

## ИННОВАЦИОННАЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ПРОГРАММА



**Проект 1:** инновационная среда университета в регионе и эффективное управление

**Цель:** развитие инноваций и инновационных образовательных программ на основе интеграции образования, науки и бизнеса для организации подготовки и переподготовки кадров по широкому спектру специальностей и направлений.

Федеральное агентство по образованию  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
Владимирский государственный университет  
Кафедра приборостроения и информационно-измерительных технологий

# КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «РАСЧЁТЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ»

Составители:  
Л.В. ИЛЬИНСКАЯ  
В.С. ГРИБАКИН

Владимир 2008

УДК 621.3.032

ББК 31.2

К65

Рецензент

Доцент Владимирского государственного университета

*А.С. Грибакин*

Печатается по решению редакционного  
совета Владимирского государственного университета

К65      Конспект лекций по дисциплине «Расчёты электромагнитных систем» / сост.: Л.В. Ильинская, В.С. Грибакин; Владим. гос. ун-т. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2008. – 24 с.

Предназначен для студентов дневной формы обучения специальности 200101 – приборостроение. Может быть полезен студентам специальности 200106 – информационно-измерительная техника и технологии при выполнении курсового и дипломного проектирования.

Ил. 8. Библиогр.: 7 назв.

УДК 621.3.032

ББК 31.2

## **Введение**

Устройства, создающие в том или ином пространстве магнитное поле, называют магнитами. Широкое распространение получили электромагниты и постоянные магниты.

Электромагнит создаёт магнитное поле с помощью обмотки, обтекаемой электрическим током. Для усиления этого поля и направления магнитного потока по нужному пути в большинстве электромагнитов имеется магнитопровод.

Электромагниты, созданные 150 лет назад, получили очень широкое распространение. Они используются в устройствах техники связи, электрических машинах, устройствах автоматики, аппаратуре регулирования и защиты электротехнических установок, медицинской аппаратуре, бытовой технике.

Масса электромагнитов колеблется от долей грамма до сотен тонн, а потребляемая электрическая мощность – от милливатт до десятков тысяч киловатт.

В электромагнитных механизмах электромагниты используют в качестве привода для поступательного перемещения рабочего органа или его поворота. Это тяговые электромагниты; электромагнитные замки; электромагнитные муфты сцепления и торможения; тормозные электромагниты; электромагниты в реле, контакторах, пускателях, автоматических выключателях; подъёмные электромагниты; электромагниты вибраторов т.д.

### **1. Классификация электромагнитов**

1. В зависимости от способа создания магнитного потока и характера действующей магнитодвижущей (намагничивающей) силы электромагниты делятся на:

- 1) электромагниты постоянного тока нейтральные;
- 2) электромагниты постоянного тока поляризованные;
- 3) электромагниты переменного тока.

В электромагнитах постоянного тока рабочий магнитный поток создаётся с помощью обмотки постоянного тока. Действие электро-

магнита зависит только от величины этого потока и не зависит от его направления, а значит, от направления тока в обмотке. Если тока нет, то магнитный поток и сила притяжения практически равны нулю.

Поляризованные электромагниты имеют два магнитных потока: поляризующий и рабочий. Первый создаётся в большинстве случаев постоянными магнитами, иногда – электромагнитами. Рабочий поток создаётся с помощью управляющей или рабочей обмотки. Действие такого магнита зависит как от величины, так и от направления рабочего потока. При отсутствии тока в рабочей обмотке сила притяжения создаётся поляризующим магнитным потоком.

В электромагнитах переменного тока магнитный поток, создаваемый обмоткой с переменным током, периодически меняется по величине и направлению, поэтому сила электромагнитного притяжения пульсирует от нуля до максимума с удвоенной частотой по отношению к частоте переменного тока.

Широкое распространение получили электромагниты с выпрямлением тока, которые по питанию можно отнести к электромагнитам переменного тока, а по характеристикам – к электромагнитам постоянного тока.

2. В зависимости от способа включения обмотки различают электромагниты с последовательными и параллельными обмотками.

Обмотки последовательного включения работают при заданном токе и выполняются с малым числом витков большого сечения. Обмотки параллельного включения работают при заданном напряжении и имеют большое число витков малого сечения.

3. По характеру работы обмотки электромагниты разделяют на работающие в длительном, прерывистом и кратковременном режимах.

4. По скорости действия электромагниты бывают с нормальной скоростью действия, быстродействующие и замедленно действующие.

При всём разнообразии электромагнитов они состоят из основных частей одинакового назначения. К ним относятся (рис.1): 3 – катушка с намагничивающей обмоткой (может быть несколько катушек и несколько обмоток); 4 – неподвижная часть магнитопровода из ферромагнитного материала (ядро и сердечник); 1 – подвижная часть магнитопровода (якорь); 5 – каркас катушки.

В отдельных случаях неподвижная часть магнитопровода может иметь несколько деталей.

