

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ ИЗ ЗАКРИТИЧЕСКИХ МАГНИТОТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.Д. Константинов

г. Усть-Катав, филиал ЮУрГУ

В работе проанализированы различные методы контроля параметров постоянных магнитов. Предложенный способ определения магнитных характеристик постоянных магнитов из закритических магнитотвердых материалов отличается повышенной универсальностью и точностью.

Широкое использование постоянных магнитов в различных электротехнических устройствах и приборах, в частности, в электроаппаратах и электрических машинах, повышает эксплуатационную надежность, энергетические показатели устройств и устраняет необходимость наличия источника питания.

Постоянные магниты, вследствие сложной технологии изготовления и обработки изделий, имеют достаточно большой разброс магнитных характеристик даже для одного конкретного типа. Кроме того, существующие нормативные документы нормируют только три точки кривой размагничивания: остаточную индукцию B_r , коэрцитивную силу по индукции H_c и точку с максимальной магнитной энергией.

При массовом производстве изделий с постоянными магнитами входной контроль их параметров осуществляется с помощью достаточно сложных специальных приспособлений и измерительных приборов. В практике магнитных измерений известны различные способы определения параметров кривой размагничивания постоянных магнитов: магнитометрический, электродинамический и др., требующие дорогостоящей измерительной аппаратуры.

Известный способ определения характеристик постоянных магнитов, согласно которому измеряют три значения магнитного потока, требует для каждого типоразмера специальной магнитной системы [1]. При этом два измерения соответствуют граничным точкам участка основной кривой размагничивания, на котором лежит точка отхода рабочей линии возврата, а третье измерение определяет параметр точки, лежащей на линии возврата. По этим измеренным значениям судят о величине рабочего потока. Причем, для проведения контроля параметров постоянных магнитов необходимо применять различные магнитомягкие и немагнитные вкладыши и для каждого типоразмера должен быть отдельный набор вкладышей, что снижает универсальность метода. Кроме того, для испытания только одного магнита необходимо провести несколько измерений, что снижает производительность данного метода.

Наиболее близким к предлагаемому решению является способ определения остаточной индук-

ции и максимальной магнитной энергии, заключающийся в том, что испытуемый магнит цилиндрической формы с осевой намагниченностью помещается между двумя полюсными наконечниками в виде ферромагнитных дисков с наружным диаметром, большим диаметра магнита [2].

После измерения величины индукции в зазоре между дисками определяют остаточную индукцию

$$B_r = B_\delta \frac{S_d K_\sigma^2}{S_m}, \quad (1)$$

где B_δ – индукция в зазоре между дисками;

S_d – площадь дисков;

S_m – площадь поперечного сечения постоянного магнита;

K_σ – коэффициент, учитывающий поток рассеяния между дисками, не проходящий через зазор.

Рассмотренный способ также требует применения для различных магнитов полюсных наконечников специальных типоразмеров. Кроме того, точность указанного способа недостаточна, так как производится только одно измерение индукции в зазоре между полюсными наконечниками, а параметры кривой размагничивания вычисляются, причем в формулу входит достаточно неопределенный коэффициент K_σ , учитывающий поток рассеяния. Поэтому, важной является задача определения параметров постоянных магнитов сравнительно простыми методами, особенно при небольшой серии выпускаемых устройств.

Предложенный способ опытного определения параметров постоянных магнитов из закритических магнитотвердых материалов заключается в следующем:

- 1) магниты определенного типоразмера сортируют на группы по величине магнитной индукции в центре полюса;
- 2) из каждой группы отбирают $2n$ магнитов и собирают из них составной магнит;
- 3) измеряют индукцию в нейтральном сечении составного магнита в свободном состоянии, по которой с учетом известных величин зазора под измеритель магнитной индукции, размеров и количества испытуемых магнитов находят значение напряженности магнитного поля;
- 4) повторяют измерения n раз, при этом сни-

мают каждый раз по одному магниту с противоположных полюсов составного магнита;

5) кривая размагничивания определяется совокупностью n рабочих точек $B = f(H)$, характеризующихся измеренными значениями индукции в нейтральном сечении составного магнита и рассчитанными значениями напряженности поля [3].

