

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫХ МЕТОДОВ ВИХРЕТОКОВОГО КОНТРОЛЯ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Горкунов Б.М., к.т.н., доц.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"

Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Приборы и методы неразрушающего контроля"  
тел./факс: (057) 707-6380, E-mail: gorkunov@kpi.kharkov.ua

*В роботі розглянуто декілька методів спільного безконтактного контролю магнітної проникності та питомого електричного опору ферромагнітних виробів з допомогою вихорострумових трансформаторних перетворювачів. Одержано основні математичні співвідношення для розрахунку чутливостей та похибок контролю, проведено порівняльний аналіз роботи перетворювачів за метрологічними характеристиками.*

*В работе рассмотрено несколько методов совместного контроля магнитной проницаемости и удельного электрического сопротивления ферромагнитных изделий с помощью вихретоковых трансформаторных преобразователей. Получены основные математические соотношения для расчета чувствительностей и погрешностей контроля, проведен сравнительный анализ работы преобразователя по метрологическим характеристикам.*

Многие узлы агрегатов и механизмов в энергетике, машиностроении и приборостроении выполнены из ферромагнитных материалов и подвергаются различным механическим воздействиям, которые, в конечном счете, приводят к изменению магнитных и электрических параметров ферромагнитного изделия. Поскольку относительная магнитная проницаемость  $\mu_r$  и удельное электрическое сопротивление  $\rho$  функционально связаны с механическим напряжением  $\sigma_M$ , то, определяя их, можно контролировать прочностные характеристики металлических изделий [1, 2]. Известно много методов и устройств бесконтактного определения электромагнитных параметров ферромагнитных изделий [3]. Особое место занимают вихретоковые методы и преобразователи для бесконтактного контроля  $\mu_r$  и  $\rho$ , причем, каждый из них имеет рациональные по точности и чувствительности диапазоны контроля и условия их применения [4].

Данная работа посвящена анализу работы вихретоковых преобразователей при реализации различных методов одновременного бесконтактного контроля  $\mu_r$  и  $\rho$  ферромагнитных изделий и выбору оптимальных по метрологическим характеристикам того или иного метода для различных объектов и условий контроля.

В работах [4, 5] рассмотрены вихретоковые методы и преобразователи для совместного бесконтактного контроля  $\mu_r$  и  $\rho$  ферромагнитных изделий, основанные на измерении трех ЭДС вихретокового преобразователя (ВТП) и соответствующих универсальных функций преобразования.

Данная работа посвящена проведению сравнительного анализа трех методов реализации вихретокового контроля  $\mu_r$  и  $\rho$ , которые основаны на измерении суммарной ЭДС и ее фазы, вносимой ЭДС и ее фазы, а также измерении ЭДС и фазы выходного сигнала ВТП при компенсации части ЭДС, пропорциональной магнитному потоку в воздушном зазоре. Как будет показано ниже, алгоритмы, реализующие рассматриваемые в работе методы, состоят из расчетных и измерительных операций. В связи с развитием микропроцессорной техники, погрешности, возникающие при выполнении расчетных операций, достаточно малы и ими можно пренебречь. Что же касается первичного и вторичного преобразования (измерительные операции), то в этом случае для оценки метрологических параметров (погрешности и чувствительно-

сти) необходимо знать схему включения преобразователя и метрологические характеристики измерительной аппаратуры, используемой для реализации того или иного метода контроля.

Принципиальная схема включения ВТП, с помощью которой можно реализовать все три метода бесконтактного контроля  $\mu_r$  и  $\rho$ , приведена на рис. 1, а векторная диаграмма напряжений ВТП, поясняющая его работу, приведена на рис. 2.

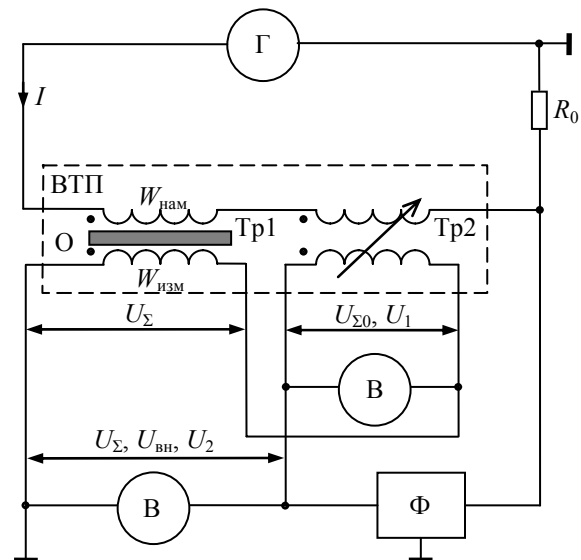


Рис. 1. Принципиальная схема включения ВТП для измерения ЭДС и ее фазы

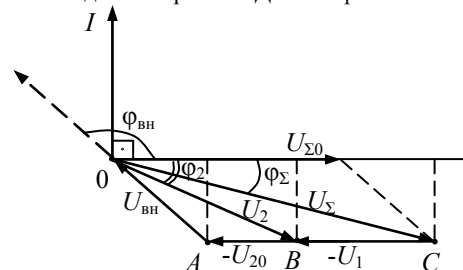


Рис. 2. Векторная диаграмма тока, ЭДС и их фаз ВТП с ферромагнитным изделием

Преобразователь состоит из двух идентичных трансформаторов  $Tr1$  и  $Tr2$  (см. рис. 1), в первом находится исследуемый ферромагнитный образец  $O$ , а второй имеет возможность изменять количество вит-

