KiT#78(1).qxd 1/18/2008 3:13 PM Page 38

Аморфные и нанокристаллические сплавы для измерительных преобразователей

Юрий СТАРОДУБЦЕВ
Владимир БЕЛОЗЕРОВ
yunstar@mail.ru

Использование магнитомягких аморфных и нанокристаллических сплавов, обладающих высокой магнитной проницаемостью, позволяет повысить чувствительность измерительных преобразователей и точность преобразования измеряемых величин.

Измерительный преобразователь представляет техническое средство с нормативными метрологическими характеристиками, служащее для преобразования измеряемой величины в другую величину или измерительный сигнал, удобный для обработки, хранения, дальнейших преобразований, индикации или передачи. Преобразователь, на который непосредственно воздействует измеряемая физическая величина, является первичным измерительным преобразователем, а конструктивно обособленный первичный преобразователь называют датчиком. Датчик выполняет роль своеобразного «органа чувств», который должен обладать высокой чувствительностью. Повысить чувствительность преобразователей и точность преобразования измеряемых величин позволяет использование магнитомягких материалов, обладающих высокой магнитной проницаемостью.

Сразу необходимо отметить, что магнитная проницаемость ферромагнитных материалов зависит от напряженности магнитного поля H (рис. 1). В связи с этим определим основные типы магнитной проницаемости, которые наиболее часто приводят в справочных данных. В международной системе единиц измерения СИ используют относительную магнитную проницаемость:

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H},$$

где B — магнитная индукция в теслах (Тл), H — напряженность магнитного поля в амперах на метр (А/м), $\mu_0 = 4\pi\times10^{-7}$ — магнитная постоянная в генри на метр (Гн/м). При этом относительная магнитная проницаемость характеризует возрастание магнитной индукции с увеличением напряженности магнитного поля. В большинстве случаев величины B и H берутся по начальной (статической) кривой намагничивания. В зависимости от значения магнитного поля выделяют различные типы магнитной проницаемости. Начальную относительную магнитную проницаемость $\mu_н$ находят экстраполяцией зависимости магнитной проницаемости $\mu = \mu(H)$ к нулю:

$$\mu_н = \frac{1}{\mu_0}\lim_{H\to 0}\frac{B}{H}.$$

На практике вместо начальной относительной магнитной проницаемости указывают близкое к ней значение относительной магнитной проницаемости, измеренное в достаточно слабом магнитном поле. Например, $\mu_{0,08}$ обозначает относительную магнитную проницаемость, измеренную при напряженности магнитного поля 0,08 А/м. Наибольшее значение относительной магнитной проницаемости на кривой намагничивания называют максимальной относительной магнитной проницаемостью μ_{max}.

Дифференциальная относительная магнитная проницаемость μ_d определяется соотношением:

$$\mu_d = \frac{1}{\mu_0}\frac{dB}{dH},$$

то есть она является производной функции $B = B(H)$ в некоторой точке H, нормированной на магнитную постоянную. Производная dB/dH численно равна тангенсу угла наклона касательной в точке на кривой зависимости $B = B(H)$. Из определения следует уравнение:

$$\mu_d = \frac{d(\mu H)}{dH} = \mu + H\frac{d\mu}{dH},$$

которое связывает дифференциальную относительную магнитную проницаемость μ_d и относительную магнитную проницаемость μ. Последнюю величину иногда называют нормальной относительной магнитной проницаемостью, чтобы подчеркнуть ее отличие от дифференциальной проницаемости. Диффе-

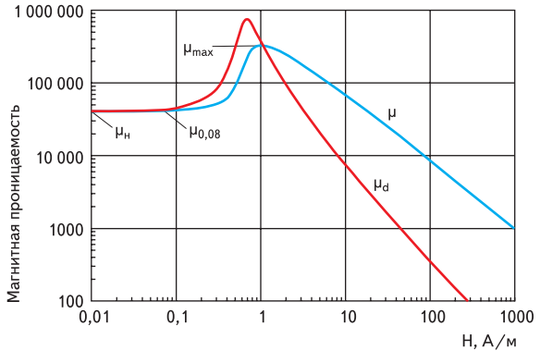


Рис. 1. Зависимость нормальной μ и дифференциальной μ_d относительной магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля H по начальной кривой намагничивания. $\mu_н$ — начальная относительная магнитная проницаемость; μ_{max} — максимальная относительная магнитная проницаемость; $\mu_{0,08}$ — относительная магнитная проницаемость при напряженности магнитного поля H = 0,08 А/м.

