

БЕСКОНТАКТНЫЙ ВИХРЕТОКОВЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ДИАМЕТРА И УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ НЕМАГНИТНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ В ПОЛЯХ РАЗЛИЧНОЙ ОРИЕНТАЦИИ

Бондаренко В.Е., к.т.н., доц.

Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”

Україна, 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21 НТУУХПІ, кафедра “Передача електричної енергії”

Тел.(0572) 40-0996, E-mail: bond@kpi.kharkov.ua

В роботі розглянуто методи та вибрано схеми пристрійв для безконтактного контролю діаметра та питомого електричного опору протяжніх немагнітних провідних виробів в повздовжньому та поперечному магнітному полі. Приведені розрахунки основних параметрів перетворювача і його точності характеристики.

В работе рассмотрены методы и выбраны схемы устройств для бесконтактного контроля диаметра и удельного электрического сопротивления протяжённых немагнитных проводящих цилиндрических изделий в продольном и поперечном магнитном поле. Проведён расчёт основных параметров, даны их точностные характеристики.

Всё большее внимание в энергетике, особенно в последнее время, уделяется вопросам контроля технического состояния материалов, отдельных элементов и оборудования в целом. Важность контроля, не в последнюю очередь, диктуется усилением таких неблагоприятных факторов, как прогрессирующее старение и неэффективное техническое обслуживание. Кроме этого, следует учесть и невозможность прямого контроля геометрических и электрических параметров проводящих элементов линий электропередачи, когда у огромного количества протяжённых токопроводов свободный доступ к концам в большинстве случаев затруднён или вообще отсутствует. Поэтому вопросы одновременного контроля геометрических и электрических параметров представляют значительный практический интерес.

Одним из возможных вариантов контроля диаметра и удельного электрического сопротивления может быть бесконтактный вихревоковый метод. Такие методы и устройства в настоящее время достаточно подробно исследованы для контроля параметров цилиндрических проводящих изделий в продольном [6,9] и поперечных [2,10] электромагнитных полях. Однако эти исследования выполнены в основном на ферромагнитных образцах. При этом диаметр, удельная электрическая проводимость, а иногда и магнитная проницаемость контролируются отдельно. Вопрос же одновременного контроля диаметра и удельного электрического сопротивления проводника, выполненного, как правило, из меди или из алюминия, позволяет оценить проводящие свойства проводника и судить о его прочностных характеристиках. Это особенно важно, поскольку проводники в процессе эксплуатации подвержены интенсивному износу при воздействии механических нагрузок, на транспорте, и гололёдных или ветровых нагрузок на линиях электропередачи. Поэтому несомненный интерес представляют возможные методы и устройства одновременного контроля радиуса и удельного электрического сопротивления длинномерных немагнитных проводниковых изделий [8].

Рассмотрим модель проводящего изделия

имеющего свободный доступ хотя бы к одному концу. Для его контроля может быть использован метод измерения с проходным трансформаторным электромагнитным преобразователем (ТЭМП). Такой преобразователь состоит из двух коаксиально расположенных цилиндрических катушек, внутри которых располагается контролируемое изделие. Наружная обмотка преобразователя создаёт продольное переменное магнитное поле, которое возбуждает вихревые токи в толще проводникового материала. Внутренняя обмотка является измерительной и предназначена для контроля ЭДС, наводимой в ней результирующим магнитным потоком. В связи со сложностью зависимостей между характеристиками контролируемого изделия и параметрами электрической цепи преобразователя, проведение анализа режимов работы устройств с ТЭМП в значительной степени затруднено. Однако, если ввести некоторую безразмерную величину, связывающую выходные электрические сигналы, геометрические размеры преобразователя и изделия и установить универсальные зависимости амплитуды и фазы этой величины от обобщённого параметра, характеризующего свойства изделия, а так же определить последовательность расчётных и измерительных операций, можно создать простой электромагнитный метод одновременного определения диаметра и удельного электрического сопротивления изделия в продольном магнитном поле. Для расчёта распределения напряжённости по радиусу цилиндрического проводящего изделия воспользуемся уравнениями Максвелла и учитывая граничные условия получим выражение, характеризующее распределение напряжённости магнитного поля вдоль текущего радиуса r .

