

УДК 620.179.12

Себко В.В.

ЧЕТЫРЁХПАРАМЕТРОВЫЙ ВИХРЕТОКОВЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЛОСКИХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ, ОСНОВАННЫЙ НА КРАТНЫХ ЧАСТОТАХ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ВИХРЕТОКОВОГО ДАТЧИКА

1. Введение

На сегодняшний день представляет особый интерес, развитие многопараметровых вихретоковых методов для контроля параметров плоских изделий. Неразрушающий контроль параметров плоских объектов, а именно двухпараметровые вихретоковые методы контроля электромагнитных параметров μ_r и σ рассмотрены в работах [2–4,9]. Трёхпараметровые методы вихретокового контроля μ_r , σ , и площади поперечного сечения S_0 плоских изделий, основанные на экстремуме фазового угла суммарной ЭДС E_{Σ} , рассмотрены в работах [5,6]. Недостатком методов, описанных в работах [2–6], является то, что они не учитывают температуру, при которой проходит контроль электромагнитных параметров плоских изделий, что существенно снижает точность такого контроля. В работе [8] рассмотрены вихретоковые двухпараметровые методы контроля параметров немагнитных пластин: удельного электрического сопротивления ρ и температуры t , но при этом не проводится контроль параметров ферромагнитных изделий, что очень важно, к примеру, при контроле пластин трансформаторов электродвигателей. В работе [7] рассмотрена возможность усовершенствования (повышение точности и эффективности) двухпараметрового электромагнитного метода [2] за счет совместного определения μ_{rt} и σ_t с температурой t и рассчитаны относительные погрешности измерения параметров ферромагнитного изделия $\gamma_{\mu_{rt}}$, γ_{σ_t} и γ_t .

Трёхпараметровый метод, позволяющий контролировать параметры цилиндрических изделий, основанный на кратных частотах трансформаторного вихретокового датчика (ТВД), описан в работе [1].

Достоинством этого метода является то, что в отличие от методов, рассмотренных в [2–9] на кратных частотах легче определить много параметров исследуемого образца и существенно упрощаются функции преобразования, на которых основаны эти методы. Следует отметить, что методы [1–9] реализуются на базе трансформаторного вихретокового датчика (ТВД) и поэтому имеют сложный алгоритм измерительных и расчётных операций по определению контролируемых параметров изделий. Кроме того, ТВД имеет достаточно сложные схемы включения. В этом плане выгодно отличаются вихретоковые параметрические преобразователи, которые обладают достаточно простой конструкцией и включаются в мостовые схемы, используемые из-за их достаточно высокой точности и чувствительности [10,11].

Теория работы параметрических вихретоковых датчиков (ПВД) с цилиндрическими изделиями и схемы включения таких преобразователей хорошо описаны в работах [10–13].

В работе [14] был впервые предложен четырёхпараметровый метод совместного контроля параметров a , μ_{rt} , σ_t и t цилиндрического изделия с помощью ПВД, работающего на кратных частотах магнитного поля. При этом, на сегодняшний день, практически нет работ, в которых описаны вихретоковые методы определения многих параметров ферромагнитных пластин с помощью ПВД. В тоже время такие отрасли промыш-

ленности Украины, как приборостроение, химическое машиностроение, металлургия, постоянно требует создания новых высокоточных и эффективных вихретоковых методов контроля параметров ферромагнитных лент, фольг, пластин при производстве деталей и узлов энергетического оборудования, электродвигателей и других устройств, где используется пооперационный контроль плоских изделий.

До настоящего времени не были разработаны простые алгоритмы измерительных и расчётных операций, а также неизвестны функции преобразования, на базе которых можно создать многопараметровые методы и проводить вихретоковый контроль плоских изделий, с помощью параметрического вихретокового датчика (ПВД).

Целью работы является создание четырёхпараметрового вихретокового метода контроля параметров ферромагнитного плоского изделия, основанного на кратных частотах, зондирующего плоское изделие магнитного поля, который реализуется с помощью ПВД.