ков вторичной (измерительной) обмотки от 0 до  $W_{\max}$ . Так как вторичные обмотки Тр1 и Тр2 включены последовательно-встречно, то на выходе ВТП можем получать значения напряжений  $U_{\Sigma}$  (если  $W_{\text{измТр2}} = 0$ ),  $U_{\text{вн}}$  (если  $W_{\text{измТр2}} = W_{\max}$ ) и  $U_2$  (если  $W_{\text{измТр2}}$  будет подобрано таким образом, чтобы на выходе вторичной обмотки Тр2 было напряжение  $U_1 = U_{\Sigma 0}(1 - \eta)$ , где  $\eta = d^2/d_{\text{п}}^2$  - коэффициент заполнения;  $d$  - диаметр образца;  $d_{\text{п}}$  - диаметр вторичной обмотки преобразователя;  $U_{\Sigma 0}$  - ЭДС преобразователя без изделия). При этом, фазометр Ф будет измерять фазовые углы  $\frac{\pi}{2} + \varphi_{\Sigma}$ ,

$\frac{\pi}{2} - \varphi_{\text{вн}}$  и  $\frac{\pi}{2} + \varphi_2$  соответственно.

Для того, чтобы качественно сравнить работу ВТП для реализации трех методов одновременного определения  $\mu_r$  и  $\rho$  ферромагнитных изделий необходимо получить основные соотношения, описывающие данный метод, провести и получить экспериментальные данные измерений ЭДС, их фаз и других параметров преобразователя, а также описать алгоритм последовательности измерительных и расчетных процедур. Затем получить выражения для оценки поведения погрешностей и чувствительностей в широком диапазоне изменения режимов работы преобразователя и после этого провести сравнительный анализ метрологических характеристик ВТП для трех методов контроля  $\mu_r$  и  $\rho$ .

Получим основные расчетные соотношения для реализации метода бесконтактного одновременного определения  $\mu_r$  и  $\rho$  ферромагнитного изделия при измерении  $U_{\Sigma}$  и  $\varphi_{\Sigma}$  выходного сигнала ВТП. Используя результаты работы [6] и векторную диаграмму (см. рис. 2), можно записать:

$$\text{tg}\varphi_2 = \frac{U_{\Sigma} \sin \varphi_{\Sigma}}{U_{\Sigma} \cos \varphi_{\Sigma} - U_1}; \quad (1)$$

$$U_2 = \mu_r \eta U_{\Sigma 0} K, \quad (2)$$

где  $U_2$  и  $\text{tg}\varphi_2$  - ЭДС и фаза, пропорциональные магнитному потоку и его фазе внутри исследуемого изделия;  $K$  - удельный нормированный магнитный поток, который однозначно зависит от обобщенного параметра  $x$ .

Причем, как известно [6]:

$$x = \frac{d}{2} \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r 2\pi f}{\rho}}, \quad (3)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м - магнитная постоянная;  $f$  - частота зондирующего поля.

Используя выражение (2), с учетом того, что  $U_2 = U_{\Sigma} \sin \varphi_{\Sigma} / \sin \varphi_2$  - теорема синусов (см. рис. 2), получим:

$$\mu_r = \frac{U_{\Sigma} \sin \varphi_{\Sigma}}{U_{\Sigma 0} \eta K \sin \varphi_2} = \frac{U_{\Sigma} \sin \varphi_{\Sigma}}{\eta U_{\Sigma 0} \text{Im} K}, \quad (4)$$

где  $\text{Im} K$  - универсальная функция, которая связана через  $x$  с функцией  $\text{tg}\varphi_2$ , т.е.  $\text{Im} K = f_1(\text{tg}\varphi_2)$ .

Подставив выражение (4) в (3), получим:

$$\rho = \frac{\mu_0 \pi d^2 f U_{\Sigma} \sin \varphi_{\Sigma}}{2 U_{\Sigma 0} K_{\rho}}, \quad (5)$$

где  $K_{\rho}$  - универсальная функция преобразования, которая через параметр  $x$  связана с функцией  $\text{tg}\varphi_2$ , т.е.  $K_{\rho} = f_2(\text{tg}\varphi_2)$ .

Аналогичным образом, при реализации второго метода определения  $\mu_r$  и  $\rho$  по измеренным значениям  $U_{\text{вн}}$  и  $\varphi_{\text{вн}}$ , получим основные расчетные соотношения.

Из векторной диаграммы (см. рис. 2) можно получить:

$$\text{tg}\varphi_2 = \frac{U_{\text{вн}} \sin \varphi_{\text{вн}}}{U_{\text{вн}} \cos \varphi_{\text{вн}} + U_{20}}, \quad (6)$$

где  $U_{20} = \eta U_{\Sigma 0}$  - ЭДС преобразователя, пропорциональна магнитному потоку преобразователя без изделия на размере исследуемого изделия.

