

Министерство образования Российской Федерации  
Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г.В.Плеханова  
(технический университет)

О.Б.ЛАКОТА

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ АППАРАТЫ

*Учебное пособие*

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
2001

УДК 62.523.8: 621.316.9 (075.80)

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ АППАРАТЫ:** Учебное пособие / *О.Б.Лакота*. Санкт-Петербургский горный ин-т. СПб, 2001. 57 с. ISBN 5-94211-040-9.

Рассмотрены низковольтные электрические аппараты. Представлены основные положения теории расчета, принципов построения и функционирования, условия эксплуатации наиболее распространенных электрических аппаратов управления режимами работы, защиты и регулирования параметров электротехнических установок.

Учебное пособие предназначено для студентов всех форм обучения специальности 180400 «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов» при проведении теоретических и практических занятий по курсу «Электрические и электронные аппараты» и для самостоятельных занятий студентов других специальностей.

Табл.1. Ил.28. Библиогр.: 6 назв.

Научный редактор проф. *А.Е.Козярук*

Рецензенты: кафедра робототехнических автоматизированных производственных систем ЛЭТИ, кафедра электротехники и прецизионных электромеханических систем Санкт-Петербургского ИТМО(ТУ).

ISBN 5-94211-040-9

© Санкт-Петербургский горный институт им. Г.В.Плеханова, 2001 г.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Студенты специальности 180400 «Электропривод и автоматика промышленны установок и технологических комплексов», получив знания по таким учебным дисциплинам, как «Технические основы электротехники», «Физические основы электроники», «Электропривод», приступают к изучению дисциплины «Электрические и электронные аппараты». В данном учебном пособии рассматриваются низковольтные электрические аппараты.

Данная дисциплина является как теоретической, так и практической базой, на основе которой возможно получение достоверных данных по основным направлениям и перспективам развития электрических и электронных аппаратов.

Рассмотрены основы теории, принципы построения и функционирования, условия эксплуатации наиболее распространенных низковольтных электрических аппаратов, предназначенных для коммутации, защиты, контроля и управления электротехническими системами и их составными частями.

На основании полученных знаний студент, будущий специалист, сможет разбираться в физических явлениях, происходящих в электрических аппаратах, в принципе работы, конструктивных особенностях; сумеет рассчитать основные параметры, используя информационные технологии при проектировании и конструировании электрических аппаратов, являющихся составной частью автоматических установок и технологических комплексов горного производства.

Ограниченность объема не позволила включить в учебное пособие материал, посвященный контактным явлениям, происходящим в электрических аппаратах, работе аппаратов распределительных устройств и аппаратов управления напряжением до 1000 В.

Данный материал подробно изложен в научно-технической литературе, в частности в работах [4,5].

## **1. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

Электрическая энергия является одним из видов энергии, необходимых в автоматизированном производстве. Электрические аппараты – это устройства, которые предназначены для управления, регулирования и защиты электрических цепей и машин, а также для контроля и регулирования различных неэлектрических процессов.

Электрические аппараты классифицируются по назначению, принципу действия, области применения и др.

*По назначению* (выполняемым функциям) выделяют коммутационные, ограничивающие, пускорегулирующие и другие аппараты.

- Коммутационные аппараты предназначены для включения и отключения электрических цепей; к ним относятся: рубильники, выключатели нагрузки, автоматические предохранители. Для этой группы распределительных устройств характерно сравнительно редкое отключение и выключение.

- Ограничивающие аппараты предназначены для ограничения перенапряжения (разрядники) и токов короткого замыкания (реакторы).

- Пускорегулирующие аппараты используют для управления (пуска, регулирования частоты вращения, напряжения, тока) электроприводами или другими потребителями энергии. К этой группе относятся контакторы, пускатели, контроллеры, резисторы и др. Характерная особенность этих аппаратов – работа в режиме частых включений и отключений.

- Контролирующие аппараты предназначены для контроля заданных электрических и неэлектрических величин. К этой группе относятся реле и датчики. Характерная особенность этих аппаратов – контроль входной электрической и неэлектрической величины.

- Регулирующие аппараты используют для автоматической стабилизации и регулирования заданного параметра электрической цепи или системы. К этой группе относятся электрические аппараты для стабилизации уровня напряжения, тока, частоты вращения и других величин.

- Измерительные аппараты предназначены для преобразования измеряемой величины до стандартного (удобного) значения и служат для изоляции (потенциального разделения) цепей первичной коммутации (главного тока) от цепей измерительных и защитных приборов. К этой группе относятся трансформаторы тока, напряжения, конденсаторные делители напряжения.

*По принципу действия* (в зависимости от используемых в них физических явлений) выделяют:

- электромагнитные – электромагнитные контакторы, реле, пускатели и др.;

- электромагнитные аппараты взаимодействия тока с магнитным полем – индукционные, электродинамические реле и др.;

- тепловые – тепловые реле, биметаллические механизмы и др.;

- электрические аппараты нелинейной электротехники – дроссели насыщения, магнитные усилители, разрядники и др.;

- комбинированные – действие этих аппаратов основано на использовании нескольких физических явлений.

*По области применения* выделяют три группы аппаратов.

- Аппараты распределительных устройств применяются в электроустановках систем электроснабжения (высокого и низкого напряжения) для коммутации электрических цепей, ограничения перенапряжений и токов короткого замыкания, измерения и других целей.

- Аппараты управления электроприводами используют в системах электропривода производственных машин и механизмов для пуска, регулирования, контроля и других функций.

- Аппараты для автоматизации производственных процессов применяются в схемах автоматизации и управления для контроля, регулирования и других функций.

*По роду тока* различают аппараты постоянного тока, переменного тока промышленной частоты, переменного тока повышенной частоты, выпрямленного тока.

*По напряжению* выделяют электрические аппараты низкого (до 1000 В) и высокого (свыше 1000 В) напряжения. В связи с увеличением рабочего напряжения подземных потребителей угольных шахт появились электрические аппараты, работающие при напряжении 1400 В.

*По способу выполнения управляющих функций* электрические аппараты подразделяются на контактные и бесконтактные. В контактных аппаратах разрывы электрической цепи происходят физически, в бесконтактных аппаратах физического разрыва цепей нет.

*По устройству* различают конструктивные электрические аппараты – имеют только механическую нагрузку (в том числе и крепежные детали) и активные аппараты, которые, наряду с механической, имеют электрические, магнитные нагрузки.

Особую группу представляют электрические аппараты, предназначенные для работы в электроустановках горных предприятий. Для указанной группы характерны наличие защитных оболочек, усиленные конструктивные и активные элементы и другие признаки.

## **2. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ АППАРАТАМ**

Требования, предъявляемые к аппаратам, зависят от области применения, условий эксплуатации, ответственности выполняемых функций и т.д.

К общим требованиям относятся следующие:

1. Надежное выполнение заданных функций – аппарат в пределах заданного ресурса должен безотказно, точно, стабильно и четко выполнять требуемые функции.

2. Достаточная электродинамическая и термическая стойкость – аппарат должен выдерживать электродинамические и тепловые перегрузки при кратковременных аварийных режимах.

3. Достаточный уровень электрической изоляции – аппарат должен без повреждений выдерживать возможные перенапряжения в условиях ухудшения состояния изоляции (загрязнение, старение).

4. Коммутационная способность – аппарат должен безотказно работать во всех нормальных, а также аварийных режимах в управляемых и защищаемых цепях. Контакты аппаратов должны быть способны отключать и включать токи всех режимов (нормальных и аварийных).

5. Простота устройства – аппарат должен иметь наименьшие массу, габариты и стоимость, быть удобным в эксплуатации, технологичным.

Согласно ГОСТ 14254-80 электрические аппараты должны иметь оболочки, защитные свойства которых обозначаются латинскими буквами IP и двумя цифрами. Первая цифра обозначает степень защиты от прикосновения персонала к опасным частям аппарата. Вторая цифра определяет защиту от попадания внутрь аппарата инородных предметов и жидкостей. Обозначения некоторых исполнений электрических аппаратов в соответствии с ГОСТ 4254-80 следующие:

IP00. *Открытое исполнение.* Защита персонала от соприкосновения с токоведущими или подвижными частями отсутствует. Инородные тела могут попадать внутрь аппарата.

IP20, ..., IP42. *Защищенное исполнение:*

- IP20. Оболочка таких аппаратов предохраняет от случайного прикосновения к токоведущим частям, подвижным частям и от проникновения внутрь аппаратов посторонних предметов. При этом исполнении оболочка должна предотвращать соприкосновение с деталями аппарата металлического щупа (диаметр 12 мм, длина 80 мм). Шарик диаметром 12 мм не должен проникать внутрь аппарата.

- IP22. В дополнение к свойствам исполнения IP20 оболочка защищает от вредного действия капель жидкости, падающей на стенку оболочки, наклоненную к вертикали под углом до 15°.

- IP23. В дополнение к свойствам IP20 оболочка защищает от дождя, падающего под углом 60°.

- IP40. Оболочка защищает аппарат от попадания мелких предметов диаметром менее 1 мм.

- IP42. Дополнительно к IP40 оболочка защищает от попадания капель жидкости в аппарат.

При установке электрических аппаратов на открытом воздухе они должны иметь исполнение не ниже IP44. Это относится и к аппаратам, которые эксплуатируются в помещениях с химически активными парами и газами, где возможно оседание пыли на части аппаратов, что ухудшает охлаждение.

- IP44. *Оболочка* в дополнение к свойствам IP40 защищает от воздействия струи воды, падающей под любым углом к ее поверхности.

- IP60. *Пылезащитное исполнение*. Оболочка предохраняет от попадания пыли внутрь аппарата.

- IP65. *Пылеводозащитное* исполнение. Оболочка полностью защищает от попадания пыли внутрь аппарата и от воздействия струи, направленной под любым углом к ее поверхности.

- IP67. *Герметичное исполнение*. Оболочка полностью предохраняет от попадания пыли внутрь аппарата и обеспечивает полную герметичность аппарата.

Основные материалы, применяемые в электрических аппаратах, следующие: 1) *проводниковые* – для токоведущих частей – медь, алюминий, сталь, латунь и др.; 2) *изоляционные* – для электрической изоляции токоведущих частей – целлюлоза, хлопок, шелк (пропитанные и непропитанные), синтетические материалы, материалы на основе слюды, асбеста, стекловолокна; эти материалы должны выдерживать температуру и соответствовать ГОСТ 8865-87 (в частности, это относится и к нагревостойкости); 3) *магнитные* – для магнитопроводов – специальные виды сталей, сплавы; 4) *контактные* – для контактов – серебро, медь, графит, металлокерамика, платино-иридиевые сплавы и др.; 5) *дугостойкие изоляционные* – для дугостойких устройств – асбест, керамика, пластмассы; 6) *сплавы с высоким удельным сопротивлением* – для резисторов – константан, нихром, хромаль, фехраль и др.; 7) *биметаллы* – для элементов, использующих различное удлинение металлов при нагревании их током; 8) *конструктивные* – используются для изготовления деталей аппаратов, воспринимающих механические усилия или придающих эти аппаратам какую-либо форму, – металлы, пластмассы и др.

Основные характеристики наиболее распространенных материалов приведены в таблице.



**Основные физические величины, характеризующие проводниковые материалы**

Проводниковые материалы	Удельное сопротивление, $10^{-6}$ Ом·см	Температурный коэффициент сопротивления, $10^{-3}$ К <sup>-1</sup>	Удельная теплоемкость, при 20 °С кДж/(кг·К)	Коэффициент линейного расширения, $10^{-6}$ К <sup>-1</sup>
Медь	1,75	3,9	0,39	16,17
Алюминий	2,8	4,9	0,85	22,9
Сталь	9,8	6,2	0,45	11,1-12,6
Латунь	2,5-6,0	2-7	0,38	18,9

### 3. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ СИЛЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТАХ

Электродинамической устойчивостью аппарата называется его способность противостоять силам, возникающим при прохождении тока короткого замыкания (к.з.). Электродинамическая устойчивость выражается амплитудным значением тока  $I_{дин}$ , при котором механические напряжения не выходят за допустимые пределы, либо кратность этого тока относительно номинального ( $I_n$ ) определяется выражением

$$K_{дин} = I_{дин} / \sqrt{2} I_n$$

Иногда динамическая стойкость оценивается действующим значением ударного тока за период после начала короткого замыкания.

#### 3.1. методы расчета электродинамических усилий

Для расчета электродинамических усилий (э.д.у.) используется два способа. Первый заключается в рассмотрении силы как результата взаимодействия проводника с током и магнитного поля.

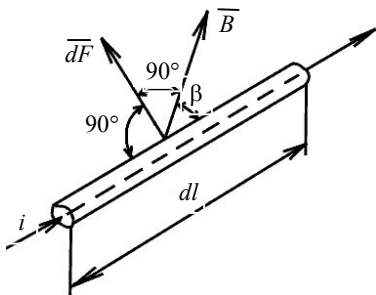


Рис. 1. Направление э.д.у., действующей на проводник с током

Если элементарный проводник  $dl$  с током  $i$  находится в магнитном поле с индукцией  $B$ , создаваемой другими проводниками (рис.1), то сила, действующая на этот элемент,

$$dF = iBdl\sin\beta,$$

где  $i$  – ток;  $\beta$  – угол между векторами элемента  $dl$  и индукции  $B$  по кратчайшему расстоянию.

За направление  $dl$  принимается направление тока в элементе. Направление индукции  $B$ , создаваемое другим проводником, определяется по правилу буравчика, а направление силы – по правилу правой руки.

Полное электродинамическое усилие, действующее на проводник  $l$ ,

$$F = \int_0^l dF = \int_0^l Bi\sin(\beta)dl,$$

при  $\beta = 90^\circ$   $F = \int_0^l Bidl$ . Этот способ применяется, когда индукцию в любой точке проводника можно найти аналитически, используя закон Био – Савара – Лапласа.

