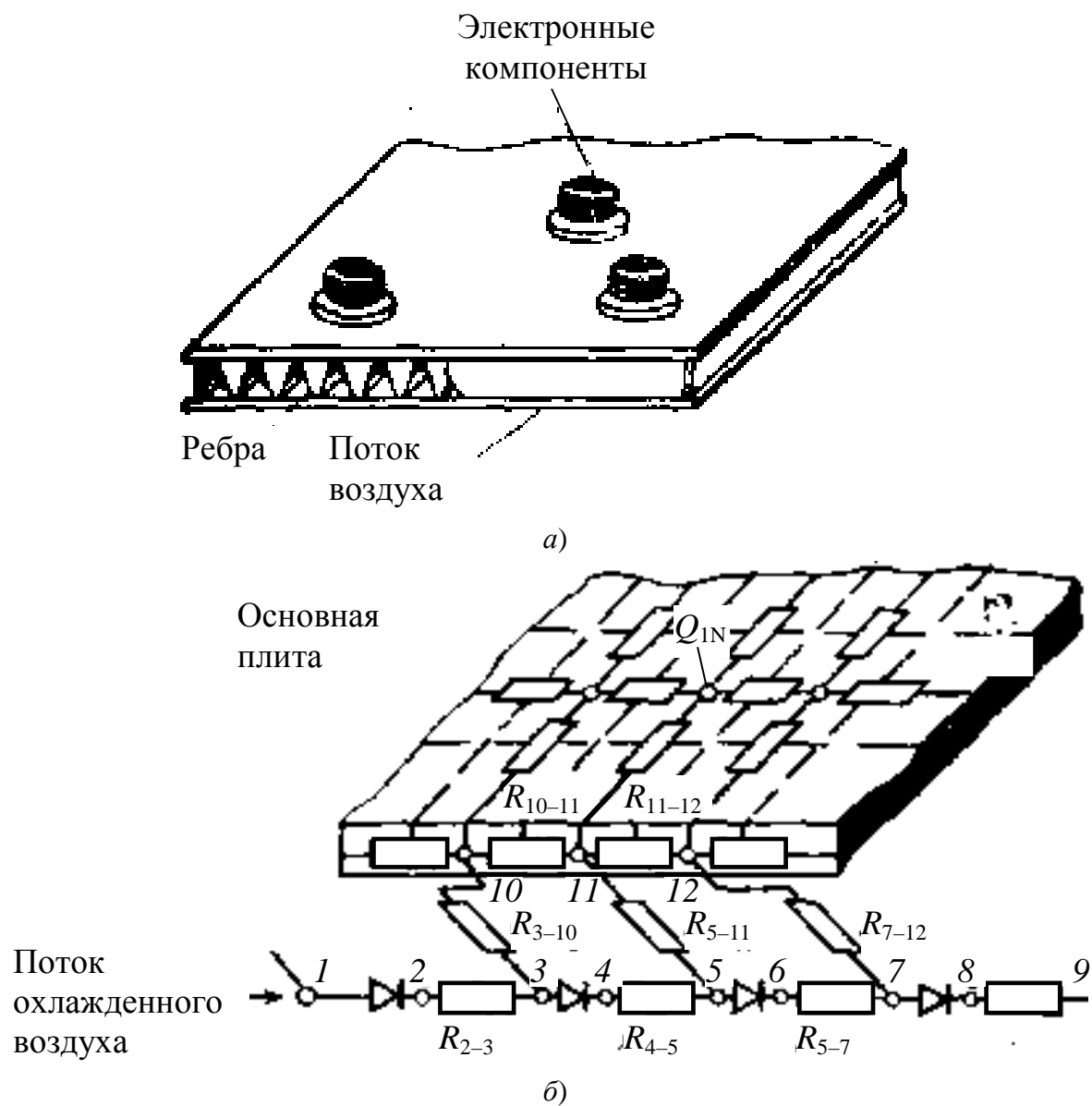


Рис. 12.10 – Моделирование потока тепла через охлаждаемую плиту: конструктивная схема (а) и эквивалентные электрические схемы замещения (б)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Требования к сокращению сроков и повышению качества проектирования РЭС привели к широкому использованию вычислительной техники в процессе проектирования.