$$H(r) = H_0 \frac{I_o(kr)}{I_o(ka)} \quad (1)$$

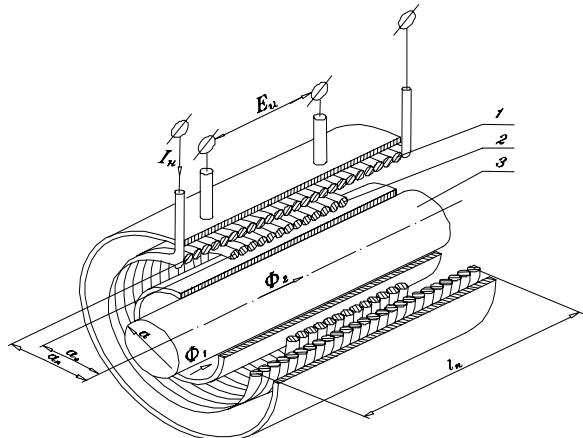
где H_0 – напряжённость магнитного поля в воздушном зазоре между изделием и обмоткой; I_o – модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка от линейных аргументов (kr) и (ka) ; k – линейный параметр.

$$k = \sqrt{i\omega\mu_o\mu_r\sigma} \quad (2)$$

где ω - циклическая частота переменного магнитного поля.

Зная распределения напряжённости магнитного поля вдоль радиуса находим магнитный поток Φ_2 , пронизывающий поперечное сечение проводника в намагничивающей обмотки (см.рис.1) и с учётом ряда допущений получим

$$\Phi_2 = \mu_o\mu_r H_o \frac{2\pi a}{k} \frac{I_1(k a)}{I_o(k a)} \quad (3)$$



1-намагничивающая обмотка;
2-измерительная обмотка;
3-изделие

Рис.1. Проходной ТЭМП с проводящим цилиндрическим изделием

Для определения параметров контролируемого изделия необходимо знать их влияние на ЭДС измерительной обмотки ТЭМП, для чего используя (1), рассчитывают магнитные потоки, создаваемые возбуждающей обмоткой преобразователя, внутри и снаружи её, и соответствующие им ЭДС без изделия и с изделием.

Для упрощения процесса анализа режимов работы ТЭМП введём, используя полученные значения магнитных потоков и ЭДС, комплексный безразмерный параметр N , характеризующий собой удельную нормированную ЭДС ТЭМП. Выделим действительную и мнимую части N и его фазы φ_{bh} . Тогда получим выражение для модуля N и фазы φ_{bh} :

$$|N| = \frac{E_{bh}}{E_o \eta} = \sqrt{(1 - \mu_r \operatorname{Re} \dot{K})^2 + (\mu_r \operatorname{Im} \dot{K})^2} \quad (4)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{bh} = \frac{\mu_r \operatorname{Im} \dot{K}}{1 - \mu_r \operatorname{Re} \dot{K}} \quad (5)$$

где $\operatorname{Re} \dot{K}$ и $\operatorname{Im} \dot{K}$ – действительная и мнимая части специального комплексного параметра K , характеризующего собой удельный нормированный магнитный поток, приходящийся на единицу μ_r ; E_{bh} и E_0 – вносимая ЭДС и ЭДС ТЭМП без изделия; φ_{bh} – фазовый угол сдвига E_{bh} по отношению к E_0 ; η – коэффициент заполнения ТЭМП изделием, $\eta = d^2/d_n^2 - d$ и d_n – диаметры изделия и измерительной обмотки ТЭМП соответственно.

Записав действительную и мнимую части ком-

плексного параметра K через функции Кельвина [7], а так же используя числовые значения из [11] представим зависимости N и $|\varphi_{bh}|$ от x графически

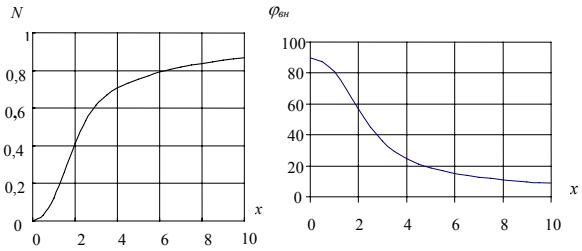


Рис.2. Зависимость параметров N и $|\varphi_{bh}|$ от x .

Из представленных графиков видны точки перегиба, в которых наблюдается наибольшая крутизна кривых. Для одновременного определения диаметра и удельного электрического сопротивления цилиндрического немагнитного изделия воспользуемся появлением экстремумов на функциях амплитудной S_N и фазовой S_φ чувствительностей ТЭМП к параметру x , определив лишь одну точку на двух функциях преобразования, т.е. рабочую точку амплитудной или фазовой чувствительности преобразователя [5]. Для уточнения координат этих точек продифференцируем функции $N = f(x)$ и $|\varphi_{bh}| = f(x)$ и представим результаты графически (см. рис.3).