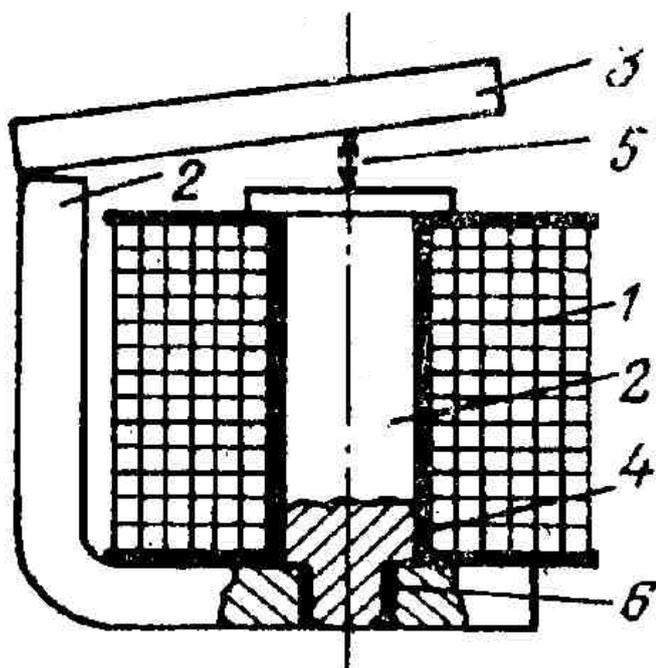


Рис. 1. Основные части электромагнита

Якорь передаёт электромагнитное усилие соответствующим деталям приводимого в действие механизма. Он отделён от остальных частей магнитопровода воздушными промежутками, количество и форма которых зависят от конструкции электромагнита. Воздушные промежутки, в которых возникает полезная сила, называют рабочими (2 на рис.1), в которых не возникает – паразитными (6 на рис.1).

Поверхности магнитопровода, ограничивающие рабочий воздушный промежуток, называют полюсами (якорь и шляпка сердечника 4 на рис. 1).

В зависимости от расположения якоря относительно остальных частей электромагнита различают:

- электромагниты с внешним втягивающимся якорем (рис. 2, а, б);
- электромагниты со втягивающимся якорем (рис. 2, в);
- электромагниты с внешним поперечно движущимся якорем (рис. 2, г).

В каждой из этих групп имеется ряд конструктивных разновидностей, связанных с характером протекающего по обмотке тока и необходимостью обеспечения заданных характеристик и параметров электромагнитов.

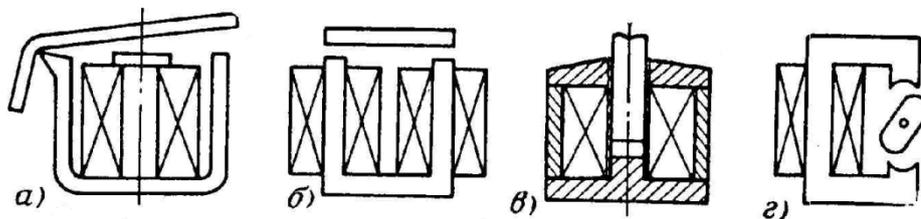


Рис. 2. Основные типы электромагнитов

## 2. Основные уравнения рабочего процесса электромагнитов

1. Уравнение электрической цепи обмотки электромагнита (с параллельной обмоткой)

$$u = iR + d\Psi/dt \quad (1)$$

или

$$i = f_1\left(u_1 \frac{d\Psi}{dt}\right) = \frac{u - \frac{d\Psi}{dt}}{R},$$

где  $i$  – мгновенное значение тока в обмотке;

$u$  – напряжение источника питания цепи обмотки;

$\Psi$  – мгновенное значение потокосцепления обмотки;

$t$  – время;

$R$  – активное сопротивление цепи обмотки.

Уравнение (1) даёт возможность провести анализ процесса преобразования электрической энергии, поступающей от источника тока, в энергию магнитного поля.

2. Уравнение характеристики намагничивания электромагнита.

$$\Psi = f_2(i, \delta) \quad (2)$$

связывает потокосцепление  $\Psi$ , ток в обмотке  $i$  и рабочий зазор  $\delta$ .

Влияние вихревых токов невелико и в обычных электромагнитах его не учитывают.

3. Уравнение силы электромагнитного притяжения.

$$F_э = f_3(W_M). \quad (3)$$

Эта сила даёт возможность определить полное значение получающейся механической энергии.

4. Уравнение движения имеет вид

$$m = \frac{d^2x}{dt^2} = F_э - F_n(x) - F_c\left(\frac{dx}{dt}\right), \quad (4)$$

где  $m$  – приведённая масса движущихся частей;

$x$  – перемещение якоря;

$F_n(x)$  – противодействующая сила, являющаяся обычно функцией положения якоря;

$F_c\left(\frac{dx}{dt}\right)$  – сила сопротивления, зависит от скорости движения.

Это уравнение характеризует механические процессы, происходящие при срабатывании (или возврате) электромагнита.

5. Уравнение нагрева и охлаждения электромагнита.

$$V = f_5(P, t_{\text{вкл.}}, \text{размеры}). \quad (5)$$

Связывает температуру нагрева  $V$  с мощностью  $P$ , выделяющейся в обмотке, размерами электромагнита и временем нахождения его во включённом состоянии  $t_{\text{вкл.}}$ .