ренциальная магнитная проницаемость достигает наибольшего значения в более слабом магнитном поле, и ее максимальное значение всегда больше μ_{max}. Кривые $\mu = \mu(H)$ и $\mu_d = \mu_d(H)$ пересекаются в точке $\mu = \mu_d = \mu_{max}$, поскольку здесь $\partial\mu/\partial H = 0$.

Синусоидальные величины магнитной индукции и напряженности магнитного поля можно представить в комплексной форме, которой соответствует понятие комплексной магнитной проницаемости:

$$\overline{\mu} = \frac{B_m e^{j(\omega t+\psi_B)}}{\mu_0 H_m e^{j(\omega t+\psi_H)}} = \frac{B_m}{\mu_0 H_m} e^{-j\psi}$$

$$= \frac{B_m}{\mu_0 H_m}\cos\psi - j\frac{B_m}{\mu_0 H_m}\sin\psi = \mu_1 - j\mu_2,$$

где $\psi = \psi_H - \psi_B$ — угол между векторами напряженности магнитного поля и магнитной индукции, который также называют углом потерь, поскольку тангенс этого угла равен отношению магнитных потерь и обратимой части удельной полной намагничивающей мощности. Полная амплитудная магнитная проницаемость или модуль комплексной магнитной проницаемости μ равен отношению:

$$\mu = \frac{B_m}{\mu_0 H_m}.$$

Магнитная проницаемость зависит от частоты переменного магнитного поля. Причем ее снижение с ростом частоты происходит наиболее значительно в материале и при напряженности магнитного поля, где имеется высокая магнитная проницаемость (рис. 2). В металлических ферромагнетиках это объясняется, главным образом, снижением глубины проникновения магнитного поля в материал с высокой магнитной проницаемостью

$$\delta_H = \sqrt{\frac{\rho}{\pi\mu\mu_0 f}},$$

то есть усилением скин-эффекта. В ферритах, где скин-эффект практически не выражен, снижение магнитной проницаемости с частотой обусловлено затуханием колебания доменных границ.

Из теории следует [1], что коэрцитивная сила $H_c \sim \sqrt{K}$, а начальная магнитная проницаемость $\mu_н \sim B_s/\sqrt{K}$, где B_s — магнитная индукция насыщения, K — константа магнитной анизотропии. Очевидным следствием является также соотношение $\mu_н \sim B_s/H_c$. Если учесть, что магнитная индукция насыщения и температура Кюри T_c связаны законом Блоха:

$$B_s = B_{s0}\left[1 - \alpha(T/T_c)^{\frac{3}{2}}\right],$$

то материал с наивысшей магнитной проницаемостью должен иметь низкие значения магнитной индукции насыщения B_s, температуры Кюри T_c и константы магнитной анизотропии K.

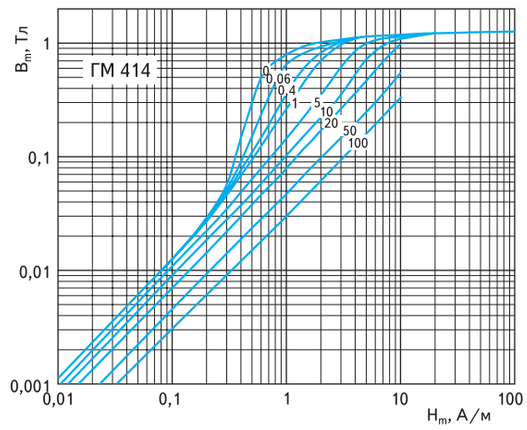


Рис. 2. Типичные динамические кривые намагничивания магнитопровода ГМ 414. Цифрами у кривых указана частота f в килогерцах. Кривая f = 0 соответствует основной кривой намагничивания