Как видно из рисунка, максимальные значения чувствительности S_N и S_φ наступают при $x_1 = 1,62$ и $x_2 = 1,82$ соответственно. Таким образом, используя рассчитанные максимальные значения S_N и S_φ и результаты экспериментов возможно определить одновременно диаметр d и удельное электрическое сопротивление ρ цилиндрического изделия. Действительно, производную dN/dx можно представить как

$$S_N = \frac{dN}{dx} = \frac{\sqrt{f}}{C_1} \frac{dE_{bh}^*}{df} \quad (6)$$

где dE_{bh}^*/df – производная нормированной вносимой ЭДС E_{bh}^* по частоте f , $E_{bh}^* = E_{bh}/E_0$; C_1 – коэффициент, постоянный для конкретного изделия;

$$x = \frac{d}{2} \sqrt{\frac{2\pi\mu_0 f}{\rho}} \text{ - обобщенный параметр.}$$

Аналогично производную $d\varphi_{bh}/dx$ запишем в виде

$$S_\varphi = \frac{d\varphi_{bh}}{dx} = \frac{\sqrt{f}}{C_2} \frac{d\varphi_{bh}}{df} \quad (7)$$

где $d\varphi_{bh}/df$ – производная угла φ_{bh} по частоте f ; C_2 – постоянный для конкретного изделия коэффициент.

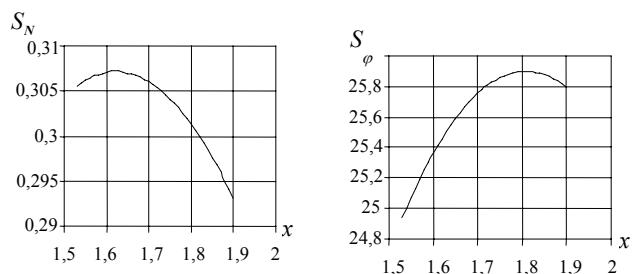


Рис.3 Зависимость S_N и S_φ чувствительностей от x .

Таким образом, рис.3 и формулы (6)-(7) позволяют разработать процедуру определения d и ρ цилиндрического изделия. Особенностью такой процедуры является регистрация оптимальных значений $E_{\text{вн}}$ и $\varphi_{\text{вн}}$ при амплитудном или фазовом методе. Затем определяют контрольные параметры:

$$d = d_u \sqrt{\frac{E_{\text{вн}}}{E_0 N}} = d_u \sqrt{\frac{E^*_{\text{вн}}}{N}} \quad (8)$$

Для последовательного цикла измерений

$$\rho = \frac{\pi \mu_0 f d^2}{2 x^2} \quad (9)$$

Для параллельного цикла

$$\rho = \frac{\pi \mu_0 f d_u E^*_{\text{вн}}}{2 x^2 N} \quad (10)$$

где d_u – диаметр измерительной обмотки.

Для оценки эффективности бесконтактного метода контроля протяжённых цилиндрических изделий, имеющих доступ хотя бы с одного конца, был проведён расчёт ожидаемых значений сигналов преобразователя с изделием [4].

Как показали выполненные расчёты, проведённые для трёх значений радиусов изделий, выполненных из меди и алюминия, значения вносимого ЭДС $E_{\text{вн}}$ тем заметнее с ростом обобщённого параметра x , чем больше коэффициент заполнения преобразователя. В этом случае влияние воздушного зазора между изделием и измерительной обмоткой уменьшается. Влияние скин-эффекта становится более заметным для изделий с большими радиусами. Значение величины $E_{\text{вн}}$ как для медного, так и для алюминиевого образца находятся вблизи 1В. Изменение фазового угла $\varphi_{\text{вн}}$ наблюдается лишь в области малых значений x . При значениях $x \geq 4$ $\varphi_{\text{вн}}$ изменяется очень мало и для всех x практически не зависит от радиуса.

Для проверки предложенного метода одновременного контроля диаметра и удельного электрического сопротивления немагнитных цилиндрических изделий были проведены эксперименты по схеме представленной на рис. 4 [5]. В схеме использованы три идентичных преобразователя. Первичные обмотки рабочего (РП) и компенсационного (КП) преобразователей включены последовательно-согласно, вторичные последовательно-встречно. Измерительные приборы в схеме, в особенности их пределы измерений класса точности, выбирались с учётом проведённого расчёта ожидаемых значений сигналов преобразователя.