Когда обмотка отключена от сети и мощность в ней не выделяется, происходит охлаждение, процесс которого описывается уравнением

$$V = f'_5(V_{\text{м}}, t_{\text{откл.}}, \text{размеры}) \quad (5a)$$

и зависит от температуры  $V_{\text{в}}$ , до которой был нагрет электромагнит, времени охлаждения  $t_{\text{откл.}}$  и размеров электромагнита.

### 3. Характеристики и параметры электромагнитов

Основные уравнения рабочего процесса электромагнита определяют его характеристики. Динамические характеристики являются наиболее общими, так как учитывают изменение намагничивающей силы (н.с.) электромагнита в процессе его срабатывания, трение, демпфирование и инерцию подвижных частей.

Однако эти характеристики трудно получить, и они обязательны только для некоторых типов электромагнитов (быстродействующие, электромагнитные вибраторы и т. п.). В большинстве случаев рассматривают статические характеристики, когда не учитывают влияние на электрическую цепь противоЭДС, возникающей во время движения якоря электромагнита, т.е. считают что ток в обмотке постоянен и равен току срабатывания.

Важнейшие характеристики электромагнита:

1. Тяговая характеристика (статическая) – зависимость электромагнитной силы от положения якоря или рабочего зазора  $\delta$  для постоянных значений напряжения или тока:

$$F_g = f(\delta) \text{ при } U = \text{const}$$

$$\text{или } F_g = f(\delta) \text{ при } I = \text{const.}$$

2. Характеристика противодействующих усилий (нагрузки) электромагнита – зависимость противодействующих сил от зазора  $\delta$  (рис. 3):

$$F_n = f(\delta).$$

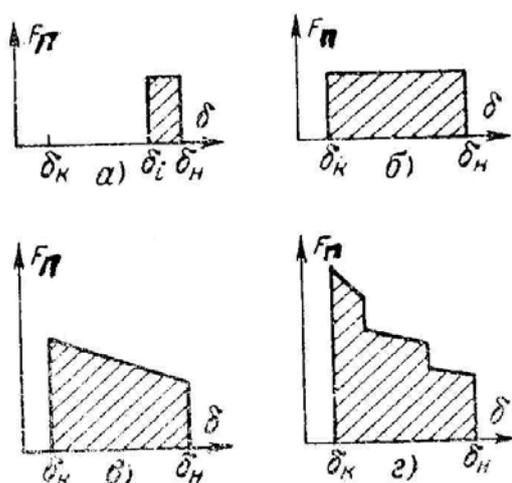


Рис. 3. Характерные виды нагрузок:

а – механизма защёлки;

б – при подъёме груза;

в – в виде пружины;

г – в виде ряда вступающих в действие пружин;

$\delta_n$  – начальный зазор;

$\delta_k$  – конечный зазор

Сопоставление противодействующей и тяговой характеристик позволяет говорить о работоспособности электромагнита. Для нормального срабатывания электромагнита необходимо, чтобы тяговая характеристика проходила выше противодействующей, а для чёткого отпускания наоборот (рис. 4).

3. Нагрузочная характеристика – зависимость электромагнитной силы от величины напряжения или тока при фиксированном положении якоря:

$$F_3 = f(u);$$

$$F_3 = f(i). \text{ Для } \delta = \text{const.}$$

4. Условная полезная работа – произведение электромагнитной силы, соответствующей начальному рабочему зазору, на величину хода якоря:

$$W_{п.у} = F_y(\delta_H - \delta_K) \text{ при } I = \text{const.}$$

Значение условной полезной работы для данного электромагнита является функцией начального положения якоря и величины тока в обмотке электромагнита.

На рис. 5 показаны статическая тяговая характеристика  $F_3 = f(\delta)$  и кривая  $W_{п.у} = f(\delta)$  электромагнита. Заштрихованная площадь пропорциональна  $W_{п.у}$  при данном значении  $\delta_H$ .

5. Механическая эффективность – относительная величина условной полезной работы  $W_{п.у}$  по сравнению с максимально возможной (соответствующей наибольшей заштрихованной площади)  $W_{п.ут}$ :

$$\eta_{\text{мех}} = \frac{W_{п.у}}{W_{п.ут}}.$$

При расчёте электромагнита желательно, чтобы он отдавал максимум полезной работы, т.е. чтобы  $\delta_H$  соответствовал  $W_{п.ут}$  (см. рис. 5).