Второй способ основан на использовании энергетического баланса системы проводников с током. Электростатическая энергия системы не учитывается. При этом принимается, что независимо от перемещения или деформации токоведущих контуров под действием сил э.д.у. токи в них неизменны. Тогда получим, что усилие одного независимого контура

$$F = \partial W / \partial x,$$

где  $W$  – электромагнитная энергия системы;  $x$  – возможное перемещение в направлении силы.

Для двух взаимосвязанных контуров электромагнитная энергия системы

$$W = 0,5L_1i_1^2 + 0,5L_2i_2^2 + Mi_1i_2, \quad (1)$$

где  $L_1, L_2$  – индуктивности контуров 1 и 2;  $i_1, i_2$  – токи, протекающие в них;  $M$  – взаимная индукция.

Первые два члена уравнения определяют энергию независимых контуров, а третий – энергию, обусловленную их магнитной связью.

Уравнение (1) позволяет рассчитать как силы, действующие в изолированном контуре, так и силу взаимодействия одного контура со всеми остальными. Усилие одного независимого контура определяется из уравнения

$$F = \partial W / \partial x = 0,5i^2 \partial L / \partial x.$$

При расчете силы взаимодействия двух контуров считаем, что энергия изменяется только в результате взаимного расположения контуров. Энергия, обусловленная собственной индуктивностью, считается неизменной. В этом случае усилие взаимодействия между контурами

$$F = \partial W / \partial x = i_1i_2 \partial M / \partial x.$$

Энергетический метод удобен, когда известна аналитическая зависимость собственной индуктивности  $L$  и взаимной индукции  $M$  от геометрических размеров.

### 3.2. Расчет прочности конструкции

Расчет прочности конструкции ведется исходя из максимального значения э.д.у., хотя воздействие усилия кратковременно. В однофазных электрических установках расчет э.д.у. ведется по ударному току к.з. Для трехфазных аппаратов за расчетное значение берется амплитуда ударного тока

$$i_{уд} = k_{уд} I_{мз},$$

где  $I_{мз}$  – амплитуда апериодической составляющей трехфазного тока к.з.;  $k_{уд}$  – ударный коэффициент, зависящий от мощности ( $P$ ) установки, вида сети, обычно  $k_{уд} = 1,8$ .

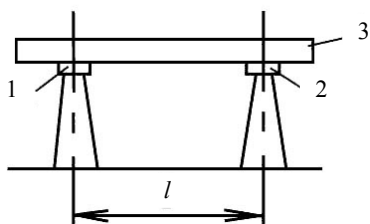


Рис.2. Крепление токоведущих шин  
1, 2 – изоляторы; 3 – шина, жестко  
закрепленная на изоляторах;  
 $l$  – расстояние между изоляторами  
(свободный пролет)

Расчет устойчивости проводят для средней фазы, дающей наибольшее значение силы э.д.у. Следует учитывать, что механическое напряжение не должно превышать: для меди марки МТ – 140 МПа, для алюминия марки АТ – 70 МПа.

При расчете электродинамической стойкости электрического аппарата необходимо учитывать также возможность возникновения резонанса между гармонически меняющимися

э.д.у. (для переменного тока) и собственными механическими колебаниями токоведущих деталей. Когда частота переменной составляющей э.д.у близка к собственной частоте механических колебаний, возможно разрушение аппарата из-за резонанса. Шины при этом совершают вынужденные колебания (в виде стоячих волн). Для проводных шин прямоугольного и круглого сечения частота их свободных колебаний определяется по приближенной формуле

$$f = (k / l^2) \sqrt{EJ / m},$$

где  $k$  – коэффициент, зависящий от характера крепления шины;  $l$  – пролет между изоляторами, м;  $E$  – модуль упругости материала шины, Па;  $J$  – момент инерции сечения шины относительно оси изгиба, м<sup>4</sup>;  $m$  – масса единицы длины шины, кг/м.

При жестком креплении токоведущих шин изоляторов  $k = 11,2$  (рис.2).

На шину действует равномерно распределенное э.д.у. Усилие, приходящееся на единицу длины шины, определяется из выражения  $f = F/l$ . Если по каким-нибудь причинам не удастся получить собственную частоту колебаний шин ниже основной частоты э.д.у., то собственную частоту выбирают выше двойной частоты э.д.у.

## **4. НАГРЕВ И ОХЛАЖДЕНИЕ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТАХ**

При работе электрического аппарата в его токоведущих частях, а также в изоляции и в деталях конструкции возникают потери электрической энергии, которая превращается в тепло. Тепловая электрическая энергия частично расходуется на повышение температуры аппарата и частично выделяется в окружающую среду. Нагрев в значительной части отражает надежность аппарата. Во всех возможных режимах работы температура частей аппарата не должна превосходить таких значений, при которых возможна его работа в длительном режиме.

Различают три вида теплообмена: теплопроводность; конвекцию; тепловое излучение.

### **4.1. Установившийся процесс нагрева**

Процесс нагрева считается установившимся, если с течением времени температура аппарата и его частей не изменяется, при этом все выделяющееся тепло отдается в окружающее пространство. Медленный нагрев всегда существует, если аппарат работает в нормальном режиме, т.е. с нагрузкой от нулевого значения до номинальной величины. Особенность медленного нагрева состоит в том, что температура аппарата достигает установившегося значения или установившегося значения превышения температуры, и в таком состоянии прибор работает длительное время (это продолжительный режим работы).

### **4.2. Нагрев аппаратов в переходных режимах**

*Переходный процесс при нагреве и охлаждении.* После включения аппарата температура его элементов не сразу достигает установившихся значений. Энергетический баланс при нагреве тела выражается следующим уравнением:

$$i^2 R dt = cm d\theta + k_r S (\theta - \theta_0) dt, \quad (2)$$

где  $i^2 R dt = P$  – мощность тепловых потерь в аппаратах (тепловая энергия, выделяемая в токоведущих частях при протекании тока  $i$  за время  $t$ ), получаем это выражение из закона Джоуля – Ленца

$$Q = \int_0^t i^2 R dt \text{ при } i, R = \text{const};$$

$cm d\theta$  – часть энергии (тепла), идущая на нагрев токоведущих частей;  $k_r S (\theta - \theta_0) dt$  – часть энергии, отдаваемая телом в окружающую среду с учетом всех трех видов теплообмена;  $k_r$  – коэффициент теплоотдачи с поверхности токоведущих частей, Вт/м<sup>2</sup>;  $S$  – поверхность токоведущих частей (охлаждаемая поверхность), м<sup>2</sup>;  $m$  – масса тела, кг;  $c$  – удельная теплоемкость единицы массы токоведущей части, Вт·с/(кг·°C);  $\theta$  – температура, которую достигает тело при медленном нагреве, °C;  $\theta_0$  – температура окружающей (охлаждающей) среды, °C;  $(\theta - \theta_0)$  – превышение температуры, °C; при этом  $(\theta - \theta_0) = \tau$ ;  $d\theta = d\tau$  (при постоянстве температуры окружающей среды).

Решение уравнения (2) имеет вид

$$\tau = \tau_0 e^{-t/T} + \tau_y (1 - e^{-t/T}),$$

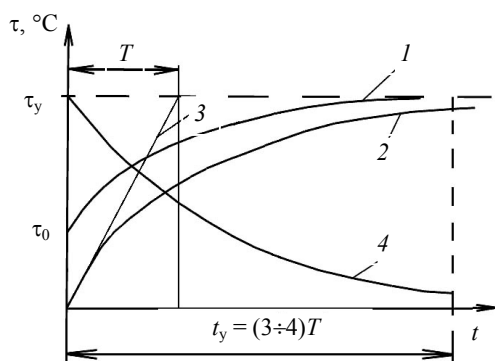


Рис.3. Переходный процесс нагрева и охлаждения однородного тела

где  $\tau_0$  – превышение температуры в начале процесса (при  $t = 0$ );  $\tau_y$  – установившееся превышение температуры,  $\tau_y = P/k_r S = i^2 R/k_r S$ ;  $T$  – постоянная времени нагрева, с,  $T = mc/k_r S$ .

Зависимость  $\tau(t)$  изображена на рис.3, кривая 1. При  $\tau_0 = 0$  зависимость  $\tau(t)$  представлена кривой 2. Чем больше  $T$ ,

тем медленнее нагревается тело. Указанная зависимость определяется уравнением

$$\tau = \tau_y (1 - e^{-t/T}),$$

В установившемся режиме все выделяемое тепло отдается в окружающую среду. Проведя касательную к кривой  $\tau(t)$ , получим при  $t = 0$

$$d\tau/dt = \tau_y T \text{ или } T = \tau_y d\tau/dt.$$

Эта касательная отсекает на прямой  $\tau = t$  отрезок, равный в выбранном масштабе постоянной времени нагрева  $T$ .

Теперь допустим, что медленный нагрев происходит без отдачи тепла в окружающее пространство. Тогда из уравнения энергетического баланса (2)

$$i^2 R dt = c m d\theta, \text{ т.е. } P dt = C d\tau,$$

откуда  $\tau = (P/c)t$ . Поскольку  $P = k_r S \tau_y$ , а  $T = c/(k_r S)$ , выполнив подстановку, получим

$$\tau = (\tau_y/T)t,$$

т.е. рост температуры описывается касательной к кривой  $\tau(t)$  в начале координат. Эта касательная – прямая 3 на рис.3.

При  $t = T$  превышение температуры  $\tau = \tau_y$ . Отсюда следует, что постоянная времени  $T$  – это время, в течение которого тело нагрелось бы до установившейся температуры при отсутствии отдачи тепла в окружающую среду.

При отключении аппарата тепло, накопленное в процессе нагрева, отдается в окружающую среду. Уравнение энергетического баланса при охлаждении тела имеет вид

$$c m d\tau = -k_r S \tau dt,$$

при решении которого относительно  $\tau$  получим

$$\tau = \tau_y e^{-t/T}.$$

Зависимость  $\tau(t)$  при охлаждении изображена кривой 4 на рис.3.

Выводы:

- установившееся значение превышения температуры не зависит от начального нагрева и пропорционально мощности потерь токоведущих частей;

- $T$  – это мера тепловой энергии тела, и чем она больше, тем больше время достижения установившегося перегрева,  $t_{уст} = (3 \div 4)T$ ;

- $k_T$  на практике определяется чрезвычайно трудно, поэтому задается таблично, зависит от температуры и других физических параметров.

**Нагрев и охлаждение аппаратов при кратковременном режиме работы.** Кратковременным называется режим работы аппаратов, при котором температура аппарата во включенном состоянии не достигает установившегося значения ( $\tau_y$ ), а после отключения его температура падает до температуры окружающей среды. В этом случае мы можем нагружать аппараты так, чтобы изменение превышения его температуры соответствовало кривой 1 на рис.4, при этом  $\tau \leq \tau_{доп}$ .

Длительность  $t_{кр}$  прохождения тока  $I_{кр}$  выбирается так, чтобы температура токоведущих частей не превышала допустимого значения;  $\tau_{кр}$  – установившееся превышение температуры в случае, когда ток  $I_{кр}$  проходит бесконечно долго. Тогда по истечении времени  $t_{кр}$  превышение температуры будет равно допустимому  $\tau_{доп}$ . Получим следующее выражение:

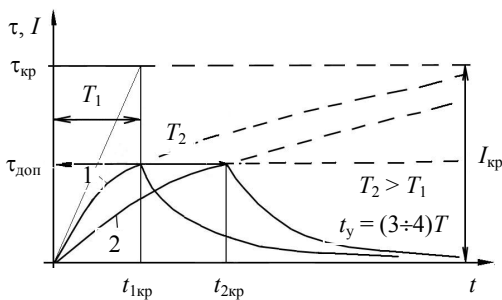


Рис.4. Типичные кривые нагрева и охлаждения при кратковременном режиме

$$t_{кр} = T \ln \frac{1}{1 - \tau_{доп} / \tau_{кр}} \quad (3)$$

Из уравнения (3) следует, что чем больше  $T$ , тем дольше может протекать ток через аппарат:  $T_2 > T_1$ ,  $t_{2кр} > t_{1кр}$ .

Коэффициент перегрузки для характеристики кратковременного режима



$$K_I = I_{кр} / I_{дл} = 1 / \sqrt{1 - e^{-t_{кр}/T}}$$

показывает, во сколько раз может возрасти нагрузка по току при кратковременном режиме по сравнению с длительным режимом;  $I_{кр}$  – ток кратковременного режима.

Выводы:

- при конструировании электрических аппаратов с учетом кратковременного режима необходимо стремиться к увеличению постоянной времени нагрева  $T$ , так как при этом можно получить большой ток перегрузки;
- при времени, большем  $4T$ , режим можно считать длительным, поскольку допустимое превышение температуры равно 98 % от установившегося значения.

**Повторно-кратковременный режим работы.** Это режим, при котором за время включения аппарата температура не достигает своего установившегося значения, а за время паузы – достигает своего первоначального значения (рис.5). При данном режиме нагрев и охлаждение строго чередуются.

Время цикла  $t_{ц} < 4T$ . В итоге реализуется квазиустановившийся режим – режим, при котором за время работы  $t_p$  аппарат нагревается до значения  $\tau_{max}$ , а за время паузы  $t_{п}$  охлаждается до  $\tau_{min}$ . При этом время цикла  $t_{ц} = t_p + t_{п}$ ,  $\tau_{2max} > \tau_{1max}$ ,  $\tau_{2min} > \tau_{1min}$ . В течение времени  $t_p$  через аппарат протекает неизменный ток  $I_p$ . Установившееся превышение температуры при этом токе равно  $\tau_{y1}$ . В течение времени  $t_{п}$  через аппарат проходит неизменный ток  $I_{п}$ . Этому току соответствует установившееся значение температуры  $\tau_{y2}$ . Поскольку  $I_p > I_{п}$ , в течение времени  $t_{п}$  аппарат охлаждается. Через некоторое время максимальные  $\tau_{max}$  и минимальные  $\tau_{min}$  превышения температуры соседних циклов стано-

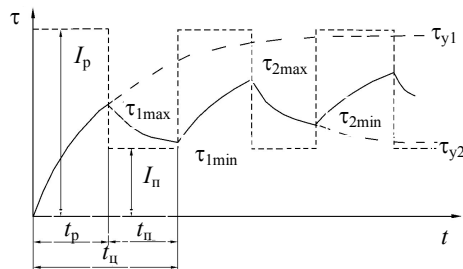


Рис.5. Кривые нагрева и охлаждения при повторно-кратковременном режиме

вятся одинаковыми. Наступает квазистационарный режим. В конце интервала превышение температуры  $t_p$  достигнет  $\tau_{\max}$ .

