

## КОНТРОЛЬ ЧЕТЫРЕХ ПАРАМЕТРОВ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ НА ОДНОЙ ЧАСТОТЕ ЗОНДИРУЮЩЕГО ПРОДОЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТВД

Себко В.В., канд. техн. наук, доцент каф. ХТПЭ НТУ "ХПИ"

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"

Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ",

кафедра "Химическая техника и промышленная экология"

тел. (0572) 70-76-380, факс (0572) 70-76-602, e-mail: sebko@kpi.kharkov.ua

*Розглянуто вихрострумівий метод безконтактного спільного визначення геометричних, магнітних, електричних параметрів та температури циліндричного виробу. При цьому всі дослідження проводились тільки на одній частоті зондуючого повздовжнього магнітного поля, що відповідає максимальному значенню фазового кута сумарної ЕРС трансформаторного вихрострумівого датчика ТВД та із урахуванням нагріву циліндричного ферромагнітного виробу.*

*Рассмотрен вихретоковый метод бесконтактного совместного определения геометрических, магнитных, электрических параметров и температуры цилиндрического изделия. При этом все исследования проводились только на одной частоте зондирующего продольного магнитного поля, которая соответствует максимальному значению фазового угла суммарной ЭДС трансформаторного вихретокового датчика ТВД и с учетом нагрева цилиндрического ферромагнитного изделия.*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день особое значение приобретает развитие вихретоковых методов для совместного определения сразу нескольких параметров ферромагнитных изделий. В современной практике электромагнитных измерений известны двухпараметровые методы и реализующие их устройства для совместного определения магнитной проницаемости  $\mu_r$  и удельной электрической проводимости  $\sigma$  в продольных магнитных полях, а также трёхпараметровые электромагнитные методы для совместного определения радиуса  $a$  и электромагнитных параметров изделий различных конфигураций [2-10]. В работах [2-6] рассмотрены возможности совместного определения двух и трех параметров плоских и цилиндрических ферромагнитных изделий, основанные на зондировании их однородным магнитным полем одной определённой частоты, которая соответствует экстремальному значению какого-либо параметра сигнала преобразователя. Так, например, в работах [4, 5, 6] рассмотрены методы совместного определения  $\mu_r$ ,  $\sigma$  и  $a$  плоских изделий, основанные на определении максимального значения фазового угла результирующей ЭДС трансформаторного вихретокового датчика ТВД, а также методы, основанные на экстремуме мнимой части ЭДС  $E_S$  для определения  $\mu_r$  и  $\sigma$ .

В работах [2, 3] получены функции преобразования, на основе которых реализуются электромагнитный метод для определения  $\mu_r$ ,  $\sigma$  и  $a$  цилиндрического изделия, также основанный на достижении экстремума фазового угла суммарной ЭДС преобразователя. Общим недостатком всех этих методов является то, что они не учитывают температуру, при которой измерялись параметры цилиндрического изделия, что

приводит к возникновению погрешности определения параметров  $\mu_r$  и  $\sigma$  порядка 30%.

В последнее время появились работы в которых описаны двухпараметровые методы реализуемые на базе параметрического вихретокового датчика ПВД. Это амплитудный, фазовый и переменнo-частотный методы, которые позволяют контролировать электрический параметр  $\rho$  и температуру  $t$  немагнитных цилиндрических изделий [7]. Общим недостатком этих методов является то, что они используют только одну функцию преобразования и позволяют определить ограниченное число параметров, только  $\rho$  и  $t$  немагнитных изделий. Существует так же трёхпараметровый метод [8] на базе ПВД, который позволяет контролировать  $\mu_r$ ,  $\sigma$  и  $t$  ферромагнитных изделий, но в данном случае совсем не рассматриваются геометрические параметры образцов.

