

Арнольд Р.Р.

**Расчет и проектирование
магнитных систем с
постоянными магнитами**

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 53
ББК 22.3
А84

А84 **Арнольд Р.Р.**
Расчет и проектирование магнитных систем с постоянными магнитами / Арнольд Р.Р. – М.: Книга по Требованию, 2013. – 184 с.

ISBN 978-5-458-26961-2

В книге подробно рассматриваются основные методы расчета прямых магнитов и магнитных систем с постоянными магнитами. Предлагается новый упрощенный метод расчета и проектирования. Этот метод может быть использован для расчета разных типов систем с постоянными магнитами, изготовленными из различных материалов.

ISBN 978-5-458-26961-2

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2013

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2013

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.



Серия Книжный Ренессанс

www.samizday.ru/reprint

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

1-1. Типы магнитных систем и характеристики магнитных материалов

Термин «магнитная система с постоянным магнитом» относится к системам, имеющим постоянный магнит *1* (рис. 1-1,*а*), рабочий зазор *2*, в котором концентрируется подлежащая использованию магнитная энергия, магнитопровод *3* и полюсные наконечники *4*, выполняемые из магнитно-мягких материалов. В некоторых системах магнитопровод (рис. 1-1,*б*), или магнитопровод и полюсные наконечники могут отсутствовать (рис. 1-1,*в*).

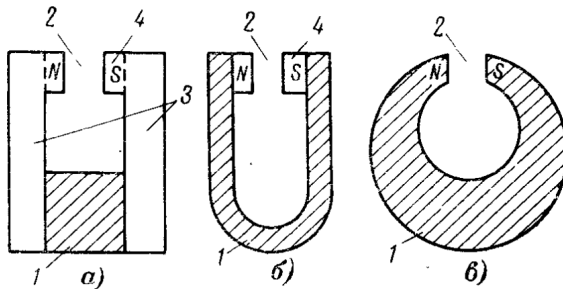


Рис. 1-1. Простейшие примеры систем с постоянными магнитами.

1 — постоянный магнит; *2* — рабочий зазор; *3* — магнитопровод; *4* — полюсные наконечники.

Под прямым или разомкнутым магнитом понимается постоянный магнит (или система магнитов) без отчетливо выраженного рабочего зазора. В этом случае распределение магнитного потока в окружающем внешнем пространстве определяется в основном геометрией самого магнита. В качестве примеров можно привести магниты в виде цилиндров или призм, расположенных на