Повторно-кратковременный режим характеризуется продолжительностью включения ПВ или ПВ%:

$$\text{ПВ}\% = \text{ПВ} \cdot 100 = [t_p / (t_p + t_n)] \cdot 100 = (t_p / t_n) \cdot 100. \quad (4)$$

С учетом (4) коэффициент перегрузки по току

$$K_I = \frac{I_p}{I_{\text{дл}}} = \sqrt{\frac{1 - e^{-t_p \cdot 100 / (\text{ПВ}\%)}}{1 - e^{-t_p / T}}}. \quad (5)$$

Коэффициент перегрузки по мощности

$$K_p = \frac{1 - e^{-t_n / T}}{1 - e^{-t_p / T}}.$$

Из формулы (5) видно, что при возрастании отношения  $t_p / T$  тепловая нагрузка аппарата увеличивается, а коэффициент перегрузки по току уменьшается.

### 4.3. Нагрев аппаратов при коротком замыкании

В электрических аппаратах токи к.з. могут в 10-20 раз превышать токи длительного режима. Для уменьшения температуры проводников длительность прохождения тока к.з. ограничивается защитными средствами до 4-5 с, поэтому допустимая температура проводников при к.з. в 2-4 раза больше, чем при длительном режиме. Так, для медных проводников с изоляцией класса А эта температура равна 250 °С. Поскольку длительность к.з. существенно меньше постоянной времени нагрева токоведущей цепи, составляющей минуты, можно считать, что процесс нагрева адиабатический и что все тепло расходуется на повышение температуры проводника. В этом случае энергетический баланс проводника с сопротивлением  $R$  и с массой  $m$  выражается уравнением

$$i^2 R dt = cm d\theta.$$

Можно считать, что вся энергия идет на нагрев проводника, тогда

$$Pdt = cmdt.$$

В реальных условиях при высоких температурах имеет место изменение сопротивления

проводника  $R$  и его удельной теплоемкости  $c$ . Для упрощения расчетов эти значения принимают для нагретого проводника. Нагрев при к.з. происходит, практически, по прямой линии (рис.6).

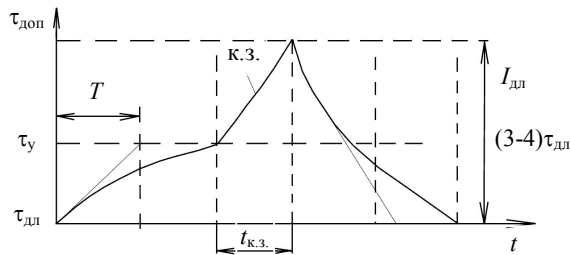


Рис.6. Кривые нагрева при коротком замыкании

## 5. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ МЕХАНИЗМЫ

### 5.1. Основные сведения и классификация

Составной частью многих электрических аппаратов являются электромагнитные системы, выполненные обычно в виде электромагнитных механизмов или устройств.

*Электромагнитный механизм* – это электромагнитная система, подвижная часть которой совершает полезную работу при перемещении. Причем это перемещение происходит вследствие изменения или перераспределения магнитного потока (электромагниты, электромагнитные муфты и др.).

*Электромагнитным устройством* называют электромагнитную систему, в обмотках которой при изменении и распределении магнитного потока изменяется величина тока и напряжения (силовые измерительные трансформаторы, дроссели, магнитные усилители и др.).

Следовательно, электромагнитные механизмы предназначены для преобразования магнитной энергии в механическую.

Электромагнитные механизмы классифицируются следующим образом:

- по способу действия – удерживающие, притягивающие;
- по тепловому режиму работы – механизмы длительного, кратковременного и повторно-кратковременного режима;
- по току – постоянного и переменного тока;
- по конструкции магнитопровода – с замкнутым магнитопроводом, с разомкнутым магнитопроводом;
- по способу включения катушки – с параллельной катушкой, с последовательной катушкой.

К электромагнитным механизмам предъявляются следующие требования. Катушка электромагнита должна: обеспечивать включение электромагнитного механизма в худших условиях (нагретом состоянии и при пониженном напряжении); не перегреваться во всех режимах; быть минимальной по размеру и технологичной; механически прочной; иметь соответствующий класс изоляции согласно условиям эксплуатации.

При расчете электромагнита должны быть определены: сопротивление, число витков и диаметр провода.

## **5.2. Основные части и конструкции электромагнитных механизмов**

Основными элементами электромагнитной системы являются одна или несколько обмоток и магнитная цепь.

В трансформаторах (рис.7, а) одна обмотка служит для создания магнитного потока, который пересекает другую обмотку и индуцирует в ней э.д.с. В магнитных усилителях (рис.7, б) изменение тока в обмотке 1 приводит к изменению сопротивления обмотки 2 и, как следствие, величины тока в обмотке 2. В электромагнитных устройствах магнитная цепь 3 обычно не имеет воздушного зазора и выполняется либо в виде тороида (рис.7, а), либо имеет специальную форму в результате набора из отдельных пластин (рис.7, б).

В электромагнитных механизмах (рис.8) магнитная цепь имеет подвижную часть (якорь 1). При перемещении якорь совершает полезную работу и притягивается к сердечнику 2. Ядро 3 – не-

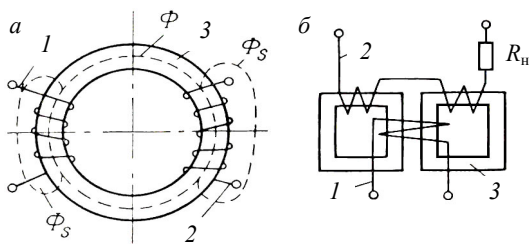


Рис.7. Конструкция элементов электромагнитных устройств: *a* – магнитная цепь в виде тороида; *б* – магнитная цепь в виде набора отдельных пластин

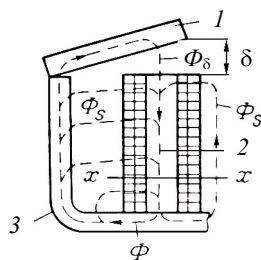


Рис.8. Магнитная цепь электромагнитного механизма

подвижная часть магнитной цепи, соединяющая сердечник и якорь или несколько сердечников;  $\delta$  – расстояние между якорем и сердечником, называется *рабочим* воздушным зазором.

Создаваемый обмоткой *полный* магнитный поток состоит из: потока  $\Phi$  – *рабочий* магнитный поток, который проходит вдоль всей магнитной цепи лишь частично и замыкается по воздуху через расположенные поблизости детали конструкции; потока  $\Phi_s$  – поток *рассеяния*, который с увеличением воздушного зазора и повышением насыщения магнитной цепи увеличивается; потока  $\Phi_\delta$  – *главный рабочий* поток, который проходит через рабочий воздушный зазор  $\delta$  (именно этот поток обуславливает возникновение механических сил, вызывающих перемещение якоря).

По конструкции катушка может быть каркасная или бескаркасная, наматываться на съемный шаблон.

Сердечник и ярмо электромагнита, образующие магнитопровод, выполняются из магнитомягких материалов с узкой петлей гистерезиса и высокой магнитной проницаемостью ( $\mu$ ).

### 5.3. Сила тяги электромагнитов

Одна из основных задач проектирования электромагнитов – определение электромагнитной (тяговой) силы, которую электромагнит должен развить при определенном воздушном зазоре между якорем и сердечником магнитопровода.

При подключении катушки электромагнита к источнику напряжения в ней возникает переходной процесс, описываемый уравнением

$$U = iR + \frac{d\Psi}{dt}, \quad (6)$$

где  $i$  – ток в катушке;  $R$  – омическое сопротивление катушки;  $\Psi$  – потокосцепление.

Умножив каждый член уравнения (6) на  $idt$ , получим выражение энергетического баланса электромагнита за время  $dt$

$$Uidt = i^2 Rdt + id\Psi.$$

Левая часть уравнения представляет собой энергию, получаемую из сети за время  $dt$ ; первый член правой части – потерю энергии в омическом сопротивлении катушки; второй член правой части – приращение энергии магнитного поля в электромагните (т.е. энергию, затрачиваемую на создание магнитного поля).

В общем случае зависимость  $\Psi = f(i)$  имеет нелинейный характер, причем при больших зазорах эта зависимость сравнительно пологая, а при малых зазорах – более крутая (рис.9).

Энергия, запасенная в поле электромагнита в момент трогания якоря (рис.9, а),

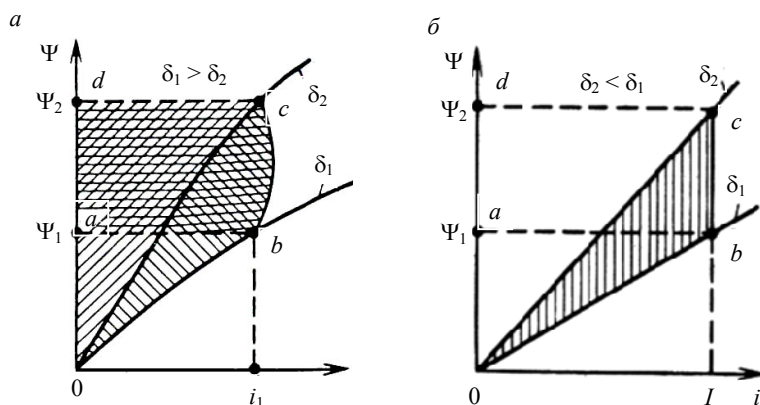


Рис.9. Зависимость потокосцеплений от тока в обмотке электромагнита: а – магнитная система насыщена; б – магнитная система не насыщена

$$W_1 = \int_0^{\Psi_1} i d\Psi = \text{площадь } OabO.$$

Энергия, запасенная в поле электромагнита, к концу движения якоря

$$W_2 = \int_0^{\Psi_2} i d\Psi = \text{площадь } OdcO.$$

Энергия, сообщенная электромагниту за время движения якоря (т.е. при уменьшении воздушного зазора от  $\delta_1$  до  $\delta_2$ ),

$$W_3 = \int_{\Psi_1}^{\Psi_2} i d\Psi = \text{площадь } abcd.$$

Следовательно, при уменьшении воздушного зазора от  $\delta_1$  до  $\delta_2$  магнитная энергия изменяется на величину

$$\Delta W = W_1 + W_3 - W_2 = \text{площадь } OcbO.$$

Это изменение магнитной энергии равно *механической работе*, совершаемой движущимся якорем электромагнита:

$$A_{\text{мех}} = F\Delta\delta = \Delta W,$$

где  $F$  – среднее значение тяговой силы на участке  $\Delta\delta = \delta_1 - \delta_2$ .

Из последнего выражения следует, что

$$F = \frac{\Delta W}{\Delta\delta} = \lim_{\Delta\delta \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta W}{\Delta\delta} \right) = \frac{dW}{d\delta}.$$

Таким образом, для определения *тяговой силы* электромагнита, исходя из энергетического баланса электромагнита, необходимо располагать зависимостями  $\Psi = f(i)$ , построенными для различных положений якоря, и определить изменение магнитной энергии.

При отсутствии насыщения магнитной системы зависимость  $\Psi = f(i)$  практически прямолинейна (рис.9, б). При медленном перемещении якоря, когда ток  $I$  в катушке, достигнув установившегося значения, остается величиной постоянной, тяговая сила может быть определена по аналитической формуле. Из рис.9, б следует

$$\Delta W = 0,5I\Psi_1 + I(\Psi_2 - \Psi_1) - 0,5I\Psi_2 + 0,5I\Delta\Psi.$$

Тяговая сила в джоулях на сантиметр

$$F = 0,5(I d\Psi / d\delta),$$

в килограммах

$$F = 5,1I d\Psi / d\delta.$$

При равномерном распределении магнитного потока в воздушном зазоре для определения силы тяги при полностью притяннутом якоре (или в предварительных расчетах) используется формула Максвелла. Сила тяги в килограммах электромагнита *постоянного тока* может быть определена из формулы Максвелла

$$F = 4,06 \cdot 10^8 B_\delta^2 S,$$

где  $B_\delta$  – индукция в воздушном зазоре, Вб/см<sup>2</sup>;  $S$  – поверхность полюса, взаимодействующая с магнитным потоком, см<sup>2</sup>.

Сила тяги электромагнитов *переменного тока* определяется их тех же методических предпосылок, но с учетом того, что магнитный поток периодически изменяется по величине и напряжению:  $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$ . Тогда сила тяги

$$F = 4,06 \cdot 10^8 \Phi^2 / S = (4,06 \cdot 10^8 \Phi_m^2 / S) \sin^2 \omega t.$$

Известно, что  $\sin^2 \omega t = 0,5(1 - \cos 2\omega t)$ , тогда

$$F = (2,03 \cdot 10^8 \Phi_m^2 / S)(1 - \cos 2\omega t) = F' - F' \cos \omega t = F' - F''.$$

Следовательно, сила тяги электромагнита переменного тока содержит две составляющие: постоянную  $F'$  и переменную  $F''$ . Переменная составляющая изменяется во времени по закону  $\cos 2\omega t$  и имеет амплитуду, равную постоянной составляющей (рис.10).

Сила  $F$  имеет пульсирующий характер и дважды за период проходит через ноль. Среднее значение силы тяги за период равно ее постоянной составляющей:

$$F_{cp} = F' = 2,03 \cdot 10^8 \Phi_m^2 / S.$$



Сравнивая выражения для силы тяги при постоянном и переменном токе, можно видеть, что среднее значение силы тяги при переменном токе равно силе тяги при постоянном токе.

