

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_{Σ} (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 Φ 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 μ_r и ρ 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 μ_r и ρ .

Получим основные расчетные соотношения для реализации метода бесконтактного одновременного определения μ_r и ρ ферромагнитного изделия при измерении U_{Σ} и φ_{Σ} 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_{ρ} - 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 μ_r и ρ 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 ρ , получим:

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

Третий метод совместного определения μ_r и ρ заключается в том, что вначале компенсируют часть ЭДС преобразователя, пропорциональную магнитному потоку в зазоре, а после этого измеряют U_2 и φ_2 . Зная φ_2 , по функциональной зависимости $K = f_3(\varphi_2)$ [6], находят K , а на основании формулы (2) μ_r определяют как:

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

Значение ρ определяют из выражения:

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

где $N = x^2 K$ - универсальная функция преобразования, которая зависит от φ_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 μ_r и ρ 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 μ_r и ρ , 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_{Σ} и φ_{Σ} получим:

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

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

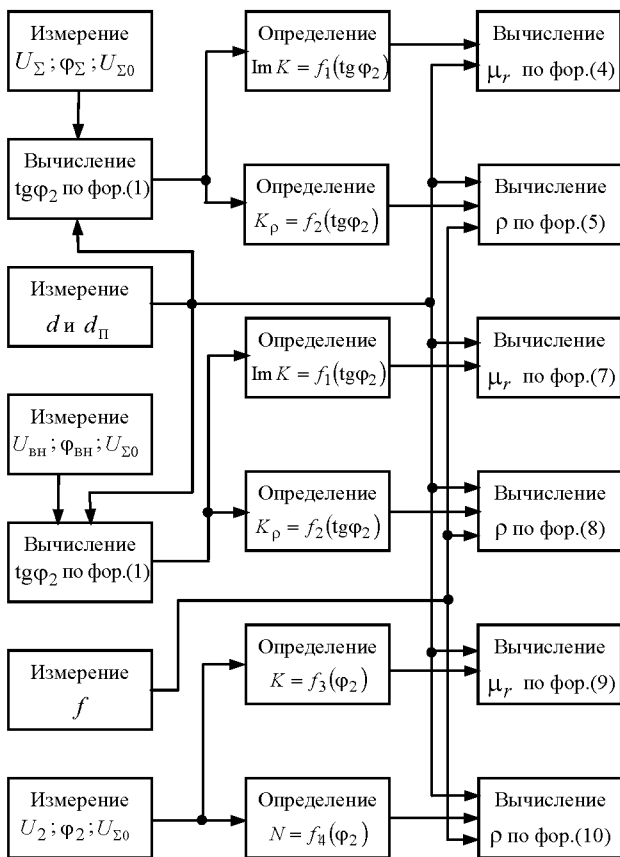


Рис. 3. Совмещенный алгоритм определения μ_r и p

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 φ_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; $\mu_r = 1,5$; $p = 0,715 \cdot 10^{-6}$ Ом·м) и сталь 45 (с параметрами: $d = 10$ мм; $\mu_r = 100$; $p = 0,2 \cdot 10^{-6}$ 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 μ_r и p .

Вторым важным метрологическим параметром ВТП является погрешность одновременного определения μ_r и p . В нашем случае, поскольку рассматриваемые методы являются косвенными, то, используя результаты работы [7], получим выражения для оценки погрешностей контроля γ_{μ} и γ_p 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:

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

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

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

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

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

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

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

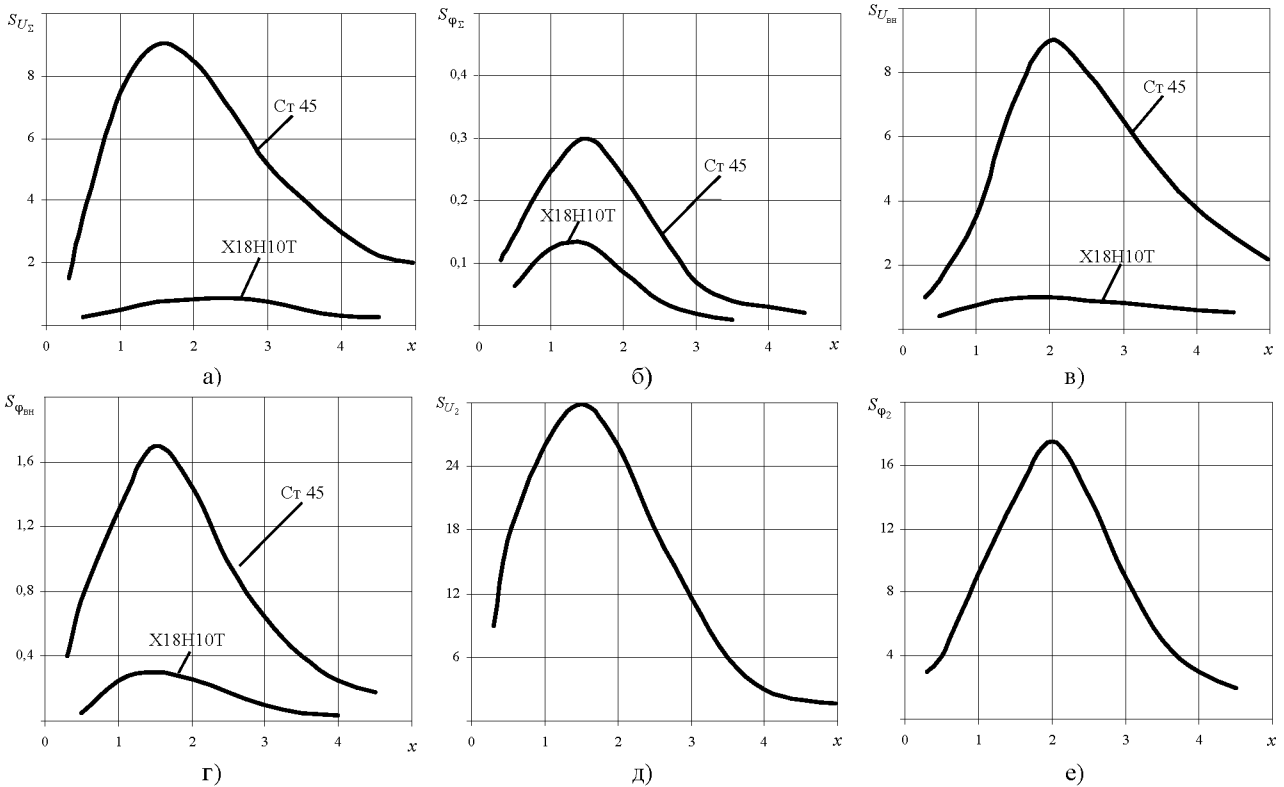


Рис. 4. Зависимости относительных чувствительностей по амплитуде и фазе для случаев измерения: U_{Σ} и φ_{Σ} (а, б); $U_{ВН}$ и $\varphi_{ВН}$ (в, г); U_2 и φ_2 (д, е)

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

где $\Delta \operatorname{Im} K$, ΔK_p 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 μ_r и ρ вторым методом, при этом, используя выражения (6) - (8), получим:

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

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

где $\gamma_{\operatorname{Im} K}$ и γ_{K_p} – определяют по формулам (23) - (26), а $\gamma_{\operatorname{tg} \varphi_2}$, используя выражение (6) находят как:

$$\gamma_{\operatorname{tg} \varphi_2}^2 = (e_1 \gamma_{U_{ВН}})^2 + (e_2 \gamma_{\varphi_{ВН}})^2 + (e_3 \gamma_{U_{\Sigma 0}})^2 + (e_4 \gamma_{\eta})^2, \quad (34)$$

где e_1 , e_2 , e_3 и e_4 – коэффициенты влияния, которые равны соответственно:

$$e_1 = \frac{\partial \operatorname{tg} \varphi_2 U_{ВН}}{\partial U_{ВН} \operatorname{tg} \varphi_2} = 1; \quad (35)$$

$$e_2 = \frac{\partial \operatorname{tg} \varphi_2 \varphi_{ВН}}{\partial \varphi_{ВН} \operatorname{tg} \varphi_2} = \frac{\varphi_{ВН} (U_{ВН} + \eta U_{\Sigma 0} \cos \varphi_{ВН})}{\sin \varphi_{ВН} (U_{ВН} \cos \varphi_{ВН} + U_{\Sigma 0} \eta)}; \quad (36)$$

$$e_3 = \frac{\partial \operatorname{tg} \varphi_2 U_{\Sigma 0}}{\partial U_{\Sigma 0} \operatorname{tg} \varphi_2} = -\frac{\eta U_{\Sigma 0}}{U_{ВН} \cos \varphi_{ВН} - U_{\Sigma 0} \eta}; \quad (37)$$

$$e_4 = \frac{\partial \operatorname{tg} \varphi_2 \eta}{\partial \eta \operatorname{tg} \varphi_2} = -\frac{\eta U_{\Sigma 0}}{U_{ВН} \cos \varphi_{ВН} - U_{\Sigma 0} \eta}. \quad (38)$$

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 γ_K и γ_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 ; γ_{φ_2} – погрешность фазометра.