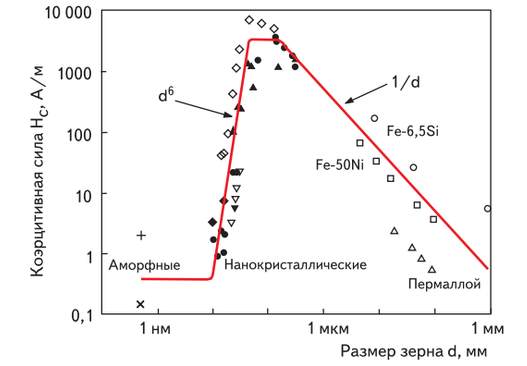


Рис. 3. Зависимость коэрцитивной силы H_c от размера зерна d в магнитомягких материалах

Магнитная анизотропия в материале возникает вследствие кристаллографической анизотропии, под действием механических напряжений, а также в результате направленного атомного упорядочения в процессе охлаждения в магнитном поле. Подавить влияние кристаллографической анизотропии можно за счет уменьшения размера зерна. На рис. 3 представлена зависимость коэрцитивной силы H_c от размера зерна d в поликристаллических магнитомягких материалах. С уменьшением размера зерна примерно до 100 нм коэрцитивная сила растет пропорционально величине $1/d$ вследствие увеличения плотности дефектов (объемной доли межзеренных границ). При этом макроскопическая магнитная анизотропия материала совпадает с локальной магнитной анизотропией отдельных кристаллитов. Если размер зерна меньше некоторой длины, а именно длины магнитной обменной корреляции, то происходит ослабление макроскопической магнитной анизотропии вследствие межзеренного взаимодействия. При этом коэрцитивная сила снижается с уменьшением размера зерна пропорционально d^6 (модель случайной магнитной анизотропии). Этот механизм ослабления кристаллографической магнитной анизотропии действует также в аморфных сплавах, в которых имеется ближний атомный порядок — нанокластеры размером менее 1 нм.

Таблица. Типичные магнитные свойства магнитопроводов ГАММАМЕТ с высокой начальной магнитной проницаемостью

Марка	B_s, Тл	B_r/B_s	H_c, А/м	$\mu_{0,08}$	μ_{max}	P_s, Вт/кг B_m = 0,2 Тл, 20 кГц	$\lambda_s \times 10^6$	T_C, °С
ГМ 414	1,17	0,6	1,0	60 000	300 000	4,5	1,5	600
ГМ 501	0,43	0,6	0,15	150 000	600 000	3,6	<0,2	150

KiT#78(1).qxd 1/18/2008 3:13 PM Page 40

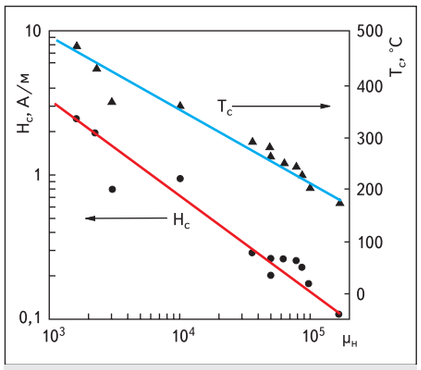


Рис. 4. Коэрцитивная сила H_c и температура Кюри T_c в зависимости от начальной относительной магнитной проницаемости $\mu_н$ в аморфных сплавах на основе кобальта с магнитострикцией насыщения $\lambda_s \approx 0$