Основными задачами работы являются:

1. Получить универсальные функции преобразования $Z_{\hat{a}i\Pi 1t}^*/Z_{\hat{a}i\Pi 2t}^* = f(\varphi_{\hat{a}i 1t})$; $Z_{\hat{a}i\Pi 1t}^* = f(\varphi_{\hat{a}i 1t})$; $x_{1t} = f(\varphi_{\hat{a}i 1t})$ для плоских изделий (отношение нормированных полных сопротивлений обмотки ПВД $Z_{\hat{a}i\Pi 1t}^*/Z_{\hat{a}i\Pi 2t}^*$ на двух кратных частотах, которые соответствуют двум значениям параметра x от фазового угла $\varphi_{вн1t}$ на первой частоте, который зависит от температуры; отношения полного сопротивления $Z_{вн1t}^*$ от фазового угла на первой частоте $\varphi_{вн1t}$; и зависимость обобщенного параметра x_{1t} на первой частоте от фазового угла $\varphi_{вн1t}$).

2. Получить выражения, описывающие четырёхпараметровый метод контроля плоских изделий, основанный на кратных частотах ПВД.

2. Четырёхпараметровый вихретоковый метод определения параметров плоских ферромагнитных изделий, основанный на кратных частотах ПВД

Используя результаты работ [10–13], а именно, выражения для определения эквивалентного сопротивления $R_{\text{эКВ}}$ и эквивалентной индуктивности обмотки $L_{\text{эКВ}}$ ПВД, а также воспользовавшись формулами определения модуля удельного нормированного полного сопротивления $Z_{\hat{a}i}$ и его фазового угла $\varphi_{\hat{a}i}$, запишем выражение для $Z_{\hat{a}i\Pi t}^{**}$ (пластины) на двух кратных частотах

$$Z_{\hat{a}i\Pi t}^{**} = \frac{Z_{\hat{a}i\Pi 1t}^*}{Z_{\hat{a}i\Pi 2t}^*} = \frac{4Z_{\hat{a}i\Pi 1t}}{Z_{\hat{a}i\Pi 2t}} = \sqrt{\frac{\left[1 - \mu_{\text{рт}} \left(1 - e^{-x_{1t}} \cos x_{1t} + e^{-x_{1t}} \sin x_{1t}\right)\right]^2 + \left[\mu_{\text{рт}} \left(1 - e^{-x_{1t}} \cos x_{1t} - e^{-x_{1t}} \sin x_{1t}\right)\right]^2}{\left[1 - \mu_{\text{рт}} \left(1 - e^{-x_{2t}} \cos x_{2t} + e^{-x_{2t}} \sin x_{2t}\right)\right]^2 + \left[\mu_{\text{рт}} \left(1 - e^{-x_{2t}} \cos x_{2t} - e^{-x_{2t}} \sin x_{2t}\right)\right]^2}}, \quad (1)$$

где $Z_{\hat{a}i\Pi t}^{**}$ – отношение нормированных удельных полных электрических сопротивлений на первой и второй частоте (индексы 1 и 2 соответствуют первой и второй частоте магнитного поля, индекс "П" соответствует пластине); $Z_{\hat{a}i\Pi 1t}^*$ и $Z_{\hat{a}i\Pi 2t}^*$ – удельные нормированные полные электрические сопротивления обмоток ПВД с пластиной на

первой и второй кратных частотах измерения магнитного поля; e – основание натурального логарифма; x_{1t} – обобщенный параметр на частоте f_{1t} ; x_{2t} – обобщенный параметр на кратной частоте f_{2t} ; $x_{2t} = 2x_{1t}$, а $f_{2t} = 4f_{1t}$; индекс t – означает, что здесь и в дальнейшем рассматриваемая величина берётся с учётом температуры.