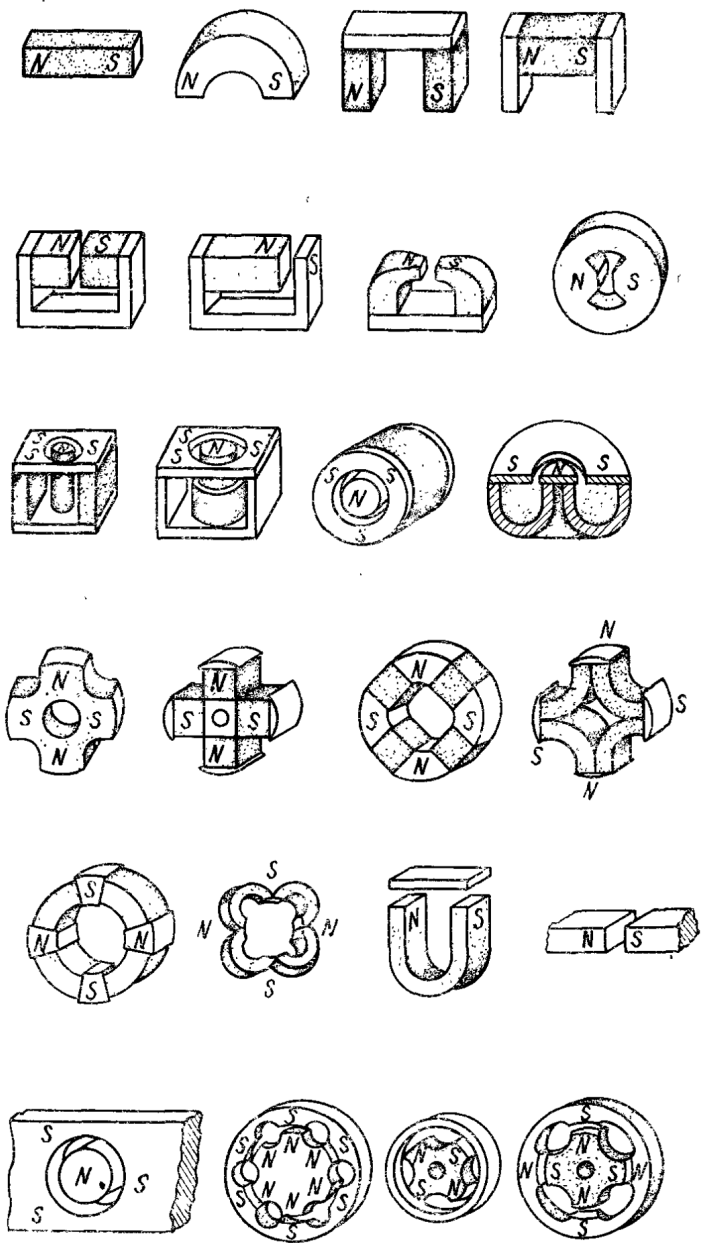
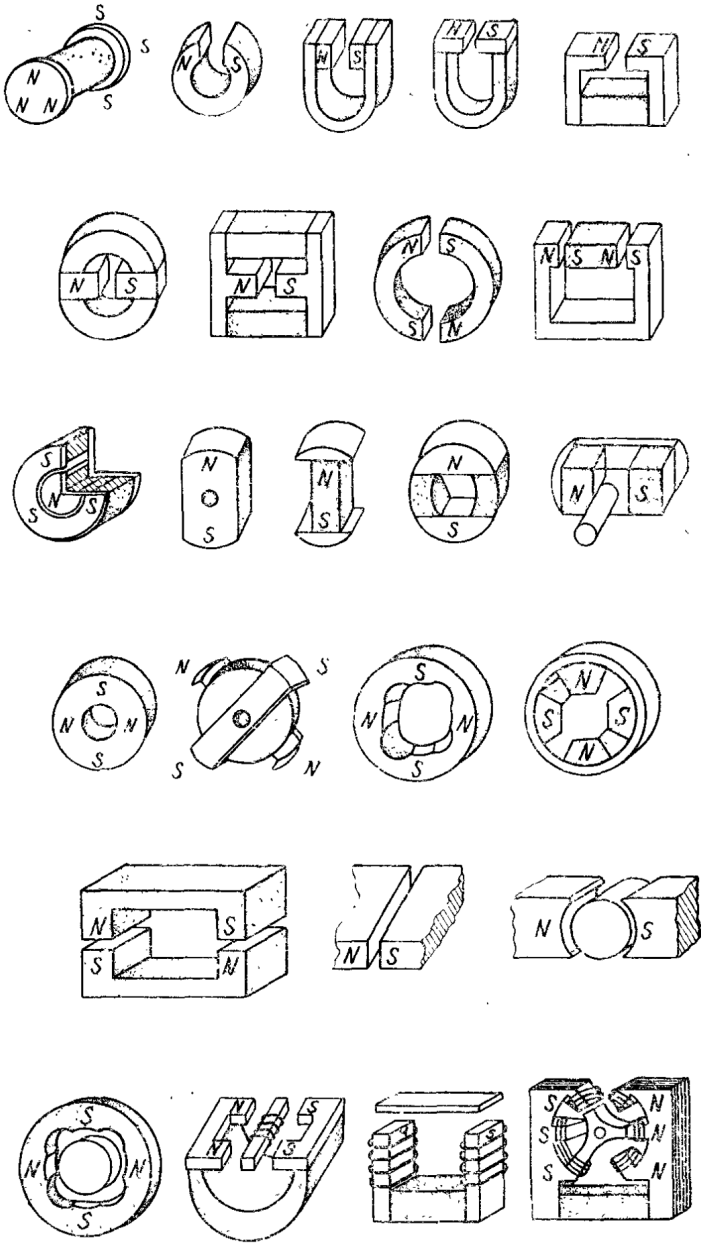


Рис. 1-2. Некоторые типы постоянных магнитов



и магнитных систем с постоянными магнитами.

