

А.Г. Сливинская

**Электромагниты и
постоянные магниты**

Учебное пособие

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 030
ББК 92
А11

A11 **А.Г. Сливинская**
Электромагниты и постоянные магниты: Учебное пособие / А.Г. Сливинская –
М.: Книга по Требованию, 2014. – 248 с.

ISBN 978-5-458-39392-8

ISBN 978-5-458-39392-8

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2014

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2014

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

ВВЕДЕНИЕ

Устройства, создающие в том или ином пространстве магнитное поле, называют магнитами. Магниты могут быть как естественными, так и искусственными. Например, Земля представляет собой огромный естественный магнит, создающий поле так называемого земного магнетизма. Естественными магнитами являются и некоторые сорта железных руд. Однако широкое распространение имеют лишь искусственные магниты: электромагниты и постоянные магниты.

Электромагнит создает магнитное поле с помощью обмотки, обтекаемой электрическим током. Для того чтобы усилить это поле и направить магнитный поток по определенному пути, в большинстве электромагнитов имеется магнитопровод, выполняемый из магнитномягкой стали.

Электромагнит был впервые создан примерно 150 лет назад. За это время электромагниты получили настолько широкое распространение, что трудно назвать область техники, где бы они не применялись в том или ином виде. Они содержатся во многих бытовых приборах — электробритвах, магнитофонах, телевизорах и т. п. Устройства техники связи — телефония, телеграфия и радио — немыслимы без их применения. Электромагниты являются неотъемлемой частью электрических машин, многих устройств промышленной автоматики, аппаратуры регулирования и защиты разнообразных электротехнических установок. Развивающейся областью применения электромагнитов является медицинская аппаратура. Наконец, гигантские электромагниты для ускорения элементарных частиц применяются в синхрофазотронах.

Вес электромагнитов колеблется от долей грамма до сотен тонн, а потребляемая при их работе электрическая мощность — от милливатт до десятков тысяч киловатт.

Особой областью применения электромагнитов являются электромагнитные механизмы¹. В них электромагниты используются в качестве привода для осуществления необходимого поступательного перемещения рабочего органа или поворота его в пределах ограниченного угла, или для создания удерживающей силы.

Примером подобных электромагнитов являются тяговые электромагниты, предназначенные для совершения определенной работы при перемещении тех или иных рабочих органов; электромагнитные замки; электромагнитные муфты сцепления и торможения и тормозные электромагниты; электромагниты, приводящие в действие контактные устройства в реле, контакторах, пускателях, автоматических выключателях; подъемные электромагниты, электромагниты вибраторов и т. п.

В ряде устройств наряду с электромагнитами или взамен их используются постоянные магниты (например, магнитные плиты металлорежущих станков, тормозные устройства, магнитные замки и т. п.).

Постоянный магнит представляет собой деталь из специального магнитотвердого материала, способного после намагничивания (с помощью электромагнита) самостоятельно и практически неограниченное время поддерживать магнитное поле.

Благодаря огромному прогрессу современной химии и металлургии созданы сплавы для изготовления постоянных магнитов с исключительно высокими магнитными характеристиками. Некоторые из этих материалов позволяют выполнять постоянные магниты с меньшими объемом и весом, чем эквивалентные электромагниты.

Постоянные магниты получают все большее распространение. Их используют в электрогенераторах и электродвигателях, измерительной и регулирующей аппаратуре, репродукторах и микрофонах, фокусирующих устройствах электронных приборов, герконах и т. д.

Перечисленные области далеко не исчерпывают всего разнообразия применения электромагнитов и постоянных магнитов, а лишь показывают наиболее распространенные и типичные случаи их использования.

¹ Электромагнитам таких механизмов, являющихся основой большинства встречающихся на практике (для перечисленных в предисловии специализаций) электрических аппаратов, в книге будет уделено основное внимание.

Глава первая

КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ, ИХ ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ

1-1. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ

Электромагниты весьма разнообразны по конструктивным исполнениям, которые различаются по своим характеристикам и параметрам, поэтому классификация облегчает изучение процессов, происходящих при их работе.

В зависимости от способа создания магнитного потока и характера действующей намагничивающей силы (н. с.) электромагниты подразделяются на три группы: 1) электромагниты постоянного тока нейтральные; 2) электромагниты постоянного тока поляризованные и 3) электромагниты переменного тока.

В нейтральных электромагнитах постоянного тока рабочий магнитный поток создается с помощью обмотки постоянного тока. Действие электромагнита зависит только от величины этого потока и не зависит от его направления, а следовательно, от направления тока в обмотке электромагнита. При отсутствии тока магнитный поток и сила притяжения, действующая на якорь, практически равны нулю.

