

УДК 620.179.14

**МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ВОЗМОЖНОСТИ
БЕЗЭЛЕКТРОННОЙ МАГНИТНОЙ ИНДИКАЦИИ
ТОЛЩИНЫ ЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ ТРУБОПРОВОДОВ**

С.Г. Сандомирский, С.А. Ревяко

*Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,
Минск, Беларусь*

Разработаны методические основы безэлектронной магнитной индикации толщины немагнитного покрытия на ферромагнитном основании. Показано, что диапазон измеряемых толщин составляет половину длины используемых стержневых постоянных магнитов, а чувствительность – 4...10 угловых градусов на миллиметр. Создан портативный автономный магнитный толщиномер защитного покрытия трубопроводов, позволяющий проводить измерения в жестких климатических условиях и под водой.

Введение. Продолжительность надежной эксплуатации магистральных трубопроводов во многом определяется толщиной защитного немагнитного покрытия, нанесенного на ферромагнитное основание трубы. Нарушения целостности трубопровода возможны вследствие недостаточной толщины нанесенного защитного покрытия, его повреждения или отслоения при прокладке, эксплуатации или ремонте.

При 100 %-ной влажности (под водой), при пониженных или повышенных температурах целесообразно отказаться от использования средств измерения и индикации толщины покрытия, подверженных влиянию окружающей среды – датчиков Холла и феррозондов, предполагающих применение электронных средств получения и обработки сигналов. Средством измерения в этих условиях может быть магнитная стрелка, а индицируемым параметром – угол ее поворота в суперпозиции магнитного поля, связанного с расстоянием до поверхности трубы, и поля, создаваемого в точке наблюдения дополнительным источником.

Постановка задачи. Цель работы – разработка научных основ безэлектронной магнитной индикации толщины немагнитного покрытия на

ферромагнитном основании и принципов создания портативных автономных магнитных толщиномеров защитного покрытия трубопроводов.

Методические основы использования угловых измерений в магнитном неразрушающем контроле разработаны в [1]. Получены аналитические выражения для напряженности и направления суперпозиции поля контролируемого объекта и поля дополнительного источника:

$$c = \sqrt{a^2 + 1 + 2a \cos \theta}, \quad (1)$$

$$\phi = \arccos \frac{1 + a \cos \theta}{c}, \quad (2)$$

где $a = A/B$; $c = C/B$ (A, B, C – модули соответственно векторов \vec{A} , \vec{B} , \vec{C}); векторы \vec{A} и \vec{B} – составляющие магнитного поля контролируемого объекта и поля дополнительного источника в точке наблюдения; \vec{C} – вектор суммарного магнитного поля от суперпозиции векторов \vec{A} и \vec{B} ; θ – угол между векторами \vec{B} и \vec{A} ; ϕ – угол между векторами \vec{B} и \vec{C} .

В [1] проанализирована также для чувствительность изменения направления ϕ результирующего поля к изменению модуля измеряемого поля при воздействии поля помехи произвольной напряженности и ориентации.

Установлено, что оптимальное соотношение чувствительности, диапазона измерения и помехозащищенности метода достигается при выборе угла θ в диапазоне $120^\circ \leq \theta \leq 150^\circ$.

Область максимальной чувствительности и практической линейности шкалы измерения при этом соответствует изменению модуля измеряемого поля в диапазоне от 0,5 до 1,5 модуля поля дополнительного источника в точке наблюдения.

Разрешающая способность шкалы измерения в области максимальной чувствительности составляет при этом примерно 1 % модуля измеряемого поля на угловой градус.

Анализ поля двухэлементной магнитной системы над ферромагнитным полупространством. Рассмотрим систему (рис. 1) из двух намагниченных ферромагнитных цилиндров [2], расположенных на расстоянии Z от ферромагнитного полупространства.