В связи с этим, для повышения точности и эффективности контроля электромагнитных параметров цилиндрических изделий возникает необходимость развития и совершенствования многопараметровых методов для определения геометрических параметров изделий, относительной магнитной проницаемости  $\mu_r$ , удельной электрической проводимости  $\sigma_r$  и температуры  $t$  ферромагнитных цилиндрических изделий на базе ТВД.

### 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ЧЕТЫРЁХПАРАМЕТРОВОГО ВИХРЕТОКОВОГО МЕТОДА

Целью работы является исследование четырёхпараметрового бесконтактного вихретокового метода, использующего продольное магнитное поле и определение электромагнитных параметров с учетом температуры, при которой они были найдены. Основной задачей работы является усовершенствование суще-

ствующего трёхпараметрового метода на базе ТВД [2, 3]. На рис. 1 приведена схема включения ТВД для определения  $a$ ,  $\mu_r$ ,  $\sigma$  и  $t$  ферромагнитного цилиндрического изделия с учетом результатов работ [2, 3]. В самой схеме используются нагреватель, внутри которого помещается изделие и контрольные устройства для определения температуры ПТ (платиновые терморезисторы) [1]. В работах [2, 3] приведена векторная диаграмма распределения магнитных потоков и ЭДС ТВД для изделий различных конфигураций. На рис. 2 дана векторная диаграмма ЭДС и фазовых улов ТВД, при этом пунктиром показан общий случай положения векторов  $E'_1$ ,  $E'_2$ ,  $E'_\Sigma$ , а сплошными линиями обозначены векторы  $E_{1t}$ ,  $E_{2t}$  и  $E_{\Sigma t}$  при изменении температуры в результате нагрева изделия. Следует отметить, что величины  $E_{\Sigma t}$ ,  $E_{2t}$  и  $E_0$  являются нормированными на коэффициент  $1/E_0$  [2, 3].

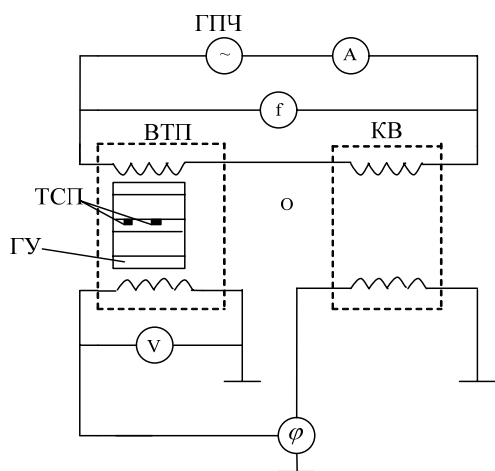


Рис. 1. Схема ТВД для совместного измерения четырёх параметров цилиндрических изделий: ГПЧ – генератор переменной частоты; А – амперметр; Ф – частотомер; ВТП – вихретоковый преобразователь; КВ – катушка взаимной индуктивности; О – образец; V – вольтметр; φ – фазомер; ГУ – греющее устройство; ПТ – платиновый терморезистор

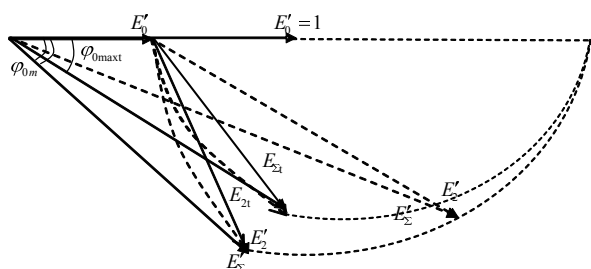


Рис. 2. Векторная диаграмма нормированных ЭДС и их фазовых улов при наличии и отсутствии температуры изделия, помещенного в экстремальный ТВД

При этом  $E'_\Sigma$  и  $E_{\Sigma t}$  являются касательными к своим годографам. Из векторной диаграммы видно, что в результате нагрева изделия, с ростом темпера-

туры ЭДС  $E_{\Sigma t}$  больше, чем ЭДС  $E'_\Sigma$  а фазовый угол  $\varphi_{0max t}$  меньше, чем  $\varphi_{0max}$ .