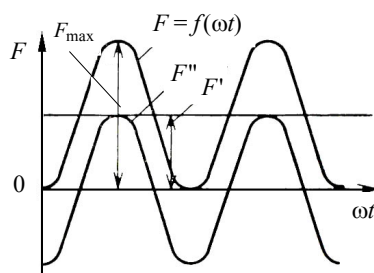


Рис.10. К определению силы тяги электромагнита переменного тока

Силу тяги электромагнита переменного тока можно определить на основе анализа его энергетического баланса. Последовательность рассмотрения аналогична, что и для магнитов постоянного тока, однако при допущении, что магнитная система не насыщена и зависимости  $\Psi = f(i)$  — линейны (см. рис.9, б).

При параллельном включении катушки электромагнита уменьшение воздушного зазора сопровождается уменьшением м.д.с. (см. рис.9, б; прямая *bc*) при условии постоянства потокосцепления. В этом случае изменение магнитной энергии определяется площадью треугольника *Obc*:

$$\Delta W = 0,5\Psi i_1 - 0,5\Psi i_2 = 0,5\Psi \Delta i.$$

Общее выражение для силы тяги

$$F = - \lim_{\Delta\delta \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta W}{\Delta\delta} \right)_{\Psi = \text{const}} = -0,5\Psi \frac{di}{d\delta}.$$

Учтем, что

$$\Psi = Li = w^2 G_{\Sigma} i; \quad i = \Phi / \sqrt{2} w G_{\Sigma};$$

$$\frac{di}{d\delta} = - \frac{\Phi}{\sqrt{2} w G_{\Sigma}^2} \frac{dG_{\Sigma}}{d\delta},$$

где  $G_{\Sigma}$  — суммарная магнитная проницаемость всех воздушных зазоров;  $w$  — число витков катушки.

Тогда сила тяги в джоулях на сантиметр и килограммах соответственно

$$F = 0,5 \frac{\Phi^2}{2G_{\Sigma}^2} \frac{dG_{\Sigma}}{d\delta} \quad \text{и} \quad F = 5,1 \frac{\Phi^2}{2G_{\Sigma}} \frac{dG_{\Sigma}}{d\delta} .$$

Если выразить магнитный поток через напряжение сети:  $\Phi = 2U / w\omega$ , то для силы тяги запишем

$$F = 5,1 \frac{U^2}{w^2 G_{\Sigma}^2 \omega^2} \frac{dG_{\Sigma}}{d\delta}$$

#### 5.4. Сравнение статических характеристик электромагнитов переменного и постоянного тока

Статические характеристики электромагнитов снимают, когда в обмотках электромагнитов протекает неизменный ток при неподвижном и движущемся якоре. *Статическая тяговая характеристика* – зависимость силы тяги электромагнита  $F$  от величины зазора  $\delta$  для электромагнитов постоянного и переменного тока (рис.11). Кривая 2 (рис.11, а) изображает зависимость  $F = f(\delta)$ , снятую экспериментально. Сравнение кривых 1 и 2 показывает, что при больших зазорах, когда поток в системе мал (падением магнитного потенциала можно пренебречь), эти кривые почти совпадают. Для электромагнитов переменного тока (рис.11, б) при увеличении зазора  $\delta$  растет магнитное сопротивление рабочего зазора и ток в обмотке, уменьшается индуктивность катушки, а поток ( $\Phi_{\delta}$ ) в рабочем зазоре остается постоянным. Однако влияние активного сопротивления  $R$

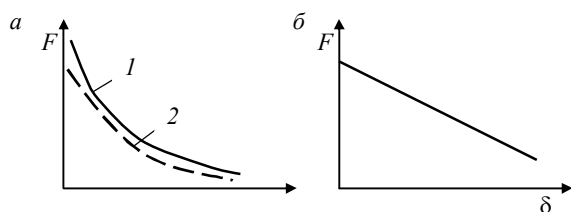


Рис.11. Статические тяговые характеристики электромагнитов:  
а – постоянного тока; б – переменного тока

катушки ограничивает рост тока и, следовательно, тяговое усилие  $F$  из-за этого уменьшается.

Выше были приведены тяговые характеристики, соответствующие простому клапанному

электромагниту. Для более сложных электромагнитов типичные тяговые характеристики представлены на **рис.12**, где кривая 1 имеет гиперболический вид, характерный для электромагнитов, у которых поток рассеяния не создает силы; кривая 2 – седлообразный вид, свойственный электромагнитам, у которых возникает дополнительная сила, создаваемая потоком рассеяния; кривая 3 – Л-образный вид, наблюдается у электромагнитов, состоящих из катушки и якоря, втягиваемого внутрь катушки (электромагниты соленоидного типа), а также у электромагнитов, якорь которых перемещается перпендикулярно к направлению магнитного потока; кривая 4 – пологий вид, свойственный электромагнитам с незамкнутой и замкнутой магнитными цепями, у которых якорь втягивается внутрь катушки

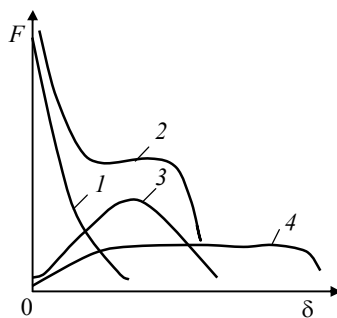


Рис. 12. Типичные тяговые характеристики

Подключение обмоток электромагнитов постоянного и переменного тока к источнику питания преимущественно параллельное, в отдельных случаях (токовые реле) – последовательное.

При сравнении статических характеристик электромагнитов постоянного и переменного тока следует сделать следующие выводы:

1. Поскольку среднее значение силы тяги при переменном токе  $F_{\text{ср}} = 0,5F_{\text{max}}$  (см. рис.10), для электромагнитов переменного и постоянного тока  $F_{\text{ср.пер}} = 0,5F_{\text{ср.пост}}$ , поэтому электромагнит постоянного тока развивает в 2 раза большее усилие, чем электромагнит переменного тока.

2. Электромагнит переменного тока имеет вибрацию якоря.

3. В электромагнитах постоянного тока сила тяги резко падает при увеличении зазора, поэтому эти электромагниты делаются с малым зазором.

4. В электромагнитах переменного тока при увеличении зазора растет магнитное сопротивление  $R_{\mu}$  зазора и ток в обмотке. При этом в рабочем зазоре поток  $\Phi_{\delta}$  падает только за счет активного сопротивления в обмотке, т.е.

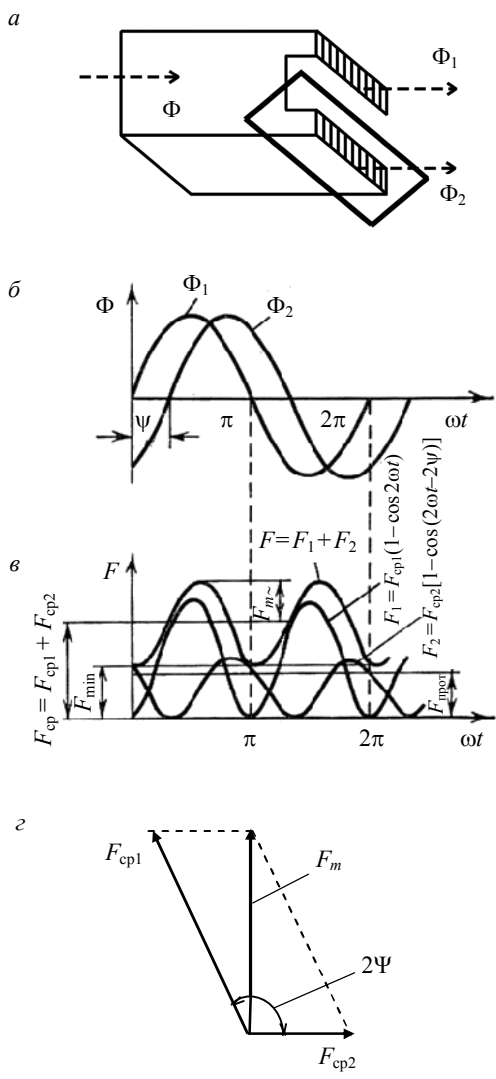


Рис. 13. Принцип работы электромагнита переменного тока с короткозамкнутым витком

$$\Phi_{\delta} = Iw / R_{\mu},$$

где  $Iw$  – м.д.с. обмотки.

Таким образом, электромагнит переменного тока как бы имеет автоматическую форсировку. При большем зазоре создается большая м.д.с. обмотки, которая обеспечивает необходимый поток в рабочем зазоре, поэтому у электромагнитов переменного тока возможен большой ход якоря.

Особенностью работы электромагнитов переменного тока является вибрация якоря. Для борьбы с вибрацией якоря в однофазных электромагнитах применяются короткозамкнутые витки (рис. 13, а), полностью или частично охватывающие полюсы магнитопровода. Основное назначение экранов – изменение фазы магнитного потока.

Экран создает свой магнитный поток  $\Phi_2$ , который отстает по фазе на угол  $\psi$  от основного потока  $\Phi_1$  и создает свою намагничивающую силу

$F_2$ . Каждый из потоков создает под своей частью полюса свою силу тяги  $F_1$  и  $F_2$  (рис.13, б).

В верхней части полюса развивается сила тяги

$$F_1 = F_{m1} \sin^2 \omega t = F_{m1} \cdot 0,5(1 - \cos 2\omega t) = F_{cp1} - F_{cp1} \cos 2\omega t ,$$

в нижней части

$$F_2 = F_{m2} \sin^2(\omega t - \psi) = F_{cp2} - F_{cp2}(\cos 2\omega t - 2\psi) .$$

Результирующая сила тяги, действующая на якорь, равна сумме сил  $F_1$  и  $F_2$  (рис.13, в). Согласно рис.13, *з амплитуда переменной составляющей* может быть найдена из векторной диаграммы, тогда

$$F_{m.пер} = \sqrt{F_{cp1}^2 + F_{cp2}^2 + 2F_{cp1}F_{cp2} \cos 2\psi} . \quad (7)$$

Обычно электромагнит проектируется так, чтобы его минимальная сила тяги  $F_{min}$  была больше противодействующей силы:

$$F_{min} = F_{cp} - F_{m.пер} > F_{прот} .$$

Чем меньше  $F_{m.пер}$ , тем меньше пульсация силы тяги. Из (7) следует, что для уменьшения пульсации тяговой силы необходимо уменьшение амплитуды  $F_{m.пер}$ , что возможно при следующих условиях:  $F_{m.пер} = 0$  при  $F_{cp1} = F_{cp2}$  и  $\psi = 90^\circ$ . Эти условия выполнить невозможно, поэтому для ненасыщенных потоков  $\Phi_2 = \Phi_1$  при  $\psi = 60^\circ \div 65^\circ$ , а сила  $F_{cp1} \neq F_{cp2}$ . Поскольку короткозамкнутый виток уменьшает поток под нижней частью полюса, с целью выравнивания потоков  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  этот виток охватывает большую часть полюса (обычно 2/3).

Для уменьшения вибрации якоря в трехфазном электромагните используется естественный сдвиг потоков в этой системе (т.е. при трехфазном источнике питания). Магнитные потоки всех трех фаз электромагнитов симметричны. Примем, что насыщение отсутствует, тогда сила тяги, развиваемая под каждым полюсом,

$$F_A = F_m \sin^2 \omega t; \quad F_B = F_m \sin^2(\omega t - 2\pi/3);$$

$$F_C = F_m \sin^2(\omega t - 4\pi/3) .$$

Результирующая сила, действующая на якорь, равна сумме этих сил:

$$F = F_A + F_B + F_C = 3F_m / 2 .$$

Таким образом, результирующая сила в трехфазном электромагните во времени не меняется. Однако вибрация якоря полностью не устраняется. При прохождении магнитного потока в каждой фазе через ноль сила, развиваемая этой фазой, также равна нулю. В результате точка приложения электромагнитной силы перемещается. Поскольку точка приложения противодействующей силы неизменна, возникает перекачивание якоря, т.е. вибрация.

## 5.5. Динамика и время срабатывания электромагнитов

До сих пор мы рассматривали только статические характеристики электромагнитов, т.е. предполагалось, что в их обмотках проходит *неизменный* ток независимо от того, неподвижен якорь либо движется. В таком режиме работают тормозные и удерживающие электромагниты. В большинстве электромагнитов, имеющих обмотку напряжения, процесс срабатывания имеет динамический характер, при этом существенное значение имеет время.

С точки зрения времени срабатывания различают три вида электромагнитов:

- быстродействующие ( $t_{cp}$  изменяется от единицы до десятков миллисекунд);
- обыкновенные ( $t_{cp}$  составляют десятки-сотни миллисекунд);
- замедленного действия.

Время срабатывания  $t_{cp}$  электромагнита – это время с момента подачи напряжения на обмотку до момента остановки якоря:

$$t_{cp} = t_{тр} + t_{дв},$$

где  $t_{тр}$  – время трогания, время с начала подачи напряжения до начала движения якоря;  $t_{дв}$  – время движения, т.е. время перемещения якоря из положения при зазоре  $\delta_n$  до положения при зазоре  $\delta_k$ .

При движении якоря изменяется индуктивность системы, поэтому динамические характеристики электромагнита отличаются от статических. Работа электромагнита имеет *циклический* характер, так как якорь обычно совершает поступательное и вращательное движение с последующим возвратом в исходное положение.

Рабочий цикл электромагнита можно разбить на отдельные этапы (рис.14).

1. Первым этапом является процесс срабатывания электромагнита, когда якорь переходит от начального положения  $S_n$  в конечное  $S_k$  (рис.14, а). Этот этап подразделяется на периоды *трогания* якоря  $t_{тр}$  и его движения  $t'_{дв}$ . В период трогания ток в обмотке электромагнита (рис.14, б) возрастает до значения  $i_{тр}$  (кривая 1), при котором обеспечивается равенство электромагнитной силы силам, противодействующим движению, т.е.  $F = F_{прот.}$ . Уравнение, описывающее этот процесс, имеет вид

$$U = iR + d\Psi/dt. \quad (8)$$

Поскольку в начальном положении якоря рабочий зазор относительно большой, магнитная цепь может считаться ненасыщенной, а индуктивность обмотки – постоянной величиной, тогда при  $\Psi = Li$  и  $L = \text{const}$  получим

$$U = iR + Ldi/dt.$$

Решим это уравнение относительно  $i$ :

$$i = I_y(1 - e^{-t/T}),$$

где  $I_y = U/R$  – установившееся значение тока;  $T = L/R$  – постоянная времени цепи.