Используя выражение (2), а также по теореме синусов (см. рис. 2)  $U_2 = U_{\text{вн}} \sin \varphi_{\text{вн}} / \sin \varphi_2$ , получим:

$$\mu_r = \frac{U_{\text{вн}} \sin \varphi_{\text{вн}}}{\eta U_{\Sigma 0} \text{Im} K}. \quad (7)$$

Аналогично для  $\rho$ , получим:

$$\rho = \frac{\mu_0 \pi d^2 f U_{\text{вн}} \sin \varphi_{\text{вн}}}{2 U_{\Sigma 0} K_{\rho}}. \quad (8)$$

Третий метод совместного определения  $\mu_r$  и  $\rho$  заключается в том, что вначале компенсируют часть ЭДС преобразователя, пропорциональную магнитному потоку в зазоре, а после этого измеряют  $U_2$  и  $\varphi_2$ . Зная  $\varphi_2$ , по функциональной зависимости  $K = f_3(\varphi_2)$  [6], находят  $K$ , а на основании формулы (2)  $\mu_r$  определяют как:

$$\mu_r = \frac{U_2}{\eta U_{\Sigma 0} K} = \frac{U_2}{U_{20} K}. \quad (9)$$

Значение  $\rho$  определяют из выражения:

$$\rho = \frac{\mu_0 \pi d^2 f U_2}{2 U_{\Sigma 0} N}, \quad (10)$$

где  $N = x^2 K$  - универсальная функция преобразования, которая зависит от  $\varphi_2$ , т.е.  $N = f_4(\varphi_2)$ .

Таким образом, получим совмещенный универсальный алгоритм последовательности измерительных и расчетных операций для реализации трех методов одновременного контроля  $\mu_r$  и  $\rho$  ферромагнитных изделий, который приведен на рис. 3.

Одной из важных метрологических характеристик вихретоковых преобразователей является его чувствительность. Для сравнительной оценки по чувствительности ВТП, реализующих три метода одновременного контроля  $\mu_r$  и  $\rho$ , вначале получим выражения, которые связывают параметры выходного сигнала преобразователя с параметрами объекта контроля и режимом работы ВТП (т.е. с обобщенным параметром  $x$ ). Так, используя векторную диаграмму (см. рис. 2), для схемы включения преобразователя с измерением  $U_{\Sigma}$  и  $\varphi_{\Sigma}$  получим:

$$U_{\Sigma} = U_{\Sigma 0} \sqrt{(\eta \mu_r K)^2 + 2\eta(1 - \eta)\mu_r K \cos \varphi_2 + (1 - \eta)^2}; \quad (11)$$

$$\varphi_{\Sigma} = \arctg\left(\frac{\mu_r \eta K \sin \varphi_2}{\mu_r \eta K \cos \varphi_2 + 1 - \eta}\right). \quad (12)$$

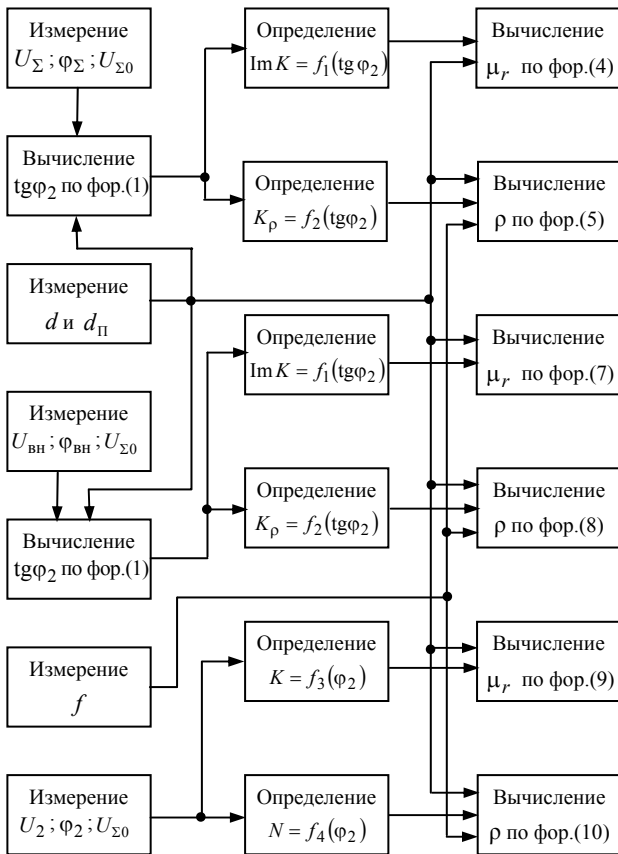


Рис. 3. Совмещенный алгоритм определения  $\mu_r$  и  $\rho$

Для схемы с измерением  $U_{вн}$  и  $\varphi_{вн}$  аналогично:

$$U_{вн} = \eta U_{\Sigma 0} \sqrt{(\mu_r K)^2 - 2\mu_r K \cos \varphi_2 + 1}; \quad (13)$$

$$\varphi_{вн} = \arctg \left( \frac{\mu_r K \sin \varphi_2}{\mu_r K \cos \varphi_2 - 1} \right). \quad (14)$$