При этом для пластины на частоте f_{1t} , параметр x_{1t} находят по формуле [1,2–6]

$$x_{\Pi 1t} = d \sqrt{\pi \cdot \mu_0 \cdot \mu_{rt} \cdot f_{1t} / \rho_t} \quad (2)$$

На частоте магнитного поля f_2 , для x_{2t} можно записать

$$x_{\Pi 2t} = d \sqrt{\pi \cdot \mu_0 \cdot \mu_{rt} \cdot f_{2t} / \rho_t} \quad (3)$$

где d – толщина пластины; ρ_t – удельное электрическое сопротивление материала пластины. Фазовый угол параметра $Z_{\text{аіі}}^*$, т.е. $\varphi_{\text{вн1t}}$ находят из следующего соотношения с учётом [10–13]:

$$\text{tg} \varphi_{\text{аіі}} = \frac{1 - \mu_{rt} \cdot (1 - e^{-x_{1t}} \cos x_{1t} + e^{-x_{1t}} \sin x_{1t})}{\mu_{rt} \cdot (1 - e^{-x_{1t}} \cos x_{1t} - e^{-x_{1t}} \sin x_{1t})} \quad (4)$$

величину $Z_{\text{аіі}}^*$ находят по формуле

$$Z_{\text{аіі}}^* = \frac{Z_{\text{аіі}}}{\omega_l \cdot L \cdot \eta} = \frac{Z_{\text{аіі}} \cdot 1}{\omega_l \cdot \mu_0 \cdot S_k \cdot W_k^2 \cdot \eta} = \sqrt{\left[(1 - \mu_{rt}) \cdot (1 - e^{-x_{1t}} \cos x_{1t} + e^{-x_{1t}} \sin \delta_{1t}) \right]^2 + \left[\mu_{rt} \cdot (1 - e^{-x_{1t}} \cos x_{1t} - e^{-x_{1t}} \sin x_{1t}) \right]^2} \quad (5)$$

где η – коэффициент заполнения [2–6]

$$\eta = \frac{dh}{d_k \cdot h_k} \quad (6)$$

где S_k – площадь поперечного сечения каркаса ПВД; W_k – число витков нанесённых на каркас ПВД; l – длина ПВД; d_k, h_k – ширина и толщина каркаса.

Воспользовавшись результатами работ [10–13] можно записать следующее выражение для первой частоты реальной и мнимой частей параметра K_t , выражающего собой удельный нормированный магнитный поток внутри пластины, т.е.

$$\text{Re } \dot{K}_t = 1 - e^{-x_{1t}} \cos x_{1t} - e^{-x_{1t}} \sin \delta_{1t} \quad (7)$$

$$\text{Im } \dot{K}_t = 1 - e^{-x_{1t} \cos x_{1t}} + e^{-x_{1t}} \sin \delta_{1t} \quad (8)$$

Запишем эти выражения для второй кратной частоты

$$\operatorname{Re} \dot{K}_t = 1 - e^{-x_{2t}} \cos x_{2t} - e^{-x_{2t}} \sin \delta_{2t}; \quad (9)$$

$$\operatorname{Im} \dot{K}_t = 1 - e^{-x_{2t} \cos x_{2t}} + e^{-x_{2t}} \sin \delta_{2t}, \quad (10)$$

где $\operatorname{Re} \dot{K}_t$ и $\operatorname{Im} \dot{K}_t$ [10–13] – реальные и мнимые части параметра \dot{K}_t на первой и второй частоте магнитного поля.