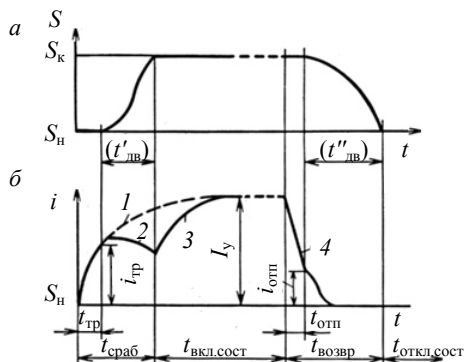


Рис.14. Рабочий цикл электромагнита:  
а – изменение положения якоря во времени;  
б – изменение тока в обмотках электромагнита во времени

Ток, при котором начинается движение якоря, называется *током трогания*  $i_{тр}$ , а время нарастания тока от нуля до  $i_{тр}$  является временем трогания  $t_{тр}$ .

Для момента трогания запишем

$$i_{тр} = I_y (1 - e^{-t_{тр}/T}). \quad (9)$$

Решив (9) относительно  $t_{тр}$ , получим

$$t_{тр} = \frac{L}{R} \ln \frac{1}{1 - i_{тр} / I_y}. \quad (10)$$

Из выражения (10) видно, что время трогания якоря  $t_{тр}$  пропорционально  $T = L/R$ . При приближении тока трогания  $i_{тр}$  к установившемуся значению тока  $I_y$  нарастание тока замедляется.

2. Второй этап – движение якоря. Сила тяги становится больше противодействующих сил, т.е.  $F > F_{прот.}$ . Начинается движение якоря (рис.14, б), зазор уменьшается, индуктивность увеличивается, поскольку  $L = w^2 G_\delta$ , где  $w$  – число витков катушки,  $G_\delta$  – магнитная проводимость воздушного зазора. Уравнение (8) примет следующий вид:

$$U = iR + L di / dt + idL / dt. \quad (11)$$

При движении якоря  $dL/dt > 0$ , поэтому  $i$  и  $di/dt$  начинают уменьшаться (поскольку сумма всех падений напряжений, т.е. правая часть уравнения (11), равна неизменному значению напряжения источника питания  $U$ ). Этому режиму соответствует кривая 2 на рис.14, б. Чем больше скорость движения якоря, тем больше спад тока. Якорь достигает своего крайнего положения, и уменьшение тока прекращается.

Работа, произведенная электромагнитом за время движения  $t'_{дв}$ , затрачивается на увеличение кинетической энергии ( $0,5mV^2$ , где  $m$  – масса подвижных частей,  $V$  – скорость перемещения якоря) его подвижной части и преодоление противодействующих сил  $F_{прот.}$

Таким образом, время срабатывания

$$t_{ср} = t_{тр} + t'_{дв}.$$



3. Третий этап – период включенного состояния  $t_{\text{вкл.сост}}$ . После окончания перемещения якоря система находится в состоянии покоя. Ток меняется по закону

$$i = I_0 e^{-t/T_1} + I_y (1 - e^{-t/T_1}),$$

где  $T_1 = L_k/R_k$  – постоянная времени при  $\delta = \delta_k$ ;  $t = t_{\text{вкл.сост}}$ .

Ток увеличивается до установившегося значения  $I_y = U/R$ , причем  $T_1 > T$ , поскольку конечный зазор меньше начального зазора, т.е.  $\delta_k < \delta_n$ . Таким образом, величина тока в переходном режиме ( $i_{\text{тр}}$ ) значительно меньше установившегося значения и сила, развиваемая электромагнитом, в динамике значительно меньше, чем в статике при  $I_y = \text{const}$ .

4. Четвертый этап – время возврата  $t_{\text{возвр}}$  якоря электромагнита в исходное положение. В исходное положение якорь возвращается двумя ступенями.

Сначала при отключении обмотки (рис.14, б) ток спадает до тока отпускания  $i_{\text{отп}}$  (кривая 4), при котором электромагнитная сила становится равной силе, стремящейся вернуть якорь в исходное положение ( $F_{\text{эм}} = F_{\text{прот}}$ ). Это соответствует промежутку времени отпускания  $t_{\text{отп}}$ , которое зависит от ряда факторов: нагрузки, условий отключения обмотки, а также от задерживающего действия вихревых токов (поле которых стремится поддержать спадающий магнитный поток) и т.д. Процесс отпускания при этом описывается уравнением

$$U = iR_d + iR + L_k di/dt,$$

где  $R_d$  – сопротивление искры (дуги), возникающей между контактами при размыкании.

Если предположить, что  $R_d = \text{const}$ , то решение уравнения примет вид

$$i = \left( \frac{U}{R} + \frac{U}{R_d + U} \right) e^{-t/T_k} + \frac{U}{R_d + R},$$

где  $T_k$  – постоянная времени, равная  $L_k/(R_d + R)$ , обычно  $R_d > R$ .

Тогда ток меняется по закону

$$i = (U / R) e^{-t/T_k}.$$

Поскольку  $R_d$  велико, время  $T_k$  очень мало. Процесс спадания тока, а следовательно, и магнитного потока происходит быстро. Если сердечник, на котором размещается обмотка, сплошной и имеет большое сечение, то спад магнитного потока замедляется, так как в сердечнике возникают вихревые токи, поле которых стремится поддержать спадающий поток.

После периода отпускания начинается движение якоря, которое происходит за счет усилия  $F_{\text{прот}}$  противодействующей пружины. Этому периоду соответствует время движения  $t''_{\text{дв}}$  (рис.14, а), в течение которого подвижная часть перемещается в исходное положение.

Таким образом, время возврата в исходное положение

$$t_{\text{возвр}} = t_{\text{отп}} + t''_{\text{дв}}.$$

5. Пятый этап – период отключенного состояния ( $t_{\text{отк.сост}}$ ). В течение этого периода обмотка охлаждается после ее отключения от источника питания.

## 5.6. Характеристики электромагнита

1. Электромеханическая характеристика, представляющая собой зависимость электромагнитной силы  $F_3$  от положения якоря  $S$  для различных постоянных значений подведенного к обмотке напряжения или тока в обмотке:  $F_3 = f(S)$  при  $U$  (или  $i$ ) = const.

2. Нагрузочная характеристика

$$F_3 = f(U) \text{ при } S = \text{const} \text{ или } F_3 = f(i) \text{ при } S = \text{const}.$$

3. Условная полезная работа

$$W_{\text{п.у}} = F_3(S_k - S_n) \text{ при } i = \text{const}.$$

4. Показатель добротности электромагнита

$$Д = \frac{\text{Вес электромагнита}}{W_{п.у}} = f(S).$$

5. Показатель экономичности

$$\Theta = \frac{\text{Потребляемая мощность}}{W_{п.у}} = f(S).$$

6. Коэффициент запаса

$$k_3 = (Iw)_{уст} / (Iw)_{ср} = I_{уст} / I_{ср}.$$

Для получения минимального времени трогания, при определенной конструкции электромагнита, ток трогания должен составлять 70 % установившегося тока, т.е.  $k_3 = 1,4$  (при  $i_{тр} = 0,7I_{уст}$ ).

7. Коэффициент возврата

$$k_{возвр} = (Iw)_{возвр} / (Iw)_{ср} = I_{отп} / I_{ср} = 0,1 \div 0,8.$$

Повышение достигается при уменьшении хода электромагнита, а также при приближении противодействующей характеристики к тяговой характеристике электромагнита.

## 6. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ РЕЛЕ

### 6.1. Общие сведения

Для выполнения автоматического управления какими-либо объектами используется релейное управление, при котором изменение управляющего параметра (входной сигнал) приводит к скачкообразному изменению управляемого параметра (выходной сигнал).

Электрический аппарат, реализующий релейный закон управления, называется реле. В реле при плавном изменении управляющего (входного) параметра до определенного заданного значения управляемый (выходной) параметр изменяется скачкообразно. При этом хотя бы один из этих параметров должен быть электрическим.

Основными функциональными органами реле являются: воспринимающий (измерительный), промежуточный и исполнительный.

Воспринимающий орган реагирует на управляющую величину  $X$  и преобразует ее в физическую величину, необходимую для работы реле.

Промежуточный орган сравнивает преобразованную физическую величину с определенным, наперед заданным значением. При достижении преобразованной величиной заданного значения промежуточный орган передает воздействие исполнительному органу. Исполнительный орган, обеспечивая скачкообразное изменение выходного управляемого параметра, воздействует на управляемую цепь.

В электромагнитных реле перемещение элементов воспринимающего органа обусловлено взаимодействием электромагнитного поля чувствительного элемента с якорем. В качестве воспринимающего органа используются электромагнитные механизмы. Они имеют сравнительно большие тяговые усилия при относительно малых габаритах, что и обуславливает их широкое применение в реле. На электромагнитном принципе осуществляется работа реле тока (максимального и минимального), реле напряжения (максимального, минимального напряжения) сигнальные, промежуточные и другие, реле времени, реле частоты и другие типы реле, применяемые в схемах защиты, управления электроприводами, автоматике.

Промежуточный орган реле – пружина, исполнительный орган – контактная система.

В зависимости от хода якоря различают следующие типы реле: клапанного типа (якорь притягивается с внешней стороны магнитопровода), соленоидного типа (якорь втягивается внутрь), поворотного типа (якорь имеет внешнее поперечное движение относительно силовых линий магнитного поля).

Магнитная энергия и усилия на якоре электромагнитного реле определяются на основе расчетных формул для электромагнитных механизмов.

Действие функциональных органов электромагнитного реле можно проследить по схеме [рис.15](#). Воспринимающий орган  $A$  преобразует входную величину (напряжение)  $U_{вх}$ , поступающую на об-

мотку 2 магнитопровода 1, в промежуточную величину, т.е. в механическую силу якоря 3. Механическая сила якоря  $F_я$  действует на контактную систему исполнительного органа B. Промежуточная величина – сила якоря  $F_я$ , – пропорциональная вход-

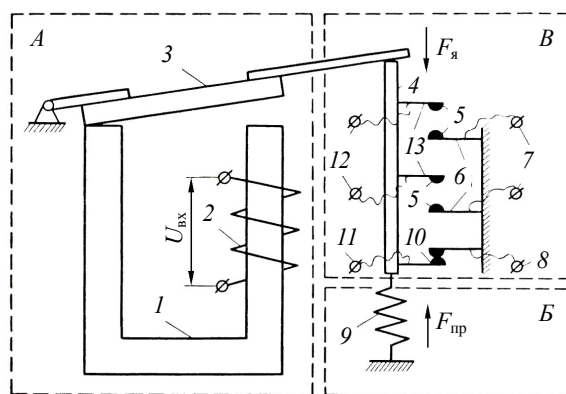


Рис. 15. Схема работы электромагнитного реле

ной величине  $U_{вх}$ , сравнивается с заданным значением силы  $F_{пр}$  развиваемой пружиной 9 промежуточного органа B.

При  $U_{вх} < U_{ср}$ ,  $F_я < F_{пр}$  держатель 4 подвижных контактов 13 не передвигается ( $U_{ср}$  – напряжение срабатывания).

При  $U_{вх} \geq U_{ср}$ ,  $F_я \geq F_{пр}$  подвижные контакты 13 исполнительного органа B приходят в движение. Обеспечивается замыкание замыкающих 4-5, 13-6 контактов и размыкание размыкающих контактов 10. При этом выходной параметр изменяется скачкообразно. Сопротивление между точками управляемых цепей: между клеммами 12-7 сопротивление скачкообразно меняется от  $\infty$  до 0; между клеммами 11-8 – от 0 до  $\infty$ .

## 6.2. Основные параметры и характеристики электромагнитных реле

В процессе функционирования реле во временном масштабе различают четыре фазы: период (время) срабатывания  $t_{ср}$ , рабочий период  $t_{раб}$ , период (время) отключения  $t_{откл}$ , период (время) покоя  $t_{п}$  (рис. 16).

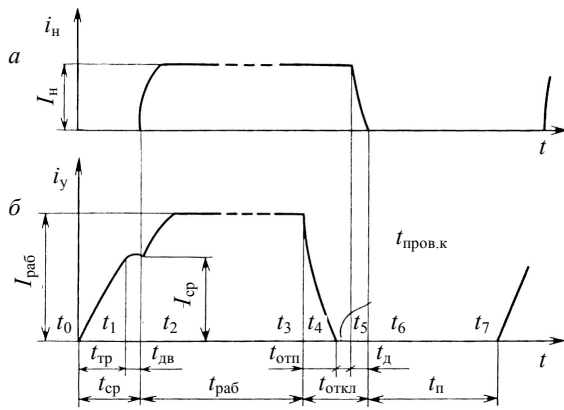


Рис. 16. Зависимость выходной (а) и выходной (б) величин от времени

Период срабатывания включает промежуток времени от момента начала воздействия входного сигнала на воспринимающий орган до момента появления сигнала в управляемой цепи. Этому периоду на рис.16, б соответствует отрезок оси абсцисс  $t_{сп} = t_2 - t_0$ . В момент  $t_0$  ток в обмотке реле возрастает до

значения, при котором электромагнитной силе  $F_э$ , действующей на якорь, начинает противодействовать сила пружины  $F_м$  (механическая сила) промежуточного органа. Входная величина при этом называется *величиной трогания при срабатывании*.