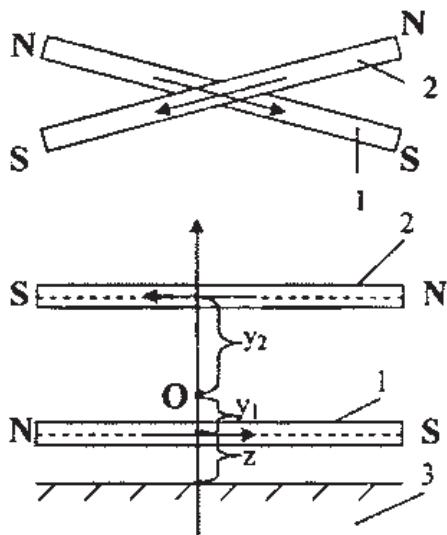


Рис. 1. Схема расположения (горизонтальная и фронтальная проекции) намагниченных цилиндров 1 и 2 относительно ферромагнитного полупространства 3:
O – точка наблюдения; S, N – магнитные полюса цилиндров

Для унификации используемых аналитических выражений, не нарушая общности рассмотрения с точки зрения результатов анализа, для зависимости остаточной намагниченности M_d цилиндра длиной L и радиусом R , находящегося в остаточно намагниченном состоянии после намагничивания до насыщения от магнитных свойств (намагниченности насыщения M_s , остаточной намагниченности M_r и коэрцитивной силы H_c) его материала и коэффициента размагничивания N , воспользуемся полученной в [3] и экспериментально обоснованной в [4] формулой:

$$M_d = \frac{M_s(H_c + NM_r)}{2NM_r} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4M_r^2 NH_c}{M_s^2 (H_c + NM_r)^2}} \right]. \quad (3)$$

Центральный коэффициент размагничивания N находящегося в остаточно намагниченном состоянии цилиндра из материала с магнитной проницаемостью $\mu \gg 1$ при $\lambda = L/2R > 1$ может быть вычислен по аппроксимирующей формуле К. Вармутта [5]:

$$N = \frac{1}{\lambda^2 - 1} \left[\frac{\lambda}{\sqrt{\lambda^2 - 1}} \ln(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) - 1 \right] \frac{1 + 2,35 \ln(1 + 0,137\lambda)}{1 + 2,28 \ln(1 + 0,284\lambda)}. \quad (4)$$

Остаточный магнитный поток Φ_0 в центральном сечении цилиндра равен [4]

$$\Phi_0 = \mu_0 \pi R^2 J_s (1 - N), \quad (5)$$

а тангенциальная составляющая поля в окружающем цилиндр пространстве [6]:

$$H_t(\bar{x}, \bar{y}) = \frac{\Phi_0}{\pi \mu_0 L^2} \sum_{n=1}^2 (-1)^{n+1} \left[\frac{(1-c)k_1 A}{B} + ck_2 \left\{ \ln(A+B) + \frac{(-1)^{n+1}}{B} \right\} \right], \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} \bar{y} &= \frac{2y}{L}; & \bar{x} &= \frac{2x}{L}; \\ A &= \bar{x} + (-1)^n; & B &= \sqrt{A^2 + \bar{y}^2}; \\ k_1 &= \sqrt{d^2 + 1}; & d &= \frac{2R}{L}; & k_2 &= 2 \left[k_1 - d^2 \cdot \ln \{ (1+k_1)d^{-1} \} \right]^{-1}; \end{aligned}$$

c – параметр ($0 \leq c \leq 1$), характеризующий распределение остаточного магнитного потока вдоль цилиндра.

Пусть намагниченные цилиндры расположены (см. рис. 1) в параллельных плоскостях под углом θ друг к другу на оси, проходящей через центры цилиндров перпендикулярно их образующим.

Пусть y_1, y_2 – расстояния между точкой наблюдения O , расположенной на оси, соединяющей центры цилиндров, и, соответственно, центром источника дополнительного поля и центром контролируемого объекта.

Как установлено в [1], оптимальное соотношение чувствительности, диапазона измерения и помехозащищенности метода достигается при значениях угла θ между векторами измеряемого магнитного поля и поля дополнительного источника в диапазоне $120^\circ \leq \theta \leq 150^\circ$.

Дальнейшее рассмотрение проведем для $\theta = 150^\circ$.

С учетом этого для ориентации ϕ суммарного поля относительно направления поля дополнительного источника получим из (1) и (2):

$$\phi = \arccos \frac{1 - \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \right) a}{\sqrt{a^2 + 1 - \sqrt{3}a}}. \quad (7)$$

Поле каждого из цилиндров в точке наблюдения в зависимости от расстояния Z будет ослабляться в различной степени. Это приведет к зависимости угла поворота помещенной в точку наблюдения магнитной стрелки от расстояния системы цилиндров до полупространства. Эта зависимость может быть проанализирована с использованием (3)...(7) и метода зеркальных отображений [7].