РЭС является сложной, в общем случае неоднородной системой, для проектирования которой могут использоваться комплексы программ различного назначения и методы электрических аналогий. И то и другое требуют знания физических процессов, протекающих в функциональных узлах РЭС.

Так, адекватность компьютерной модели системы определяется адекватностью моделей отдельных компонентов и выбранным численным методом решения модели, в том числе шагами интегрирования и точностью решения. В этой связи компьютерные модели процессов и явлений иногда проявляют свойства, не присущие реальным объектам. В то же время построение эквивалентных схем моделей систем неэлектрической природы в принципе невозможно без знания математического описания физических процессов в этих системах.

В данном учебном пособии рассмотрены общие принципы построения, функционирования и проектирования ЭПУ, являющихся неотъемлемой частью РЭС. Изучение данных вопросов позволит будущим радиоспециалистам успешно осуществлять проектирование РЭС различного назначения.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АД	– асинхронный двигатель
БДПТ	– бесконтактный двигатель постоянного тока
ВАХ	– вольт-амперная характеристика
ГПТ	– генератор постоянного тока
ДПТ	– двигатель постоянного тока
ДПТ НВ	– ДПТ с независимым возбуждением
ЕМХ	– естественная механическая характеристика
ИМХ	– искусственная механическая характеристика
ИВЭП	– источник вторичного электропитания
КПД	– коэффициент полезного действия
МДС	– магнитодвижущая сила
МХ	– механическая характеристика
ОВ	– обмотка возбуждения
ООС	– отрицательная обратная связь
ОПН	– одноконтный преобразователь напряжения
ПОС	– положительная обратная связь
РЭА	– радиоэлектронная аппаратура
РЭС	– радиоэлектронное средство
РЭС БН	– радиоэлектронное средство бытового назначения
СД	– синхронный двигатель
ФММ	– ферромагнитный материал
ФМС	– ферромагнитный сердечник
ФП	– функциональное проектирование
ХИТ	– химический источник тока
ШД	– шаговый двигатель
ШИМ	– широтно-импульсная модуляция
ЭАП	– электроакустический преобразователь
ЭДС	– электродвижущая сила
ЭМЭ	– электромагнитный элемент
ЭПУ	– электропреобразовательное устройство

## ЛИТЕРАТУРА

### Основная литература

1. Иванов-Цыганов А.И. Электропреобразовательные устройства РЭС: Учеб. для вузов. – М.: Высш. шк., 1991. – 272 с.
2. Иванов-Цыганов А.И. Электротехнические устройства радиосистем: Учеб. для вузов. – М.: Высш. шк., 1979. – 304 с.
3. Китаев В.Е., Бокуняев А.А., Колканов М.Ф. Расчет источников электропитания устройств связи: Учеб. пособие для вузов.– М.: Радио и связь, 1993.– 232 с.
4. Березин О.К., Костиков В.Г., Шахнов В.А. Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры.–М.: «Три Л», 2000.– 400 с.

### Дополнительная литература

5. Обрусник В.П. Магнитные элементы электронных устройств.: Учеб. пособие.– Томск: Томс. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 1999. – 108 с.
6. Обрусник В.П. Электрические машины.: Учеб. пособие. – Томск: Томский межвуз. центр дистанц. образ., 1999. – 165 с.
7. Коновалов Б.И. Преобразовательная техника. В 2-х ч. – Томск: ТУСУР, 1996. – Часть 2: Транзисторные преобразовательные системы. – 84 с.

### Вспомогательная литература

8. Кацман М.М. Электрические машины: Учеб. для учащихся электротехн. спец. техникумов. – М.: Высш. шк., 1990. – 463 с.
9. Бальян Р.Х., Обрусник В.П. Оптимальное проектирование силовых высокочастотных ферромагнитных устройств. – Томск: Изд-во ТГУ, 1987. – 165 с.
10. Грумбина А.Б. Электрические машины и источники питания радиоэлектронных устройств: Учеб. для техникумов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 368 с.
11. Высокочастотные транзисторные преобразователи / Э.М. Ромаш, Ю.И. Драбович, Н.Н. Юрченко, П.Н. Шевченко. – М.: Радио и связь, 1988. – 288 с.
12. Сидоров И.Н., Биннатов М.Ф., Васильев Е.А. Устройства электропитания бытовой РЭА: Справочник. – М.: Радио и связь, 1991. – 472 с.
13. Москаленко В.В. Электрический привод. – М.: Энергоиздат, 1991.– 430 с.