Поляризованные электромагниты постоянного тока характеризуются наличием двух независимых магнитных потоков: поляризующего и рабочего. Поляризующий магнитный поток в большинстве случаев создается с помощью постоянных магнитов. Иногда для этой цели используют электромагниты. Рабочий поток возникает под действием н. с. рабочей или управляющей обмотки. Если ток в них отсутствует, на якорь действует сила притяжения, создаваемая поляризующим магнитным потоком. Действие поляризованного электромагнита зависит как от величины, так и от направления рабочего потока, т. е. от направления тока в рабочей обмотке.

В электромагнитах переменного тока питание обмотки осуществляется от источника переменного тока.

Магнитный поток, создаваемый обмоткой, по которой проходит переменный ток, периодически изменяется по величине и направлению (переменный магнитный поток¹), в результате чего сила электромагнитного притяжения пульсирует от нуля до максимума с удвоенной частотой по отношению к частоте питающего тока.

Однако для тяговых электромагнитов снижение электромагнитной силы ниже определенного уровня недопустимо, так как это приводит к вибрации якоря, а в отдельных случаях к прямому нарушению нормальной работы. Поэтому в тяговых электромагнитах, работающих при переменном магнитном потоке, приходится прибегать к мерам для уменьшения глубины пульсации силы (например, применять экранирующий виток, охватывающий часть полюса электромагнита).

Кроме перечисленных разновидностей, в настоящее время большое распространение получили электромагниты с выпрямлением тока, которые по питанию могут быть отнесены к электромагнитам переменного тока, а по своим характеристикам приближаются к электромагнитам постоянного тока. Поскольку все же имеются некоторые специфические особенности их работы, они рассматриваются в [Л. 25].

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

Обмотки последовательного включения, работающие при заданном токе, выполняются 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.

Обмотки параллельного включения, работающие при заданном напряжении, имеют, как правило, весьма большое число витков и выполняются из провода малого сечения.

¹ Кроме термина переменный магнитный поток, связанного с периодическим процессом, будет использован термин изменяющийся магнитный поток. Последний применяется для обозначения аperiodических изменений амплитудного или действующего значения магнитного потока, происходящих при коммутации в электрической цепи или изменениях магнитной проводимости магнитной цепи.

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

По скорости действия электромагниты могут быть с нормальной скоростью действия, быстродействующие и замедленно действующие. Это разделение является несколько условным и свидетельствует главным образом о том, приняты ли специальные меры для получения необходимой скорости действия.

Все перечисленные выше признаки накладывают свой отпечаток на особенности конструктивных выполнений электромагнитов.

Вместе с тем при всем разнообразии встречающихся на практике электромагнитов они состоят из основных частей одинакового назначения. К ним относятся (рис. 1-1): 1 — катушка с расположенной на ней намагничивающей обмоткой (может быть несколько катушек и несколько обмоток); 2 — неподвижная часть магнитопровода, выполняемого из ферромагнитного материала (ярмо и сердечник); 3 — подвижная часть магнитопровода (якорь); 4 — каркас катушки; 5 — рабочий зазор; 6 — паразитный зазор.

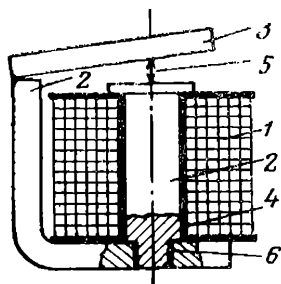


Рис. 1-1. Основные части электромагнита.

1 — обмотка; 2 — неподвижные части магнитопровода; 3 — ярмо; 4 — каркас катушки; 5 — рабочий зазор; 6 — паразитный зазор.

В некоторых случаях неподвижная часть магнитопровода состоит из нескольких деталей (основания, корпуса, фланцев и т. д.).

Якорь отделяется от остальных частей магнитопровода воздушными промежутками и представляет собой часть электромагнита, которая, воспринимая электромагнитное усилие, передает его соответствующим деталям приводимого в действие механизма.

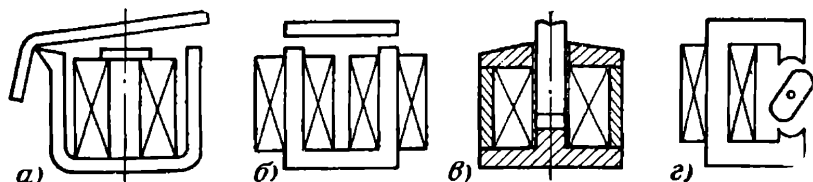


Рис. 1-2. Основные типы электромагнитов.

а и б — с внешним притягивающимся ярмом; в — со втягивающимся ярмом; г — с поперечно движущимся ярмом.