Поле магнитных зарядов индуцированных намагниченным цилиндром на поверхности полупространства, можно представить как поле стержневого постоянного магнита, расположенного по другую сторону границы раздела на расстоянии $2Z$ от исходного магнита.

Поле магнитного изображения H_i постоянного магнита в системе координат, связанной с центром симметрии исходного стержневого постоянного магнита, рассчитывается по формуле [7]:

$$H_i = \frac{\mu - 1}{\mu + 1} \cdot H(x, y + 2z). \quad (8)$$

Результирующее поле $H_{\Sigma i}$ магнита вблизи ферромагнитного полупространства в точке (x, y) является суперпозицией полей исходного и «изображенного» магнитов:

$$H_{\Sigma i} = H(x, y) - \frac{\mu - 1}{\mu + 1} H(x, y + 2z). \quad (9)$$

На рисунке 2 приведена зависимость ориентации ϕ тангенциальной составляющей суммарного поля магнитной системы (см. рис. 1) от расстояния Z до ферромагнитного ($\mu \gg 1$) полупространства для трех различных длин L цилиндров с $R = 2$ мм из феррита стронция ($M_d \approx 310$ кА/м).

Графики построены без учета влияния отражения второго постоянного магнита и влияния полупространства на намагниченность первого (см. рис. 1) постоянного магнита.

Полученные результаты показывают:

- диапазон измеряемых расстояний от полупространства до нижнего цилиндра составляет примерно 1/2 длины используемых магнитов;
- чувствительность к изменению Z составляет при этом 4...10 угловых градусов на миллиметр.

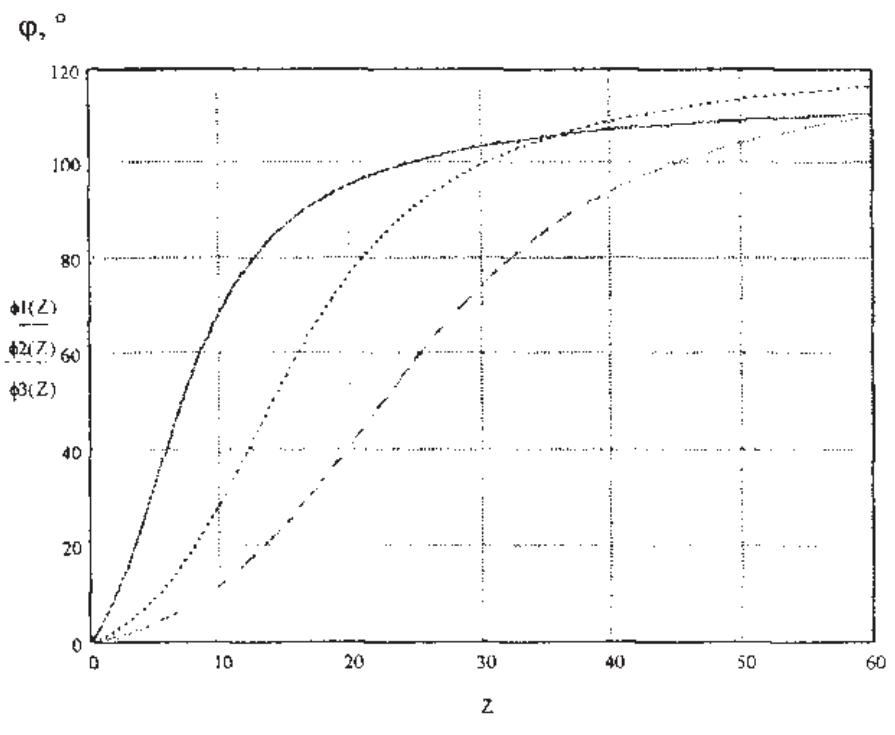


Рис. 2. Зависимость ориентации Φ суммарного поля системы двух одинаковых цилиндров (по рис. 1) от расстояния Z до ферромагнитного полупространства
Примечание. Расчет по (3)...(7) при $c = 0$ для $y_2 = (L - 5)$ мм, $y_1 = 5$ мм для $L = 20$ мм
(сплошная линия $\phi 1$), 50 мм (точка $\phi 2$) и 80 мм (пунктир $\phi 3$).