Схема настраивается таким образом, что при отсутствии в РП образца, разностный сигнал, фиксированный вольтметром V равен нулю, так как на выходе всех трёх вторичных обмоток ЭДС E_0 будет одинаковая. Когда в преобразователь помещается изделие, появляется разностная ЭДС $E_{\text{вн}}$, регистрируемая тем же вольтметром. Фазовый угол $\varphi_{\text{вн}}$ определяется фазометром Φ . Без изделия ЭДС E_0 РП измеряется при сохранении намагничивающего тока постоянным в процессе проведения эксперимента. Среднюю напря-

жённость H_0 однородного магнитного поля выбирают в пределах 200-400 А/м. Для исследования были выбраны образцы из меди и алюминия, длина которых всегда превышала длину преобразователя.

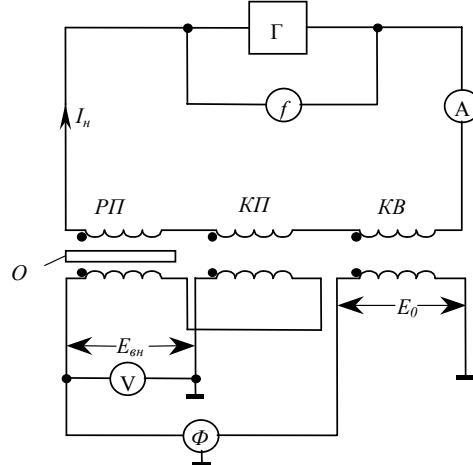
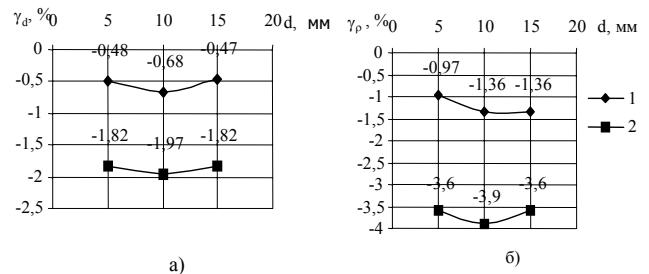


Рис.4 Схема совместного измерения радиуса и удельного электрического сопротивления цилиндрических изделий

На рис.5 приведены относительные погрешности измерений диаметра d и удельного электрического сопротивления ρ цилиндрических изделий, выполненных из медного и алюминиевого материала (рассмотрен последовательный цикл). Из рисунка следует, что действительные и измерянные значения d и ρ хорошо согласуются между собой. Максимальные значения относительных погрешностей γ_d и γ_ρ не превышают 2% и 4% соответственно. Результаты измерений в параллельном цикле расчёты операций определения d и ρ тех же изделий практически согласуются с результатами эксперимента.



1 - медь; 2 - алюминий.

Рис.5. Относительные погрешности измерения d и ρ при различных диаметрах медных и алюминиевых образцов.

Проведенный анализ процедур определения d и ρ с использованием продольного магнитного поля показал, что фазовый экстремальный метод, можно осуществить проще чем амплитудный, поэтому для контроля изделий, которые протяжёны по своему устройству и доступ к концам которых затруднён, был выбран фазовый метод с использованием преобразователя с поперечным к изделию магнитным зондирующем полем. [3]. Такой преобразователь должен сочетать в себе функции проходного и накладного преобразователя, которому в полной мере соответствуют две катушки Гельмгольца (КГ), магнитное поле которых направлено поперек продольной оси изделия.

Измерительная катушка (ИК), как элемент преобразователя, размещается вблизи поверхности изделия (рис.6). Преобразователь (КГ) создает поперечное магнитное поле, т.е. направленное перпендикулярно продольной оси цилиндрического изделия, обеспечивая таким образом однородность поля в котором находится образец.

Для рассмотрения метода одновременного контроля d и ρ воспользуемся уравнением Максвелла и законом Ома в цилиндрической системе координат и при относительной магнитной проницаемости $\mu_r=1$ изделия, получим выражение для напряженности результирующего поперечного магнитного поля снаружи цилиндрического изделия с учётом граничных условий

$$\dot{H}_\perp = \dot{H}_0 \left[1 - \frac{I_2(ka)}{I_0(ka)} \cdot \frac{a^2}{r^2} \cos 2\theta \right] \quad (11)$$

где \dot{H}_0 – напряженность исходного однородного магнитного поля; I_0, I_2 – модифицированные функции Бесселя первого рода; a – радиус цилиндрического изделия; r – радиальная и угловая текущие координаты.