На рис. 1 изображен составной магнит из $2n = 8$ испытываемых магнитов (поз. 1) с наружным диаметром d_m и осевой длиной h_m . В зазоре, с величиной δ , в нейтральном сечении составного магнита расположен датчик Холла (поз. 2).

Для доказательства справедливости предложенного способа проанализируем магнитные характеристики постоянных магнитов в свободном состоянии. С этой целью определим магнитную проводимость внешней среды $\lambda_{вн}$ для постоянного магнита в виде цилиндра с осевой намагниченностью.

При расчете $\lambda_{вн}$ приняты следующие допущения:

- 1) магнитные силовые линии перпендикулярны к поверхности раздела сред;
- 2) каждая магнитная силовая линия является частью окружности, центр которой лежит в нейтральном сечении магнита;
- 3) считаем, что основная проводимость внешней среды обусловлена магнитным потоком между боковыми поверхностями (рис. 2).

При линейном изменении намагничивающей силы по длине магнита проводимость между боковыми поверхностями

$$\lambda_{вн} = \mu_0 \frac{S_{cp}}{l_{cp}}, \quad (2)$$

где S_{cp} - средняя величина площади поперечного сечения магнитных трубок;

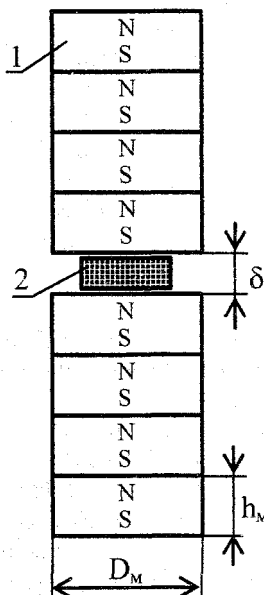


Рис. 1. Составной магнит с измерителем индукции в нейтральном сечении

l_{cp} - средняя длина силовой линии;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м - магнитная постоянная.

Принятые допущения приводят к рассмотрению элементарной трубки с поверхностью эллипсоида вращения, имеющего радиус в поперечном сечении

$$R = \frac{d_m}{2} + x \cdot \sin \alpha, \quad (3)$$

где x - текущее значение размера по длине магнита.

Тогда площадь поперечного сечения магнитных трубок (площадь боковой поверхности усеченного конуса) при разном угле α наклона образующей конуса

$$S(\alpha) = 2\pi \int_0^{l_m/2} \left(\frac{d_m}{2} + x \cdot \sin \alpha \right) dx = \frac{\pi}{2} (l_m d_m + l_m^2 \sin^2 \alpha). \quad (4)$$

Среднее значение площади поперечного сечения силовых трубок

$$S_{cp} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} S(\alpha) d\alpha = \pi \frac{l_m d_m}{2} + l_m^2. \quad (5)$$

Средняя длина силовых линий

$$l_{cp} = \frac{2}{l_m} \int_0^{l_m/2} \pi x dx = \frac{\pi}{4} l_m. \quad (6)$$

Магнитная проводимость между боковыми поверхностями магнита конечной длины

$$\lambda_{вн} = \mu_0 \frac{S_{cp}}{l_{cp}} = \mu_0 \left(\frac{d_m}{8} + \frac{4l_m}{\pi} \right). \quad (7)$$

Тогда внешняя проводимость магнита бесконечной длины $\lambda_{вн} \rightarrow \infty$. Таким образом, для магнита бесконечной длины магнитное сопротивление внешней среды только для боковых поверхностей $R_{вн} = 0$ и постоянный магнит находится в режиме короткого замыкания.