В случае использования схемы включения ВТП с частичной компенсацией ЭДС, пропорциональной потоку в воздушном зазоре, на выходе преобразователя будем иметь значение ЭДС  $U_2$ , которое определяется по формуле (2), и непосредственно фазовый угол  $\varphi_2$ , совпадающий с фазовым углом магнитного потока в изделии. Так как сравнивать различные методы реализации ВТП возможно только по относительным чувствительностям, то, исходя из выражений (2) и (11) - (14), получим формулы для расчета относительных чувствительностей ВТП по напряжению и фазе, т.е.

$$S_{U_{\Sigma}} = \frac{\partial U_{\Sigma} / U_{\Sigma 0}}{\partial x} = \frac{[\eta \mu_r K + (1 - \eta) \cos \varphi_2] \frac{\partial K}{\partial x} + K(1 - \eta) \frac{\partial \cos \varphi_2}{\partial x}}{\sqrt{(\eta \mu_r K)^2 + 2\eta \mu_r (1 - \eta) K \cos \varphi_2 + (1 - \eta)^2}}; \quad (15)$$

$$S_{\varphi_{\Sigma}} = \frac{\partial \varphi_{\Sigma}}{\partial x} = \frac{\frac{\partial K}{\partial x} (1 - \eta) \sin \varphi_2 + K[\eta \mu_r K + (1 - \eta) \cos \varphi_2] \frac{\partial \varphi_2}{\partial x}}{(\eta \mu_r K)^2 + 2\eta \mu_r (1 - \eta) K \cos \varphi_2 + (1 - \eta)^2}; \quad (16)$$

$$S_{U_{вн}} = \frac{\partial U_{вн} / U_{\Sigma 0}}{\partial x} = \eta \mu_r \frac{(\mu_r K - \cos \varphi_2) \frac{\partial K}{\partial x} - K \frac{\partial \cos \varphi_2}{\partial x}}{\sqrt{(\mu_r K)^2 - 2\mu_r K \cos \varphi_2 + 1}}; \quad (17)$$

$$S_{\varphi_{вн}} = \frac{\partial \varphi_{вн}}{\partial x} = \mu_r \frac{K(\mu_r K - \cos \varphi_2) \frac{\partial \varphi_2}{\partial x} - \frac{\partial K}{\partial x} \sin \varphi_2}{(\mu_r K)^2 - 2\mu_r K \cos \varphi_2 + 1}; \quad (18)$$

$$S_{U_2} = \frac{\partial U_2 / U_{\Sigma 0}}{\partial x} = \eta \mu_r \frac{\partial K}{\partial x}; \quad (19)$$

$$S_{\varphi_2} = \frac{\partial \varphi_2}{\partial x}, \quad (20)$$

где  $\partial K / \partial x$ ,  $\partial \varphi_2 / \partial x$ ,  $\partial \cos \varphi_2 / \partial x$  – частные производные универсальных функций преобразования, которые определяются для каждой рабочей точки преобразователя.

Для построения экспериментальных зависимостей относительных чувствительностей по амплитуде и фазе выходного сигнала от обобщенного параметра  $x$  в работе использовался трансформаторный ВТП с параметрами:  $d_{\Pi} = 16,2$  мм;  $l_{\Pi} = 176$  мм; напряженность поля  $H_0 = 100$  А/м. Для исследования были выбраны два образца: нержавеющая сталь X18H10T (с параметрами:  $d = 10$  мм;  $\mu_r = 1,5$ ;  $\rho = 0,715 \cdot 10^{-6}$  Ом·м) и сталь 45 (с параметрами:  $d = 10$  мм;  $\mu_r = 100$ ;  $\rho = 0,2 \cdot 10^{-6}$  Ом·м). Изменение параметра  $x$  осуществлялось изменением частоты зондирующего поля.

На рис. 4 а-е представлены зависимости относительных чувствительностей по амплитуде и фазе выходного сигнала ВТП для трех методов одновременного контроля  $\mu_r$  и  $\rho$ .

Вторым важным метрологическим параметром ВТП является погрешность одновременного определения  $\mu_r$  и  $\rho$ . В нашем случае, поскольку рассматриваемые методы являются косвенными, то, используя результаты работы [7], получим выражения для оценки погрешностей контроля  $\gamma_{\mu}$  и  $\gamma_{\rho}$  для каждого метода. Для этого, используя выражения (4) и (5), найдем соотношения для определения неисключенной систематической составляющей погрешности при доверительной вероятности 0,95 в виде:

$$\gamma_{\mu} = k \sqrt{\gamma_{U_{\Sigma}}^2 + (\varphi_{\Sigma} \operatorname{ctg} \varphi_{\Sigma})^2 \gamma_{\varphi_{\Sigma}}^2 + \gamma_{U_{\Sigma 0}}^2 + 4\gamma_d^2 + \gamma_{d_{\Pi}}^2 + \gamma_{\operatorname{Im} K}^2}; \quad (21)$$

$$\gamma_{\rho} = k \sqrt{\gamma_{U_{\Sigma}}^2 + (\varphi_{\Sigma} \operatorname{ctg} \varphi_{\Sigma})^2 \gamma_{\varphi_{\Sigma}}^2 + \gamma_{U_{\Sigma 0}}^2 + 4\gamma_{d_{\Pi}}^2 + \gamma_f^2 + \gamma_{K_{\rho}}^2}, \quad (22)$$

