

ЧАСТОТНЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ГАЛЬВАНОПОКРЫТИЙ

У статті розглянуто метод контролю електромагнітних циліндричних виробів прохідними перетворювачами. Опрацьований частотно-балансний метод має суттєво вищу, порівняно з аналоговими, розрізняльну здатність та точність вимірювань. Надано теоретичне обґрунтування способу та результати експериментальних досліджень. Теоретична модель підтверджена експериментальними дослідженнями. Розрізняльна здатність метода сягає 0,03...0,1 мкм.

В статье рассмотрен метод контроля электромагнитных цилиндрических изделий проходными преобразователями. Разработанный частотно-балансный метод имеет существенно более высокую, в сравнении с аналоговыми, разрешающую способность и точность измерений. Предоставлено теоретическое обоснование способа и результаты экспериментальных исследований. Теоретическая модель подтверждена экспериментальными исследованиями. Разрешающая способность метода достигает 0,03...0,1 мкм.

Проходные преобразователи цилиндрической формы с намагничивающей и измерительными обмотками, внутрь которых помещается контролируемое изделие, широко применяются для контроля электромагнитных свойств различных изделий. Их принцип работы основан на токовихревом эффекте. При прохождении по обмотке возбуждения намагничивающего тока значение изменения магнитного потока, определяется значением потерь на вихревые токи. По изменению электродвижущей силы, наводимой в измерительной обмотке, определяют электромагнитные свойства контролируемого материала [1, 2]. Точность контроля в большей степени зависит от девиации значения и частоты намагничивающего тока, что требует применения дополнительных электронных устройств. Точность контроля изделий может быть значительно повышена, если использовать разработанный токовихревой частотно-балансный метод [3-5].

При частотно-балансном методе определяется частота намагничивающего тока, при которой выходной сигнал, снимаемый с измерительной обмотки размещенного в преобразователе изделия, равен выходному сигналу с измерительной обмотки без изделия. Анализ выходных характеристик показывает, что частота токовихревого баланса практически не зависит от изменения значения намагничивающего тока. Так в диапазоне намагничивающего тока $I_n = 1...15$ мА изменение его на ± 80 % изменяет частоту баланса всего на 1,1 %. Возможные изменения частоты намагничивающего тока вообще не скажутся на результатах измерений, так как при определении балансной частоты они автоматически будут скомпенсированы. Достоинством метода является также то, что в качестве информации используется частота намагничивающего тока, а не аналоговый сигнал, что обеспечивает большую разрешающую способность и позволяет эффективно использовать цифровую измерительную аппаратуру без каких-либо преобразований полезной информации [6].

Приведены результаты исследований по применению токовихревого частотно-балансного метода для контроля проходными преобразователями толщины покрытий, наносимых на цилиндрические ферромагнитные изделия.

Для определения зависимости частоты токовихревого баланса f_6 от толщины Δ электропроводного покрытия с электропроводностью γ_3 рассмотрим слу-

чай, когда покрытие нанесено на ферромагнитную среду с проводимостью γ_ϕ и магнитной проницаемостью μ_ϕ . Ограничим исследуемую ферромагнитную среду длинным цилиндром с радиусом r . Примем, что намагничивающая обмотка обеспечивает падение плоской электромагнитной волны на поверхность электропроводного покрытия. При рассмотрении электромагнитной волны в материале электропроводного покрытия амплитуда напряженности магнитного поля по толщине покрытия изменяется по закону [7]

$$H_x = \frac{H_o}{e^{x \left(\frac{\omega \gamma_3 \mu_3}{2} \right)^{0.5}}}, \quad (1)$$

где H_o – напряженность магнитного поля на поверхности покрытия; γ_3, μ_3 – электропроводность и магнитная проницаемость материала электропроводного покрытия; x – текущая координата по глубине покрытия.