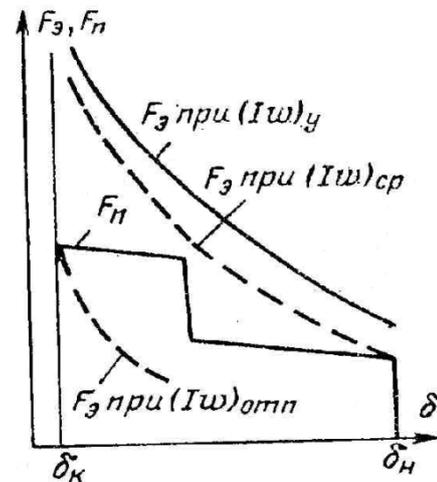


Рис. 4. К согласованию характеристик действующих и противодействующих сил

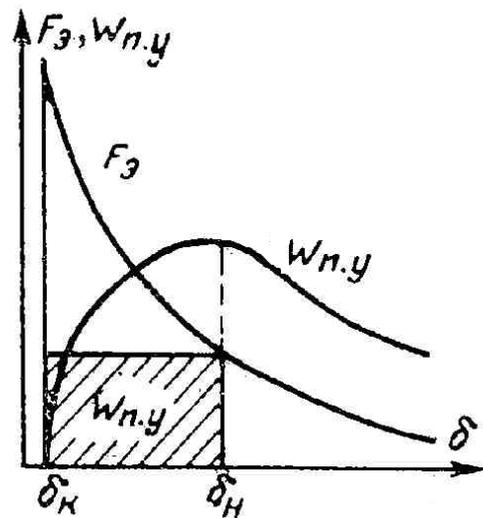


Рис. 5. Условная полезная работа электромагнита

6. Время срабатывания электромагнита – время с момента подачи сигнала на обмотку электромагнита до перехода якоря в конечное положение – является функцией начальной противодействующей силы  $F_{II}$ :

$$t_{\text{ср.}} = f(F_{II}) \text{ при } U = \text{const.}$$

7. Характеристика нагрева – зависимость температуры нагрева обмотки электромагнита от продолжительности включённого состояния

$$V_{\text{обм.}} = f(t).$$

8. Показатель добротности электромагнита – отношение потребляемой обмоткой электромагнита мощности к величине условной полезной работы:

$$D = \frac{\text{масса электромагнита}}{W_{\text{п.у}}} = f(\delta).$$

9. Показатель экономичности – отношение потребляемой мощности к величине условной полезной работы:

$$\Xi = \frac{\text{потребляемая мощность}}{W_{\text{п.у}}} = f(\delta).$$

#### 4. Основные параметры электромагнитов

1. Мощность, потребляемая электромагнитом.

Теоретически может быть снижена путём соответствующего увеличения размеров его катушки. Предельная мощность может ограничиваться величиной допустимого нагрева его обмотки и в некоторых случаях условиями питания цепи обмотки электромагнита. Рациональная конструкция электромагнита выбирается в магнитном и механическом отношениях с учётом тепловых характеристик.

2. Коэффициент запаса – отношение намагничивающей силы, соответствующей установившемуся значению тока, к намагничивающей силе срабатывания (критическая н.с):

$$\kappa_3 = \frac{(IW)_y}{(IW)_{\text{ср}}} = \frac{I_y}{I_{\text{ср}}}.$$

По условиям надёжности  $\kappa_3$  всегда выбирается больше единицы.

3. Параметр срабатывания – минимальное значение н.с тока или напряжения, при котором происходит срабатывание электромагнита (перемещение якоря от  $\delta_H$  до  $\delta_K$ ).

4. Параметр отпускания – максимальное значение н.с, при котором якорь возвращается в начальное положение.

5. Коэффициент возврата – отношение н.с., при которой происходит возврат якоря в первоначальное положение, к намагничивающей силе. срабатывания

$$k_B = \frac{(IW)_{\text{отп}}}{(IW)_{\text{ср}}} = \frac{I_B}{I_{\text{ср}}}.$$

Для нейтральных электромагнитов значения коэффициента возврата всегда меньше единицы и для различных исполнений могут составить от 0,1 до 0,9.

## 5. Магнитные цепи электромагнитов

Магнитная цепь представляет собой совокупность участков, образующих замкнутый путь для прохождения магнитного потока. Практически понятие «магнитная цепь» применяют к случаям, когда устройство имеет магнитопровод из ферромагнитного материала, усиливающий магнитный поток и направляющий его определенным образом.

Если магнитопровод замкнут, то во многих случаях магнитным потоком вне его можно пренебречь. В этом случае мы имеем простую последовательную магнитную цепь (рис. 6, а), расчет которой не представляет существенных трудностей.

Применяемые в электромагнитах магнитопроводы весьма разнообразны как по конструктивному выполнению, так и по соотношению размеров образующих их деталей.

В электромагнитах, применяющихся в электромагнитных механизмах, магнитопровод не может быть полностью замкнутым, так как на пути основного рабочего магнитного потока  $\Phi_\delta$  должен быть обязательно рабочий (воздушный) зазор, в пределах которого совершается перемещение якоря. Кроме того, как правило, неизбежны паразитные воздушные зазоры, определяемые особенностями конструкции и технологическими условиями ее выполнения.

Наличие воздушных промежутков на пути рабочего магнитного потока приводит к появлению потоков рассеяния  $\Phi_s$ , замыкающихся по воздуху между отдельными частями магнитопровода и часто соизмеримых по величине с рабочим потоком (рис. 6, б). Такими потоками пренебрегать нельзя. Правильный их учет особенно важен для электромагнитов, работающих при переменном магнитном потоке.