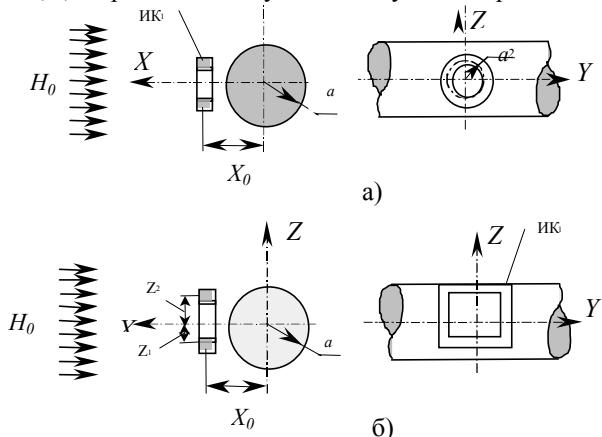


Рис.6. Расположение круглой а) и прямоугольной б) измерительных катушек вблизи изделия.

Для того, чтобы преобразователь измерял непосредственно реакцию цилиндрического изделия на внешнее возбуждающее поле, введём понятие разностного нормированного потока $(\dot{\Phi}_0 - \dot{\Phi}_p) / \dot{\Phi}_0$, где $\dot{\Phi}_0$ – магнитный поток зондирующего поля, пронизывающий измерительную катушку ИК в отсутствие изделия; $\dot{\Phi}_p$ – внешний результирующий магнитный поток. Воспользовавшись выражениями для определения $\dot{H}_\perp, \dot{\Phi}_p, I_0$ и I_2 определим модуль и фазу разностного нормированного потока

$$\left| \frac{\dot{\Phi}_0 - \dot{\Phi}_p}{\eta \cdot \dot{\Phi}_0} \right| = \left| \frac{\dot{\Phi}_{bh}}{\eta \dot{\Phi}_0} \right| = \left| \frac{\dot{E}_{bh}}{\eta \dot{E}_0} \right| = \sqrt{1 - \sqrt{2}(\operatorname{Re} \dot{A} + \operatorname{Im} \dot{A}) + |\dot{A}|^2} \quad (12)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\operatorname{Re} \dot{A} - \operatorname{Im} \dot{A}}{\sqrt{2 - (\operatorname{Re} \dot{A} + \operatorname{Im} \dot{A})}} \quad (13)$$

где $\dot{A} = \frac{I_1(x\sqrt{i})}{xI_0(x\sqrt{i})}$ – комплексная величина; η – форм-фактор, безразмерная геометрическая функция, которая зависит от формы, размеров датчика, цилиндрического изделия и их взаимного расположения.

Для упрощения процесса анализа режимов такого преобразователя при использовании немагнитных материалов, введём безразмерную комплексную величину \dot{N} , которая выражает собой в данном случае удельную вносимую ЭДС ИК вихревокового преобразователя и выразив модифицированные функции Бесселя I_0 и I_2 в (11) через bei - и ber -функции Кельвина, запишем модуль и фазу этой величины:

$$|\dot{N}| = \left| \frac{\dot{E}_{bh}}{\eta \dot{E}_0} \right| = \left(1 - \frac{4}{x^2} \times \frac{xber x bei' x - x ber' x bei x - ber'^2 x - bei'^2 x}{bei^2 x + ber^2 x} \right)^{1/2} \quad (14)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{bh} = \frac{\frac{2}{x} (ber x ber' x + bei x bei' x)}{ber^2 x + bei^2 x - \frac{2}{x} (ber x bei x - bei x ber x)} \quad (15)$$

где “штрих” означает производную соответствующей функции Кельвина по аргументу x .

Анализ выражений (14) и (15) показывает, что фаза разностного нормированного магнитного потока φ_{bh} не зависит от форм-фактора η . Это даёт возможность проведения фазовых измерений и контроля удельного электрического сопротивления изделий практически без отстройки от такого существенно мешающего фактора, как зазор между изделием и измерительной катушкой, что важно в практике неразрушающего контроля.

Зависимости N и φ_{bh} от x , а также измеренные значения E_{bh} , φ_{bh} и известные параметры d и x_0 позволяют установить последовательность измерительных и расчётов операций для одновременного контроля радиуса a и удельного электрического сопротивления ρ цилиндрических проводящих изделий.