Среднее значение магнитного потока, проходящего через покрытие за полупериод, определяется соотношением согласно [7]

$$\Phi = \frac{2}{\pi} H_o \mu_3 S \int_0^\Delta e^{-x \sqrt{j \omega \mu_3 \gamma_3}} dx, \quad (2)$$

где площадь поперечного сечения покрытия

$$S = \frac{\pi d^2}{4} - \frac{\pi d_1^2}{4}. \quad (3)$$

Так как $d_1 = d - \Delta$, с достаточной точностью можно записать

$$S = \frac{\pi d \Delta}{2}. \quad (4)$$

Значение интеграла в соотношении (2) является табличным и определяется следующим выражением

$$\int_0^\Delta e^{-x \sqrt{j \omega \mu_3 \gamma_3}} dx = \frac{1}{\sqrt{j \omega \mu_3 \gamma_3}} (1 - e^{-\Delta \sqrt{j \omega \mu_3 \gamma_3}}). \quad (5)$$

Учитывая, что $\sqrt{j} = (1 + j) / \sqrt{2}$, получаем

$$\int_0^{\Delta} e^{-x\sqrt{j\omega\mu_3\gamma_3}} dx = \frac{1 - e^{-\alpha} \sin \alpha + e^{-\alpha} \cos \alpha}{\sqrt{2\omega\mu_3\gamma_3}} - j \frac{1 - e^{-\alpha} \sin \alpha + e^{-\alpha} \cos \alpha}{\sqrt{2\omega\mu_3\gamma_3}}, \quad (6)$$

где

$$\alpha = \Delta \left(\frac{\omega\mu_3\gamma_3}{2} \right)^{0.5}. \quad (7)$$

Результаты расчета показывают, что при $\alpha \geq 5$ модуль комплексного выражения, входящего в соотношение (6), примерно равно 1. Тогда, с учетом соотношения (6), выражение (2) примет вид

$$\Phi = H_o \mu_3 d \frac{1}{2\omega\mu_3\gamma_3}. \quad (8)$$

С учетом граничных условий в области раздела электропроводной и ферромагнитной среды, т.е. при $x = \Delta$, запишем

$$H_{\phi o} = H_{n\Delta}, \quad (9)$$

где $H_{\phi o}$ – напряженность поля на поверхности ферромагнетика; $H_{n\Delta}$ – напряженность поля на поверхности покрытия толщиной Δ .

Следовательно, учитывая (1), напряженность поля на поверхности ферромагнетика, определяется соотношением

$$H_{\phi o} = \frac{H_o}{e^{\frac{\Delta(\omega\mu_3\gamma_3)^{0.5}}{2}}}. \quad (10)$$

Ограничиваясь вторым членом разложения обратной показательной функции, так как α значительно больше первого, получим

$$H_{\phi o} = \frac{2H_o}{\omega\mu_3\gamma_3\Delta^2}. \quad (11)$$

Для дальнейшего расчета примем, что по всему сечению ферромагнитного материала действует постоянная напряженность $H_{\phi o}$, и введем фиктивную магнитную проницаемость для учета реального распределения напряженности поля. Тогда магнитный поток, проходящий через ферромагнетик, равен

$$\Phi_{\phi} = H_{\phi o} \mu'_{\phi} \frac{\pi d^2}{4}. \quad (12)$$

Для нахождения фиктивной магнитной проницаемости μ_{ϕ} определим магнитный поток Φ_{ϕ} за полу-период

$$\Phi_{\phi} = H_{\phi o} 3\mu_{\phi} \frac{\pi d}{4} \int_0^{\pi/2} \int_0^{\infty} e^{j\omega t} e^{-x\sqrt{j\omega\mu_{\phi}\gamma_{\phi}}} dt dx. \quad (13)$$

Проинтегрировав соотношение (13), получаем

$$\Phi_{\phi} = 2H_{\phi o} \mu_{\phi} d_1 \frac{e^{j\frac{\pi}{4}}}{\sqrt{\omega\mu_{\phi}\gamma_{\phi}}}, \quad (14)$$

а для абсолютного значения магнитного потока

$$\Phi_{\phi} = \frac{2H_{\phi o} \mu_{\phi} d_1}{\sqrt{\omega\mu_{\phi}\gamma_{\phi}}}, \quad (15)$$

где μ_{ϕ} , γ_{ϕ} – магнитная проницаемость и электропроводность ферромагнитного материала.