сравнительно большом расстоянии от других магнитных тел. Прямой магнит можно рассматривать как частный случай системы с постоянным магнитом.

Некоторые типы постоянных магнитов и магнитных систем с постоянными магнитами схематически представлены на рис. 1-2 [Л. 4]. В магнитных системах с постоянным магнитом в настоящее время применяется большое число магнитных (ферромагнитных) материалов.

Постоянные магниты изготавливаются из так называемых *магнитно-твердых* материалов. Для магнитопроводов и полюсных наконечников систем применяются *магнитно-мягкие* материалы. Кроме этих основных материалов, иногда могут применяться материалы с рядом особых свойств, например, с резкой зависимостью магнитной проницаемости от температуры (термомагнитные сплавы) и др.

Основная особенность магнитных материалов состоит в том, что они способны сохранять запас магнитной энергии после воздействия на них достаточно сильного магнитного поля (практически любого).

Характеристики и необходимые для расчетов магнитных систем кривые размагничивания современных магнитно-твердых материалов и кривые намагничивания магнитно-мягких можно найти в ряде книг, учебных пособий и статей (см., например, [Л. 1—10]). Основные магнитные свойства и химический состав магнитно-твердых сплавов, упоминаемых в книге, приведены в приложениях 1—3.

1-2. Соотношения при намагничивании

При намагничивании размагниченного постоянного магнита (образца магнитного материала) в замкнутой магнитной цепи зависимость индукции B в образце от монотонно возрастающего магнитного поля с напряженностью H выражается начальной (первой, первоначальной) кривой намагничивания (кривая OB_1 на рис. 1-3). Работа, затрачиваемая на намагничивание единицы объема магнита на величину dB , будет равна:

$$dA = HdB.$$

Эта работа может быть представлена графически как площадь полосы длиной H и шириной dB (площадь, за-

штрихованная на рис. 1-3). Энергия, затрачиваемая на намагничивание единицы объема магнита до индукции B_S , определяется выражением

$$W_m = \int_{B=0}^{B=B_S} H dB$$

и графически изображается площадью OB_1B_S на рис. 1-3.

Если после намагничивания отключить намагничивающий ток, то рабочая точка магнита, характеризующая его магнитное состояние, переместится по нисходящей ветви петли гистерезиса в точку B_r . При этом энергия, соответствующая площади $B_r B_1 B_S$, возвращается обратно к источнику тока (в виде мощности экстра-токов размыкания).

Если постоянный магнит вынуть из ярма намагничивающего устройства, то его рабочая точка переместится по кривой размагничивания (части предельной петли гистерезиса во втором квадранте) из точки B_r в точку M , положение которой определяется внутренним (собственным) размагничивающим полем магнита. При этом затрачивается механическая работа, которая преобразуется в магнитную энергию во внешнем пространстве и частично теряется (на нагрев магнита и др.).

Энергия, создаваемая магнитом во внешнем пространстве, в общем случае определяется выражением

$$W_{\text{окр}} = -\frac{1}{2} \int_{V_m} \bar{E}_m \bar{H}_m dV_m,$$

где \bar{B}_m и \bar{H}_m — векторы индукции и напряженности поля в материале магнита и V_m — объем магнита.