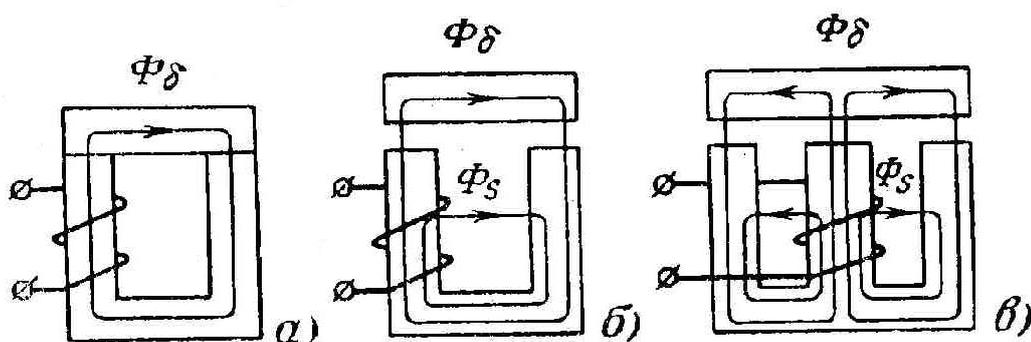


Рис. 6. Примеры магнитных цепей.

*а* — простая последовательная магнитная цепь; *б* — простая магнитная цепь с потоком рассеяния; *в* — разветвленная магнитная цепь.

В электромагнитах постоянного тока наличие потоков рассеяния приводит лишь к некоторому увеличению магнитного потока, проходящего по отдельным частям магнитопровода. Их влияние может быть компенсировано увеличением сечений соответствующих деталей.

В электромагнитах, работающих при переменном магнитном потоке, наличие потока рассеяния приводит к соответствующему уменьшению рабочего потока, так как общее потокосцепление должно оставаться практически неизменным (для обмоток параллельного включения).

Поток рассеяния распространяется по всему пространству между частями магнитопровода, пересекая обмотку по различным направлениям. Точно определить эти направления, как правило, не удастся. Поэтому при расчетах пользуются некоторой упрощенной картиной потокораспределения, выделяя наиболее характерные пути прохождения потока рассеяния. Последние образуют контуры, параллельные контуру, по которому через рабочий зазор проходит основной поток. Соответственно получаем магнитную цепь, имеющую ряд параллельных ветвей.

В электромагнитах находят также широкое распространение конструкции с разветвленными магнитопроводами (рис. 6, в). В этом случае магнитная цепь имеет еще более сложную конфигурацию, включающую как контуры потоков рассеяния, так и ряд контуров с рабочими потоками. Расчет разветвленных магнитных цепей с потоками рассеяния весьма сложен.

При расчете магнитной цепи обычно решается одна из двух задач:

1) определяется величина намагничивающей силы обмотки, которую необходимо иметь для создания заданной величины магнитного потока в определенном сечении магнитной цепи;

2) определяется значение магнитного потока в интересующем нас сечении магнитной цепи, соответствующее заданной намагничивающей силе обмотки.

Предполагается, что форма и размеры магнитопровода известны, имеются заданные в той или иной форме необходимые характеристики его материала, вычислены значения проводимостей путей магнитного потока по воздуху.

При расчете магнитных цепей, исходя из формальной аналогии с электрическими цепями, пользуются соответствующими правилами и способами расчета последних.

Исходными уравнениями для магнитных цепей постоянного тока при этом являются:

- для узла магнитной цепи  $\sum \Phi = 0$ ;

- для участка магнитной цепи  $\Phi = \frac{U_M}{R_M} = U_M G_M$ ;

- для замкнутого контура  $\sum (Iw) = \sum \Phi R_M$ .

В этих уравнениях  $\Phi$  – магнитный поток;  $U_M$  – разность магнитных потенциалов между концами участка;  $R_M$  – магнитное сопротивление и  $G_M$  – магнитная проводимость участка;  $(Iw)$  – намагничивающая сила.

Уравнение для узла магнитной цепи, аналогичное первому закону Кирхгофа, вытекает из того, что линии вектора магнитной индукции являются замкнутыми, т. е. не имеют конца и начала. Поэтому алгебраическая сумма магнитных потоков в узле магнитной цепи равняется нулю.

Уравнение для участка магнитной цепи записывается по аналогии с законом Ома для участка электрической цепи. Магнитный поток выражается как частное от деления разности магнитных потенциалов на каком-либо участке на магнитное сопротивление этого участка или как произведение разности магнитных потенциалов на соответствующую магнитную проводимость.

На основании закона полного тока алгебраическая сумма намагничивающей силы, действующих в замкнутом контуре магнитной цепи, равна алгебраической сумме падений магнитного потенциала в этом контуре. Этому правилу соответствует уравнение для замкнутого контура, аналогичное второму закону Кирхгофа.

Продолжая аналогию с электрической цепью, часто для наглядности составляют электрическую схему замещения магнитной цепи. В схеме замещения намагничивающая сила заменяется ЭДС, магнитный поток – электрическим током, а магнитные сопротивления отдельных участков магнитопровода и воздушных промежутков – соответствующими электрическими сопротивлениями.