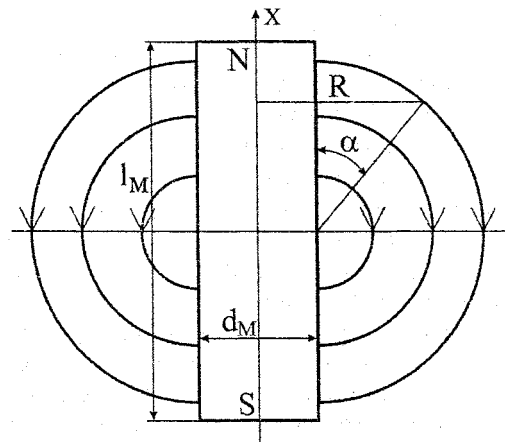


Рис. 2. Магнитные силовые линии с боковых поверхностей магнита

Согласно схеме замещения для магнита бесконечной длины (рис. 3) магнитный поток определяется

$$\Phi = \frac{F_M}{R_M} = \mu_m H_c S_M = B_r S_M, \quad (8)$$

где $F_M = H_c l_M$ – намагничивающая сила магнита;

$$R_M = \frac{l_M}{\mu_m S_M} \text{ – внутреннее магнитное сопротивление постоянного магнита. Для закритических магнитотвердых материалов проницаемость воздуха } \mu_m = \mu_0;$$

S_M – площадь поперечного сечения магнита.

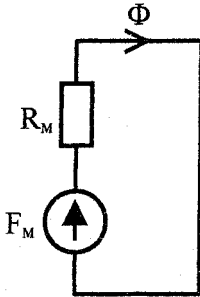


Рис. 3. Схема замещения магнита при коротком замыкании

Для магнита конечной длины введем коэффициент K_L , тогда магнитный поток будет

$$\Phi = K_L B_r S_M, \quad (9)$$

где K_L – коэффициент, учитывающий индуктивность соленоида конечной длины.

Физическим аналогом постоянного магнита цилиндрической формы намагниченного аксиально, является катушка с током. Поэтому для определения коэффициента K_L заменим постоянный магнит цилиндрическим токовым слоем с равными геометрическими размерами $l_k = l_m$, $d_k = d_m$ и намагничивающей силой $IW = H_c l_M$. Здесь I – ток в обмотке соленоида с числом витков W (рис. 4).

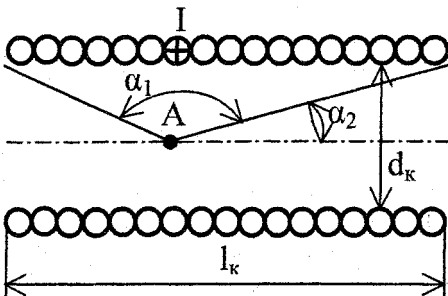


Рис. 4. Определение индукции для цилиндрического токового слоя

Известно, что значение индукции в произвольной точке A , лежащей на оси соленоида конечной длины

$$B_A = 0,5 \mu_0 NI (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1), \quad (10)$$

где $N = W/l_k$ – число витков соленоида на единицу длины.

Тогда для цилиндрической катушки с током максимальное значение индукции в середине катушки

$$B_{\max} = \mu_0 NI \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{d_M}{l_M}\right)^2}}. \quad (11)$$

Для бесконечно длинной катушки $l_k \rightarrow \infty$,

$$B'_{\max} = \mu_0 NI. \quad (12)$$

Сравнивая уравнения (8), (9) и (11), (12) нетрудно заметить, что коэффициент, используемый при расчете индуктивности соленоида конечной длины равен

$$K_L = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{d_M}{l_M}\right)^2}}. \quad (13)$$

Зависимость $K_L = f\left(\frac{d_M}{l_M}\right)$ представлена на

рис. 5.

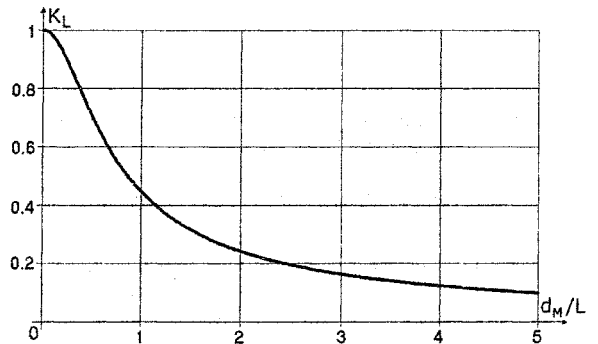


Рис. 5. Определение коэффициента K_L для магнита цилиндрической формы

Для испытуемых магнитов прямоугольной формы, а следовательно, для катушек с прямоугольным витком со сторонами a и b , значение коэффициента K_L имеет достаточно сложное выражение. В первом приближении можно воспользоваться уравнением для цилиндрической катушки, если принять равенство площадей сечений цилиндрической и прямоугольной катушек

$$S_{\text{пр}} = S_{\text{цил}}; \quad ab = \frac{\pi d_M^2}{4}, \quad \text{откуда } d_M = \sqrt{\frac{4ab}{\pi}}.$$

Тогда

$$K'_L = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{4ab}{\pi l_M^2}}}. \quad (14)$$

Последняя зависимость $K'_L = f\left(\frac{\sqrt{S_M}}{l_M}\right)$ показана на рис. 6.