где  $k = 1,11$  – коэффициент надежности при доверительной вероятности 0,95;  $\gamma_{U_{\Sigma}}$ ,  $\gamma_{U_{\Sigma 0}}$ ,  $\gamma_{\varphi_{\Sigma}}$ ,  $\gamma_d$ ,  $\gamma_{d_{\Pi}}$ ,  $\gamma_f$  – погрешности определения параметров указанных в индексах;  $\gamma_{\operatorname{Im} K}$  и  $\gamma_{K_{\rho}}$  – погрешности определения значений  $\operatorname{Im} K$  и  $K_{\rho}$  из универсальных функциональных зависимостей  $\operatorname{Im} K = f_1(\operatorname{tg} \varphi_2)$  и  $K_{\rho} = f_2(\operatorname{tg} \varphi_2)$  в точке, соответствующей полученному значению  $\operatorname{tg} \varphi_2$  из формулы (1), которые можно определить из выражений:

$$\gamma_{\operatorname{Im} K} = \frac{f_1'(\operatorname{tg} \varphi_2) \operatorname{tg} \varphi_2}{f_1(\operatorname{tg} \varphi_2)} \gamma_{\operatorname{tg} \varphi_2} = A_1 \gamma_{\operatorname{tg} \varphi_2}; \quad (23)$$

$$\gamma_{K_{\rho}} = \frac{f_2'(\operatorname{tg} \varphi_2) \operatorname{tg} \varphi_2}{f_2(\operatorname{tg} \varphi_2)} \gamma_{\operatorname{tg} \varphi_2} = A_2 \gamma_{\operatorname{tg} \varphi_2}. \quad (24)$$

Значения коэффициентов  $A_1$  и  $A_2$  можно определять по конечным приращениям аргумента и функции в рабочей точке по формулам:

$$A_1 = \frac{\Delta \operatorname{Im} K \operatorname{tg} \varphi_2}{\Delta \operatorname{tg} \varphi_2 \operatorname{Im} K}; \quad (25)$$