Трудность расчета магнитной цепи определяется тем, что в общем случае необходимо учитывать магнитное сопротивление магнитопровода, выполняемого из ферромагнитного материала, с присущей последнему нелинейной зависимостью магнитного сопротивления от величины магнитного потока.

Для электромагнитов, работающих при переменном магнитном потоке, можно считать, что магнитная индукция не выходит за пределы прямолинейного участка кривой намагничивания. Однако при их расчете необходимо учитывать влияние потерь от гистерезиса и вихревых токов в магнитопроводе и потерь в экранирующих витках, из-за чего потоки в различных участках магнитной цепи могут находиться в различных фазах.

Последнее обстоятельство приводит к целесообразности при расчете магнитных цепей переменного тока использовать символический метод, основанный на изображении векторных величин комплексными числами и операциях с последними. Следует помнить, что непосредственное применение символического метода возможно, лишь когда магнитные потоки и намагничивающей силе синусоидальны (т. е. когда магнитная цепь не насыщена).

Таким образом, в схеме замещения магнитной цепи переменного тока все величины должны быть комплексными и исходные уравнения для ее расчета принимают следующий вид:

- для узла  $\sum \dot{\Phi}_m = 0$ ;

- для участка  $\dot{\Phi}_{mi} = \sqrt{2} \frac{\dot{U}_{mi}}{Z_{mi}}$ ;

- для замкнутого контура  $\sum_k (\dot{J} \cdot w)_k = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_i \dot{\Phi}_{mi} Z_{mi}$ ,

где  $\dot{\Phi}_{mi}$  – комплексная величина потока (максимальное значение) в данном участке замкнутой цепи;

$\dot{U}_{mi}$  – комплексная величина разности магнитных потенциалов (эффективное значение) между концами участка;

$Z_{mi}$  – комплексная величина полного сопротивления участка;

$(\dot{J} \cdot w)_k$  – комплексная величина намагничивающей силы (действующее значение).

В свою очередь  $Z_{mi} = R_{mi} + jX_{mi}$ ,

где  $R_{mi}$  – активная и  $X_{mi}$  – реактивная составляющие комплексного магнитного сопротивления участка магнитной цепи.

Участки магнитной цепи в виде воздушных промежутков создают только активное магнитное сопротивление, так как на этих участках потерь на перемагничивание и вихревые токи нет. Для них

$$Z_{м.в} = R_{м.в} = \frac{1}{G_{м.в}},$$

где  $G_{м.в}$  – магнитная проводимость воздушных зазоров.

Формы полюсов, образующих воздушные зазоры электромагнитов, чрезвычайно многообразны. Величина магнитного сопротивления магнитопровода, а также ряд других величин, определяющих характеристики магнитопровода и необходимых при расчете магнитной цепи, обуславливаются свойствами материала, из которого выполнен магнитопровод.

## 6. Обмотки электромагнитов

### Общие сведения

Обмотки являются составной частью всех электромагнитов (рис. 7). Проходящий по обмотке ток создает н. с, необходимую для возникновения магнитного потока. Величина требуемой н. с определяется из расчета магнитной цепи.

Задача расчета обмотки заключается в том, чтобы получить такие обмоточные данные (диаметр провода  $d$ , число витков  $w$  и сопротивление обмотки  $R$ ), которые при заданном напряжении или токе обеспечивают необходимую н. с. При этом должно быть выполнено еще одно условие – в процессе работы превышение температуры не должно быть больше допустимого.

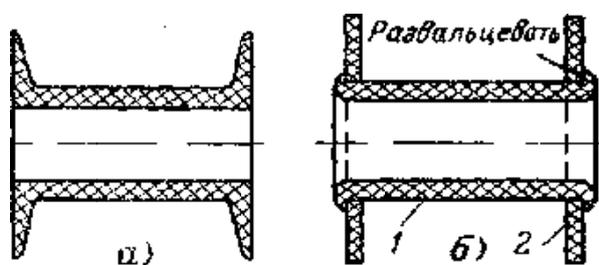


Рис. 7. Каркасы катушек:

а – пластмассовый прессованный;

б – сборный каркас; 1 – изоляционная втулка; 2 – изоляционные шайбы

При прочих неизменных условиях магнитный поток электромагнита с последовательной обмоткой определяется н. с. последней, которая равна произведению величины тока на число витков.

Обмотки параллельного включения, работающие при заданном напряжении, имеют обычно весьма большое число витков малого сечения.

В электромагнитах постоянного тока с обмоткой параллельного включения исходным параметром является сечение обмоточного провода, а число витков выбирается из условий нагрева.

В электромагнитах переменного тока, наоборот, исходным расчетным параметром является количество витков, а сечение провода определяется тепловым расчетом.

Обмотки последовательного включения, работающие при заданном токе, выполняются, как правило, с малым числом витков большого сечения. Ток, проходящий по такой обмотке, практически не зависит от ее параметров, а определяется характеристиками потребителей, включенных последовательно с обмоткой.

