

НАКЛАДНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТОЛЩИНЫ И ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ

Себко В.П., д.т.н., проф., Беззапонная В.М.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"

Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Приборы и методы неразрушающего контроля"
тел. (057) 70-769-27

У даній роботі розглядається диференціальний перетворювач з магнітопроводом для контролю товщини немагнітних листових виробів і товщини стінок трубчатих виробів. Запропонована електрична схема включення такого перетворювача. Отримані співвідношення, які пов'язують різницю ЕРС перетворювача з добутком товщини листа або стінки труби. Запропоновано методику вибору раціонального режиму роботи з погляду досягнення максимальної чутливості диференціального накладного вихорострумового перетворювача до товщини виробу. Показано, що при певній частоті намагнічуючого струму, настає максимум чутливості перетворювача до товщини виробу (плоского або трубчастого). Розглянуто також вплив напруженості магнітного поля й електропровідності матеріалу виробу на результати контролю товщини немагнітного виробу.

В данной работе рассматривается дифференциальный преобразователь с магнитопроводом для контроля толщины немагнитных листовых изделий и толщин стенок трубчатых изделий. Предложена электрическая схема включения такого преобразователя. Получены соотношения, которые связывают разностную ЭДС преобразователя с изменением толщины листа или стенки трубы. Предложена методика выбора рационального режима работы с точки зрения достижения максимальной чувствительности дифференциального накладного вихретокового преобразователя к толщине изделия. Показано, что при определенной частоте тока намагничивания, наступает максимум чувствительности преобразователя к толщине изделия (плоского или трубчатого). Рассмотрено также влияние напряженности магнитного поля и электропроводности материала изделия на результаты контроля толщины немагнитного изделия.

К настоящему времени в существующей литературе рассмотрены ряд преобразователей с магнитопроводом для контроля толщины плоских намагнитных изделий, проводящих и непроводящих покрытий [1-6]. Однако практически все эти работы, как правило, имели отношение к абсолютным методам и преобразователям для контроля немагнитных листов. Кроме того, не было получено достаточно удобных соотношений, связывающих параметры изделия с сигналами преобразователя.

Тем не менее при проектировании и расчете накладных преобразователей с магнитопроводом, а также при их эксплуатации задача исследования таких преобразователей является весьма актуальной и представляет практический интерес для широкого круга специалистов, занимающихся в области преобразователей и измерительной техники. Это тем более важно, что накладные преобразователи предназначены для локального (с малой зоной) контроля. А это дает возможности определять распределение параметров изделия вдоль его длины или торца сплошного цилиндрического изделия.

В настоящей работе предлагается методика расчета дифференциального электромагнитного преобразователя для локального контроля толщины немагнитных изделий (плоских и трубчатых).

Рассмотрим индуктивный преобразователь с разомкнутым магнитопроводом для измерений толщин немагнитных листовых и трубчатых изделий. Чувствительность одного датчика к измеряемому параметру оказывается низкой. Для ее увеличения два одинаковых датчика включены по дифференциальной схеме (рис. 1). Рабочий РД и компенсационный КД датчики имеют по две идентичные намагничивающие и

измерительные обмотки, размещенные на магнитопроводах с зазорами. Рабочий датчик устанавливается на испытуемое изделие ИИ, а компенсационный - на образцовое ОИ. Намагничивающая обмотки с числами витков W_1 включаются последовательно-согласно и питаются от генератора G . Величина тока в намагничивающей цепи регулируется сопротивлением R_c и измеряется амперметром РА. Измерительные обмотки с числами витков W_2 включаются последовательно-встречно, разностный сигнал ЭДС ΔE измеряется вольтметром PV. Знак приращения толщины изделия определяется при помощи фазочувствительного вольтметра.