Если магнитное поле в постоянном магните можно сделать однородным, а векторы \bar{B}_m и \bar{H}_m — совпадаю-

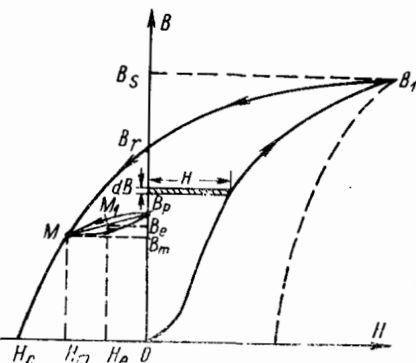


Рис. 1-3. Кривая намагничивания и кривые гистерезиса.

щими по направлению, то

$$W_{\text{окр}} = -\frac{1}{2} B_m H_m V_m.$$

Это выражение вполне справедливо только для однородно намагниченного эллипсоида, однако оно применяется для приближенного вычисления энергии магнитов других форм, как находящихся в магнитных системах, так и разомкнутых.

Таким образом, координаты рабочей точки B_m и H_m определяют величину плотности магнитной энергии, отдаваемой магнитом во внешнее пространство. Эта плотность магнитной энергии является важнейшей характеристикой магнитно-твердых материалов. Плотность магнитной энергии графически представляют в виде функции либо от индукции в нейтральном сечении магнита, либо от соответствующей ей напряженности поля. Каждой точке кривой размагничивания соответствует произведение $B_m H_m$, так что и сама кривая может рассматриваться как выражение плотности магнитной энергии.

В первом приближении задача поверочного расчета как разомкнутого магнита, так и магнитной системы с постоянным магнитом сводится к нахождению координат рабочей точки B_m , H_m , по которым можно найти величину магнитного потока во внешнем пространстве или в рабочем зазоре.

При проектировании магнитов и магнитных систем с постоянными магнитами надо стремиться к тому, чтобы рабочая точка находилась в точке максимальной величины произведения BH — $(BH)_{\text{макс}}$, которая является теоретическим пределом отдаваемой единицей объема магнитного материала магнитной энергии.

Если закоротить магнитную цепь постоянного магнита магнитопроводом из магнитно-мягкого материала, то рабочая точка переместится не по кривой размагничивания в точку B_r , а по кривой возврата в точку B_p . При дальнейших циклах замыкания и размыкания магнита рабочая точка будет перемещаться между точками M и B_p по кривой возврата. При частичном (неполном) замыкании магнита, например при установке намагниченного магнита в систему, рабочая точка будет находиться между точками M и B_p на кривой возврата, и координаты этой точки M_1 , $B_e H_e$ будут определяться, так же как и координаты точки M , внутренним размаг-

ничивающим полем. Кривые возврата при расчетах обычно аппроксимируют прямой линией, проходящей через точки начала и конца кривой M и B_p .

Дифференциальная проницаемость на кривой возврата

$$\frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH} = \rho$$

может быть принята постоянной. Эту проницаемость обычно называют коэффициентом возврата. Величина коэффициента возврата различна для кривых возврата, начинающихся в разных точках на кривой размагничивания. Переход с кривой размагничивания на кривую возврата и обратно всегда имеет плавный характер (рис. 1-4), так что положение начальной точки M находится с некоторым приближением.

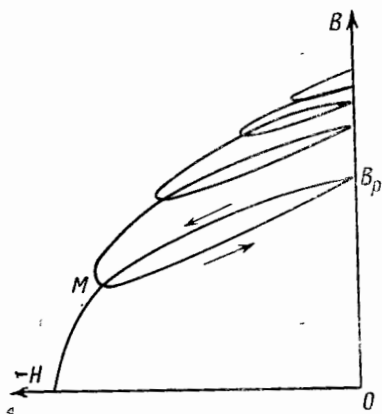


Рис. 1-4. Кривые возврата.

Магнитная энергия на кривых возврата выражается произведением $B_e H_e$.

Постоянные магниты при их практическом применении работают как на кривых размагничивания, так и на кривых возврата.

