

УДК 537.621.3:62-462

С.А.Марков (5 курс, каф. РФ), В.А.Каратыгин, к.т.н., доц.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ СТАЛЬНОЙ ТРУБЫ НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ

ABSTRACT: Possibility of creating the device, which can measure magnetic permeability (μ) of steel pipe being inside it, has been analyzed. This measurement can be used for defining the degree of corrosion. The device developed by means of offered method will be relatively simple, and will produce a measurement being completely inwardly pipe.

Трубопроводы (нефтяные, газовые) сделаны из стальных труб, подверженных коррозии. Возникает необходимость определения степени коррозии. На практике используется система: возбуждающая катушка, работающая на низкой частоте (от 10 Гц до 10 кГц), датчик магнитного поля. По изменению амплитуды и фазы сигнала от датчика, можно оценить толщину трубы, если известны магнитная проницаемость μ и проводимость σ . Величина μ может меняться от одного образца к другому, кроме того перегрузка труб осуществляемая с помощью электромагнитов, приводит к остаточной намагниченности, что, в свою очередь, ведет к изменению дифференциального значения μ_d , которое нас и интересует. Отсюда задача: создать устройство, которое можно перемещать внутри трубы и измерять μ_d (далее под μ везде имеется в виду именно μ_d).

Для того, чтоб можно было измерить магнитную проницаемость зная толщину трубы, но не зная σ , необходимо проводить измерения на постоянном токе (и, соответственно, в присутствии только магнитостатического поля). Возникает идея: рассмотреть теоретическую зависимость напряженности магнитного поля в некоторой точке внутри трубы от μ трубы. Причем целесообразно исследовать зависимость не абсолютного значения поля в некоторой точке внутри трубы, а отношения различных составляющих поля (нормальной, и касательной к стенке - H_r и H_z соответственно), измеренных в точках их максимумов. В таком случае можно сильно уменьшить погрешности. Имея теоретическую зависимость $H_r/H_z = V(\mu)$, и экспериментальное значение H_r/H_z можно найти μ (зная толщину трубы). Возможно также определение толщины трубы, зная значение ее μ и измерив H_r/H_z .

Для возбуждения магнитного поля используется катушка с постоянным током. Ось симметрии катушки совпадает с осью симметрии трубы. В силу симметрии задачи, при расчетах было целесообразно воспользоваться цилиндрической системой координат. Это позволяет исключить координату ϕ (от нее не будут зависеть никакие величины). За начало координат принят центр катушки. Координаты концов катушки - $+Z_0$ и $-Z_0$. Введем обозначения: радиус катушки - ρ_0 , длина катушки - $L=2Z_0$, внутренний радиус трубы - a , внешний радиус трубы - b , протекающий ток - I , количество витков - n .

Для упрощения анализа, соленоид в рассмотрении можно заменить на магнитный диполь [2]. В таком случае его поле можно рассматривать как сумму полей условных магнитных зарядов $+q_m$ и $-q_m$, расположенных в точках $(+Z_0, 0)$ и $(-Z_0, 0)$. При этом $q_m = \pm \pi \cdot I \cdot n \cdot \rho_0^2 / L$. Такое упрощение вносит некоторую погрешность, но ей можно пренебречь при $\rho \geq 5\rho_0$.

Таким образом, можно решать задачу нахождения полей магнитного диполя в трубе. Для цилиндрической системы координат удобно находить решения для магнитостатического потенциала Ψ после его Фурье-преобразования по координате z .

Общим решением для $\bar{\Psi}$ является функция вида [2]:

$$\bar{\Psi} = S_1 \cdot K_0(|\gamma| \cdot \rho) + S_2 \cdot I_0(|\gamma| \cdot \rho)$$

где $K_0(x)$ и $I_0(x)$ - модифицированные функции Бесселя нулевого порядка, а коэффициенты $S_{1,2}$ будут разными для внутренней, промежуточной и внешней областей (при $\mu \neq 1$) и будут зависеть от μ и γ . Производными от $K_0(x)$ и $I_0(x)$ будут соответственно $-K_1(x)$ и $I_1(x)$ - модифицированные функции Бесселя первого порядка.

Учтем граничные условия для магнитного поля – непрерывность $\bar{\Psi}(\rho)$ на границах раздела (т.к. непрерывна тангенциальная компонента Н) и непрерывность нормальной компоненты Н помноженной на соответствующий μ .