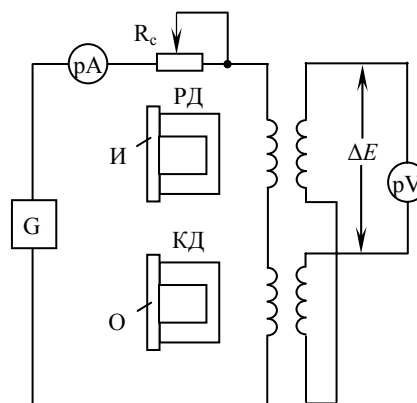


Рис. 1. Электрическая схема включения преобразователя

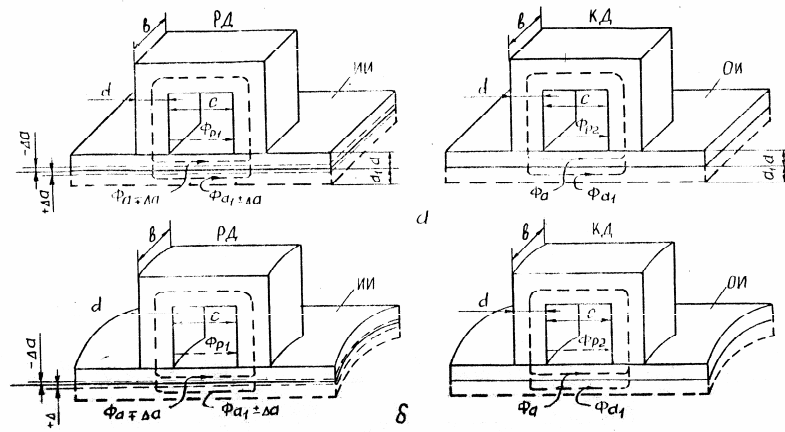


Рис.2 а, б. Размещение магнитопроводов рабочего и компенсационного датчиков на листовом и трубчатом изделиях

На рис. 2 а, б показано размещение магнитопроводов рабочего и компенсационного датчиков на листовом и трубчатом изделиях. Даны обозначения: $\Phi_{a \pm \Delta a}$, $\Phi_{a_1 \mp \Delta a}$ и Φ_{p1} - мгновенные значения потоков в исследуемом изделии, в слое воздуха за изделием и рассеяния; Φ_a , Φ_{a1} и Φ_{p2} - мгновенные значения потоков в образцовом изделии, в слое воздуха за ним и рассеяния; a и a_1 - толщины изделия и слоя воздуха за ним, ограничивающие соответствующие потоки; Δa - изменение толщины изделия; знаки \pm соответствуют уменьшению и увеличению толщины изделия; b - толщина магнитопровода; c - расстояние между полюсами магнитопровода; d - ширина полюса магнитопровода.

Назовем $\Phi_{a \pm \Delta a} + \Phi_{a_1 \mp \Delta a}$ эффективным потоком рабочего датчика, а $\Phi_a + \Phi_{a1}$ - эффективным потоком образцового датчика. Примем некоторые допущения. Поскольку воздушный зазор в магнитопроводе сравнительно велик, эффективный магнитный поток будет определяться магнитным сопротивлением зазора, а не сопротивлением магнитопровода.

Кроме эффективного потока существуют потоки рассеяния, расчет которых можно провести, используя работу [5]. Будем считать, что практически весь эффективный поток ограничивается размером ширины полюса магнитопровода $d = a + a_1$. Последнее подтверждается теоретическими и экспериментальными данными [5,6].

Выражение для мгновенного значения разностной ЭДС во вторичных обмотках датчиков имеет вид

$$\Delta e = -W_2 \cdot \frac{d(\Phi_{a \mp \Delta a} + \Phi_{a_1 \pm \Delta a} + \Phi_{p1} - \Phi_a - \Phi_{a1} - \Phi_{p2})}{dt}. \quad (1)$$

Так как рабочий и компенсационный датчики выполнены идентичными и включаются по дифференциальной схеме, можно считать, что потоки рассеяния будут одинаковыми (то есть $\Phi_{p1} = \Phi_{p2}$) и в выражении (1) взаимно компенсируются. Это относится к немагнитному изделию, поскольку магнитные потоки, связанные с вихревыми токами, значительно меньше потоков рассеяния.