Выражение для диаметра при условии использования круглой ИК:

$$d = d_2 \sqrt{\frac{E_{bh}}{2E_0|N|} \left[\frac{1}{1 - \frac{1}{\sqrt{1 + a_2^2 / x_0^2}}} \right]} \quad (16)$$

для прямоугольной ИК (при условии $z_1 = z_2 = z$)
(см. рис.6 б)

$$d = 2x_0 \sqrt{\frac{E_{bh}}{2E_0|N|} \left(1 + \frac{z^2}{x_0^2} \right)} \quad (17)$$

Выражение для определение удельного электрического сопротивления находят в случае круглой ИК:

$$\rho = \frac{\pi \mu_0 d^2 f}{4x^2} \frac{E_{\text{eh}}}{E_0 |N|} \left[\frac{1}{1 - \frac{1}{\sqrt{1 + a_2^2 / x_0^2}}} \right] \quad (18)$$

При использовании прямоугольной катушки имеем

$$\rho = \frac{2\pi\mu_0 f x_0^2}{x^2} \frac{E_{\text{eh}}}{E_0 |N|} \left(1 + \frac{z^2}{x_0^2} \right) \quad (19)$$

Для проверки выбранного фазового экстремального метода контроля с использованием поперечного зондирующего магнитного поля были проведены эксперименты по схеме, представленной на рис. 7.

Используя методику расчёта сигналов электромагнитного преобразователя [1] были выбраны измерительные приборы для контроля диаметра d и удельного электрического сопротивления ρ медных и алюминиевых образцов.

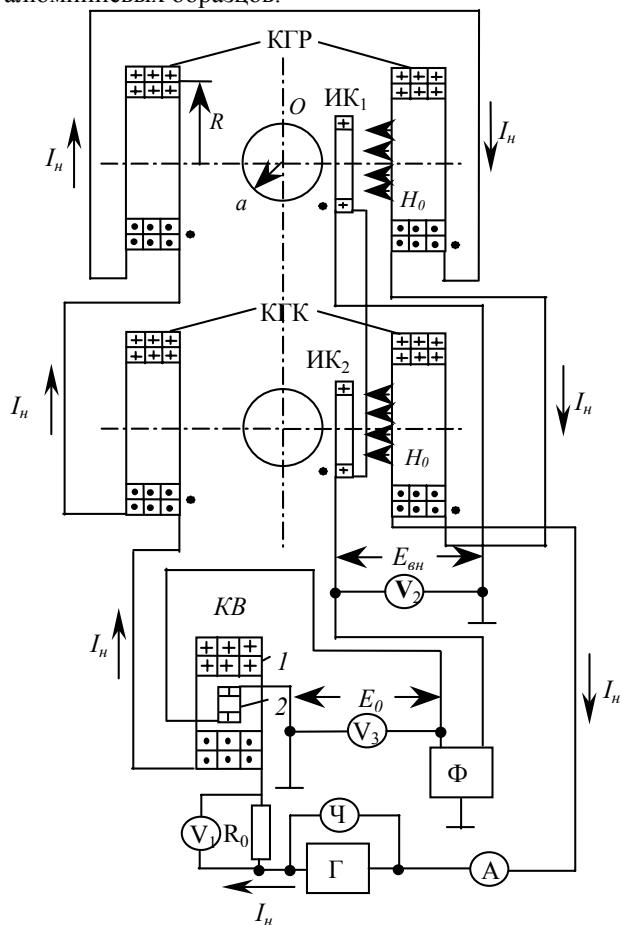


Рис.7. Схема включения электромагнитного преобразователя с поперечным магнитным полем.

Схема содержит две пары идентичных катушек Гельмгольца: рабочие – КГР и компенсационные – КГК, образец – О, две идентичные прямоугольные измерительные катушки: рабочая – ИК₁ и компенсационная – ИК₂, катушка взаимоиндуктивности КВ, с первичной – 1 и вторичной – 2 обмотками, вольтметры V₁, V₂, V₃, генератор синусоидальных сигналов Г, частотометр Ч, образцовое сопротивление R₀, амперметр А и фазометр Ф.