Разработка безэлектронного магнитного толщиномера. На основании проведенного анализа изменения поля двухэлементной магнитной системы вблизи ферромагнитного полупространства предложен [8] принцип построения Безэлектронного магнитного толщиномера для магнитной индикации расстояния до ферромагнитной поверхности (рис. 3).

Для решения задачи повышения автономности устройства и расширения диапазона контролируемых толщин покрытий в сторону больших толщин в приборе магниты длиной L расположены в параллельных плоскостях на расстоянии h ($0,25L \leq h \leq L$) друг от друга. Магнитная стрелка закреплена на оси в пространстве между магнитами на расстоянии l ($0,1h \leq l \leq 0,5h$) от магнита, ближайшего к покрытию, а угол Θ между направлениями намагниченности магнитов установлен 150° . Между магнитной стрелкой и контролируемым покрытием расположена шкала, проградуированная в единицах толщины покрытия и снабженная нониусом, имеющим возможность вращения вокруг оси.

В исходном состоянии вдали от ферромагнитного основания магнитная стрелка находится под действием суперпозиции магнитных полей, соз-

даваемых магнитами 1 и 2, и ориентируется в направлении, близком к направлению намагниченности магнита 1. Эта ориентация стрелки на шкале соответствует бесконечно большой толщине покрытия.

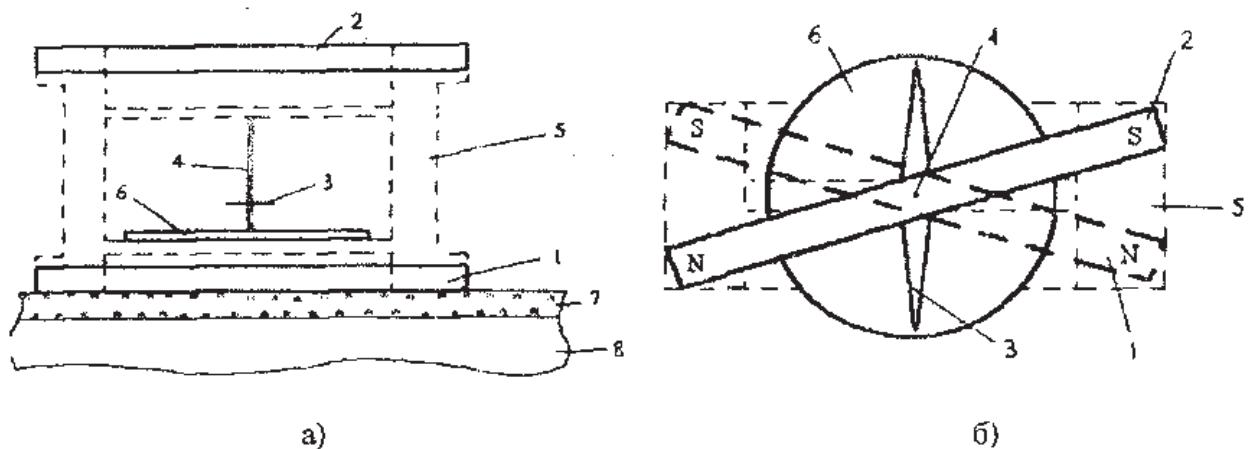


Рис. 3. Функциональная схема безэлектронного магнитного толщинометра в соответствии с [8] во фронтальной (а) и горизонтальной (б) проекциях:
1, 2 – стержневые постоянные магниты; 3 – магнитная стрелка; 4 – ось;
5 – немагнитный каркас; 6 – шкала для отсчета контролируемой толщины;
7 – немагнитное покрытие; 8 – ферромагнитное основание

Примечание. Буквами N и S обозначены торцы постоянных магнитов, соответствующие их северному и южному полюсам соответственно.

При установке прибора на свободную от покрытия поверхность ферромагнитного основания магнитное поле первого магнита 1 в плоскости расположения магнитной стрелки практически полностью компенсируется полем магнитных зарядов, индуцированных им на поверхности основания. В то же время магнитное поле второго магнита 2, находящегося при этом на расстоянии h ($0,25L \leq h \leq L$) от поверхности ферромагнитного основания, в плоскости расположения магнитной стрелки практически не изменяется. Поэтому стрелка при установке устройства на поверхность ферромагнитного основания ориентируется практически в направлении, близком направлению намагниченности магнита 2. Эта ориентация магнитной стрелки на шкале соответствует нулевой толщине покрытия.