Алгоритм определения параметров плоского изделия на кратных частотах ПВД практически такой же, как и для цилиндрического [14], однако функции преобразования существенно отличаются (см. формулы 1,4,5). Приведём последовательность измерительных и расчётных операций по определению параметров плоского изделия: сначала по зависимости $Z_{\hat{a}i\Pi_{1t}}^*/Z_{\hat{a}i\Pi_{2t}}^* = f(\varphi_{\hat{a}i1t})$ найдём величину μ_{rt} . Затем, зная величину μ_{rt} , и пользуясь зависимостью $Z_{\hat{a}i\Pi_{1t}}^*$ от $\varphi_{\hat{a}i1t}$ определим параметр b , который равен $b = Z_{\hat{a}i\Pi_{1t}}^*$ при измеренном $\varphi_{\hat{a}i1t}$. При этом параметр η найдём по формуле

$$\eta = \frac{Z_{\hat{a}i\Pi_{1t}}}{\omega_{1t} \cdot L \cdot b}, \quad (11)$$

где $Z_{\hat{a}i\Pi_{1t}}$ – измеренное значение полного вносимого электрического сопротивления ПВД.

При этом для определения площади пластины воспользуемся также известной формулой для определения η [2,3]

$$\eta = \frac{S_0}{S_k}, \quad (12)$$

где S_0 и S_k – площади поперечного сечения пластины и каркаса.

Теперь с учётом [2,3], можно определить величину S_{0t}

$$S_{0t} (Z_{\hat{a}i\Pi_{1t}}^{**}; \varphi_{\hat{a}i1t}) = \eta \cdot S_k. \quad (13)$$

Величину удельной электрической проводимости σ_t пластины, с учётом температуры находят по формуле

$$\sigma_t = \frac{x_{1t}^2 (\varphi_{\hat{a}i1t}; \mu_{rt}) \cdot h^2}{\pi \cdot \mu_{rt} \cdot \mu_0 (Z_{\hat{a}i\Pi_{1t}}^{**}; \varphi_{\hat{a}i1t}) \cdot S_0^2 \cdot f_{1t}}, \quad (14)$$

где h – ширина пластины.

Значение удельного электрического сопротивления пластины ρ_t определяем из выражения

$$\rho_t = \frac{\pi \cdot \mu_{rt} \cdot \mu_0 (Z_{\text{аі і ПІт}}^{**}; \varphi_{\text{аі і т}}) \cdot S_0^2 \cdot f}{x_{1t}^2 (\varphi_{\text{аі і т}}; \mu_{rt}) \cdot h^2}. \quad (15)$$

Температуру ферромагнитной пластины можно определить, используя данный метод, из выражения

$$t = \frac{1 + \alpha t_1}{\alpha} \cdot \left[\left(\frac{\pi \cdot \mu_{rt} \cdot \mu_0 (Z_{\text{аі і ПІт}}^{**}; \varphi_{\text{аі і т}}) \cdot S_0^2 (Z_{\text{аі і ПІт}}^{**}; \varphi_{\text{аі і т}}) \cdot f_{1t}}{\rho_t \cdot x_{1t}^2 (\varphi_{\text{аі і т}}; \mu_{rt}) \cdot h^2} - 1 \right) \right] + t_1, \quad (16)$$

где α – температурный коэффициент материала пластины [7,8].

Запишем формулу для определения температуры ферромагнитной пластины через σ_i . Следует отметить, что в данном случае использовались ферромагнитные пластины у которых $d \ll h$ [2,3], а длина пластины, по отношению к её ширине $l \geq 10h$ [2,3]. На пластину наматывалась одна намагничивающая обмотка с числом витков W .