14. Хрущев В.В. Электрические машины систем автоматики: Учеб для вузов. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд., 1985. – 368 с.

15. Игнатович В.Г., Митюхин А.И. Регулировка и ремонт бытовой радиоэлектронной аппаратуры: Учеб. пособие. – Минск: Выш. шк., 1992. – 367 с.

16. Фомичев Ю.И., Лукин Н.В. Источники питания современных телевизоров. Серия «Зарубежная электроника», 1997. – Спб.: Изд-во ДЕАН. – 128 с.

17. Гедзберг Ю.М. Блоки питания отечественных и зарубежных телевизоров: Справочное пособие. – М.: Радио и связь, 1996. – 144 с.

18. Родин А.В., Тюнин Н.А., Воронов М.А. Ремонт мониторов. Серия «Ремонт», Вып. 12, 1997. – М.: Изд-во СОЛОН. – 287 с.

19. Авраменко Ю.Ф. Схемотехника проигрывателей компакт-дисков. Серия «Зарубежная электроника». Вып. 8, 1999. – Спб.: Изд-во ДЕАН. – 128 с.

20. Колесниченко О.В., Шишигин И.В., Обрученков В.А. Интегральные микросхемы зарубежной бытовой видеоаппаратуры. Справочное пособие. – Спб.: Лань. – 1995. – 272 с.

21. Интегральные микросхемы: Микросхемы для линейных источников питания и их применение. – М.: ДОДЭКА. 1996. – 288 с.

22. Интегральные микросхемы: Микросхемы для импульсных источников питания и их применение. – М.: ДОДЭКА. 1996. – 224 с.

23. Энциклопедия ремонта. Выпуск: 14. Микросхемы для управления электродвигателями. Выпуск 2. – М.: ДОДЭКА, 2000. – 288 с.

24. Клушин Г.М. Состояние и тенденции развития полупроводниковых источников питания кинотехники // Техника кино и телевидения. – 1992. – № 10. – С. 39–44.

25. Бирюков С.А. Устройства на микросхемах. Цифровые измерительные приборы, источники питания, любительские конструкции. – М.: Солон-Р, 1999. – 192 с.

26. Миловзоров В.П. Электромагнитные устройства автоматики. – М.: Высш. шк., 1974. – 416 с.

27. Воробьев И.М. Оборудование и эксплуатация радиостанций. Учеб. пособие для профтехучилищ. – М.: Связь, 1997. – 360 с.

28. Иванов В.К. Оборудование радиотелевизионных передающих станций: Учеб. пособие для техникумов связи. – М.: Радио и связь, 1981. – 240 с.

29. Касаткин А.С. Основы электротехники. Учеб. пособие. – М.: Высш. шк., 1975. – 304 с.

30. ГОСТ 23413–79. Средства вторичного электропитания радиоэлектронной аппаратуры. Термины и определения.

31. ГОСТ 13109–87. Электрическая энергия. Требования к качеству электрической энергии в электрических сетях общего пользования.

32. ГОСТ 5237–83. Аппаратура электросвязи. Напряжения питания и методы измерений.

33. ГОСТ 23414–79. Преобразователи энергии полупроводниковые. Термины и определения.

34. Правила устройства электроустановок / Минэнерго СССР. – М.: Энергоатомиздат, 1986.– 648 с.

35. ВСН 332–93. Инструкция по проектированию электроустановок предприятий и сооружений электросвязи, проводного вещания, радиовещания и телевидения.

36. Правила технической эксплуатации первичных сетей взаимоувязанной сети связи Российской Федерации. Кн. 6. Правила технической эксплуатации электроустановок предприятий первичных сетей.– М.: Госкомсвязи России, 1998. – 45 с.

37. Лепендин Л.Ф. Акустика: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. школа, 1978. – 448 с.

38. Урбанский Б. Электроакустика в вопросах и ответах: Пер. с польск. / Под ред. М.А. Сапожкова. – М.: Радио и связь, 1981. – 248 с.