Количество и форма воздушных промежутков, отделяющих подвижную часть магнитопровода от неподвижной, зависят от конструкции электромагнита. Воздушные промежутки, в которых возникает полезная сила, называются рабочими; воздушные промежутки, в которых не возникает усилия в направлении возможного перемещения якоря, являются паразитными¹. На рис. 1-1 рабочий зазор обозначен *б*, паразитный — *в*.

Поверхности подвижной или неподвижной части магнитопровода, ограничивающие рабочий воздушный промежуток, называют полюсами (якорь *з* и шляпка сердечника на рис. 1-1).

В зависимости от расположения якоря относительно остальных частей электромагнита различают электромагниты с внешним притягиваемым якорем (рис. 1-2, *а* и *б*), электромагниты со втягиваемым якорем (рис. 1-2, *в*) и электромагниты с внешним поперечно движущимся якорем (рис. 1-2, *г*).

Характерной особенностью электромагнитов с внешним притягиваемым якорем является внешнее расположение якоря относительно обмотки. На него действует главным образом рабочий поток, проходящий от якоря *з* к торцу шляпки сердечника *2*. Характер перемещения якоря может быть вращательным (клапанный электромагнит на рис. 1-2, *а*) или поступательным (рис. 1-2, *б*). Потоки рассеяния (замыкающиеся помимо рабочего зазора) у таких электромагнитов практически не создают тягового усилия, и поэтому их стремятся уменьшить. Электромагниты этой группы способны развивать достаточно большое усилие, но обычно применяются при сравнительно небольших рабочих ходах якоря.

Особенностью электромагнитов со втягиваемым якорем являются частичное расположение якоря в своем начальном положении внутри катушки и дальнейшее перемещение его в катушку в процессе работы (рис. 1-2, *в*). Потоки рассеяния у таких электромагнитов, особенно при больших воздушных зазорах, создают определенное тяговое усилие, в результате чего они являются полезными, особенно при сравнительно больших

¹ Паразитные зазоры обусловлены технологическими факторами, а также необходимостью предотвращения залипания от остаточной намагниченности при отключении обмотки. Их величина колеблется от сотых до десятых долей миллиметра.

ходах якоря. Такие электромагниты могут выполняться со стопом или без него, причем форма поверхностей, образующих рабочий зазор, может быть различной в зависимости от того, какую тяговую характеристику нужно получить. Наибольшее распространение получили электромагниты с плоскими и усеченно коническими полюсами, а также электромагниты без стопа. В качестве направляющей для якоря чаще всего применяется трубка из немагнитного материала, создающая паразитный зазор между якорем и верхней, неподвижной, частью магнитопровода.

Электромагниты со втягивающимся якорем могут развивать усилия и иметь ход якоря, изменяющиеся в очень большом диапазоне, что обуславливает их широкое распространение.

В электромагнитах с внешним поперечно движущимся якорем (рис. 1-2, г) якорь перемещается поперек магнитных силовых линий, поворачиваясь на некоторый ограниченный угол. Такие электромагниты обычно развивают сравнительно небольшие усилия, но они позволяют путем соответствующего согласования форм полюсов и якоря получать изменения тяговой характеристики и высокий коэффициент возврата¹.

В каждой из трех перечисленных групп электромагнитов в свою очередь имеется ряд конструктивных разновидностей, связанных как с характером протекающего по обмотке тока, так и с необходимостью обеспечения заданных характеристик и параметров электромагнитов.

1-2. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ

Для характеристики процессов, происходящих в электромагните на различных этапах его работы, существенными являются следующие пять основных уравнений:

1. Уравнение электрической цепи обмотки² электромагнита

$$u = iR + \frac{d\Psi}{dt}, \quad (1-1)$$

¹ Коэффициентом возврата называется отношение параметра отпущения (возврата) к параметру срабатывания, например тока возврата I_v к току срабатывания $I_{ср}$.

² Будем рассматривать включение электромагнитов с параллельной обмоткой, имеющих наиболее широкое распространение.

или

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

где u — напряжение источника питания цепи обмотки;

i — мгновенное значение тока в обмотке;

R — активное сопротивление цепи обмотки;

Ψ — мгновенное значение потокосцепления обмотки;

t — время.

Уравнение (1-1) дает возможность произвести анализ первой стадии энергетических преобразований в электромагните — процесса преобразования электрической энергии, поступающей от источника тока, в энергию магнитного поля.

2. *Уравнение характеристики намагничивания электромагнита*

$$\Psi = f_2(i, \delta) \quad (1-2)$$

связывает потокосцепление Ψ , ток в обмотке i и рабочий зазор δ . В общем случае это уравнение должно учитывать также влияние вихревых токов, появляющихся во время переходных процессов в массивных деталях магнитопровода, сплошных конструктивных деталях и дополнительных обмотках, сцепленных с магнитным потоком. В обычных электромагнитах это влияние невелико и его не принимают во внимание.