В основу расчета эффективных потоков датчиков положены законы распространения электромагнитного поля в случае падающей плоской электромагнит-

ной волны [7]. Воспользовавшись выражением для напряженности магнитного поля в теле эталонного и исследуемого изделий и за ними, с учетом изменения толщины последнего, определим соответствующие магнитные потоки. При этом выражения для них имеют вид:

$$\Phi_{a \mp \Delta a} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot H_0 \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \delta \cdot b \times \left[\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{4}\right) - e^{-\frac{a \mp \Delta a}{\delta}} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{4} - \frac{a \mp \Delta a}{\delta}\right) \right], \quad (2)$$

$$\Phi_{a_1 \pm \Delta a} = (a_1 \pm \Delta a) \cdot H_0 \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot b \cdot e^{-\frac{a \mp \Delta a}{\delta}} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{a \mp \Delta a}{\delta}\right), \quad (3)$$

$$\Phi_a = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot H_0 \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \delta \cdot b \cdot \left[\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{4}\right) - e^{-\frac{a}{\delta}} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{4} - \frac{a}{\delta}\right) \right], \quad (4)$$

$$\Phi_{a_1} = a_1 \cdot H_0 \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \delta \cdot b \cdot e^{-\frac{a}{\delta}} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{a}{\delta}\right), \quad (5)$$

где H_0 - средняя напряженность магнитного поля в воздушном зазоре датчика; μ_0 - магнитная постоянная ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м); μ_r - относительная магнитная проницаемость изделия; ω - циклическая частота; δ - глубина проникновения магнитного поля в среду; σ - удельная электрическая проводимость материала изделия.

Данные соотношения получены при условии равенства относительных магнитных проницаемостей ($\mu_r = 1$) и удельных электропроводностей материалов исследуемого и образцового изделий. Это можно выполнить на практике с помощью подбора образцовых изделий по значению σ , соответствующей удельной электрической проводимости исследуемого изделия. Если размеры изделия достаточно велики, то оба датчика можно разместить на нем, но при этом должна быть известна толщина изделия в месте размещения образцового датчика.

Воспользовавшись результатами работ [5,6] можно получить выражение для величины средней напряженности магнитного поля в воздушном зазоре датчика

$$H_0 = I_n \cdot W_1 \cdot \frac{b \left[0,26 + \frac{1}{\pi} \ln \left(1 + \frac{2d}{c} \right) \right] + 2(0,077 \cdot c + 0,25 \cdot d)}{b \cdot d}, \quad (6)$$

где I_n - величина тока в намагничивающей цепи).

Подставив значения магнитных потоков (2-5) в выражение (1), получим формулу для мгновенного значения разностной ЭДС в виде

$$\Delta e = \omega \cdot W_2 \cdot H_0 \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot b \cdot e^{-\frac{a}{\delta}} \times \sqrt{M^2 + Q^2} \cdot \sin(\omega t + \arctg \frac{Q}{M}), \quad (7)$$

где

$$M = e^{\pm \frac{\Delta a}{\delta}} \left(a_1 \mp \Delta a - \frac{\delta}{2} \right) \cdot \left(\cos \frac{a}{\delta} \cdot \cos \frac{\Delta a}{\delta} \pm \sin \frac{a}{\delta} \cdot \sin \frac{\Delta a}{\delta} \right) + \cos \frac{a}{\delta} \cdot \left(\frac{\delta}{2} \mp \frac{\delta}{2} e^{\pm \frac{\Delta a}{\delta}} \cdot \sin \frac{\Delta a}{\delta} - a_1 \right) + \frac{\delta}{2} \cdot \sin \frac{a}{\delta} \cdot \left(e^{\pm \frac{\Delta a}{\delta}} \cdot \cos \frac{\Delta a}{\delta} - 1 \right); \quad (8)$$

$$Q = e^{\pm \frac{\Delta a}{\delta}} \cdot (a_1 - a_1 \mp \Delta a) \cdot \left(\sin \frac{a}{\delta} \cdot \cos \frac{\Delta a}{\delta} \pm \cos \frac{a}{\delta} \cdot \sin \frac{\Delta a}{\delta} \right) - \sin \frac{a}{\delta} \cdot \left(\frac{\delta}{2} \mp \frac{\delta}{2} e^{\pm \frac{\Delta a}{\delta}} \cdot \sin \frac{\Delta a}{\delta} - a_1 \right) + \frac{\delta}{2} \cdot \cos \frac{a}{\delta} \cdot \left(e^{\pm \frac{\Delta a}{\delta}} \cdot \cos \frac{\Delta a}{\delta} - 1 \right). \quad (9)$$