Таким образом, можно составить систему уравнений:

$$\begin{cases} A \cdot K_0(|\gamma| \cdot a) + B(\gamma, \mu) \cdot I_0(|\gamma| \cdot a) = C(\gamma, \mu) \cdot K_0(|\gamma| \cdot a) + D(\gamma, \mu) \cdot I_0(|\gamma| \cdot a) \\ C(\gamma, \mu) \cdot K_0(|\gamma| \cdot b) + D(\gamma, \mu) \cdot I_0(|\gamma| \cdot b) = G(\gamma, \mu) \cdot K_0(|\gamma| \cdot b) \\ -A \cdot K_1(|\gamma| \cdot a) + B(\gamma, \mu) \cdot I_1(|\gamma| \cdot a) = (-C(\gamma, \mu) \cdot K_1(|\gamma| \cdot a) + D(\gamma, \mu) \cdot I_1(|\gamma| \cdot a)) \cdot \mu \\ (-C(\gamma, \mu) \cdot K_1(|\gamma| \cdot b) + D(\gamma, \mu) \cdot I_1(|\gamma| \cdot b)) \cdot \mu = -G(\gamma, \mu) \cdot K_1(|\gamma| \cdot b) \end{cases}$$

Для системы с одиночным условным магнитным зарядом, расположенным в начале координат $A = \frac{q_m}{2\pi}$. Остальные коэффициенты находятся при решении системы уравнений, и так как формулы для них очень громоздки, здесь не приводятся.

Произведя преобразования, и учитывая, что мы имеем дело с двумя q_m разного знака, получим окончательные формулы (для интересующей нас внутренней области трубы):

$$H_\rho(z, \rho) = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^\infty \gamma \cdot (\cos(\gamma(z - Z_0)) - \cos(\gamma(z + Z_0))) \cdot [A \cdot K_1(|\gamma|\rho) - B(\gamma, \mu) \cdot I_1(|\gamma|\rho)] d\gamma$$

$$H_z(z, \rho) = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^\infty \gamma \cdot (\sin(\gamma(z - Z_0)) - \sin(\gamma(z + Z_0))) \cdot [A \cdot K_0(|\gamma|\rho) - B(\gamma, \mu) \cdot I_0(|\gamma|\rho)] d\gamma$$

$$H_\rho(+Z_0, a) / H_z(0, a) = V(\mu).$$

Зная эту зависимость, и имея экспериментальные значения составляющих полей, можно найти μ .

Как показал анализ, оптимальной длиной катушки будет $L=2b$ (все пространственные величины удобно нормировать к внешнему радиусу трубы), или, если важно уменьшить погрешности связанные с неплотным прилеганием датчиков к стенке – $L=3,2b$.

Для подтверждения результатов расчета был проведен эксперимент. Для этого использовалась труба с $\mu \approx 100$, длина=1.5 метра, $a=18.5$ мм, $b=20$ мм. Измерения проводились для катушек длиной $L=40$ мм= $2b$ и $L=64$ мм= $3.2b$. По катушкам протекал постоянный ток, имелась возможность поменять его полярность. Ток менялся в пределах $0.5A \div 2A$, отношение H_ρ / H_z не менялось при его изменении. Использовался магниторезистивный датчик на микросхеме НМС-2003 фирмы Honeywell. Полученное значение μ оказалось приближенно равно предполагаемому.

Исследуемый способ измерения μ , быть может, не слишком точен, но обладает тем преимуществом, что позволяет сравнительно простыми средствами провести измерения в реальных образцах труб, не прибегая к механическому воздействию на трубу (отпиливание образцов и т.п.), что может привести к изменению магнитной проницаемости. Кроме того, использование датчиков позволяет фиксировать постоянное магнитное поле, существующее

в трубе в отсутствие возбуждающего источника. К недостаткам можно отнести отсутствие простой формулы для вычисления μ . Вследствие этого, придется производить перерасчет зависимостей при каждом изменении параметров трубы, точек измерения или длины соленоида. Полученные результаты справедливы в том случае если $\mu > 1$ только в самом материале трубы. При измерении в земле это может не выполняться.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Никольский В.В. “Электродинамика и распространение радиоволн”; изд. “Наука”, М., 1973.
2. Янке Е. “Специальные функции. Формулы, графики, таблицы”; изд. “Наука”, М., 1977.