ГЛАВА ВТОРАЯ

РАСЧЕТ ПРЯМЫХ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

2-1. Использование для расчета коэффициента размагничивания

При определении коэффициента размагничивания исходят из предположения, что в магнитном теле, в частности в прямом постоянном магните, помещенном в однородное внешнее магнитное поле H_e , возникает противоположно направленное размагничивающее поле H_\ominus . При этом в теле образуется внутреннее результирующее поле

$$H = H_e - H_\ominus. \quad (2-1)$$

Схематическое изображение поля размагничивания цилиндрического тела представлено на рис. 2-1.

Эффект размагничивания для однородно намагниченного тела характеризуется коэффициентом размагничивания N , определяемым из равенства

$$H_{\ominus} = NJ, \quad (2-2)$$

где J — намагниченность, соответствующая полю H_{\ominus} .

Из выражения (2-1) следует, что

$$H = H_e - NJ. \quad (2-2a)$$

В этих соотношениях предполагается, что тело намагничено однородно по всему объему. Это может быть обеспечено только

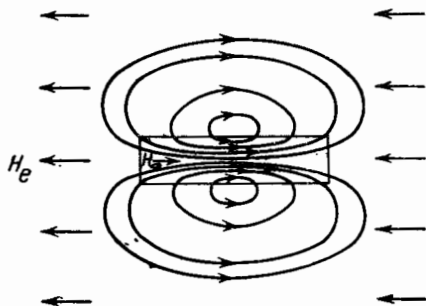


Рис. 2-1. Схематическое изображение размагничивающего поля прямого магнита.

для тел в виде эллипсоида вращения. Для тел других форм, в частности для применяемых на практике магнитов в виде цилиндров или призм, значения коэффициентов размагничивания могут быть найдены как по формулам, выведенным при ряде допущений, так и экспериментальным путем. Теоретические и экспериментальные исследования коэффициента размагничивания проводились многими исследователями (см., например [Л. 6, 11, 12]).

Для основных видов эллипсоида вращения с дли-

ной полуосей a и b величина коэффициента размагничивания при намагничивании в направлении, параллельном (N_{\parallel}) или перпендикулярном (N_{\perp}) оси вращения в системе МКСА (СИ), определяется по следующим формулам [Л. 12]:

1. Сжатый эллипсоид

Для сжатого эллипсоида $\frac{a}{b} = p < 1$ (2-3)

эксцентриситет равен:

$$e_1 = \frac{\sqrt{b^2 - a^2}}{b} = \sqrt{1 - p^2}. \quad (2-4)$$

Коэффициент размагничивания при намагничивании параллельно оси вращения равен:

$$\begin{aligned} N_{\parallel} &= \frac{1}{e_1^2} - \frac{\sqrt{1 - e_1^2}}{e_1^3} \arcsin e_1 = \\ &= \frac{1}{1 - p^2} - \frac{p}{(1 - p^2)^{3/2}} \arcsin \sqrt{1 - p^2} \end{aligned} \quad (2-5)$$

и при намагничивании перпендикулярно оси вращения

$$N_{\perp} = \frac{\sqrt{1-e_1^2}}{2e_1^3} \arcsin e_1 - \frac{1-e_1^2}{2e_1^2} =$$

$$= \frac{p}{2(1-p^2)^{3/2}} \cdot \arcsin \sqrt{1-p^2} - \frac{p^2}{2(1-p^2)}. \quad (2-6)$$

Для случая $p \ll 1$, когда $p \approx \sqrt{2(1-e_1)}$, имеем соответственно:

$$N_{\parallel} \approx 1 - 0,5\pi \sqrt{2(1-e_1)} \approx 1 - 0,5\pi p \quad (2-5a)$$

и

$$N_{\perp} \approx 0,25\pi \sqrt{2(1-e_1)} - (1-e_1) \approx 0,25\pi p - 0,5p^2. \quad (2-6a)$$