Выражения (7 - 9) значительно упрощаются при условии $\Delta a/\delta \ll 1$, что соответствует небольшим изменениям толщины исследуемого изделия относительно образцового или малым частотам питающего тока. В этом случае формула для эффективного значения разностной ЭДС имеет вид

$$\Delta E = \omega \cdot \rho \cdot W_2 \cdot H_0 \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot b \cdot \Delta a \cdot e^{-\frac{a}{\delta}} \cdot \rho, \quad (10)$$

Величина рассчитывается из следующих соотношений, при уменьшении толщины исследуемого изделия относительно образцового

$$\rho = \frac{a_1}{\delta} \cdot \sqrt{\left(1 + \frac{\Delta a}{a_1} \right)^2 + \left(1 + \frac{\Delta a}{a_1} + \frac{\Delta a}{\delta} \right)^2}, \quad (11)$$

при ее увеличении

$$\rho = \frac{a_1}{\delta} \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta a}{a_1} - 1 \right)^2 + \left(1 - \frac{\Delta a}{a_1} - \frac{\Delta a}{\delta} \right)^2}, \quad (12)$$

Использование выражений (7-12) для измерения толщин трубчатых изделий справедливо при условии $b/\pi D$, где D наружный диаметр трубчатого изделия.

Следует отметить, что для толщинометрии различных изделий можно было бы использовать и фазовые измерения (см. выражения 7-9). Однако, численные оценки, проведенные по точным и приближенным выражениям для фазовых углов, показывают, что

для различных исходных толщин разрешающая способность фазовых измерений значительно ниже амплитудных при тех же изменениях Δa . К этому можно также добавить неудобство проведения фазовых измерений, связанное со сравнительно низкой точностью измерителей фазовых сдвигов, требованиями к минимальным входным сигналам и другие.

Поскольку, наряду с магнитным потоком в изделии важным зондирующим параметром является величина вихревого тока, создаваемого этим потоком, то имеет смысл привести выражение для распределения плотности вихревых токов j_T внутри изделия. Воспользовавшись результатами работы [7], можно получить соотношение для j_T с учетом полученной выше H_0

$$j_T = H_0 \cdot \sqrt{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot \sigma \cdot \omega} \cdot e^{-\frac{y}{\delta}} \cdot \sin \left(\omega t - \frac{y}{\delta} + \frac{\pi}{4} \right), \quad (13)$$

где y - текущая координата толщины изделия ($y=0$ на поверхности образца в месте расположения датчика).

Таким образом, рассмотрен дифференциальный преобразователь с магнитопроводом для контроля толщины немагнитных листовых изделий и толщин стенок трубчатых изделий. Разработана схема включения такого преобразователя. Получены соотношения, связывающие разностную ЭДС с приращением толщины листа или стенки трубы.

Ниже предлагается методика определения рационального по чувствительности режима работы вихретокового дифференциального накладного преобразователя с магнитопроводом.

На величину выходных параметров устройства для измерения дифференциальным датчиком изменений толщины изделий могут оказывать существенное влияние различные факторы: соотношение геометрических размеров датчиков, изделия, частота намагничивающего тока, степень идентичности датчиков, материал магнитопроводов, изменение удельной электрической проводимости, величина воздушного зазора между преобразователем и изделием.

Естественно, для того, чтобы измерять толщину изделия, необходимо полностью его промагнитить. С этой точки зрения, глубина проникновения магнитного поля δ должна быть больше толщины a изделия. Однако, случай $\delta \gg a$ приводит к значительному снижению чувствительности преобразователя. Оценки показывают, что достаточно высокая чувствительность устройства достижима при условии $0,3 \leq a/\delta \leq 0,77$. При этом необходимо обеспечить выполнение ограничений на соотношение геометрических размеров магнитопровода и изделия, связанных с распространением магнитного поля в изделии и за ним ($c \geq d$, $d = a + a_1$, где c - расстояние между полюсами магнитопровода, d - ширина полюса, a_1 - толщина слоя воздуха за изделием [1]). Увеличение толщины магнитопровода приводит к росту чувствительности устройства, однако, существует ограничение и на этот размер, связанное с требуемой площадью контролируемого участка изделия, соприкасаемой с рабочей поверхностью магнитопровода.