Периоду трогания соответствует отрезок  $t_{тр} = t_1 - t_0$ . В момент времени  $t_1$  якорь электромагнита реле начинает движение. В течение  $t_{дв} = t_2 - t_1$  якорь перемещается, преодолевая противодействие промежуточного органа  $B$  (см. рис.15) и приводя в действие исполнительный орган  $B$ . В конце хода якоря замыкаются контакты исполнительного органа, ток нагрузки  $i_n$  (рис.16, а) начинает возрастать от нуля до установившегося значения. Входная величина, при которой начинается управление выходной цепью, называется *величиной срабатывания* ( $I_{сп}$ ). Мощность  $P_{сп}$ , соответствующая  $I_{сп}$ , называется мощностью срабатывания.

Время срабатывания

$$t_{сп} = t_{тр} + t_{дв}.$$

Время срабатывания электромагнитных реле колеблется от 1-2 до 20 мс. Электромагнитные реле времени обеспечивают выдержку до 10 с.

Для оценки времени срабатывания реле допустимо использовать выражение

$$t_{\text{ср}} = t_1 k_3^{-b} m^{-a},$$

где  $t_1$  – время срабатывания при заданном коэффициенте запаса  $k_3$  и коэффициенте  $m = 1$ ;  $a, b$  – коэффициенты, которые определяются в зависимости от типа реле и значений  $k_3$  и  $m$ .

Для быстродействующих реле при  $k_3 = 1,5 \div 2$  значение коэффициента  $a$  приближается к единице. Для обыкновенных реле при  $k_3 = 1,5 \div 3$  значение  $a = 0,25 \div 0,95$ , значение коэффициента  $b$  находится обычно в пределах 1,4–1,6.

*Рабочий период* включает промежуток времени

$$t_{\text{раб}} = t_3 - t_2,$$

т.е. время от момента управления выходной цепью  $t_2$  до момента прекращения воздействия на воспринимающий орган входного сигнала  $t_3$ . Ток начинает расти до установившегося значения  $I_{\text{раб}}$  (рис.16, б) – это *рабочее значение входной величины*, которое обеспечивает надежное срабатывание реле. Отношение

$$I_{\text{раб}} / I_{\text{ср}} = k_3$$

называется коэффициентом запаса по срабатыванию.

Для характеристики перегрузочной способности чувствительного элемента реле применяется значение входной величины, называемое *предельным значением рабочей величины*  $I_{\text{раб.мах}}$ . Предельное значение рабочей величины – это такое ее значение, которое чувствительный орган выдерживает в течение короткого нормируемого промежутка времени. Однако значение данной величины недопустимо при работе реле в нормальном режиме по условию электрической или механической прочности или нагрева.

Для характеристики нагрузочной способности исполнительного органа реле используется понятие *мощности управления*  $P_y$ . Мощностью управления называется мощность в управляемой цепи, которую исполнительный орган может длительно пропускать.

*Период отключения* содержит промежуток времени  $t_{\text{откл}} = t_6 - t_3$ , т.е. время от момента прекращения воздействия на воспринимающий орган  $t_3$  до момента уменьшения тока  $i_n$  в управляемой цепи до нуля (рис.16, а). В период отключения входит период отпускания  $t_{\text{отп}} = t_4 - t_3$ , в который реле отключается. Ток  $i_y$  в обмот-

ке реле спадает до нуля (рис.16, б). В этот период противодействующее усилие пружины (механическое усилие) превышает электромагнитное усилие, т.е.  $F_M > F_э$ , и происходит отпускание якоря. После выбора провала контактов (промежуток  $t_k = t_5 - t_4$ ) контакты реле размыкаются и между ними загорается дуга, которая гаснет через время  $t_d = t_6 - t_5$ . За период  $t_d$  ток в управляемой цепи уменьшается от  $I_n$  до нуля (рис.16, а).

Время отключения реле

$$t_{откл} = t_{отп} + t_k + t_d.$$

Период отключения характеризуется *коэффициентом возврата*, представляющим отношение тока отпускания  $I_{отп}$  к току срабатывания  $I_{ср}$ :

$$k_v = I_{отп} / I_{ср}.$$

Обычно для реле защиты энергосистем и реле управления, контролирующих входной параметр в узких пределах,  $k_v$  должен быть ближе к единице.

*Период покоя* – это промежуток времени

$$t_{п} = t_7 - t_6.$$

Для периода покоя характерен параметр, называемый *величиной несрабатывания*, которая представляет наибольшее значение входной величины, обеспечивающее отсутствие как срабатывания реле, так и удержания в рабочем состоянии. Время несрабатывания меньше времени трогания при срабатывании и времени отпускания.

Отношение мощности управления к мощности срабатывания называется *коэффициентом усиления*,

$$k_y = P_y / P_{ср}.$$

Число включений в единицу времени определяется величиной, обратно пропорциональной времени цикла:

$$f = 1/t_{ц} = 1/(t_{ср} + t_{раб} + t_{откл} + t_{п}).$$



### 6.3. Тяговая и механическая характеристики электромагнитного реле

В процессе функционирования в реле происходит взаимодействие электромагнитных  $F_э$  и механических  $F_м$  усилий. Электромагнитные усилия создаются в электромагните воспринимающего органа  $A$  (см. рис.15); механические усилия – пружиной промежуточного органа  $B$ . В соответствии с этим одними из основных характеристик, описывающих процесс функционирования реле в силовом масштабе, являются *тяговая* (электромеханическая) и *механическая* характеристики.

Тяговая характеристика  $F_э = f(\delta)$  представляет собой зависимость тяговых усилий, создаваемых электромагнитом, от перемещения (ход или угол поворота) якоря реле. Механическая характеристика  $F_м = f(\delta)$  представляет собой зависимость механических усилий, создаваемых пружинами, и противодействующих усилий от перемещения якоря реле (рис.17).

Подвижная система перемещается от начального положения  $\delta_н$  до конечного  $\delta_к$ ,  $\delta_1$  – провал контактов;  $F_1$  и  $F_2$  – противодействующие механические усилия, создаваемые пружинами ( $F_1$  – возвратной от  $\delta_н$  до  $\delta_к$ ,  $F_2$  – контактной от  $\delta_к$  до  $\delta_1$ ). Результирующее противодействующее усилие пружин представляет механическую характеристику  $F_м$ :  $F_м = F_1 + F_2$ .

Зависимости  $F_1$  и  $F_2$  являются линейными, это обусловлено упругими деформациями пружины при относительно небольшом перемещении подвижной системы. Элек-

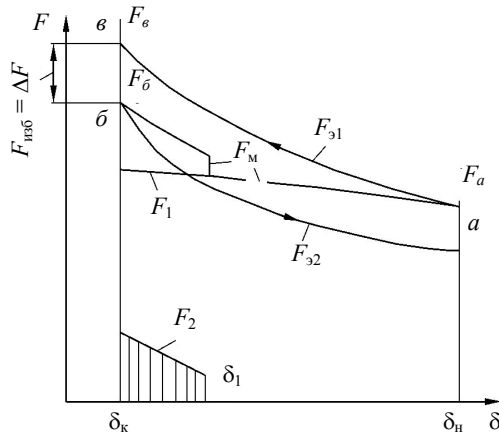


Рис.17. Характеристики электромагнитного реле:  $F_э$  – тяговая (электромагнитная);  $F_м$  – механическая (противодействующая)

тромагнитное усилие  $F_3$  зависит от тока в катушке реле. При ненасыщенной магнитной системе тяговая сила пропорциональна квадрату тока, поэтому характеристика  $F_3$  имеет форму параболы.

Для срабатывания реле необходимо, чтобы тяговая характеристика  $F_{31}$  во всех точках хода механизма была выше, чем суммарная противодействующая характеристика  $F_M$ :

$$F_{31} > F_M.$$

Движение подвижной системы при возрастании тока в обмотке начинается в точке  $a$  при данном начальном зазоре  $\delta_n$  и заканчивается в точке  $b$  при конечном зазоре  $\delta_k$ . Этот зазор создается для исключения зазора якоря. Для надежного срабатывания в обмотку реле подается рабочий ток  $I_p$ , превышающий ток трогания  $I_t$ . Коэффициент запаса при этом  $k_3 = 1,4$ . С ростом коэффициента запаса тяговая характеристика  $F_{31}$  поднимается, увеличивается тяговое усилие и ускорение якоря, сокращается полное время включения реле. При этом возрастают механические нагрузки в механизме реле, вибрация контактов. Для предотвращения залипания контактов и создается конечный зазор  $\delta_k$ . При этом зазоре тяговое усилие превышает усилие механических пружин и создается избыточное усилие  $F_{31}$ ,

$$\Delta F = F_{изб} = F_3 - F_6.$$

Для отключения реле необходимо, чтобы тяговая характеристика  $F_{32}$  во всех точках шла ниже механической характеристики  $F_M$ :

$$F_{32} < F_M.$$

Начало отключения происходит в точке  $b$ , когда усилие электромагнита  $F_{32}$  становится меньше усилий пружин. С учетом того, что реле защиты энергосистем и электропривода должны контролировать значение тока в узких пределах, коэффициент возврата  $k_6$  должен быть возможно ближе к единице. Время срабатывания электромагнитных реле колеблется от 1-2 до 20 мс. Для быстродействующих реле коэффициент запаса  $k_3 = 1,5 \div 2$ ; для обыкновенных реле  $k_3 = 1,5 \div 3$ .

## 6.4. Электромагнитные реле защиты

**Реле тока мгновенного прямого действия (РТМ).** Реле типа РТМ является реле максимального действия; по способу воздействия на управляемый объект – прямого действия; по способу включения – вторичное; по ходу якоря – соленоидного типа.

**Реле мгновенного косвенного действия типов РТ-40 и РН-50.** По роду физической величины реле разделяются на реле тока (РТ-40) и реле напряжения (РН-50); по способу воздействия на объект управления реле являются косвенными; по ходу якоря – поворотными. Реле применяются в цепях защиты электроустановок.

Коэффициент возврата максимальных реле не менее 0,8, а минимальных – не более 1,2.

Реле напряжения РН-53 и РН-54 выполняются конструктивно, как и реле РТ-40. Отличаются тем, что для предотвращения вибрации контактов катушки реле включены через однофазный мостовой выпрямитель. Протекание через обмотки тока одного направления снижает вибрацию контактов в режиме длительного включения. Реле РН-53 имеет коэффициент возврата  $k_v \geq 0,8$ ; для реле РН-54 – не выше 1,25. Кроме рассмотренных выпускаются реле напряжения постоянного тока РН-51 и реле напряжения переменного тока РН-58 с повышенным коэффициентом возврата – 0,95.

**Реле времени электромагнитные.** В электромагнитных реле времени переменного тока выдержка времени создается с помощью замедляющих механизмов (часового, механического, моторного).

В реле ЭВ-100 и ЭВ-200 выдержка времени создается часовым механизмом. При исчезновении напряжения реле мгновенно возвращается в исходное положение. Реле ЭВ-100 применяется для работы на постоянном оперативном токе 24, 48, 110 и 220 В; реле ЭВ-200 – на переменном оперативном токе 110, 127, 220 и 370 В. Обмотки реле времени переменного тока типов ЭВ-215, ЭВ-245 постоянно находятся под напряжением. Реле срабатывает при снятии напряжения; при подаче напряжения реле мгновенно возвращается в исходное положение.

Контактная система реле времени с пневматическим замедлением типа РВП связана с замедляющим устройством в виде пнев-

матического демпфера. Реле выполняется как на переменном, так и на постоянном токе. Данное реле позволяет регулировать выдержку времени от 0,4 до 180 с при точности работы  $\pm 10\%$ . Работа реле практически не зависит от значений питающего напряжения, частоты питания, температуры.

Реле защиты энергосистемы в большинстве случаев включаются в цепи входных величин через преобразующие аппараты и в основном косвенно воздействуют на управляемый объект. Входные и выходные цепи реле рассчитаны на сравнительно небольшие токи (единицы ампер).

### **6.5. Электромагнитные реле автоматики и управления электроприводами**

Реле управления электроприводами включаются непосредственно в цепи входных величин и имеют прямое и косвенное действие на объект. Входные и выходные цепи реле рассчитаны, как правило, на значительные токи.

Реле автоматики и связи включаются в цепи входных величин как непосредственно, так и через преобразователи; имеют, в основном, прямое действие на управляемый объект; их входные и выходные цепи рассчитываются на небольшие токи.

В схемах управления электроприводами применяются реле постоянного тока РЭВ-300, выполняемые и как реле напряжения, и как реле тока. Реле обладает высоким коэффициентом возврата, так как имеет достаточно большой конечный зазор и небольшой ход якоря. РЭВ предназначены для работы в схемах электропривода переменного тока. Эти реле используются для защиты от токов к.з., от перегрузок (в совокупности с реле времени). Коэффициент возврата реле напряжения 0,2-0,4, так что реле напряжения защищают, фактически, от потери напряжения. Время срабатывания реле серии РЭВ 0,06 с, а время возврата – 0,07 с.

Наряду с указанными в схемах управления и автоматики применяются электромагнитные реле времени с электромагнитным замедлением с помощью короткозамкнутого кольца, промежуточные реле и др.

## 6.6. Тепловые реле

Для защиты от перегрузок получили распространение реле с биметаллической пластиной.

В основе действия тепловых реле лежат следующие принципы: преобразование тепловых воздействий электрического тока в механические перемещения исполнительных механизмов; непосредственное преобразование тепловых воздействий электрического тока в изменение электрических параметров.

Воспринимающим органом тепловых реле является биметаллический элемент. Он состоит из двух скрепленных пластин металлов с различными коэффициентами линейного расширения:  $\alpha_2 > \alpha_1$ . При нагревании пластина прогнется в сторону металла с меньшим коэффициентом  $\alpha_1$ . Механическое усилие, развиваемое пластиной, используется для приведения в действие исполнительного органа реле — контактов. Чем больше  $\alpha_1 - \alpha_2$ , тем больше прогиб и сила. Способы нагрева биметаллических элементов показаны на [рис.18](#).