Характеристика намагничивания электромагнита, так же как и кривая намагничивания материала, из которого выполняется магнитопровод, имеет петлю гистерезиса. Ее учет важен при анализе электромагнитов, используемых в регуляторах, некоторых точных реле и т. п. В остальных случаях с наличием гистерезиса можно не считаться.

Характер кривой намагничивания электромагнита и ее видоизменения при перемещении якоря определяют возможности преобразования магнитной энергии в механическую и величину действующей в данный момент электромагнитной силы. Последняя, таким образом, также является функцией тока в обмотке и положения якоря.

3. *Уравнение силы электромагнитного притяжения*

$$F_a = f_3(W_M), \quad (1-3)$$

которая возникает как результат энергетических преобразований и в конечном счете является функцией запаса энергии W_m , сосредоточенной в магнитном поле электромагнита. Знание силы по ходу якоря дает возможность определить полное значение получающейся механической энергии.

4. Уравнение движения имеет вид:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = F_a - F_{II}(x) - F_c \left(\frac{dx}{dt} \right), \quad (1-4)$$

где m — приведенная масса движущихся частей;

x — перемещение якоря;

$F_{II}(x)$ — противодействующая сила, являющаяся обычно функцией положения якоря;

$F_c(dx/dt)$ — сила сопротивления, зависящая от скорости движения.

Это уравнение характеризует механические процессы, происходящие при срабатывании (или возврате) электромагнита¹. Оно дает возможность найти такие величины, как скорость и время движения, живую силу движущихся частей и т. п.

5. Уравнение нагрева и охлаждения электромагнита

$$\vartheta = f_5(P, t_{вкл}, \text{размеры}) \quad (1-5)$$

связывает температуру нагрева ϑ с мощностью P , выделяющейся в обмотке, размерами электромагнита и временем нахождения его во включенном состоянии $t_{вкл}$.

Нагрев электромагнита происходит в течение периода включенного состояния его обмотки. Тепловые процессы, происходящие во время срабатывания электромагнита, не принимаются во внимание вследствие их кратковременности.

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

$$\vartheta = f'_5(\vartheta_{II}, t_{откл}, \text{размеры}) \quad (1-5a)$$

и зависит от температуры ϑ_{II} , до которой был нагрет электромагнит, времени охлаждения $t_{откл}$ и размеров электромагнита.

¹ В тех случаях, когда имеет место не поступательное, а вращательное движение, удобнее бывает оперировать с величинами движущих и противодействующих моментов и угловыми перемещениями.

1-3. ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ

Рассмотренные в предыдущем параграфе основные уравнения рабочего процесса электромагнита определяют его основные характеристики. Наиболее общими являются динамические характеристики, которые учитывают изменения н. с. электромагнита в процессе его срабатывания за счет действия э. д. с. самоиндукции и движения, а также учитывают трение, демпфирование и инерцию подвижных частей. Для некоторых типов электромагнитов (быстродействующие электромагниты, электромагнитные вибраторы и т. п.) знание динамических характеристик является обязательным, так как только они характеризуют рабочий процесс таких электромагнитов. Однако получение динамических характеристик сопряжено с большой вычислительной работой (см. гл. 9). Поэтому во многих случаях, особенно когда не требуется точного определения времени движения, ограничиваются рассмотрением статических характеристик. Последние получают, если не учитывать влияния на электрическую цепь противо-э. д. с., возникающей в процессе движения якоря электромагнита, т. е. считать, что ток в обмотке электромагнита неизменен и равен, например току срабатывания.

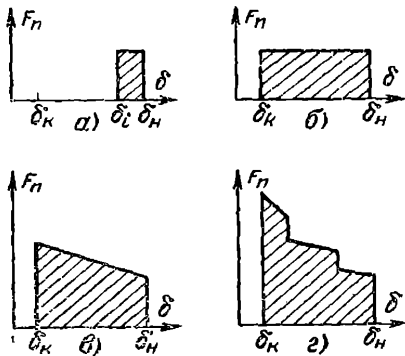


Рис. 1-3. Характерные виды нагрузок.

а — механизма защелки; б — при подъеме груза; в — в виде пружины; г — в виде ряда вступающих в действие пружин; δ_n — начальный зазор; δ_k — конечный зазор.

важнейшими характеристиками электромагнита с точки зрения его предварительной оценки являются следующие:

1. *Тяговая характеристика* (статическая). Она представляет собой зависимость электромагнитной силы от положения якоря или рабочего зазора δ для различных постоянных значений напряжения, подведенного к обмотке, или тока в обмотке:

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

или

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

статических характеристик. Последние получают, если не учитывать влияния на электрическую цепь противо-э. д. с., возникающей в процессе движения якоря электромагнита, т. е. считать, что ток в обмотке электромагнита неизменен и равен, например току срабатывания.