Даже из физических соображений ясно, что рас-

смагнитомагнитный преобразователь должен иметь оптимальный режим работы по такому параметру, как частота намагничивающего тока (или возбуждающего магнитного поля). Действительно, при низких частотах ($\delta \gg a$) чувствительность устройства мала. Та же ситуация должна наблюдаться и при высоких частотах, когда $\delta \ll a$. Отсюда следует, что обязан существовать такой частотный диапазон, при котором чувствительность датчика к изменению толщины будет максимальной.

Достаточно простое приближенное расчетное соотношение для оптимальной частоты $f_{\text{опт}}$ преобразователя по величине наибольшей относительной чувствительности к изменению толщины изделия можно получить при условии $a/\delta < 1$. В этом случае

$$f_{\text{опт}} = \frac{9}{64\pi \cdot a^2 \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \sigma}, \quad (14)$$

где μ_0 – магнитная постоянная; μ_r – магнитная проницаемость; σ – электропроводность материала изделия.

Из формулы (14) следует, что в зависимости от материалов используемого магнитопровода и изделия существуют определенные ограничения на минимальную толщину эталонного образца a . Если применять в качестве материала магнитопровода феррит, то даже при малой исходной толщине изделия измерения на оптимальных частотах не представляют особых трудностей. К примеру, при $a = 0,2$ мм для медного листа $f_{\text{опт}} \approx 16$ кГц. В случае использования шихтованного магнитопровода, набранного из ферромагнитных пластин, существует максимальное значение частоты, при которой еще не сильно выражен поверхностный эффект в отдельных пластинах магнитопровода. Таким образом, существует верхний предел по частоте для шихтованного магнитопровода, который зависит от толщины и материала используемых пластин. Например, для пластин, выполненных из электротехнической стали с толщиной 0,35 мм каждая, наибольшая частота составляет 4-5 кГц. Если принять эту частоту в качестве оптимальной, то тогда из выражения (14) следует ограничение на минимальный размер исходной толщины изделия. К примеру, для медного изделия ($\sigma = 5,6 \cdot 10^7$ СМ/М) и частоте 5 кГц $a_{\text{мин}} \approx 0,35$ мм, а для изделия из алюминиевого сплава ($\sigma = 1,72 \cdot 10^7$ СМ/М) $a_{\text{мин}} \approx 0,6$ мм.

Следует отметить, что ограничение на наибольшее значение исходной толщины изделия a связано с требуемым отношением полезного сигнала к сигналу небаланса E_n двух датчиков, помещенных на идентичные изделия. В практически важном случае

$\frac{\Delta a}{a_1} \ll 1$ (где Δa – изменение толщины изделия) наибольшую исходную толщину изделия можно определить из выражения

$$a \leq \delta - \frac{\delta^2 \cdot \frac{\Delta E}{\Delta a \cdot E_n} \cdot E_n}{\sqrt{2 \cdot d \cdot \omega \cdot W_2 \cdot H_0 \cdot \mu_0 \cdot b}}, \quad (15)$$

где H_0 – напряженность внешнего магнитного поля.

Порядок вычисления этой величины следующий. Измерив значение сигнала небаланса E_n и считая, что

полезный сигнал ΔE с должен превышать величину E_n , хотя бы на порядок, можно определить a , которое соответствует минимальным заданным приращениям толщины Δa .

При использовании формулы (10) работы [1], необходимо также ввести ограничение на наибольшее изменение толщины Δa . В этом случае предельно допустимая величина Δa связана с погрешностью разложений. Простую оценку такой погрешности можно получить из соотношения

$$\frac{\Delta a}{\delta} = \pm \frac{\beta}{2} + \sqrt{\left(\frac{\beta}{2}\right)^2 + \beta}, \quad (16)$$

где β – задаваемая погрешность разложения; верхний и нижний знаки соответствуют уменьшению и увеличению толщины изделия.