Примеры схем устройства биметаллических тепловых реле приведены на [рис.19](#). На [рис.19, а](#) изображена схема реле, в котором пластины расположены так, что при нагревании

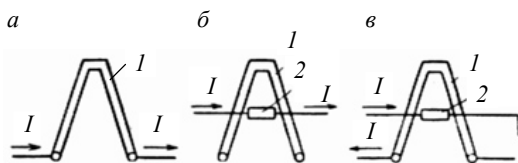


Рис.18. Схема способов нагрева биметаллических элементов тепловых реле: *а* – непосредственный нагрев, элемент 1 получает тепло от тока  $I$ , проходящего по элементу; *б* – косвенный нагрев, элемент 1 получает тепло от нагревательного элемента 2, по биметаллическому элементу ток не проходит; *в* – комбинированный способ, пластина получает тепло как от тока, протекающего по биметаллическому элементу 1, так и от нагревательного элемента 2

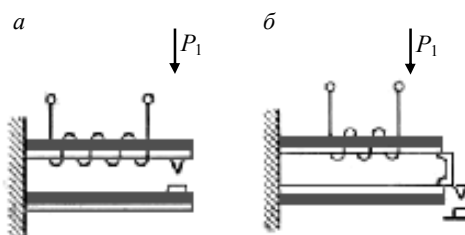


Рис.19. Схема устройства биметаллических тепловых реле

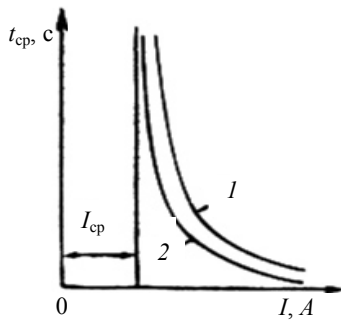


Рис.20. Время-токовые характеристики тепловых реле:  
 1 -  $I_0 / I_{ном} = 0$ ; 2 -  $I_0 / I_{ном} = 1$

они изгибаются в разные стороны, на рис.19, б пластины при нагревании изгибаются в одну сторону.

Общий недостаток тепловых реле – изменение уставки срабатывания в зависимости от температуры окружающей среды; для исключения этого недостатка рабочую температуру биметалла выбирают как можно более высокой.

Основной характеристикой тепловых реле является зависимость времени срабатывания  $t_{ср}$  от тока перегрузки  $I$ . Эта зависимость называется

*время-токовой характеристикой (рис.20).*

Время срабатывания реле при протекании по биметаллу тока перегрузки  $I_0$ , который нагревает пластину до температуры  $\theta_0$ , определяется из выражения

$$t_{ср} = T \ln(I^2 - I_0^2) / (I^2 - I_\infty^2),$$

где  $T$  – постоянная времени нагрева реле;  $I_0$  – ток до перегрузки;  $I_\infty$  – ток, при котором реле срабатывает за время  $t > T$ ;  $I$  – ток, при котором реле срабатывает за время  $t_{ср}$ .

При включении реле в холодном состоянии ( $I_0 = 0$ ) время срабатывания

$$t_{ср} = T \ln I^2 / (I^2 - I_\infty^2).$$

При коротком замыкании процесс нагрева биметаллического элемента идет без отдачи тепла и время срабатывания

$$t_{ср} = TI_\infty^2 / I^2.$$

Из-за инерционности теплового процесса тепловые реле не применяются для защиты от токов к.з. Поэтому для защиты электроустановок наряду с тепловыми реле (защищающими от перегрузок) применяют электромагнитные реле максимального тока.

Контакторы и пускатели комплектуются тепловыми реле ТРП (однофазными) и ТРН (двухфазными). Реле ТРП имеет комбинированную систему нагрева.

## **7. БЕСКОНТАКТНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ УПРАВЛЕНИЯ**

### **7.1. Общие сведения о бесконтактных электрических аппаратах**

Бесконтактные электрические аппараты воздействуют на электрическую цепь без физического разрыва, у них отсутствуют контакты подвижных частей. Основными преимуществами являются: быстрое действие, высокая скорость переключения; долговечность; срок службы определяется в основном старением компонентов, из которых они состоят.

Принцип действия бесконтактных электрических аппаратов управления основан на использовании элементов с нелинейной вольт-амперной характеристикой: ферромагнитные сердечники с обмотками (нелинейные индуктивности); нелинейные активные сопротивления, которыми обладают полупроводниковые приборы при сравнительно невысоких частотах электрического тока.

Нелинейные элементы включаются между источником питания и нагрузкой (управляемой цепью), при этом эти элементы изменяют свое сопротивление электрическому току от минимального до максимального. Таким образом достигается управление нагрузкой. За счет изменения параметров в цепи управления изменяется сопротивление. Управляемая мощность в цепи нагрузки достигает больших значений.

Указанное свойство, т.е. возможность с помощью сравнительно небольшой мощности в цепи управления управлять большой мощностью в нагрузке, характеризует бесконтактные аппараты как усилители.

Рабочая цепь (рис.21) содержит источник питания с напряжением  $U_n$ , нагрузку  $z_n$ . Цепь управления содержит источник пита-

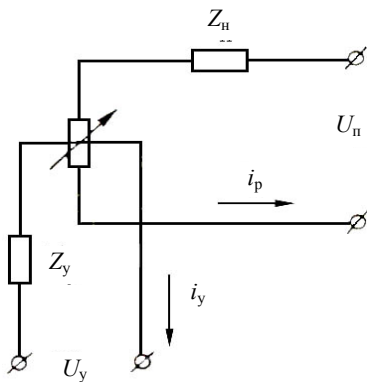


Рис.21. Структурная схема усилителя

ния управляемого сигнала с напряжением  $U_y$ , сопротивление в цепи управления –  $z_n$ . Изменяя сравнительно небольшой ток в цепи управления  $i_y$  (входной цепи), изменяют большой ток  $i_p$  выходной управляемой цепи. Получение большой мощности в выходной цепи происходит за счет энергии источника питания  $U_n$ .

Если нелинейный элемент выполнен на ферромагнитном сердечнике с обмотками, усилитель называют магнитным; если в качестве нелинейного элемента используется полупроводниковый прибор, то усилитель называют полупроводниковым.

зается полупроводниковый прибор, то усилитель называют полупроводниковым.

## 7.2. Магнитный усилитель

В магнитном усилителе (МУ) для увеличения сигнала используют индуктивное сопротивление. В качестве управляемого индуктивного сопротивления применяют дроссель со стальным сердечником.

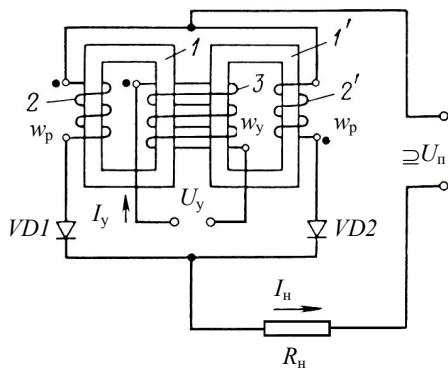


Рис.22. Схема магнитного усилителя с самоподмагничиванием

Индуктивное сопротивление изменяют подмагничиванием.

Схема магнитного усилителя с самоподмагничиванием (самонасыщением) (рис.22) имеет высокий коэффициент усиления, быстродействие. Магнитный усилитель с самоподмагничиванием состоит из следующих элементов:  $I, I'$  – два одинаковых



сердечника (из листовой электротехнической стали); 2, 2' – полуобмотки рабочей обмотки, где  $w_p$  – число витков полуобмотки, полуобмотки включаются параллельно и встречно;  $VD1, VD2$  – диоды, включены последовательно с полуобмотками;  $R_n$  – сопротивление нагрузки, включено последовательно в цепь переменного тока; 3 – обмотка управления с числом витков  $w_y$ , питается постоянным напряжением  $U_y$ .

Если управляемых сигналов несколько, то в сердечниках располагается несколько обмоток управления.

Каждая рабочая полуобмотка 2, 2' проводит ток только в течение одного полупериода питающего переменного напряжения  $U_n$  (рис.23, а). Рассмотрим протекание процесса только в сердечнике 1 (см. рис.22) в течение первого полупериода (от 0 до  $\pi$ ). К началу первого полупериода в сердечнике 1 имеется начальный магнитный поток  $\Phi_0$  (рис.23, б). Он создается магнитодвижущей силой  $F_y$  при протекании по обмотке управления 3 тока  $I_y$ . Начальный поток определяется по кривой намагничивания сердечника. Процесс намагничивания будет продолжаться до момента насыщения сердечника ( $\Phi_s$ ).

Время, в течение которого сердечник намагничивается, называется интервалом возбуждения и характеризуется углом насыщения  $\alpha$ . В этот интервал в нагрузке протекает небольшой намагничивающий ток  $I_{н,ср}$ , поскольку все напряжение питания при-

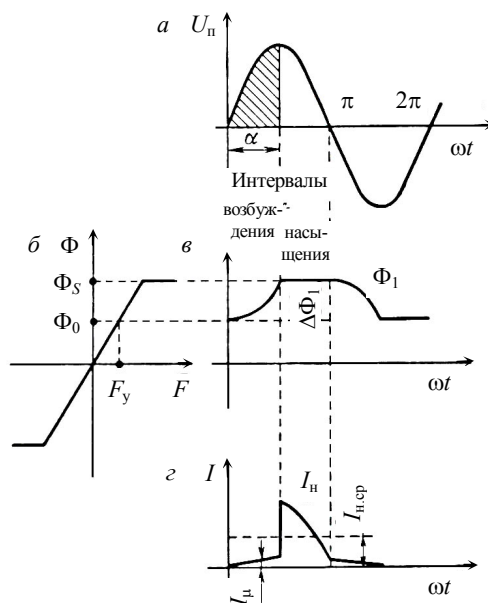


Рис.23. Кривые изменения напряжения питания, магнитного потока сердечника и тока в обмотке катушке магнитного усилителя

кладывается к дросселю из-за его большого индуктивного сопротивления (рис.23, з).

При насыщении сердечника наступает интервал насыщения, который продолжается до конца полупериода. В этом интервале поток сердечника остается неизменным; индуктивность дросселя мала и при этом практически все питающее напряжение  $U_n$  прикладывается к нагрузке  $R_n$ . Ток  $I_n$  в нагрузке резко возрастает (рис.23, з) и протекает в течение всего периода насыщения, т.е. от момента насыщения сердечника, определяемого углом  $\alpha$ , до конца полупериода, определяемого углом  $\pi$ .

В течение другого полупериода (от  $\pi$  до  $2\pi$ ) в другом сердечнике  $I'$  происходят аналогичные процессы.

Среднее значение тока в нагрузке зависит от длительности протекания тока  $I_n$  в интервале насыщения. Длительность протекания тока определяется углом насыщения  $\alpha$  (см. рис.23, з). Среднее значение тока в нагрузке

$$I_{н.ср} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{\sqrt{2}U_n \sin \omega t}{R_n} d\omega t = \frac{\sqrt{2}U_n}{\pi R_n} (1 + \cos \alpha). \quad (12)$$

Из выражения (12) видно, что ток  $I_{н.ср}$  определяется напряжением  $U_n$ , нагрузкой  $R_n$ , углом насыщения  $\alpha$  и временем насыщения. Угол  $\alpha$  зависит от степени начального намагничивания  $\Phi_0$ .

Значение изменения потока  $\Delta\Phi_1$  в течение интервала возбуждения определяется из выражения

$$\Delta\Phi_1 = \Phi_s - \Phi_0 = \frac{1}{\omega w_p} \int_0^{\alpha} U_n \sin \omega t d\omega t.$$

Чем больше начальный поток  $\Phi_0$ , тем меньше  $\Delta\Phi_1$ , тем меньше угол  $\alpha$  и больше средний ток нагрузки  $I_{н.ср}$  и наоборот. Следовательно, изменяя начальное подмагничивание, можно изменять ток нагрузки  $I_n$ .

**Основные характеристики магнитного усилителя.** Рассмотрим следующие характеристики.

1. Характеристика управления – это зависимость среднего значения тока нагрузки  $I_{н.ср}$  от магнитодвижущей силы  $F_y$  (рис.24), где м.д.с. определяется формулой

$$-F_y = w_y I_y.$$

Для уменьшения тока нагрузки  $I_{01}$  при отсутствии тока управления  $I_y$  на сердечниках усилителя предусматривают дополнительную обмотку, которая называется обмоткой смещения и питается от постороннего источника. В обмотке смещения устанавливают необходимую величину м.д.с.  $F_{см}$  смещения, которая обеспечивает требуемое значение начального тока  $I_{02}$ .

2. Коэффициент кратности тока нагрузки

$$k_i = I_{\max} / I_0,$$

где  $I_0$  – ток холостого хода, требуемый для перемангничивания сердечника.

3. Коэффициент усиления – характеризует усилительные свойства МУ; коэффициент усиления по мощности

$$k_p = P_n / P_y,$$

где  $P_n$  – мощность нагрузки;  $P_y$  – мощность управления (т.е. потери в сопротивлении обмотки управления  $r_y$  от тока управления  $I_{y.ном}$ , обеспечивающего номинальный ток нагрузки).

4. Скорость установления выходного напряжения – характеризует быстродействие МУ, которое определяет скорость установления потока  $\Phi_0$ . Поток  $\Phi_0$  изменяется по закону

$$\Phi_0 = \Phi_{0\text{уст}} (1 - e^{-t/T}),$$

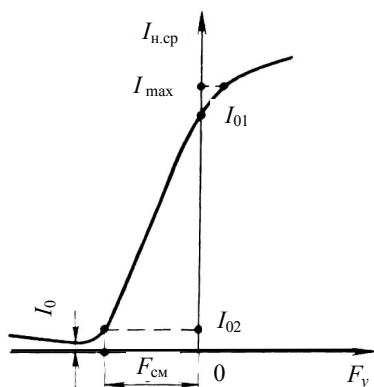


Рис.24. Характеристика управления Магнитного усилителя

$I_{01}$  – ток нагрузки при отсутствии тока управления ( $I_y = 0$ );  $I_0$  – требуемое значение начального тока;  $F_{см}$  – м.д.с. смещения;  $I_{\max}$  – максимальный ток нагрузки в конце линейной части характеристики

где  $\Phi_{0уст}$  – установившееся значение потока, которое практически достигается за  $3T$ ;  $T$  – постоянная времени.