Для получения зависимостей погрешностей контроля γ_{μ} и γ_{ρ} 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 $\gamma_\varphi \approx 0,2\%$ (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 γ_μ и γ_ρ от обобщенного параметра x для трех методов.

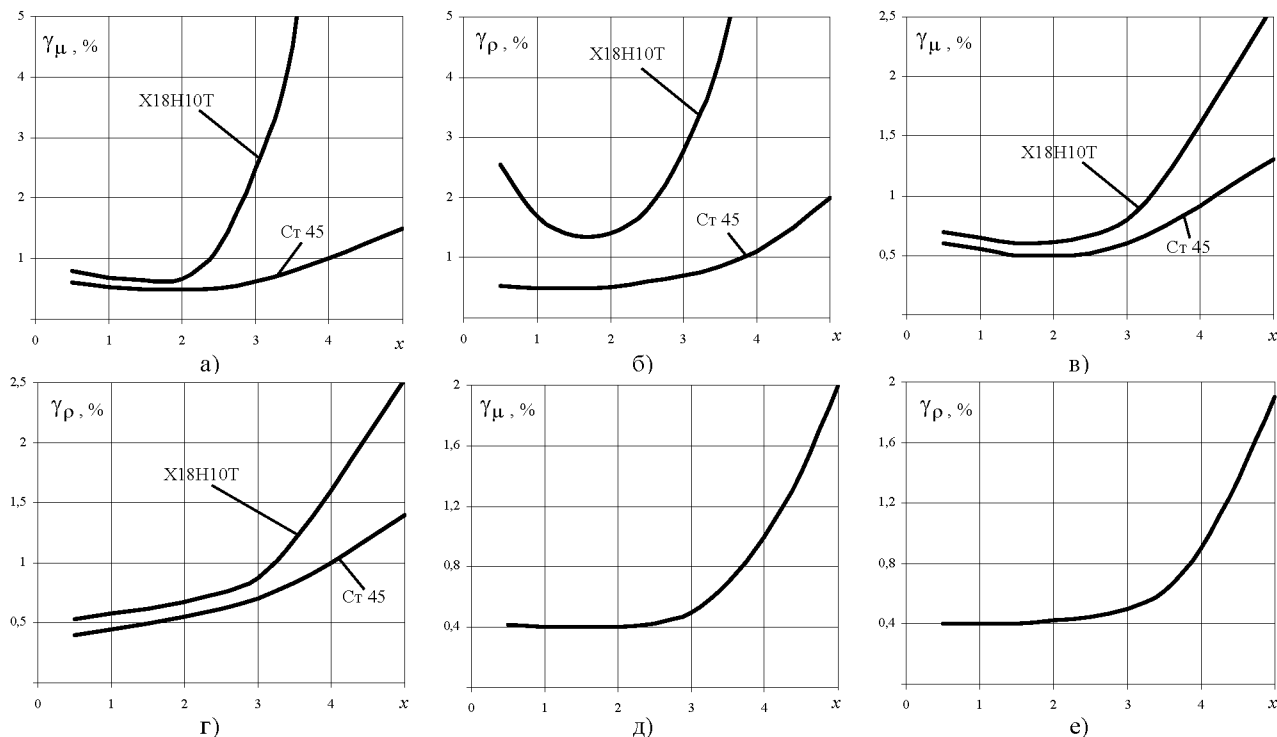


Рис. 5. Зависимости относительных погрешностей γ_μ и γ_ρ от обобщенного параметра x для первого (а, б), второго (в, г) и третьего (д, е) методов контроля

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_φ . 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 $S_{\varphi_2} \approx 15$ ($1,5 < x < 2,5$). Следует отметить, что и погрешности определения γ_μ и γ_ρ 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 μ_r и ρ , то более предпочтительным оказывается метод, основанный на измерении $U_{вн}$ и $\varphi_{вн}$, особенно для исследуемых образцов с малыми значениями μ_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. Клоев, Ф.Р. Соснин, В.Н. Филинов и др.; Под общ. ред. В.В. Клоева. – 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. Клоева. – 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 "ХПІ". – № 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