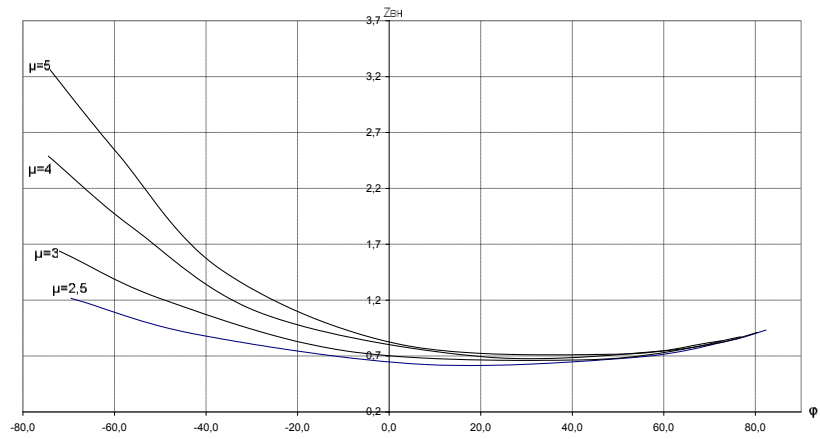
$$t = \frac{1 + \alpha t_1}{\alpha} \cdot \left[\left(\frac{\pi \cdot \mu_{rt} \cdot \sigma_l (Z_{\text{аі і ПІт}}^{**}; \varphi_{\text{аі і т}}) \cdot S_0^2 \cdot \mu_0 (Z_{\text{аі і ПІт}}^{**}; \varphi_{\text{аі і т}}) \cdot f_{1t}}{x_{1t}^2 (\varphi_{\text{аі і т}}; \mu_{rt}) \cdot h^2} - 1 \right) \right] + t_1. \quad (17)$$

Выражение для температуры t пластины, можно представить через величину μ_{rt}

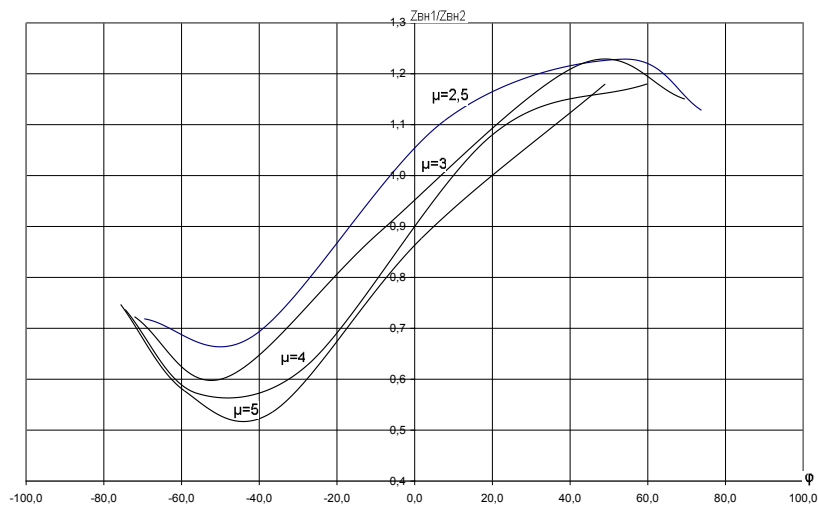
$$t = \frac{1 + \alpha_{\mu_{rt}} \cdot t_1}{\alpha_{\mu_{rt}}} \cdot \left(\frac{\mu_{rt} (Z_{\text{аі і ПІт}}^{**}; \varphi_{\text{аі і т}})}{\mu_{r1}} - 1 \right) + t_1, \quad (18)$$

где α_{μ} – температурный коэффициент магнитной проницаемости; t_1 – начальная температура; μ_{r1} – магнитная проницаемость при начальной температуре.