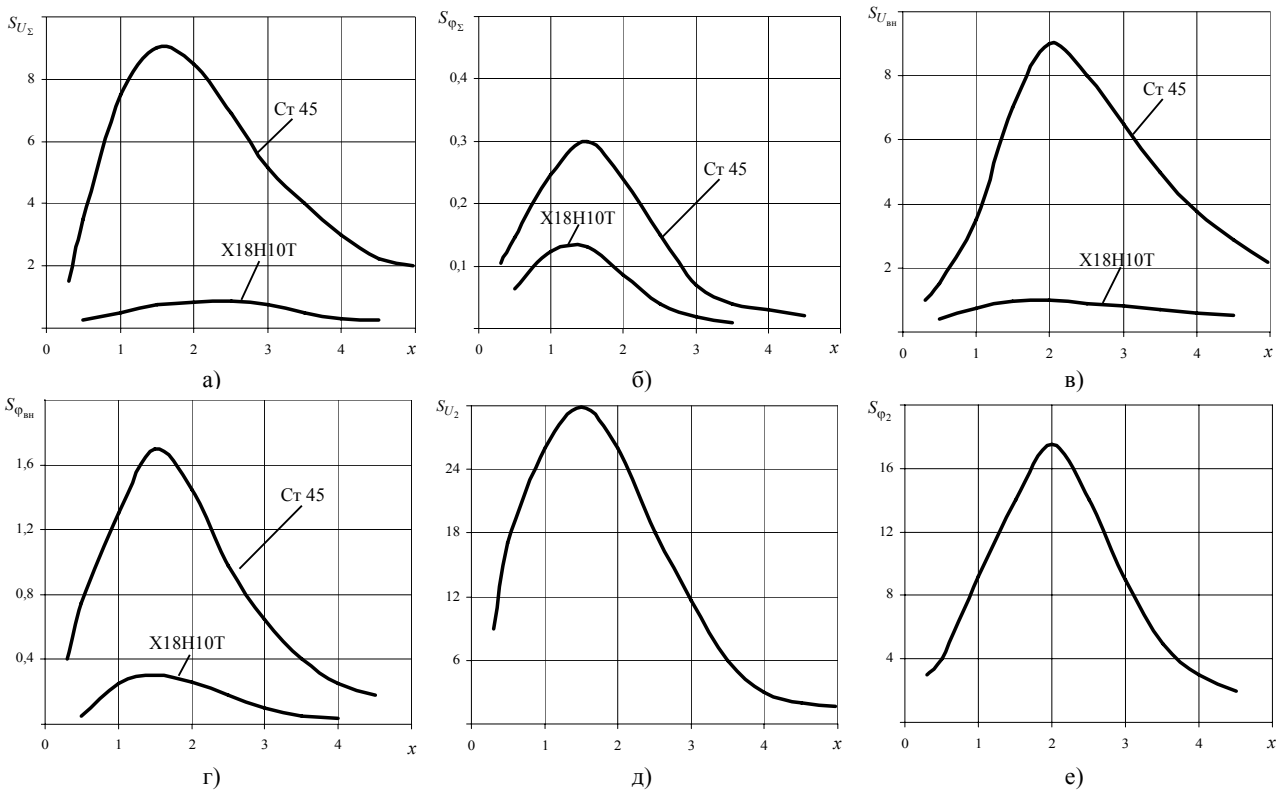


Рис. 4. Зависимости относительных чувствительностей по амплитуде и фазе для случаев измерения:  $U_{\Sigma}$  и  $\varphi_{\Sigma}$  (а, б);  $U_{ВН}$  и  $\varphi_{ВН}$  (в, г);  $U_2$  и  $\varphi_2$  (д, е)

$$A_2 = \frac{\Delta K_{\rho} \operatorname{tg} \varphi_2}{\Delta \operatorname{tg} \varphi_2 K_{\rho}}, \quad (26)$$

где  $\Delta \operatorname{Im} K$ ,  $\Delta K_{\rho}$  и  $\Delta \operatorname{tg} \varphi_2$  – бесконечно малые приращения аргумента и функций вблизи рабочей точки  $\operatorname{tg} \varphi_2$ .

Причем, используя выражение (1), по аналогичной методике получим:

$$\gamma_{\operatorname{tg} \varphi_2}^2 = (a_1 \gamma_{U_{\Sigma}})^2 + (a_2 \gamma_{\varphi_{\Sigma}})^2 + (a_3 \gamma_{U_{\Sigma 0}})^2 + (a_4 \gamma_{\eta})^2, \quad (27)$$

где  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  и  $a_4$  – коэффициенты влияния, которые определяются как частные производные по измеренным параметрам и равны соответственно:

$$a_1 = \frac{\partial \operatorname{tg} \varphi_2 U_{\Sigma}}{\partial U_{\Sigma} \operatorname{tg} \varphi_2} = 1 - \frac{U_{\Sigma} \cos \varphi_{\Sigma}}{U_{\Sigma} \cos \varphi_{\Sigma} - U_{\Sigma 0}(1-\eta)}; \quad (28)$$

$$a_2 = \frac{\partial \operatorname{tg} \varphi_2 \varphi_{\Sigma}}{\partial \varphi_{\Sigma} \operatorname{tg} \varphi_2} = \frac{\varphi_{\Sigma} [U_{\Sigma} - U_{\Sigma 0}(1-\eta) \cos \varphi_{\Sigma}]}{\sin \varphi_{\Sigma} [U_{\Sigma} \cos \varphi_{\Sigma} - U_{\Sigma 0}(1-\eta)]}; \quad (29)$$

$$a_3 = \frac{\partial \operatorname{tg} \varphi_2 U_{\Sigma 0}}{\partial U_{\Sigma 0} \operatorname{tg} \varphi_2} = \frac{U_{\Sigma 0}(1-\eta)}{U_{\Sigma} \cos \varphi_{\Sigma} - U_{\Sigma 0}(1-\eta)}; \quad (30)$$

$$a_4 = \frac{\partial \operatorname{tg} \varphi_2 \eta}{\partial \eta \operatorname{tg} \varphi_2} = \frac{\eta U_{\Sigma 0}}{U_{\Sigma 0}(1-\eta) - U_{\Sigma} \cos \varphi_{\Sigma}}. \quad (31)$$

Аналогичным образом можно найти выражения для оценки погрешностей контроля  $\mu_r$  и  $\rho$  вторым методом, при этом, используя выражения (6) - (8), получим:

$$\gamma_{\mu} = k \sqrt{\gamma_{U_{ВН}}^2 + (\varphi_{ВН} \operatorname{ctg} \varphi_{ВН})^2 \gamma_{\varphi_{ВН}}^2 + \gamma_{U_{\Sigma 0}}^2 + 4\gamma_d^2 + 4\gamma_{d\Pi}^2 + \gamma_{\operatorname{Im} K}^2}; \quad (32)$$

$$\gamma_{\rho} = k \sqrt{\gamma_{U_{ВН}}^2 + (\varphi_{ВН} \operatorname{ctg} \varphi_{ВН})^2 \gamma_{\varphi_{ВН}}^2 + \gamma_{U_{\Sigma 0}}^2 + 4\gamma_{d\Pi}^2 + 4\gamma_f^2 + \gamma_{K_{\rho}}^2}, \quad (33)$$

где  $\gamma_{\operatorname{Im} K}$  и  $\gamma_{K_{\rho}}$  – определяют по формулам (23) -

(26), а  $\gamma_{\operatorname{tg} \varphi_2}$ , используя выражение (6) находят как:

$$\gamma_{\operatorname{tg} \varphi_2}^2 = (\epsilon_1 \gamma_{U_{ВН}})^2 + (\epsilon_2 \gamma_{\varphi_{ВН}})^2 + (\epsilon_3 \gamma_{U_{\Sigma 0}})^2 + (\epsilon_4 \gamma_{\eta})^2, \quad (34)$$