Схема замещения для предложенного способа определения параметров постоянных магнитов представлена на рис. 7.

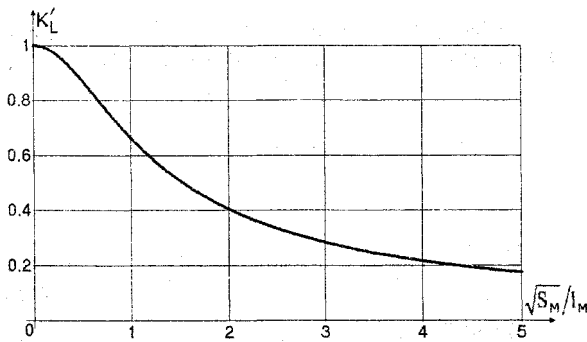


Рис. 6. Определение коэффициента K_L для магнитов прямоугольной формы

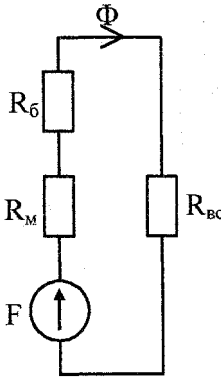


Рис. 7. Схема замещения для измерения параметров магнитов

Здесь $F_M = H_c h_m \cdot 2n$ - намагничивающая сила магнита;

$R_{вс}$ - магнитное сопротивление внешней среды;

R_M - внутреннее магнитное сопротивление постоянного магнита;

$R_\delta = \frac{\delta}{\mu_0 S_\delta}$ - магнитное сопротивление воздушного зазора для размещения датчика Холла. При измерении индукции в нейтральном сечении составного магнита веберметром с измерительной обмоткой $\delta = 0$ и $R_\delta = 0$.

Для определения величины проводимости внешней среды воспользуемся представлением составного магнита в виде эквивалентного ему соленоида, что допустимо для закритических магнитотвердых материалов.

При этом, магнитный поток в нейтральном сечении магнита, исходя из схемы замещения

$$\Phi = \frac{F_M}{R_M + R_\delta + R_{вс}} = \frac{H_c h_m 2n}{R_M + R_\delta + R_{вс}} \quad (15)$$

С другой стороны,

$$\Phi = K_L B_r S_M \quad (16)$$

Приравняв последние два уравнения, получим

$$R_{вс} = \frac{H_c h_m 2n}{K_L B_r S_M} - R_\delta - R_M \quad (17)$$

Так как для закритических магнитотвердых материалов $B_r = \mu_0 H_c$, то после несложных преобразований выражение (17) можно привести к виду

$$R_{вс} = \frac{h_m 2n}{K_L \mu_0 S_M} \left(1 - K_L - \frac{\delta}{h_m 2n} K_L \right) \quad (18)$$

Поскольку для произвольной точки кривой размагничивания, согласно схеме замещения, зависимость $H = f(B)$ определяется уравнением

$$H = BR_{вс} \frac{S_M}{h_m 2n} \quad (19)$$

то окончательно получаем

$$H = B \left(\frac{1}{\mu_0 K_L} - \frac{1}{\mu_0} - \frac{\delta}{\mu_0 h_m 2n} \right) \quad (20)$$

Последнее уравнение показывает, что соотношение между H и B для закритических магнитотвердых материалов зависит только от величины воздушного зазора, длины составных магнита и однозначно при постоянстве этих величин. Таким образом, зная только, что магниты одного типоразмера изготовлены из закритического магнитотвердого материала, определение параметров кривой размагничивания, характеризующихся рабочими точками со значениями B и H по предлагаемому способу проводят в следующей последовательности.