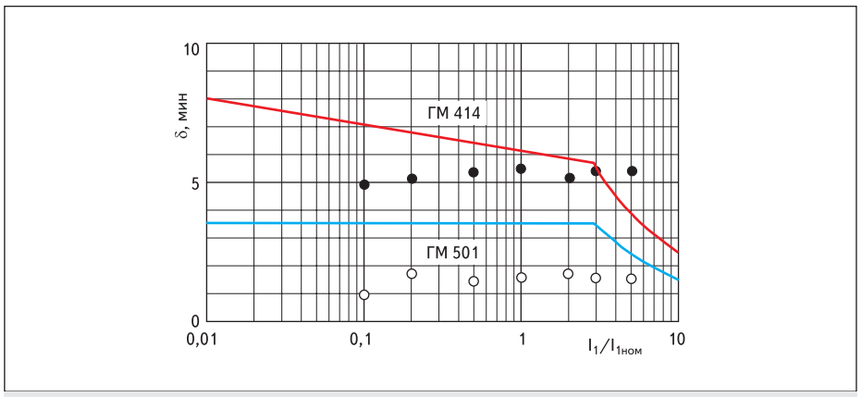


Рис. 5. Расчетные (сплошные линии) и измеренные (точки) угловые погрешности трансформатора тока δ в минутах для электронного счетчика электрической энергии. Номинальные параметры: $I_{1ном}$ = 5 А, $z_н$ = 50 Ом, cos φ2 = 1, w_1 = 1, w_2 = 3000, I1/$I_{1ном}$ = 0,01... 10, магнитопроводы ОЛ20/32-10 ГМ 414 — 2 класс и ГМ 501 — 1 класс

Минимальную магнитную анизотропию ~$\lambda_s\sigma$, обусловленную напряжением σ, обеспечивает константа магнитострикции λ_s, значение которой близко к нулю. Таким образом, все магнитные материалы с высокой магнитной проницаемостью должны иметь практически нулевую константу магнитострикции.

Процесс направленного атомного упорядочения обычно ослабляют быстрым охлаждением материала ниже температуры Кюри. Однако полностью его можно подавить только тогда, когда температура Кюри материала будет ниже температуры диффузионной активности атомов, а именно ниже примерно 180 °С.

На рис. 4 представлены зависимости коэрцитивной силы H_c и температуры Кюри T_c от начальной магнитной проницаемости $\mu_н$ в аморфных сплавах на основе кобальта с близкой к нулю магнитострикцией насыщения, которые иллюстрируют рассмотренные выше закономерности. Типичные магнитные свойства аморфного сплава ГМ 501 с наивысшей начальной магнитной проницаемости представлены в таблице. Здесь же приведены типичные свойства нанокристаллического сплава ГМ 414 с высокой магнитной проницаемостью.

Приведем некоторые примеры использования магнитопроводов с высокой магнитной проницаемостью в измерительных преобразователях. Трансформатор тока предназначен для передачи сигнала измерительной информации приборам измерения, защиты, автоматики, сигнализации и управления в электрических цепях переменного тока. В трансформаторе тока при нормальных условиях применения вторичный ток практически пропорционален первичному току и при правильном включении сдвинут относительно него по фазе на угол, близкий к нулю. Если воспользоваться эквивалентной схемой трансформатора, то для комплексных величин отношение первичного тока $\dot{I}_1$ к приведенному вторичному току $\dot{I}'_2$ можно представить в виде соотношения [2]:

$$\frac{\dot{I}_1}{I'_2} = 1 + \frac{Z'_2 + Z'_н}{Z_0},$$

где Z'_2 и $Z'_н$ — приведенные комплексные сопротивления вторичной обмотки и нагрузки соответственно, а:

$$Z_0 = \frac{\dot{U}_0}{\dot{I}_0} = \frac{j\omega w_1 \dot{\Phi}_0}{\dot{H} l_{ср} / w_1} =$$

$$= j\omega w_1^2 \frac{\dot{B}S}{\dot{H} l_{ср}} = j\omega w_1^2 \bar{\mu}\mu_0 \frac{S}{l_{ср}}$$

представляет комплексное сопротивление первичной обмотки трансформатора, обусловленное основным магнитным потоком $\dot{\Phi}_0$. Из полученного соотношения следует, что необходимым условием пропорциональности первичного и вторичного токов является низкое комплексное сопротивление вторичной обмотки Z'_2 и нагрузки $Z'_н$, то есть трансформатор тока должен работать в режиме короткого замыкания, а также высокое сопротивление Z_0, то есть магнитопровод должен иметь высокую магнитную проницаемость $\bar{\mu}$, большую площадь поперечного сечения S и низкую среднюю длину магнитной линии $l_{ср}$.