где  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$ ,  $\epsilon_3$  и  $\epsilon_4$  – коэффициенты влияния, которые равны соответственно:

$$\epsilon_1 = \frac{\partial \operatorname{tg} \varphi_2 U_{ВН}}{\partial U_{ВН} \operatorname{tg} \varphi_2} = 1; \quad (35)$$

$$\epsilon_2 = \frac{\partial \operatorname{tg} \varphi_2 \varphi_{ВН}}{\partial \varphi_{ВН} \operatorname{tg} \varphi_2} = \frac{\varphi_{ВН} (U_{ВН} + \eta U_{\Sigma 0} \cos \varphi_{ВН})}{\sin \varphi_{ВН} (U_{ВН} \cos \varphi_{ВН} + U_{\Sigma 0} \eta)}; \quad (36)$$

$$\epsilon_3 = \frac{\partial \operatorname{tg} \varphi_2 U_{\Sigma 0}}{\partial U_{\Sigma 0} \operatorname{tg} \varphi_2} = -\frac{\eta U_{\Sigma 0}}{U_{ВН} \cos \varphi_{ВН} - U_{\Sigma 0} \eta}; \quad (37)$$

$$\epsilon_4 = \frac{\partial \operatorname{tg} \varphi_2 \eta}{\partial \eta \operatorname{tg} \varphi_2} = -\frac{\eta U_{\Sigma 0}}{U_{ВН} \cos \varphi_{ВН} - U_{\Sigma 0} \eta}. \quad (38)$$

И наконец, для третьего метода реализации, используя выражения (9) и (10) получим:

$$\gamma_{\mu} = k \sqrt{\gamma_{U_2}^2 + \gamma_{U_{20}}^2 + \gamma_K^2 + \gamma_{\operatorname{HK}}^2}; \quad (39)$$

$$\gamma_{\rho} = k \sqrt{\gamma_{U_2}^2 + \gamma_{U_{\Sigma 0}}^2 + \gamma_f^2 + \gamma_N^2 + \gamma_{\operatorname{HK}}^2}, \quad (40)$$

где  $\gamma_{\operatorname{HK}}$  – погрешность недокомпенсации, которая имеет второй порядок малости и может не учитываться, а  $\gamma_K$  и  $\gamma_N$  находят из выражений:

$$\gamma_K = \frac{f_3'(\varphi_2) \varphi_2}{f_3(\varphi_2)} \gamma_{\varphi_2} = A_3 \gamma_{\varphi_2}; \quad (41)$$

$$\gamma_N = \frac{f_4'(\varphi_2) \varphi_2}{f_4(\varphi_2)} \gamma_{\varphi_2} = A_4 \gamma_{\varphi_2}, \quad (42)$$

где  $A_3$  и  $A_4$  – коэффициенты влияния, которые определяются аналогичным образом, как  $A_1$  и  $A_2$ ;  $\gamma_{\varphi_2}$  – погрешность фазометра.

Для получения зависимостей погрешностей контроля  $\gamma_{\mu}$  и  $\gamma_{\rho}$  от обобщенного параметра  $x$  для трех

методов реализации в эксперименте использовались приборы с высокими точностными характеристиками: по напряжению  $\gamma_U \approx 0,2\%$  (вольтметр В7-34); по фазе  $\gamma_\phi \approx 0,2\%$  (фазометр Ф2-34); по частоте  $\gamma_f \approx 0,1\%$  (частотомер ЧЗ-34); измерение геометрических размеров осуществлялось с погрешностью  $\gamma_d \approx 0,1\%$ ; погрешность недокомпенсации  $\gamma_{НК}$  составляла менее

0,01 %, а точность определения коэффициентов влияния достаточно высока, т.к. они находились расчетным путем.

На рис. 5 а-е приведены зависимости относительных погрешностей одновременного бесконтактного контроля  $\gamma_\mu$  и  $\gamma_\rho$  от обобщенного параметра  $x$  для трех методов.