За счет воздушного зазора между ферромагнитным изделием и измерительной обмоткой датчика при конкретной частоте фазовый угол между  $E_{\Sigma t}$  и  $E_0$  достигнет экстремума [2-4]. Следует отметить, что все величины  $\varphi_{0max}$ ,  $K$ ,  $\text{Im}K$ ,  $\text{Re}K$ ,  $x$  являются зависимыми от температуры (в схеме предусмотрено греющее устройство) и поэтому в дальнейшем все эти и измеряемые величины  $E_{\Sigma}$ ,  $\varphi_{0max}$  будут использованы с индексом  $t$ , что означает их определение при конкретной температуре и следовательно, при нагреве изделия они отличаются от величин, рассмотренных в работах [2-4].

Таким образом, суть четырехпараметрового бесконтактного метода состоит в том, что путем изменения частоты продольного магнитного поля достигают максимума фазового угла, который также зависит от температуры, при этом с учетом [2, 3] должно выполняться условие

$$\text{tg}\varphi_{0max t} = \frac{d \text{Im}(\dot{K}_t)}{d \text{Re}(\dot{K}_t)}, \quad (1)$$

где  $\text{Im}(\dot{K}_t)$  и  $\text{Re}(\dot{K}_t)$  мнимая и реальная части параметра  $\dot{K}$  [2, 3] в данном случае используются с учетом температуры. Угол  $\varphi_{0max t}$  регистрируется с помощью фазометра (см. схему рис.1). Затем при экстремуме фазового угла и при нагреве изделия, измеряются две величины  $E_{\Sigma t}$ ,  $E_0$ . Воспользовавшись зависимостью  $\varphi_{0max} = f(x)$  с учетом [2, 3] определяем значение параметра  $x_t$ , а затем, используя табличные данные полученные в работах [2, 3], определяем величины  $\dot{K}_t$ ,  $\text{Im}(\dot{K}_t)$  и  $\text{Re}(\dot{K}_t)$  с учетом температуры. После этого совместно определяют четыре параметра цилиндрического ферромагнитного изделия  $\mu_{rt}$ ,  $a$ ,  $\sigma_t$  и  $t$ .

$$\mu_{rt} = E_{\Sigma t} \cdot \sin(\varphi_{0max t}) / [E_{\Sigma t} \cdot (K_t \cdot \cos \varphi_t \cdot \sin(\varphi_{0max t}) - K_t \cdot \sin \varphi_t \cdot \cos(\varphi_{0max t}) + E_0 \cdot K_t \cdot \sin \varphi_t)]. \quad (2)$$

Радиус изделия  $a$  с учетом [2, 3] определяется по формуле

$$a = a_n \sqrt{\frac{E_{\Sigma t}}{E_0} \cdot \text{tg}\varphi_t \cdot \sin(\varphi_{0max t}) - \cos(\varphi_{0max t}) + 1}. \quad (3)$$

Величину  $\sigma_t$ , с учетом температуры находят по формуле

$$\sigma_t = \frac{x_t^2 \cdot K_t \cdot \sin \varphi_t \cdot E_0}{a_n^2 \cdot \mu_0 \cdot \omega_t \cdot E_{\Sigma t}}. \quad (4)$$

Отсюда запишем выражение для определения удельного электрического сопротивления  $\rho_t$ .

$$\rho_t = \frac{a_n^2 \cdot \mu_0 \cdot \omega_t \cdot E_{\Sigma t}}{x_t^2 \cdot K_t \cdot \sin \varphi_t \cdot E_0}. \quad (5)$$

Для определения температуры при реализации данного четырехпараметрового метода запишем известную формулу [1, 7-9]

$$\frac{\rho}{\rho_1} - 1 = \frac{\alpha t}{1 + \alpha t_1} \cdot \rho - \frac{\alpha t_1}{1 + \alpha t_1}. \quad (6)$$