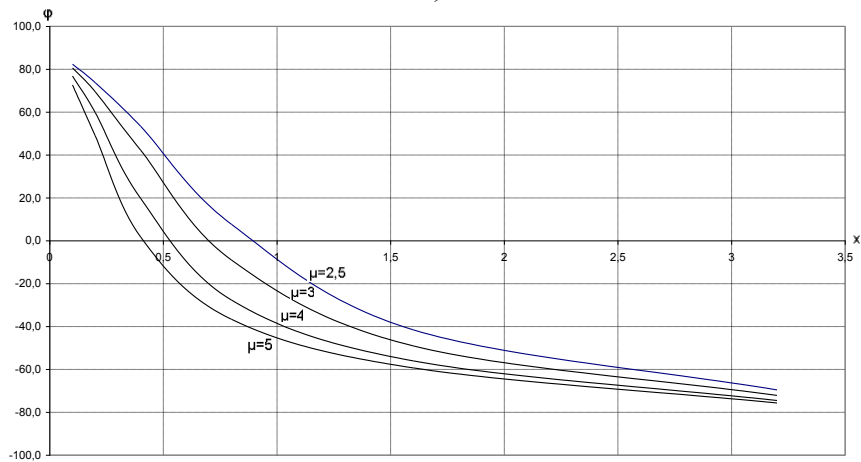
На рис. 1 а,б,в представлены три универсальных функции преобразования $Z_{\text{аі і ПІт}}^* / Z_{\text{аі і ПІт}}^* = f(\varphi_{\text{аі і т}})$; $Z_{\text{аі і ПІт}}^* = f(\varphi_{\text{аі і т}})$ и $x_{1t} = f(\varphi_{\text{аі і т}})$, на базе которых реализуется четырёхпараметровый метод контроля параметров плоских ферромагнитных изделий для значений $\mu_{rt} = 2,5; 3; 4; 5$.



а)



б)



в)

Рисунок 1

а) зависимости $\frac{Z_{\hat{a}i \Gamma \Pi_1 t}^*}{Z_{\hat{a}i \Gamma \Pi_2 t}^*}$ от $\Phi_{\hat{a}i \Gamma t}$; б) зависимости $Z_{\hat{a}i \Gamma \Pi_1}^*$ от $\Phi_{\hat{a}i \Gamma t}$; в) зависимости X_{1t} от $\Phi_{\hat{a}i \Gamma t}$

3. Выводы

На основании функций преобразования, полученных для пластин, создан четырёхпараметровый метод контроля параметров ферромагнитной пластины. При этом значение магнитной проницаемости μ_t находится по первой функции преобразования $Z_{\text{аііП}_1t}^*/Z_{\text{аііП}_2t}^*$; площадь поперечного сечения S_{0t} определяется по второй функции преобразования $Z_{\text{аііП}_3t}^* = f(\varphi_{\text{аііт}})$; значение σ_t или ρ_t находят по третьей функции преобразования, т.е. $x_{1t} = f(\varphi_{\text{вн1т}})$, а затем, зная σ_t или ρ_t , находят величину температуры t плоского ферромагнитного изделия. Следует отметить, что все параметры пластин определяются совместно при реализации четырёхпараметрового вихретокового метода контроля параметров пластин, основанного на кратных частотах, который реализуется с помощью ПВД.

Научной новизной в данном случае является использование вихретокового четырёхпараметрового метода на кратных частотах ПВД, для контроля параметров плоских изделий.

Литература

1. Ковашевич И.П. Ферромагнитный цилиндр в проходном вихретоковом преобразователе. Численное решение обратной задачи // Дефектоскопия. – 1984. – №9. – С. 8–12.
2. Себко В.П., Кириченко Р.И. Сиренко Н.Н. Электромагнитные методы контроля параметров плоских изделий // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. Спеціальний випуск. – Харків. – 2001. – №4. – С. 83–86.
3. Себко В.П., Кириченко Р.И. К теории работы трансформаторного электромагнитного преобразователя с плоским проводящим изделием // Технічна електродинаміка, тематичний випуск. Київ. – ч.1 – 2000. – С. 93–98.
4. Себко В.П., Алаа Файад Макки. Амплитудно-фазовый метод на основе использования электромагнитного преобразователя с плоским проводящим изделием // Наукові праці III Міжнародної науково-технічної конференції "Метрологія та вимірювальна техніка" – Харків. – 2002. – (Метрологія – 2002), С. 209–212.
5. Себко В.П., Шади О.Ю. Отман. Электромагнитный трёхпараметровый вихретоковый преобразователь с плоским проводящим изделием. // Вестник Харьковского Национального технического университета "ХПИ" – 2003, – №9, – С. 91–100.
6. Себко В.П., Львов С.Г., Шади О.Ю. Отман. Трёхпараметровый электромагнитный преобразователь с плоским изделием на основе максимальной фазы суммарной ЭДС. Технічна електродинаміка: Київ, – 2003. – С. 117–120.
7. Себко В.В., Ноздрачёва Е.Л. Хассан Муссу Диаб, Алаа Файад Макки. Расчёт относительных погрешностей измерения магнитных, электрических и температурных параметров плоского ферромагнитного изделия с помощью ТЭД, реализующего экстремальный вихретоковый метод // Наукові праці 5 Міжнародної науково-технічної конференції "Метрологія та вимірювальна техніка" – Харків, – Метрологія – 2006. С. 221–226.
8. Себко В.П., Хассан Муссу Диаб. Переменно-частотный электромагнитный метод бесконтактного определения удельного электрического сопротивления и температуры плоского изделия. Матеріалі конференції "Неруйнівний контроль та технічна діагностика" – Київ, – 2003, – С. 54–59.