Для обмотки обычно применяется круглый провод за исключением обмоток последовательного включения, которые часто выполняются шинной медью квадратного или прямоугольного сечения. большей частью применяются медные провода, реже алюминиевые. Марка обмоточного провода определяется его изоляцией, а выбор последней зависит от назначения и условий применения электромагнита. В зависимости от конструктивного выполнения различают каркасные, бескаркасные, спиральные и дисковые катушки.

Катушки, наматываемые круглым обмоточным проводом, как правило, пропитываются лаками или компаундами, покрываются наружной изоляцией и лакируются.

С точки зрения расчета обмотки качество конструктивно-технологического выполнения катушки в первую очередь сказывается на так называемом коэффициенте заполнения.

Одним из факторов, определяющих пригодность обмотки для данных условий работы, является ее тепловое состояние – температура нагрева. Последняя лимитируется главным образом изоляцией обмоточного провода и другими изоляционными материалами, использованными в изделии, т. е. также зависит от выбранной конструкции катушки.

Под действием температуры изоляция стареет, т. е. меняет свои свойства. Как правило, происходит ухудшение прочностных характеристик, в том числе снижение электрической прочности. Обычно принимают за допустимое значение температуры  $\vartheta_d$  такую величину температуры, под действием которой электрическая прочность изоляции снижается до 50 % своей первоначальной величины за время порядка 20 000 ч. При меньшем необходимом сроке службы допустимая температура может быть повышена.

Значение длительно допустимой температуры для каждого сорта изоляционного материала указывается в технических условиях.

Таким образом, наряду с расчетом обмоточных данных катушки приходится производить ее тепловой расчет, который определяет окончательно пригодность выбранных размеров катушки.

## 7. Коэффициент заполнения катушек

Величина намагничивающей силы, которую можно получить от данной катушки при заданном режиме работы и допустимой температуре нагрева, зависит от того, насколько эффективно используется объем катушки, т. е. насколько он заполнен материалом – обмоточным проводом.

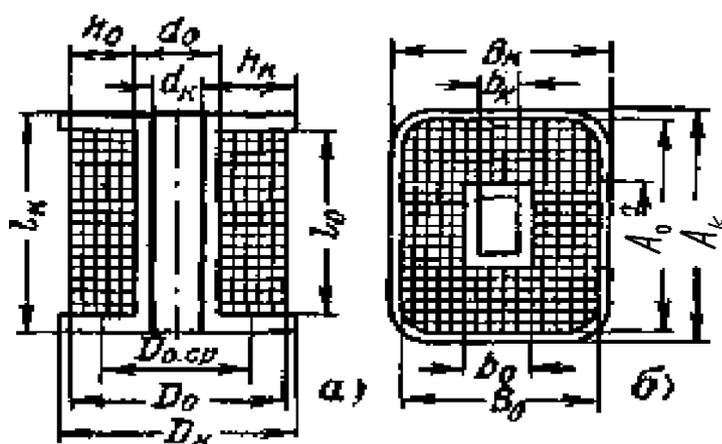


Рис. 8. Продольный разрез катушки

го проводниковым материалом, ко всей площади окна катушки.

На рис. 8, а показан продольный разрез круглой катушки, длина которой  $l_k$ , внешний диаметр  $D_k$ , внутренний диаметр  $d_k$ . Площадь поперечного сечения окна круглой катушки  $Q_k = l_k \frac{D_k - d_k}{2} = l_k h_k$ , где  $h_k$  – толщина катушки.

Для прямоугольной катушки, характерной для электромагнитов переменного тока, поперечный разрез которой представлен на рис. 8, б, площадь поперечного сечения окна

$$Q_k = l_k \frac{A_k - a_k}{2} = l_k h_k.$$

Суммарное сечение проводников в катушке

$$Q_M = \frac{\pi d^2}{4} w,$$

где  $d$  – диаметр провода (без изоляции), из которого выполнена обмотка;  $w$  – число ее витков.

Эффективность использования пространства, занимаемого катушкой, оценивается с помощью коэффициентов заполнения.

а) Коэффициентом заполнения катушки  $f_k$  называется отношение площади сечения суммарного пространства, занимаемого

Коэффициент заполнения катушки в общем случае  $f_k = \frac{Q_M}{Q_k}$ .

Для круглой катушки  $f_k = \frac{\pi d^2}{2} \frac{w}{l_k(D_k - d_k)}$ ;

для прямоугольной  $f_k = \frac{\pi d^2}{2} \frac{w}{l_k(A_k - a_k)}$ .

Так как при всех остальных равных условиях размеры катушки будут обратно пропорциональны коэффициенту заполнения, желательно, чтобы последний имел наибольшее значение. Поэтому важно рассмотреть факторы, влияющие на его величину.

Коэффициент заполнения катушки может быть представлен как

$$f_k = f_0 \frac{1}{\frac{h_k}{h_0} \frac{l_k}{l_0}},$$

где  $f_0$  – величина, называемая коэффициентом заполнения обмоточного пространства, или коэффициентом заполнения обмотки;

$h_0 = \frac{(D_0 - d_0)}{2}$  – толщина обмотки для круглой катушки;

$h_0 = \frac{(A_0 - a_0)}{2} = \frac{(B_0 - b_0)}{2}$  – толщина обмотки для прямоугольной

катушки;

$l_0$  – длина окна обмотки.