Например, при $\beta = 3\%$ величины допустимых относительных приращений $\Delta a/\delta$ толщин изделий составляют 0,19 и 0,16 при уменьшении и увеличении толщины a .

Увеличение величины напряженности магнитного поля H_0 в зазоре магнитопровода играет важную роль в повышении чувствительности устройства. Однако, такое увеличение должно быть конечным и связано, по-видимому, с эффектами нагрева изделия вихревыми токами, которые могут привести к изменению характеристик изделия. Степень нагрева изделия зависит от величины H_0 , закона распределения плотности вихревых токов, материала изделия, состояния его поверхности и других. Приведенное выше выражение (16), описывающее распределение плотности вихревых токов недостаточно для оценки предельной величины H_0 . Более целесообразно оценивать эту величину по значению плотности тока усредненной по толщине изделия, так как в случае толщинометрии $\delta > a$, используя соотношение (13), можно получить выражение для такой усредненной плотности тока, модуль которой имеет вид

$$|j_T| = \frac{H_0}{a} \sqrt{\left(1 - e^{-a/\delta} \cdot \cos a/\delta\right)^2 + \left(e^{-a/\delta} \cdot \sin a/\delta\right)^2}. \quad (17)$$

Исходя из формулы (17), можно для каждого материала определить предельную величину H_0 по допустимой плотности вихревых токов.

Определение допустимых величин плотностей токов для различных материалов с точки зрения минимального нагрева связано с решением сложных уравнений диффузии тепла и теплового баланса проводящего изделия. Для решения вопроса выбора диапазона допустимого изменения H_0 , исходя из компромиссных решений достижения сравнительно высокой чувствительности и слабого влияния тепловых эффектов вихревых токов, можно использовать справочные данные по допустимым плотностям тока для различных материалов, тем более, что последнее согласуется с экспериментом. Например, если принять для медной пластины допустимую плотность тока $j_{\text{доп}} = 2$ А/мм², то для предельного случая $a/\delta = 0,77$; $a = 0,35$ мм и $f = 5000$ Гц (шихтованный магнитопровод) наибольшее значение напряженности магнитного поля в зазоре магнитопровода $H_{\text{доп}}$ составит 944 А/м.

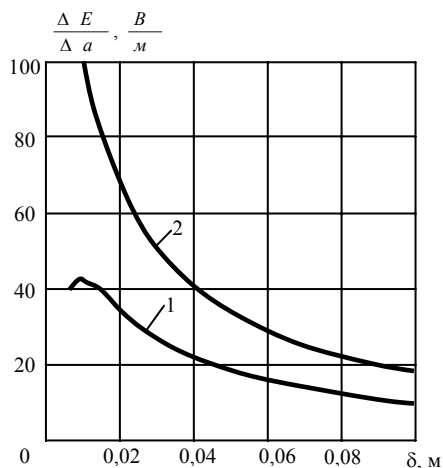


Рис. 3. Зависимость относительной ЭДС. от δ при изменении удельной электрической проводимости изделия

При увеличении толщины изделия и при том же отношении a/δ , как видно из выражения (17), для достижения таких же допустимых плотностей вихревых токов следует использовать более высокие значения напряженности магнитного поля, что в свою очередь приведет к увеличению чувствительности устройства.

Мешающими параметрами при измерении приращения толщин являются удельная электрическая проводимость (электропроводность) σ изделия и воздушный зазор между первичным преобразователем и поверхностью изделия.

На рис. 3 приведены расчетные кривые зависимостей относительных значений выходных ЭДС дифференциального индуктивного преобразователя от величины δ при изменении удельной электрической проводимости (частота $\omega = \text{const}$). Кривые построены для значений $a = 10^{-2}$ м, $a_1 = 4 \cdot 10^{-3}$ м, $\Delta a = 10^{-3}$ м в случае уменьшения толщины (кривая 1), $a = 6 \cdot 10^{-3}$ м, $a_1 = 8 \cdot 10^{-3}$ м, $\Delta a = 10^{-3}$ м для увеличения толщины (кривая 2).