**Реверсивный магнитный усилитель.** Магнитный усилитель работает на переменном токе. Для обеспечения в нагрузке постоянного по направлению тока в цепи на выходе усилителя включают выпрямитель. Для обеспечения реверсирования тока нагрузки применяют двухтактные магнитные усилители (рис.25).

Балластные сопротивления  $R_6$  предназначены для предотвращения короткого замыкания в контуре. Этот контур в схеме образован последовательным соединением усилителей.

В этой схеме ток нагрузки является разностью токов  $I_1$  и  $I_2$  обоих магнитных усилителей. Обмотки управления усилителей включены последовательно и встречно. Поэтому при увеличении тока управления в одном направлении ток одного усилителя увеличивается, а другого – падает (рис.25, б). Разность токов в нагрузке при этом возрастает. Увеличение тока управления в другом направлении также приводит к возрастанию тока нагрузки, но уже при другой полярности.

Недостатки двухтактных схем – необходимость наличия двух усилителей и большие потери в балластных сопротивлениях. Коэффициент полезного действия лучших двухтактных усилителей не превышает 45 %.

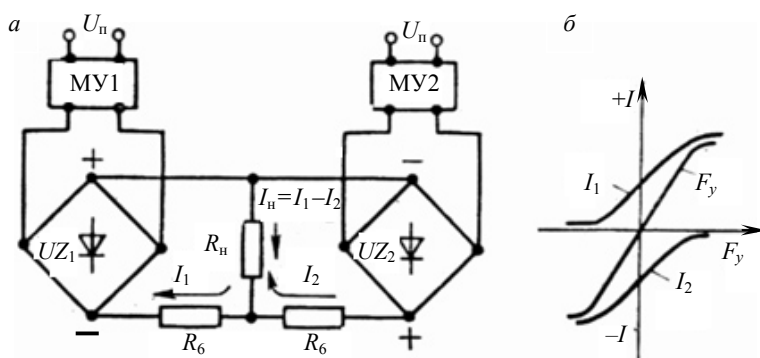


Рис.25. Двухтактный магнитный усилитель: а – схема МУ, б – характеристика управления

### 7.3. Бесконтактные магнитные реле

На базе магнитных усилителей созданы бесконтактные магнитные реле (БМР). Для создания БМР магнитный усилитель переводится в релейный режим. Для этой цели в МУ вводится обмотка обратной связи  $w_{o.c.}$ . Схема МУ с обмоткой обратной связи, в которой ток  $I_{o.c.}$  пропорционален напряжению на нагрузке  $U_H$ , приведена на рис.26. Результирующая м.д.с. управления складывается из м.д.с. обмотки управления  $I_y w_y$  и м.д.с. обмотки обратной связи  $I_{o.c.} w_{o.c.}$ .

Принцип действия БМР поясним с помощью характеристик, приведенных на рис.27.

На рис.27, а кривая  $I$  представляет собой характеристику управления магнитного усилителя без обратной связи; прямая  $II$  – зависимость напряжения на нагрузке  $U_H$  от тока обратной связи, приведенного к обмотке управления,

$$I'_{o.c.} = I_{o.c.} w_{o.c.} / w_y = U_H w_{o.c.} / (R_{o.c.} + R_{доб}) w_y = k_{o.c.} U_H,$$

где  $R_{o.c.}$  – сопротивление обмотки обратной связи;  $R_{доб}$  – добавочное сопротивление для регулировки коэффициента обратной связи  $k_{o.c.}$ .

Прямая  $II$  проведена так, что  $\text{tg}\alpha = I'_{o.c.} / U_H$ .

При  $I_y = 0$  результирующая м.д.с. создается только током обратной связи  $I_{o.c.}$ . Напряжение на нагрузке  $U_{H0}$  определяется точкой пересечения  $0$  прямой  $II$  с характеристикой  $I$ . При токе управления  $I_{y1}$  результирующая м.д.с. суммируется из м.д.с. обмоток управления и м.д.с. обмотки обратной связи:

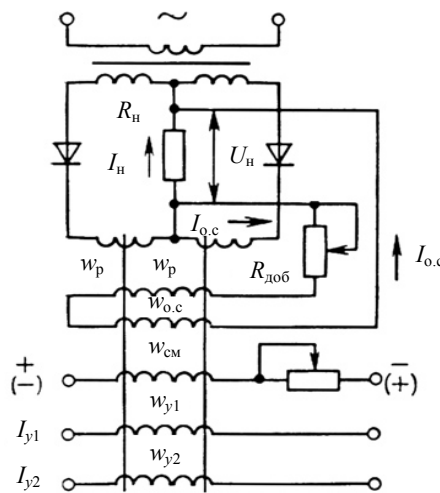


Рис.26. Схема бесконтактного магнитного реле на МУ с обратной связью по напряжению

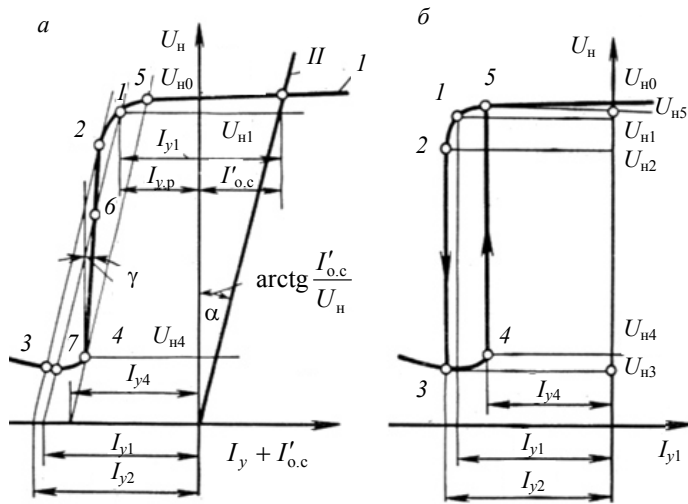


Рис.27. Релейная характеристика бесконтактного магнитного реле

$$H_y \ell = I_{y,p} w_y = -I_{y1} w_y + I_{o,c} w_{o,c} ,$$

где  $I_{y,p} = -I_{y1} + I'_{o,c}$  – результирующий ток управления.

Напряжение на нагрузке  $U_{н1}$  определяется точкой пересечения  $I$  прямой  $II$  с характеристикой  $I$ . Ток  $I_{y1}$  соответствуют также точки  $6$  и  $7$ . Однако точка  $6$  является точкой неустойчивого равновесия, из которой режим работы усилителя переходит в точку  $1$ , а в точку  $7$  режим работы усилителя переходит только по ветви  $3,7$  и  $4$ .

При токе  $I_{y2}$  состояние определяется точками  $2$  и  $3$ . При незначительном возрастании тока  $I_y$  по модулю ( $I_y < 0$ ) происходят скачкообразные переходы режима работы с точки  $2$  в точку  $3$  и напряжения на нагрузке с  $U_{н2}$  до  $U_{н3}$ . При дальнейшем увеличении по модулю тока  $I_y$  ( $I_y < 0$ ) напряжение на нагрузке изменяется незначительно (ветвь характеристики  $I$  влево от точки  $3$ ).

При уменьшении по модулю тока  $I_y$  (движение вправо по оси  $I_y + I'_{o,c}$ ) и достижении значения  $I_y = I_{y4}$  происходит скачкообразный переход режима работы из точки  $4$  в точку  $5$ . Напряжение на нагрузке при этом резко меняется с  $U_{н4}$  до  $U_{н5}$ .

Таким образом, описанный режим работы магнитного усилителя соответствует релейному режиму: при отсутствии тока  $I_y$  напряжение на нагрузке максимально  $U_{н0}$ ; при движении по характеристике  $I$  влево (т.е. при увеличении по модулю тока  $I_y$ ) и достижении током  $I_y$  значения  $I_{y2}$  происходит скачкообразное уменьшение напряжения на нагрузке с  $U_{н2}$  до  $U_{н3}$ , при дальнейшем движении по характеристике  $I$  влево напряжение на нагрузке меняется незначительно; при движении по характеристике  $I$  вправо (т.е. при уменьшении по модулю тока  $I_y$ ) и достижении током управления значения  $I_{y4}$  происходит скачкообразное возрастание напряжения на нагрузке  $U_{н4}$  до  $U_{н5}$ . Описанный режим работы магнитного усилителя изображен результирующей характеристикой (рис.27, б). Рассмотренный режим магнитного усилителя аналогичен режиму работы реле с размыкающими контактами: при  $I_{y0} = 0$  напряжение на нагрузке максимально («контакты» замкнуты), при  $I_y = I_{y2}$  напряжение  $U_n$  резко уменьшается («контакты» размыкаются). В реальных магнитных усилителях  $U_{н2}/U_{н3} \geq 100$ , а значение  $U_{н3}$  очень мало.

Для получения релейного режима магнитного усилителя необходимо, чтобы соблюдалось неравенство  $\alpha < \gamma$  (рис.27, а).

При введении в магнитный усилитель дополнительной обмотки смещения можно получать характеристики «вход-выход» бесконтактных магнитных реле, приведенные на рис.28. При отрицательном смещении  $I_{c1}w_{c2}/w_y$  бесконтактное реле имеет замыкаю-

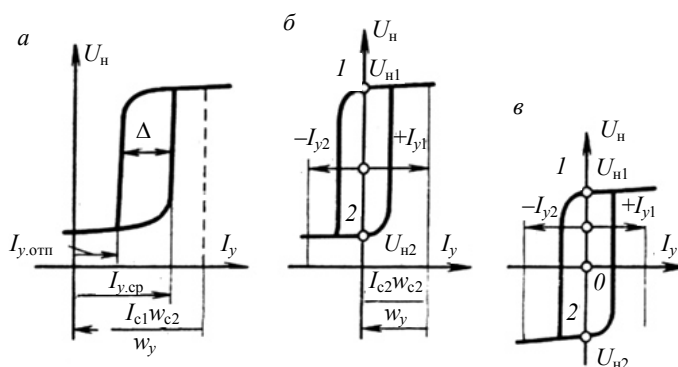


Рис.28. Характеристика «вход-выход» бесконтактных магнитных реле

щий контакт (рис.28, а); при отсутствии смещения – размыкающий контакт (см. рис.27, б).

При уменьшении отрицательного смещения  $[(I_{c2}w_{c2}/w_y) < (I_{c1}w_{c2}/w_y)]$  реле имеет характеристику с двумя устойчивыми состояниями (рис.28, б). Если вначале реле находилось в режиме, соответствующем точке  $I_1$ , и подан положительный сигнал  $+I_{y1}$ , то после снятия сигнала напряжение на нагрузке останется равным  $U_{н1}$ . При подаче отрицательного сигнала  $I_{y2}$  напряжение скачком снизится до значения  $U_{н2}$ . После снятия сигнала  $I_{y2}$  напряжение останется равным  $U_{н2}$ . Таким образом, при работе по схеме рис.28, б бесконтактное реле функционирует аналогично поляризованному реле.

На основе реверсивных магнитных усилителей получают реле с переменной знака напряжения на нагрузке (рис.28, в).

Существенное преимущество бесконтактных магнитных реле – отсутствие коммутирующих контактов, которые часто выходят из строя; недостаток – их инерционность. Работа БМР зависит от напряжения питания, частоты, температуры окружающей среды.

#### РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Акимов Е.Г.* Выбор электрических аппаратов для электропривода, электрического транспорта и электроснабжения промышленных предприятий: Учебное пособие / Е.Г.Акимов, Ю.С.Коробков, А.В.Савельев и др. М.: Изд-во МЭИ, 1990. 105 с.
2. *Коробков Ю.С.* Электромеханические аппараты автоматики / Ю.С.Коробков, В.Д.Флора. М.: Энергоатомиздат, 1991. 320 с.
3. *Таев И.С.* Основы теории электрических аппаратов. М.: Энергия, 1987. 567 с.
4. *Чунихин А.А.* Электрические аппараты. Общий курс: Учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1988. 720 с.
5. *Щуцкий В.И.* Электрические аппараты и средства автоматики горных предприятий: Учебник для вузов / В.И.Щуцкий, А.В.Ляхомский. М.: Недра, 1990. 284 с.
6. *Электрические и электронные аппараты: Учебник для вузов / Под ред. Ю.В.Розанова.* М.: Энергоатомиздат, 1998. 752 с.



## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1. Основные определения и классификация электрических аппаратов .....	4
2. Основные требования, предъявляемые к электрическим аппаратам .....	6
3. Электродинамические силы в электрических аппаратах .....	9
3.1. Методы расчета электродинамических усилий .....	9
3.2. Расчет прочности конструкции.....	11
4. Нагрев и охлаждение в электрических аппаратах.....	13
4.1. Установившийся процесс нагрева .....	13
4.2. Нагрев аппаратов в переходных режимах .....	13
4.3. Нагрев аппаратов при коротком замыкании.....	18
5. Электромагнитные механизмы.....	19
5.1. Основные сведения и классификация.....	19
5.2. Основные части и конструкции электромагнитных механизмов .....	20
5.3. Сила тяги электромагнитов .....	21
5.4. Сравнение статических характеристик электромагнитов переменного и постоянного тока.....	26
5.5. Динамика и время срабатывания электромагнитов.....	30
5.6. Характеристики электромагнита .....	34
6. Электромагнитные реле.....	35
6.1. Общие сведения.....	35
6.2. Основные параметры и характеристики электромагнитных реле.....	37
6.3. Тяговая и механическая характеристики электромагнитного реле ...	41
6.4. Электромагнитные реле защиты.....	43
6.5. Электромагнитные реле автоматики и управления электроприводами .....	44
6.6. Тепловые реле.....	45
7. Бесконтактные электрические аппараты управления.....	47
7.1. Общие сведения о бесконтактных электрических аппаратах.....	47
7.2. Магнитный усилитель.....	48
7.3. Бесконтактные магнитные реле.....	53
Рекомендательный библиографический список .....	56