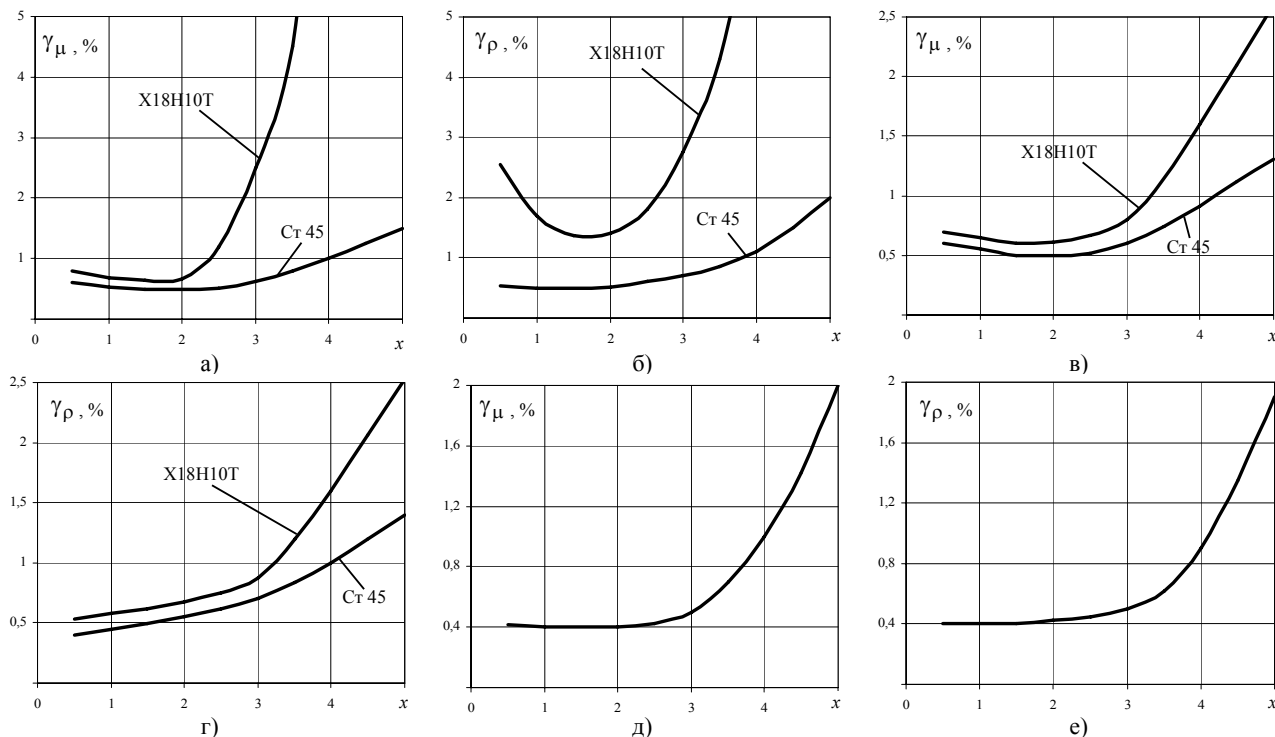


Рис. 5. Зависимости относительных погрешностей  $\gamma_\mu$  и  $\gamma_\rho$  от обобщенного параметра  $x$  для первого (а, б), второго (в, г) и третьего (д, е) методов контроля

Анализ поведения зависимостей относительных чувствительностей по амплитуде и фазе ВТП (см. рис. 4 а-е) показывает, что для всех методов существует диапазон изменения  $x$ , при котором достигаются максимальные значения чувствительностей  $S_U$  и  $S_\phi$ . Абсолютные же значения различны и наибольшую чувствительность ВТП имеет при реализации метода с компенсацией магнитного потока в воздушном зазоре (см. рис. 4 д, е), для которого  $S_{U_2} \approx 25$  ( $1 < x < 2$ ) и  $S_{\phi_2} \approx 15$  ( $1,5 < x < 2,5$ ). Следует отметить, что и погрешности определения  $\gamma_\mu$  и  $\gamma_\rho$  для этого метода меньше, чем у других методов и составляют  $\gamma_\mu \approx 0,4\%$  ( $0,5 < x < 3,0$ ) и  $\gamma_\rho \approx 0,5\%$  ( $0,5 < x < 3,5$ ). Однако, трудоемкость реализации данного метода намного сложнее и эффективнее использовать его, когда геометрические размеры ВТП и контролируемых образцов неизменны. Что же касается двух других методов одновременного контроля  $\mu_r$  и  $\rho$ , то более предпочтительным оказывается метод, основанный на измерении  $U_{ВН}$  и  $\phi_{ВН}$ , особенно для исследуемых образцов с малыми значениями  $\mu_r$  (нержавеющие стали, парамагнитные чугуны и т.д.) и малыми значениями коэффициента заполнения (диаметрами изделия).

Результаты работы позволяют сделать вывод, что у каждого метода есть свои преимущества и недостатки, а выбор того или иного метода будет, в конеч-

ном счете, определяться поставленной задачей по достижению необходимых метрологических параметров в заданных режимах работы преобразователя и сортамента контролируемых изделий.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Измерения, контроль, испытания и диагностика. Т. III-7 / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, В.Н. Филинов и др.; Под общ. ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, – 1996. – 464 с.
- [2] Спектор С.А. Электрические измерения физических величин. – Л.: Энергоатомиздат, – 1987. – 320 с.
- [3] Неразрушающий контроль: Справочник. В 7 т. Т. 2 / Под общ. ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, – 2003. – 688 с.
- [4] Горкунов Б.М., Тюпа И.В. Вихрековый двухпараметровый контроль ферромагнитных цилиндрических изделий // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Зб. наук. праць. – Харків НТУ "ХПИ". – № 5. – 2004. – С. 93-99.
- [5] Горкунов Б.М., Тюпа И.В. Точностные характеристики бесконтактного одновременного измерения магнитной проницаемости и электропроводности // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. – Київ: Інститут електродинаміки НАН України. – Ч. 3. – 2005. – С. 97-100.
- [6] Бондаренко В.И., Горкунов Б.М., Себко В.П., Тюпа В.И. Бесконтактные измерения электромагнитных характеристик цилиндрических изделий // Измерительная техника. – № 6. – 1984. – С. 57-58.
- [7] Захаров И.П., Кукуш В.Д. Теория неопределенности в измерениях. Уч. пособие. – Харьков. – 2002. – 256 с.

Надійшла 27.11.2006