В приближении малых углов δ между током в первичной и вторичной цепях токовую f_i и угловую δ погрешности трансформатора можно представить в виде:

$$f_i = -\frac{F_{02}}{F_1}\sin(\alpha_2 + \psi),\ \delta = \frac{F_{02}}{F_1}\cos(\alpha_2 + \psi),$$

где магнитодвижущие силы:

$$F_{02} = H l_{ср} = \frac{B_m l_{ср}}{\mu\mu_0\sqrt{2}},\ F_1 = I_1 w_1,$$

а α_2 — угол между вторичным током и ЭДС вторичной обмотки, обусловленной основным магнитным потоком. Таким образом, погрешность преобразования трансформатора тока напрямую связана с магнитной проницаемостью μ в рабочей точке B_m. Чем выше магнитная проницаемость, тем меньше погрешность измерения. В трансформаторе тока с магнитопроводом из анизотропной электротехнической стали погрешность резко возрастает при небольших токах, поскольку в этой области начальная магнитная проницаемость в электротехнической стали равна примерно 1000. В аморфном сплаве ГМ 501 гарантируется значение начальной относительной магнитной проницаемости не менее 100 000 (в нанокристаллическом сплаве ГМ 414 — не менее 45 000) [3], что на два порядка выше, чем в электротехнической стали. Таким образом, использование аморфных и нанокристаллических сплавов с высокой начальной магнитной проницаемостью позволяет повысить класс измерительных трансформаторов тока, в частности, резко повысить точность измерений слабых токов.

На рис. 5 представлены результаты расчета (сплошные линии) и измерения (точки) угловой погрешности δ трансформатора тока, используемого в электронном счетчике электрической энергии. Номинальные параметры: $I_{1ном}$ = 5 А, $z_н$ = 50 Ом, cos φ_2 = 1, w_1 = 1, w_2 = 3000, $I_1/I_{1ном}$ = 0,01...10, магнитопровод ОЛ20/32-10 ГМ 414 — 2 класс или ГМ 501 — 1 класс. Диаметр провода вторичной обмотки d_2 = 0,14 мм. Из рис. 5 следует, что погрешности трансформатора тока с магнитопроводом ГМ 501 примерно в два раза ниже, чем с магнитопроводом ГМ 414. Это сопоставимо с магнитной проницаемостью указанных типов магнитопроводов. Измеренные погрешности ниже рассчитанных значений, поскольку расчет проводился с запасом.

Устройство защитного отключения представляет устройство защиты человека от поражения электрическим током, а также защиты от возгораний и пожаров, возникающих на объектах вследствие повреждений изоляции, неисправностей электропроводки и электрооборудования. Устройство защитного отключения, управляемое дифференциаль-

KiT#78(1).qxd 1/18/2008 3:13 PM Page 41

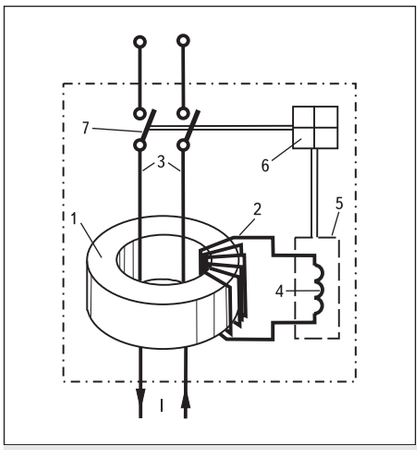


Рис. 6. Схематическое изображение устройства защитного отключения, управляемого дифференциальным током:
1 — дифференциальный трансформатор,
2 — вторичная обмотка трансформатора,
3 — первичная обмотка трансформатора,
4 — обмотка реле,
5 — магнитоэлектрическое реле,
6 — механическая передающая система,
7 — коммутационные контакты