При наличии немагнитного покрытия, компенсация поля первого магнита 1 полем индуцированных магнитных зарядов в области расположения магнитной стрелки уменьшается и возрастает его вклад в результирующее поле. Тем самым изменяется направление результирующего поля, что отображается ориентацией магнитной стрелки. Таким образом, поворот стрелки зависит от расстояния между первым магнитом 1 прибора и фер-

ромагнитным основанием, т.е. от толщины покрытия. Конструктивные особенности прибора, определяющие взаимное расположение магнитов 1 и 2 и магнитной стрелки, обеспечивают близкое к линейному изменение угла поворота стрелки от расстояния Z до ферромагнитного основания в диапазоне от 0 до $Z \approx 0,1L \dots 0,3L$. Угол $\theta = 150^\circ$ между направлениями намагниченности магнитов 1 и 2 обеспечивает устойчивость магнитной стрелки при любой толщине покрытия и максимально возможную чувствительность [1] ее ориентации к контролируемой толщине покрытия.

Внешний вид созданного с использованием принципов [8] прибора «Безэлектронный магнитный толщиномер БМТ-1» представлен на рисунке 4.



Рис. 4. Внешний вид Безэлектронного магнитного толщиномера БМТ-1

Прибор не содержит механических движущихся и энергозадающих элементов (пружин, шарниров), не требует источников электропитания, может работать при любой ориентации трубы, любой температуре окружающей среды (в том числе отрицательной) и влажности (в том числе под водой). Диапазон изменения контролируемой толщины в возможных модификациях прибора – от нуля до 0,3 длины L использованных магнитов (и, например, при $L = 10$ см может существенно перекрывать верхний предел измерения известных магнитных устройств).

Выводы

В результате проведенного анализа зависимости поля двухэлементной магнитной системы от расстояния до ферромагнитного полупространства разработаны методические основы безэлектронной магнитной инди-

кации толщины немагнитного защитного покрытия на ферромагнитном основании. Разработаны принципы построения и проанализированы возможности средств безэлектронной магнитной индикации толщины защитного покрытия трубопроводов. Создан не содержащий механических движущихся и энергозадающих элементов, не требующий источников электропитания, малогабаритный прибор «Безэлектронный магнитный толщиномер БМТ-1», позволяющий проводить измерения в жестких климатических условиях и под водой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сандомирский, С.Г. Использование угловых измерений при контроле параметров материалов магнитным методом. 1. Методические основы / С.Г. Сандомирский, С.А. Ревяко // Дефектоскопия. – 2003. – № 9. – С. 60 – 70.
2. Сандомирский, С.А. Использование угловых измерений при контроле параметров материалов магнитным методом. Практические приложения и приборная реализация / С.Г. Сандомирский, С.А. Ревяко // Дефектоскопия. – 2003. – № 9. – С. 71 – 80.
3. Янус, Р.И. Магнитная дефектоскопия / Р.И. Янус. – М.-Л. Гостехиздат, 1946. – 171 с.
4. Сандомирский, С.Г. Чувствительность остаточной намагниченности ферромагнитных изделий к магнитным характеристикам их материалов и геометрическим параметрам / С.Г. Сандомирский // Дефектоскопия. – 1990. – № 12. – С. 53 – 59.
5. Бурцев, Г.А. Расчет коэффициента размагничивания цилиндрических стержней / Г.А. Бурцев // Дефектоскопия. – 1972. – № 5. – С. 20 – 30.
6. Сандомирский, С.Г. Моделирование пространственного распределения поля остаточной намагниченности продольно намагниченного стально-го цилиндра / С.Г. Сандомирский, М.А. Мельгуй // Дефектоскопия. – 1987. – № 6. – С. 93.
7. Зацепин, Н.Н. Неразрушающий контроль / Н.Н. Зацепин. – Минск, Наука и техника, 1979. – 192 с.
8. Устройство для контроля толщины немагнитных покрытий на ферромагнитных основаниях: пат. Респ. Беларусь № 3429 / С.Г. Сандомирский, С.А. Ревяко // Офиц. Бюллетень. – 2000. – № 2. – С. 138.