Из графических зависимостей рис. 3 видно, что наибольшее влияние величины σ на результаты измерений наступает при глубинах проникновения переменного магнитного поля $\delta \approx a$ (кривая 1). Однако, в окрестности этого значения δ воздействие изменения удельной электрической проводимости минимально. В благоприятном, с точки зрения оптимальных режимов работы устройства, диапазоне изменений a/δ влияние изменения величины δ также мало. К примеру, $a/\delta = 0,6$ ($a = 10^{-2}$ м) изменение сигнала $\Delta E/\Delta a$ не превышает 2,0 %, а для $a/\delta = 0,35$ ($a = 6 \cdot 10^{-3}$ м), $\Delta E/\Delta a$ изменяется на 2,9 % при изменении δ на 10 % в обоих случаях. Следует отметить, что увеличение δ приводит к уменьшению влияния удельной электрической проводимости на результаты измерений приращений толщин.

Как было указано, преобразователь помещается непосредственно на испытуемое изделие. Во многих случаях необходимо предусмотреть наличие небольшого зазора l_3 между полюсами магнитопровода и изделием. В силу того, что в рассматриваемых преобразователях воздушный зазор магнитопровода, определяемый средней силовой линией, значительно пре-

вышает величину l_3 , не следует ожидать большого воздействия последней на результаты измерений. При учете l_3 значение разностной ЭДС уменьшится на величину $2 \Delta E l_3 / (c + d)$. Например, для датчиков с величиной $c + d = 28 \cdot 10^{-3}$ м наличие зазора $l_3 = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м приводит к уменьшению выходной ЭДС на 3,6 %.

Таким образом, рассмотрена методика выбора рационального режима работы преобразователя с точки зрения достижения максимальной чувствительности к толщине изделия дифференциального накладного вихретокового преобразователя с магнитопроводом. Рассмотрено также влияние напряженности внешнего магнитного поля и удельной электрической проводимости на результаты контроля толщины немагнитного плоского и трубчатого изделия.

Разработанный дифференциальный датчик с магнитопроводом широко использовался для контроля толщины стенки бурильных легкосплавных (алюминиевых) труб на трубной базе Крестищенского (г. Красноград) управления буровых работ. Особенно важную роль сыграл такой электромагнитный датчик при спускоподъемных операциях колонны, набранной их алюминиевых бурильных труб. Дело в том, что при бурении труба испытывает чаще всего односторонний износ при трении о породу. Если такой износ в значительной степени уменьшает сечение трубы, т.е. локальную по площади толщину стенки трубы, которая находится в колонне, то при большом весе последней, используемая труба с дефектным, т.е. уменьшенным сечением, может разорваться, и тогда часть колонны рухнет вниз скважины. Из скважины упавшую часть колонны практически достать невозможно, а это значит, что большие средства которые затрачены на бурение скважины будут истрачены напрасно. Если обнаружить разработанным датчиком односторонний критический износ стенки трубы, то её можно заменить новой трубой и тем самым спасти колонну и скважину. Такую замену дефектной трубы новой осуществляют при спускоподъемных операциях буровой колонны.

Рассмотренные дифференциальные датчики можно использовать для контроля толщины при прокате пластин, фольги и др. изделий.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Справочник / Под. ред. В.В. Клюева. Кн. 1. – М.: Машиностроение, 1975. – 391 с.
- [2] Дорофеев А.Л., Никитин А.М., Рубин А.Л. Индукционная толщинометрия. – М.: Энергия, 1978. – 185 с.
- [3] Дякин В.В., Сандовский В.А. Теория и расчет накладных вихретоковых преобразователей. – М.: Наука, 1981. – 136 с.
- [4] Соболев В.С., Шкарлет Ю.М. Накладные и экранные датчики для контроля методом вихревых токов. – Новосибирск: Наука, 1967. – 144 с.
- [5] Гордон А.В., Сливинская А.Г. Электромагниты постоянного тока. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960. – С. 140-160.
- [6] Постоянные магниты / Под. ред. Ю.М. Пятинина. – М.: Энергия, 1980. – С.267-306.
- [7] Поливанов К.Н. Теоретические основы электротехники. – М.: Энергия, 1975, Т.3. – С. 146-153.

Поступила 17.03.2005