## СОДЕРЖАНИЕ

6	ИСТОЧНИКИ ПЕРВИЧНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ .....	3
6.1	Общая характеристика и основные показатели ХИТ .....	3
6.2	Сравнительный анализ ХИТ .....	7
6.3	Выбор ХИТ для переносной БРЭА и АВТ .....	15
6.4	Способы соединения ХИТ .....	17
6.5	Классификация и принцип действия электромашинных генераторов .....	18
6.6	Электромашинные генераторы постоянного тока .....	22
6.6.1	ГПТ независимого возбуждения .....	22
6.6.2	ГПТ с параллельным возбуждением .....	25
6.6.3	ГПТ с последовательным возбуждением .....	28
6.6.4	ГПТ со смешанным возбуждением .....	29
6.7	Электромашинные генераторы переменного тока .....	29
7	ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ И ЭЛЕКТРОПРИВОДА .....	33
7.1	Классификация и принципы действия электрических двигателей .....	33
7.2	Обобщенная схема электропривода .....	35
7.3	Основные показатели и характеристики электродвигателей и электропривода .....	37
7.4	Уравнение вращательного движения и его решение .....	42
8	КОЛЛЕКТОРНЫЕ ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА .....	46
8.1	Конструктивное исполнение ДПТ .....	46
8.2	Механическая характеристика ДПТ НВ.....	46
8.3	Потери мощности и КПД электропривода с ДПТ .....	48
8.4	Сравнительный анализ способов регулирования скорости ДПТ НВ .....	50
8.5	Пуск в ход ДПТ НВ .....	52
8.6	Торможение ДПТ НВ .....	54
9	ДВИГАТЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА .....	59
9.1	Вращающееся магнитное поле электродвигателей переменного тока .....	59
9.2	Синхронные двигатели.....	61
9.3	Вентильный двигатель, или бесконтактный двигатель постоянного тока.....	65
9.4	Асинхронные двигатели.....	72

10 ЗАЩИТА ОТ ПОМЕХ И ПЕРЕГРУЗОК И ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ .....	77
10.1 Защита устройств электропитания от перегрузок .....	77
10.1.1 Принципы и методы защиты от перегрузок .....	77
10.1.2 Индивидуальная защита элементов и узлов .....	78
10.1.3 Общая активная защита устройства электропитания .....	80
10.2 Защита от помех .....	81
10.3 Элементы электробезопасности .....	82
10.3.1 Защитное заземление в сетях с изолированной нейтралью .....	83
10.3.2 Защитное заземление в сетях с заземленной нейтралью .....	85
11 ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ .....	88
11.1 Классификация и основные характеристики ЭАП .....	88
11.1.1 Классификация ЭАП .....	88
11.1.2 Эксплуатационные характеристики ЭАП-приемников .....	90
11.1.3 Особенности конструктивного исполнения микрофонов .....	92
11.1.4 Основные характеристики ЭАП-излучателей .....	93
11.2 ЭАП электромагнитного типа .....	94
11.3 ЭАП электродинамического типа .....	95
11.4 ЭАП электростатического типа .....	97
11.5 ЭАП пьезоэлектрического и магнитострикционного типа .....	102
11.6 Особенности эксплуатации ЭАП и принципы построения РЭС на базе ЭАП .....	103
11.6.1 Эксплуатация ЭАП-приемников в РЭС звукозаписи, телевидения и радиовещания .....	103
11.6.2 Эксплуатация ЭАП-излучателей в РЭС звуковоспроизведения, телевидения и радиовещания .....	104
11.6.3 Принципы построения ультразвуковых дальномерных систем .....	106
12 МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭПУ РЭС .....	109
12.1 Задачи проектирования РЭС и ЭПУ РЭС .....	109
12.2 Методы, технологии и инструментальные средства проектирования ЭПУ РЭС .....	112
12.3 Моделирование электромагнитных процессов .....	116
12.3.1 Электромагнитные аналогии .....	116
12.3.2 Правила построения эквивалентных схем ЭМЭ .....	117
12.4 Моделирование механических систем .....	118

12.4.1 Электромеханические аналогии .....	118
12.4.2 Правила построения эквивалентных схем механических систем .....	123
12.5 Моделирование ЭАП .....	124
12.5.1 Электромеханоакустические аналогии .....	124
12.5.2 Правила построения эквивалентных схем ЭАП .....	126
12.6 Моделирование тепловых процессов .....	127
12.6.1 Электрические аналогии .....	127
12.6.2 Правила построения эквивалентных схем тепловых процессов .....	128
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	132
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ .....	133
ЛИТЕРАТУРА .....	134