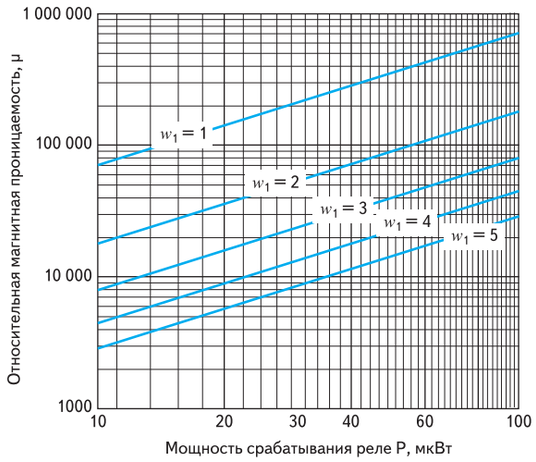


Рис. 7. Относительная магнитная проницаемость μ материала магнитопровода, имеющего типоразмер К20×12×20, в зависимости от мощности срабатывания реле Р устройства защитного отключения для различного числа витков первичной обмотки w_1 при токе утечки ΔI_1 = 30 мА и частоте 50 Гц

ным (разностным) током, схематически изображено на рис. 6. Оно состоит из дифференциального трансформатора (1), на вторичную обмотку (2) которого нагружена обмотка (4) магнитоэлектрического реле (5). Первичная цепь трансформатора (3) состоит из двух симметричных обмоток, включенных так, что ток в них протекает навстречу друг другу. Пока значение тока в симметричных обмотках одинаково, электродвижущая сила во вторичной обмотке не наводится. При возникновении утечки тока, вызванной пробоем изоляции на корпус или непреднамеренном прикосновении человека к открытым проводящим частям, нарушается равенство токов в обмотках и под влиянием разности этих токов ΔI_1 во вторичной обмотке наводится электродвижущая сила, обеспечивающая срабатывание реле. Исполнительный механизм через механическую передающую систему (6) воздействует на коммутационные контакты (7), разрывая контролируемую линию.

Из расчета дифференциального трансформатора можно найти соотношение, связывающее относительную магнитную проницаемость магнитопровода μ с мощностью срабатывания реле P, током утечки ΔI_1, числом витков первичной обмотки w_1 и размерами магнитопровода:

$$\mu = \frac{B_m}{\mu_0 H_m} = \frac{\sqrt{2}P}{\pi f \mu_0 (\Delta I_1 w_1)^2}\left(\frac{l_{ср}}{S}\right).$$

Из соотношения следует, что к магнитной проницаемости материала магнитопровода будут предъявлены менее жесткие требования, если при заданной частоте f и заданном токе утечки ΔI_1 увеличить число витков первичной обмотки w_1. Магнитопровод должен иметь минимально возможную среднюю длину магнитного линии $l_{ср}$ при выбранном сечении S, то есть форма магнитопровода должна быть стаканчатой — минимальный диаметр при большой высоте магнитопровода. Ухудшение качества реле (увеличение мощности срабатывания P) приводит к повышению требований к магнитной проницаемости материала магнитопровода. На рис. 7 представлена относительная магнитная проницаемость материала, из которого выполнен магнитопровод типоразмера К20×12×20, в зависимости от мощности срабатывания реле P при различном числе витков первичной обмотки w_1 для тока утечки ΔI_1 = 30 мА при частоте f = 50 Гц. Типичные реле имеют мощность срабатывания около 50 мкВт. Из рис. 7 следует, что при одном первичном витке магнитопровод устройства защитного отключения должен иметь относительную магнитную проницаемость в рабочей точке не менее 300 000 при частоте 50 Гц.

Феррозонд представляет первичный магнитомодуляционный преобразователь, используемый в качестве магнитометра для преобразования магнитной индукции или ее градиента в электрический сигнал. Действие феррозонда основано на модуляции магнитного состояния ферромагнитного сердечника с помощью вспомогательного переменного магнитного поля [5]. Феррозонд иногда называют ферромодуляционным преобразователем, подчеркивая его принадлежность к магнитомодуляционным преобразователям (магнитным модуляторам). Феррозонд состоит из магнитопровода, обмотки возбуждения w_E, питаемой переменным синусоидальным током частотой 1–300 кГц, и измерительной обмоткой $w_и$. В дифференциальном феррозонде (рис. 8) обмотка возбуждения наносится так, чтобы создавать одинаковые встречные переменные магнитные потоки в двух половинках магнитопровода. В отсутствие измеряемого постоянного (или медленно изменяющегося по сравнению с частотой возбуждения) магнитного поля ЭДС на измерительной обмотке близка к нулю. В постоянном магнитном поле H_0 в ЭДС возникают четные гармоники, амплитуда которых пропорциональна проекции вектора напряженности измеряемого магнитного поля на магнитную ось сердечника H_0 и скорости изменения дифференциальной магнитной проницаемости $d\mu_d/dt$:

$$e = -2\mu_0 w_и S H_0 \frac{d\mu_d}{dt}.$$

Таким образом, измерительный сигнал феррозонда появляется при изменении во времени магнитной проницаемости магнитопровода, при этом кривая намагничивания

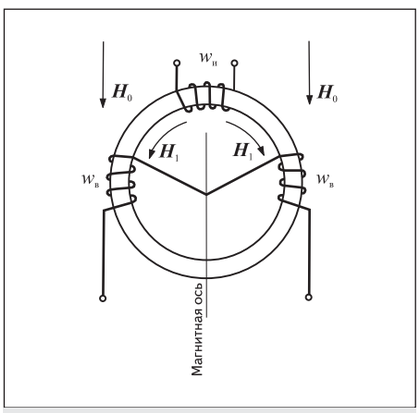


Рис. 8. Схематическое изображение дифференциального кольцевого феррозонда

KiT#78(1).qxd 1/18/2008 3:13 PM Page 42

должна иметь нелинейный характер. Чувствительность феррозонда будет наибольшей, если колебания магнитного поля происходят в области, где материал магнитопровода имеет высокую дифференциальную магнитную проницаемость.

Электромагнитная система защиты товара от краж состоит из антикражных ворот и магнитной этикетки, которая наносится на товар. В двух стойках ворот установлены антенна, которая излучает синусоидальное магнитное поле частотой 10–1000 Гц, и приемник. Этикетка представляет полоску аморфного сплава с высокой магнитной проницаемостью длиной 40–80 мм и шириной около 1 мм. Полоска вдоль своей длины разделена несколькими короткими магнитотвердыми участками с коэрцитивной силой 1,5–8 кА/м, которые служат включателями-выключателями постоянного магнитного поля для более длинных магнитомягких участков. Магнитотвердое состояние обычно получают путем локальной кристаллизации аморфной ленты. В активированном состоянии этикетка размагничена. Поэтому в слабом переменном магнитном поле излучателя магнитомягкие участки перемагничиваются, генерируя дополнительные импульсы, которые искажают синусоидальный сигнал. Несинусоидальное напряжение на приемнике активирует сигнал тревоги. Дезактивация этикетки производится в сильном внешнем постоянном магнитном поле. После его отключения магнитотвердые участки этикетки сохраняют остаточную намагниченность и намагничивают магнитомягкий материал до насыщения. В этом состоянии переменное магнитное поле не вызывает перемагничивания этикетки и не искажает синусоидальный сигнал на приемнике. Преимущество электромагнитной системы защиты заключается в возможности многократного использования этикеток, низкой стоимости, а недостаток связан с ненадежностью, обусловленной, в частности, зависимостью обнаружения метки от ориентации постоянного магнитного поля.

Литература

1. Стародубцев Ю. Н., Белозеров В. Я. Магнитные свойства аморфных и нанокристаллических сплавов. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2002.
2. Стародубцев Ю. Н. Теория и расчет трансформаторов малой мощности. М.: РадиоСофт, 2005.
3. ТУ 1261-030-12287107-2007 «Магнитопроводы ленточные кольцевые ГАММАМЕТ в защитных контейнерах».
4. Стародубцев Ю. Н., Белозеров В. Я., Зеленин В. А. Расчет условий применения аморфных и нанокристаллических сплавов в устройствах защитного отключения // Сталь. 2001. № 5.
5. Афанасьев Ю. В. Феррозондовые приборы. Л.: Энергоатомиздат, 1986.