9. Лаврентьев В.В. Оценка погрешностей измерения электромагнитных параметров ферромагнитных пластин. – Вестник государственного политехнического университета ХГПУ. – Харьков – вып.24 – 1999. – С. 114–120.

10. Москаленко И.И. Электромагнитный параметрический преобразователь. – Украинский метрологический журнал – вып.1– 1992, С. 7–10.

11. Себко В.П., Мохаммад Махмуд Дарвиш К теории работы параметрического электромагнитного преобразователя для контроля электромагнитных параметров и потерь мощности в цилиндрическом изделии // Вестник Национального технического университета, Харьковский политехнический институт.– НТУ "ХПИ".– Вып. 5 – 2001.– С. 151–156.

12. Себко В.П., Котуза А.И. Новый трёхпараметровый метод определения электромагнитных параметров и температуры на основе вносимого полного сопротивления датчика. – "Интегрированные технологии и энергосбережение".– НТУ "ХПИ"– №3.– 2006 – С. 73–76.

13. Себко В.П., Сомхиева О.С. Параметрический дифференциальный двухпараметровый преобразователь. Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. –1999.– Вып. 37.– С. 31–34.

14. Себко В.В. Контроль четырёх параметров вихретокового датчика на основе кратных частот поля. – Технічна електродинаміка. – Тем. випуск. – Київ – 2006. С. 67–68.

15. Нейман Л.Р., Калантаров П.Л. Теоретические основы электротехники. – М.– Л.: Госэнергиздат, ч. III, 1958. – 232 с.

16. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчёт индуктивностей. Справочник. – Л.: Энергия, 1970. – 415 с.

УДК 620.179.12

Себко В.В.

**ЧОТИРЬОХПАРАМЕТРОВИЙ ВИХРОСТРУМОВИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ
ПАРАМЕТРІВ ПЛОСКИХ ФЕРОМАГНІТНИХ ВИРОБІВ,
ЗАСНОВАНИЙ НА КРАТНИХ ЧАСТОТАХ МАГНІТНОГО ПОЛЯ
ПАРАМЕТРИЧНОГО ВІХОРОСТРУМОВОГО ДАТЧИКА**

Отримані три універсальні функції перетворення $Z_{\text{аііП}_1t}^* / Z_{\text{аііП}_2t}^* = f(\varphi_{\text{аііт}})$, $Z_{\text{аііП}_1t}^* = f(\varphi_{\text{аііт}})$ і $x_{1t} = f(\varphi_{\text{аііт}})$, за допомогою яких запропоновано чотирьохпараметровий вихрострумівий метод визначення параметрів плоских ферромагнітних виробів: відносної магнітної проникності $\mu_{\text{т}}$, площі поперечного перерізу плоского виробу S_{0t} , питомого електричного опору ρ_t і температури t .