2. Вытянутый эллипсоид

Для вытянутых эллипсоидов

$$\frac{a}{b} = p > 1 \quad (2-7)$$

и эксцентриситет равен:

$$e_2 = \frac{\sqrt{a^2-b^2}}{a} = \frac{\sqrt{p^2-1}}{p}. \quad (2-8)$$

Коэффициент размагничивания при намагничивании параллельно оси вращения равен:

$$N_{\parallel} = \frac{1-e_2^2}{e_2^2} \left(\frac{1}{2e_2} \ln \frac{1+e_2}{1-e_2} - 1 \right) =$$

$$= \frac{1}{p^2-1} \left[\frac{p}{\sqrt{p^2-1}} \ln(p + \sqrt{p^2-1}) - 1 \right] \quad (2-9)$$

и при намагничивании перпендикулярно оси вращения

$$N_{\perp} = \frac{1}{2e_2^2} - \frac{1-e_2^2}{4e_2^3} \ln \frac{1+e_2}{1-e_2} =$$

$$= \frac{p^2}{2(p^2-1)} - \frac{p^2}{2(p^2-1)^{3/2}} \ln(p + \sqrt{p^2-1}). \quad (2-10)$$

Для случая $p \gg 1$, когда

$$p \approx \frac{1}{\sqrt{2(1-e_2)}},$$

имеем соответственно:

$$N_{\parallel} \approx (1-e_2) [-\ln(1-e_2) - 1,30685] \approx (\ln 2p - 1)/p^2; \quad (2-9a)$$

$$N_{\perp} \approx 0,5 \{1 - (1-e_2) [0,69315 - \ln(1-e_2)]\} \approx$$

$$\approx 0,5 [1 - (\ln 2p)/p^2]. \quad (2-10a)$$

По этим формулам вычислены значения N_{\parallel} и N_{\perp} в зависимости от отношения p (табл. 2-1). Полученные данные

Таблица 2-1
 Значения коэффициентов размагничивания эллипсоидов вращения с различным отношением осей p

Сжатый эллипсоид				Вытянутый эллипсоид			
p	e_1	N_{II}	N_{\perp}	p	e_2	N_{II}	N_{\perp}
0,001	0,999999 ₅	0,9984 ₃	0,000784 ₃	1	0	0,3333 ₃	0,3333 ₃
0,0015	0,999998 ₈	0,9976 ₅	0,001175 ₈	1,5	0,745356	0,2329 ₈	0,3835 ₁
0,002	0,999998 ₀	0,9968 ₇	0,001566 ₈	2	0,866025 ₅	0,1735 ₆	0,4132 ₂
0,003	0,999995 ₅	0,9953 ₀	0,002347 ₂	3	0,942809	0,1087 ₁	0,4456 ₅
0,004	0,999992	0,9937 ₅	0,003125 ₇	4	0,968246	0,07540 ₇	0,4623 ₀
0,005	0,999987	0,9922 ₀	0,003902 ₂	5	0,979796	0,05582 ₁	0,4720 ₉
0,006	0,999982	0,9906 ₅	0,004676 ₇	6	0,986013	0,04323 ₀	0,4783 ₉
0,007	0,999975 ₅	0,9891 ₀	0,005449 ₃	7	0,989743	0,03460 ₉	0,4827 ₀
0,008	0,999968	0,9875 ₆	0,006219 ₉	8	0,992157	0,02842 ₁	0,4857 ₉
0,009	0,999960	0,9860 ₂	0,006988 ₆	9	0,993808	0,02381 ₆	0,4880 ₉
0,01	0,999950	0,9844 ₉	0,007755 ₃	10	0,994987	0,02028 ₆	0,4898 ₆
0,015	0,999887 ₅	0,9767 ₇	0,01156 ₀	15	0,997775	0,01074 ₉	0,4946 ₃
0,02	0,999800	0,9693 ₇	0,01531 ₇	20	0,998749	0,006749 ₁	0,4966 ₃
0,03	0,999550	0,9546 ₃	0,02268 ₄	30	0,999444	0,003444 ₂	0,4982 ₈
0,04	0,999200	0,9402 ₂	0,02988 ₈	40	0,999687 ₅	0,002115 ₈	0,4989 ₄