Используя фазовый электромагнитный метод, устанавливают по фазометру Φ значения $\varphi_{\text{eh}} = 61,62^\circ$, что соответствует $S\varphi = S\varphi_{\text{max}}$ изменения частоту зондирующего поля f (см.рис.3 (б)). По результатам измерений f , E_{eh} , E_0 и по известным значениям x_0 и Z , а также по найденному параметру $|N|$ определяют диаметры медного и алюминиевого цилиндрического образца. Затем, используя (18) находят удельное электрическое сопротивление. Погрешности определения величин d и ρ контрольными (микрометрический и мостовой) и в результате эксперимента составляет 0,2% и 0,3% соответственно.

Проведённый анализ погрешностей косвенных и совокупных измерений диаметра d и удельного электрического сопротивления ρ цилиндрических немагнитных изделий, используя методику суммирования этих погрешностей стал решающим при определении точностных характеристик оптимальных режимов предлагаемых преобразователей. Получены следующие выражения для расчёта относительных погрешностей измерения диаметра при использовании:

- продольного зондирующего поля:

$$\gamma_d = 1,1 \left[\gamma_{du}^2 + \left(\frac{1}{2} \gamma_{E_{\text{eh}}} \right)^2 + \left(\frac{1}{2} \gamma_{E_0} \right)^2 + \left(C_d \gamma_{\varphi_{\text{eh}}} \right)^2 \right]^{1/2}; \quad (20)$$

- поперечного зондирующего поля, с круглой ИК:

$$\gamma_{d_K} = 1,1 \left[\left(\gamma_{d_2} \right)^2 + \left(\frac{1}{2} \gamma_{E_{\text{eh}}} \right)^2 + \left(\frac{1}{2} \gamma_{E_0} \right)^2 + \left(C_{\varphi_{\text{eh}}} \gamma_{\varphi_{\text{eh}}} \right)^2 + \left(C_{a_2} \gamma_{a_2} \right)^2 + \left(C_{x_0} \gamma_{x_0} \right)^2 \right]^{1/2}; \quad (21)$$

- поперечного зондирующего поля с прямоугольной ИК:

$$\gamma_{d_{\Pi}} = 1,1 \left[\left(\frac{1}{2} \gamma_{E_{\text{eh}}} \right)^2 + \left(\frac{1}{2} \gamma_{E_0} \right)^2 + \left(C_{\varphi_{\text{eh}}} \gamma_{\varphi_{\text{eh}}} \right)^2 + \left(C_z \gamma_z \right)^2 + \left(C_{x_0} \gamma_{x_0} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (22)$$

а также для расчёта удельного электрического сопротивления в полях различной ориентации:

$$\gamma_{\rho} = 1,1 \sqrt{\left(\gamma_f \right)^2 + \left(2\gamma_d \right)^2 + \left(C_{\rho} \gamma_{\varphi_{\text{eh}}} \right)^2} \quad (23)$$

где γ_d – относительная погрешность измерения величины диаметра изделия; C_d , $C_{\varphi_{\text{eh}}}$, C_{a_2} , C_{x_0} , C_z , C_{ρ} – коэффициенты влияния.

Относительные погрешности измерения отдельных параметров определялись с учетом классов точности используемой измерительной аппаратуры и принимались $\gamma_{E_{\text{eh}}} = \gamma_{E_0} \approx 0,5\%$; $\gamma_{\varphi_{\text{eh}}} = 1\%$, $\gamma_f = 0,1\%$; $\gamma_{du} = 0,2\%$.

Полученные зависимости $\gamma_d = f(x)$ и $\gamma_{\rho} = f(x)$ расположены в основном в области низких значений погрешностей. Так при $x \geq 3$ γ_d и γ_{ρ} слабо зависят от x и лежат вблизи 0,5 и 2,5% соответственно (рис.8). При $x \leq 1$ погрешности возрастают, в связи со слабой реакцией изделия на значительное проникновение магнитного поля в образец.

Таким образом, погрешности γ_d и γ_ρ определяются положением рабочей точки (величиной x) и погрешностями измерительных приборов. Это подтверждает универсальность кривых $\gamma_d = f(x)$ и $\gamma_\rho = f(x)$ и при соответствующих погрешностях измерительных приборов могут быть использованы для определения погрешностей измерения двух параметров изделий с любыми значениями диаметров и удельного электрического сопротивления.