Воспользовавшись формулами (5) и (6) получим формулу для определения температуры  $t$  изделия, при которой измерялись  $\mu_t$  и  $\sigma_t$ , исследуя бесконтактный вихретоковый четырехпараметровый метод

$$t = \frac{1 + \alpha t_1}{\alpha} \cdot \left( \frac{a_n^2 \cdot \mu_0 \cdot \omega_t \cdot \sin(\varphi_{0 \max t}) \cdot E_{\Sigma t}}{x_t^2 \cdot K_t \cdot \sin \varphi_t \cdot \rho_1 \cdot E_0} - 1 \right) + t_1. \quad (7)$$

### 3. ВЫВОДЫ

Таким образом, рассмотрен бесконтактный четырехпараметровый вихретоковый метод, основанный на максимуме фазового угла суммарной ЭДС ТВД, который дает возможность одновременно определить  $a$ ,  $\mu_t$ ,  $\sigma_t$  и  $t$  цилиндрического ферромагнитного изделия. Этот метод может использоваться не только при разбраковке марок цилиндрических изделий, но и при исследовании режимов термических обработок изделий различных конфигураций. При автоматизации процесса измерения рассмотренный метод дает возможность определить сразу четыре параметра одновременно, например, в случае использования четырех решающих устройств, работающих в параллельных циклах. Отмечено, что при реализации описанного метода параметры  $\mu_t$  и  $\sigma_t$  определяются с учетом температуры при которой они измерялись, получена формула для определения  $t$  в исследуемом бесконтактном вихретоковом четырехпараметровом методе.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Спектор С.А. Электрические измерения физических величин. – Л.: Энергоатомиздат, 1987 – 320С.
- [2] Во Хоай Тхань. Трёхпараметровый трансформаторный электромагнитный преобразователь.- Весник ХГПУ.- Вып. 37.- 1999.- С. 64-66.
- [3] Себко В.П., Во Хоай Тхань. Определение метрологических характеристик электромагнитного преобразователя.- Український метрологічний журнал.-Вып.- 4.- 1999.- С. 20-22.
- [4] Себко В.П., Кириченко Р.И. Электромагнитный метод определения двух параметров плоского изделия на основе экстремума фазового угла преобразователя. Наукові праці III Міжнародної науково-технічної конференції "Метрологія та вимірювальна техніка" (Метрологія - 2002), Харків, 2002, т.1, С. 201-205.
- [5] Себко В.П., Шади О.Ю. Отман. Экстремальный трёхпараметровый вихретоковый преобразователь с плоским проводящим изделием. Тези доповідей 2-ої науково-технічної конференції "Приладобудування 2003", Київ 2003, 167 с..
- [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.П., Горкунов Б.М., Котуза А.И. Параметрический электромагнитный преобразователь температуры

// Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье: Сборники научных трудов ХГПУ. Вып. 6. ч. 2. – Харьков: ХГПУ, 1998. – С. 301-303.

- [8] Горкунов Б.М., Котуза А.И. Многофункциональный электромагнитный преобразователь для контроля физических параметров изделий // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск: Моделювання електронних, енергетичних та технологічних систем. – К: Інститут електродинаміки. – 1999. – ч.2. – С. 85-88.
- [9] Себко В.П., Багмет О.Л. Повышение точности измерений температуры цилиндрических изделий электромагнитным преобразователем. Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт", Харьков: НТУ "ХПИ", 2003, т.1, №1, С. 28-31.
- [10] Себко В.В. Многофункциональное вихретоковое устройство для совместного измерения радиуса, магнитной проницаемости, удельного электрического сопротивления и температуры цилиндрического проводящего изделия // Технічна електродинаміка. – Київ : Ін-т електродинаміки НАНУ. – 2002. - Тем. випуск , ч.3. – С. 101-104.

Поступила 21.09.2006