Испытуемые магниты каждого типоразмера делят на группы по индукции в центре полюса. Внутри каждой группы отбирают $2n$ магнитов и собирают из них составной магнит, устанавливая их соосно-согласно. Измеряют индукцию в нейтральном сечении составного магнита в свободном состоянии n раз, причем каждый раз снимают по одному магниту с северного и южного полюсов. Затем для каждого измеренного значения индукции B по формуле (20) находят соответствующее значение напряженности поля H , получая при этом два параметра рабочей точки на кривой размагничивания.

Совокупность n рабочих точек дает искомую кривую размагничивания, которая является магнитной характеристикой материала испытуемых постоянных магнитов.

Применяя предложенный метод, была исследована группа из $2n = 8$ магнитов из закритического сплава цериевый мишметалл-кобальт. Магниты выполнены в виде цилиндров диаметром $d_m = 6$ мм и высотой $h_m = 3$ мм, намагниченных в осевом направлении. Индукция B в нейтральном сечении составного магнита измерялась миллитесламетром Ф4354 с датчиком Холла. Результаты измерения индукции и рассчитанные по ним значения H с учетом зазора под датчик $\delta = 1$ мм представлены в табл. 1 и на рис. 8.

Для прямоугольных магнитов марки 2БА1 с размерами $a \times b \times h_m = 10 \times 20 \times 5$ мм, результаты испытаний даны на рис. 9.

Использование указанного способа позволит контролировать магнитные свойства постоянных магнитов без применения энергоемких электро-

Таблица 1

$2n$	8	6	4	2
$B, \text{Тл}$	0,44	0,42	0,39	0,32
$H, \text{кА/м}$	40	55	78	125

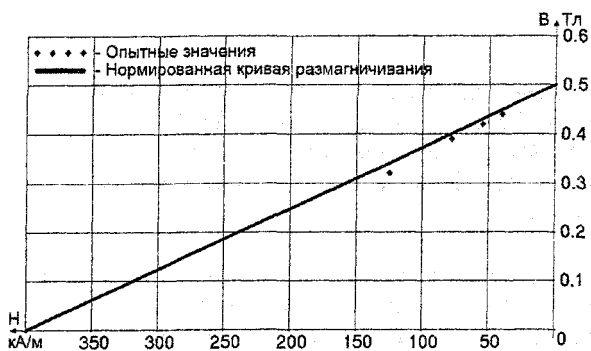


Рис. 8. Сравнительная оценка опытных данных с кривой размагничивания для магнитов цилиндрической формы

магнитов и полюсных наконечников специальной формы, пользуясь только простыми универсальными измерительными приборами типа миллитесламетров или милливеберметров.

Предложенный способ отличается повышенной универсальностью и точностью определения параметров постоянных магнитов.

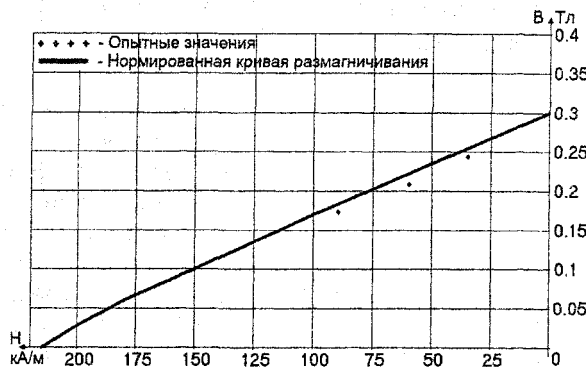


Рис. 9. Сравнительная оценка опытных данных с кривой размагничивания для магнитов прямоугольной формы

Литература

1. Авторское свидетельство СССР № 256869, Кл. G 01 R 33/16, 1969.
2. «Заводская лаборатория», 1977, №8.
3. Авторское свидетельство СССР № 1149195, Кл. G 01 R 33/14, 1982.

Константинов Владимир Дмитриевич в 1972 г. окончил Челябинский политехнический институт. С 1999 г. работает в филиале ЮУрГУ в г. Усть-Катаве. Научные интересы связаны с разработкой вентильных двигателей постоянного тока.