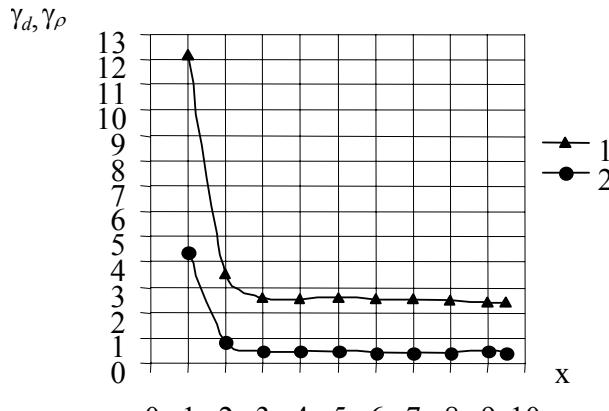


Рис.8. Зависимость γ_ρ (1) и γ_d (2) ТЭМП от x (продольное зондирующее поле)

В результате проведённых исследований преобразователей с продольным и поперечным магнитным полем на примере контроля d и ρ немагнитного проводникового протяжённого цилиндрического изделия была рассмотрена теория работы таких преобразователей на основе уравнений Максвелла и получены выражения для определения модуля и фазы разностного нормированного магнитного потока.

Построены универсальные функции преобразования в виде графиков и массивов точек, связывающие $E_{\text{вн}}$ и $\varphi_{\text{вн}}$ с обобщённым параметром x .

Рассмотрены две модификации метода определения совместного диаметра и удельного электрического сопротивления – амплитудная и фазовая, которые отличаются измеряемыми величинами. Показано преимущество фазового экстремального метода, приведён пример использования на преобразователе с поперечным магнитным полем.

Создана методика расчётов сигналов ТЭМП, создающего продольное магнитное поле. Разработаны схемы включения бесконтактных преобразователей для контроля двух параметров немагнитного цилиндрического изделия реализующие амплитудные и фазовые экстремальные методы.

Разработана методика расчёта погрешностей совместного контроля диаметра и удельного электрического сопротивления цилиндрических немагнитных проводниковых изделий. Получены выражения для оценки погрешностей измерения d и ρ и определены оптимальные диапазоны их измерения в зависимости от значений обобщённого параметра. Погрешность измерения диаметра в рекомендуемом диапазоне измерения не превышает 0,5%, а удельного электрического сопротивления 2,5%.

Результаты данной работы могут быть использованы для допускового контроля проводов ЛЭП на предприятиях – изготовители при эксплуатации в энергетических предприятиях.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Авраменко А.А., Горкунов Б.Г. и др. Методика расчёта сигналов электромагнитного преобразователя с цилиндрическим изделием. // Приборостроение. 1986. №4. С. 64-67.
- [2] Авраменко А.А., Себко В.П. и др. Бесконтактное измерение удельной электрической проводимости цилиндрических изделий в поперечном переменном магнитном поле. // Метрология. 1983. №10. С.48-54.
- [3] Бондаренко В.Е. Вихревоковый преобразователь для контроля параметров линий электропередач в поперечном магнитном поле. // Інфом.-керуючі сис-ми на ЗТ.2001. №2. С.77-80.
- [4] Бондаренко В.Е. Расчёт ожидаемых значений сигналов трансформаторного электромагнитного преобразователя с продольным магнитным полем. // Вестн. Хар. политехн. ин-та. 2002. №3. с. 11-16.
- [5] Бондаренко В.Е., Себко В.П. Бесконтактный вихревоковый контроль диаметра и удельного электрического сопротивления проводов линий электропередачи. // Технічна електродинаміка. 2002. №1. С.69-72.
- [6] Герасимов В.Г., Останин Ю.Я. и др. Неразрушающий контроль качества изделий электромагнитными методами. М.: Энергия, 1978.215с.
- [7] Двайт Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы. М.: Наука. 1973. 228с.
- [8] Себко В.П., Горкунов Б.М., Сиренко Н.Н. Теория и практика электромагнитной диагностики материалов, изделий и конструкций. 111 Міжнар. н-т конф. (Метрологія в електроніці) Харків, 10-12 жовтня 2000р. Т.1, с.21-31.
- [9] Себко В.П., Сиренко Н.Н. и др. Определение магнитной проницаемости и удельной магнитной проводимости цилиндрических изделий. // Дефектоскопия. 1989. №10. С.85-88.
- [10] Соболев В.С., Шкарлет Ю.М. Накладные и экранные датчики. Новосибирск: Наука. 1967. 144с.
- [11] Справочник по специальным функциям с формулами, графиками, таблицами. // Под. ред. М. Абрамовца, И. Стиган.- М.:Наука. 1979. 832с.

Поступила 15.04.03