Таким образом, коэффициент заполнения катушки определяется величиной коэффициента заполнения обмотки и относительными размерами ее наружной изоляции, размерами каркаса катушки и т. д.

б) Коэффициент заполнения обмотки определяется как отношение суммарной площади сечения проводников обмотки ко всей площади окна обмотки

$$f_k = \frac{Q_M}{Q_0}.$$

Для круглой катушки получим

$$f_0 = \frac{\pi d^2}{2} \frac{w}{l_0(D_0 - d_0)},$$

где  $D_0$  и  $d_0$  – наружный и внутренний диаметры обмотки без учета каркаса и наружной изоляции.

Для прямоугольной катушки

$$f_0 = \frac{\pi d^2}{2} \frac{w}{l_0(B_0 - b_0)},$$

где  $\frac{1}{2l_0(B_0 - b_0)} = Q_0$  – сечение окна обмотки;

$B_0$  и  $b_0$  – внешний и внутренний размеры обмотки в поперечном сечении без учёта каркаса и наружной изоляции.

Коэффициент заполнения обмотки зависит от толщины изоляции, размеров проволоки обмотки и вида намотки.

Задача расчёта обмоточных данных заключается в определении диаметра провода  $d$ , числа витков  $w$  и сопротивления катушки  $R$ , которые при заданном напряжении или токе обеспечивают необходимую намагничивающую силу.

## 8. Электромагниты постоянного тока

В электромагнитах постоянного тока рабочий магнитный поток создается с помощью обмотки постоянного тока.

Действие таких электромагнитов не зависит от направления тока в обмотке. Электромагниты постоянного тока наиболее экономичны и благодаря большому разнообразию конструктивных исполнений их легко приспособлять к различным условиям работы и различным характеристикам нагрузок.

Благодаря этому они получили наиболее широкое распространение. Значительную часть всего множества электромагнитов постоянного тока составляют электромагнитные механизмы, используемые в качестве привода для осуществления необходимого перемещения. Примером подобных электромагнитов являются тяговые электромагниты, предназначенные для совершения определенной механической работы при перемещении тех или иных рабочих органов; электромагниты муфт сцепления и торможения и тормозные электромагниты, электромагниты, приводящие в действие контактные устройства в контакторах и автоматических выключателях; электромагниты реле датчиков, регуляторов и других чувствительных устройств автоматики.

Силу притяжения в электромагните определяют по формуле Максвелла, которая при технических расчётах имеет вид

$$F = \frac{B^2 S}{2\mu_0}.$$

Сила, вычисленная по этой формуле, получается в ньютонах, если  $B$  выражено в теслах,  $S$  – в квадратных метрах, а  $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6}$  Гн/м.

Широкое использование электромеханических устройств различного назначения в разных областях промышленности предполагает достаточно высокий уровень подготовки инженеров по специальности 200101. Решение поставленной задачи достигается только при безусловном овладении материала, изложенного в данном конспекте.

### Библиографический список

1. Сливинская, А. Г. Электромагниты и постоянные магниты / А. Г. Сливинская. – М.: Энергия, 1972. – 247 с.
2. Ступель, Ф. А. Электромеханические реле: учеб. пособие / Ф. А. Ступель. – Харьков: Изд-во гос. ун-та, 1956. – 354 с.
3. Сотников, Б.С. Основы расчёта и проектирования электромеханических элементов автоматических и телемеханических устройств / Б. С. Сотников. – М.: Энергия, 1965. – 575 с.
4. Гордон, А. В. Электромагниты переменного тока / А. В. Гордон, А. Г. Сливинская. – М.: Энергия, 1968. – 197 с.
5. Любчик, М. А. Силовые электромагниты аппаратов и устройств автоматики постоянного тока. (Расчёт и элементы проектирования) / М. А. Любчик. – М.: Энергия, 1968. – 150 с.
6. Гордон, А. В. Поляризованные электромагниты/ А. В. Гордон, А. Г. Сливинская. – М.: Энергия, 1964. – 119 с.
7. Информационно-измерительная техника и технологии / под ред. проф. Г.Г. Раннева. – М.: Высш. шк., 2002. – 453 с. – ISBN 5-06004071-2.

## Оглавление

Введение.....	3
1. Классификация электромагнитов .....	3
2. Основные уравнения рабочего процесса электромагнитов.....	6
3. Характеристики и параметры электромагнитов .....	7
4. Основные параметры электромагнитов.....	10
5. Магнитные цепи электромагнитов .....	11
6. Обмотки электромагнитов.....	16
7. Коэффициент заполнения катушек.....	18
8. Электромагниты постоянного тока.....	20
Библиографический список.....	22

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ ПО ДИСЦИПЛИНЕ  
«РАСЧЕТЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ»

Составители

**Ильинская Людмила Викторовна**

**Грибакин Виктор Семенович**

Ответственный за выпуск – зав. кафедрой профессор В.П. Легаев

Подписано в печать 12.09.08.

Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 1,39. Тираж 100 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета

600000, Владимир, ул. Горького, 87.