Фиктивная магнитная проницаемость, с учетом соотношения (12) и (15), имеет вид

$$\mu'_{\phi} = \frac{8\mu_{\phi}}{\pi d_1 \sqrt{\omega\mu_{\phi}\gamma_{\phi}}}, \quad (16)$$

Приняв во внимание соотношения (11) и (16), выражение (12) запишем в виде

$$\Phi_{\phi} = \frac{4H_o \mu_{\phi} d_1}{\omega\mu_3\gamma_3\Delta^2 \sqrt{\omega\mu_{\phi}\gamma_{\phi}}}. \quad (17)$$

При работе преобразователя в режиме холостого хода

$$\Phi_o = H_o \mu_o \frac{\pi d^2}{4}. \quad (18)$$

Поскольку магнитный поток в режиме холостого хода преобразователя, по крайней мере, на порядок больше чем магнитный поток, проходящий в материале покрытия, условие токовихревого баланса примет вид

$$\Phi_o = \Phi_{\phi}. \quad (19)$$

Или, с учетом соотношений (17) и (18)

$$H_o \mu_o \frac{\pi d^2}{4} = \frac{4H_o \mu_{\phi} d_1}{\omega\mu_3\gamma_3\Delta^2 \sqrt{\omega\mu_{\phi}\gamma_{\phi}}}, \quad (20)$$

откуда частота токовихревого баланса

$$f_{\sigma} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{16\mu_{\phi} d_1^2}{\gamma_3^2 \mu_3^2 \gamma_{\phi} \Delta^4 \mu_o^2 \pi^2 d^4} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (21)$$

Соотношение (21) имеет физический смысл при $\Delta > 0$, так как оно получено с учетом ослабления напряженности поля электропроводным покрытием. При расчетах балансной частоты по соотношению (21), когда контролируемый образец имеет конечные размеры, необходимо учитывать размагничивающее влияние формы контролируемых деталей. В этом случае магнитная проницаемость ферромагнитного изделия равна

$$\mu_{\phi p} = \mu_{\phi} \frac{1}{1 + \frac{N}{4\pi} (\mu_{\phi} - 1)}, \quad (22)$$

где $N/4\pi$ – коэффициент размагничивания для цилиндрических изделий, определяемый по номограммам [7].

Экспериментальные исследования проводились на цилиндрических образцах диаметром 1,5 см из отожженной стали Ст.3 с медным покрытием толщиной 5...80 мкм на установке, блок-схема которой показана на рис. 1.

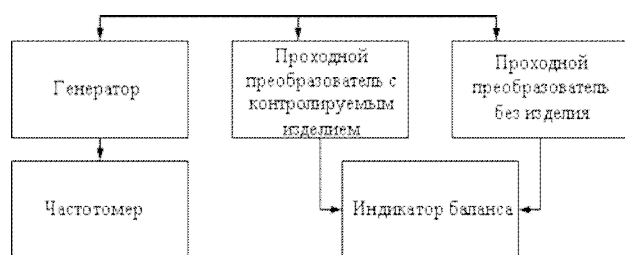


Рис. 1. Блок-схема прибора

Экспериментальный и теоретический графики зависимости частоты баланса от толщины покрытия представлены на рис. 2.

Анализ графиков выходных характеристик показывает, что экспериментальные результаты достаточно хорошо согласуются с теоретическими, погрешность расчетов не превышает 15 %, что вполне приемлемо при электромагнитных расчетах.

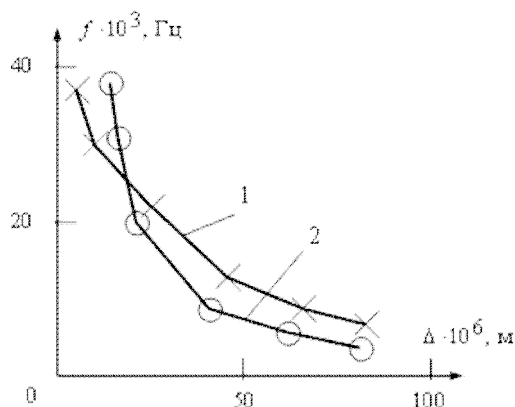


Рис. 2. Выходные характеристики: 1 – теоретическая, 2 – экспериментальная

Исследованиями установлено, что токовихревым частотно-балансным методом можно измерять электропроводные покрытия толщиной Δ до 20 мкм с разрешающей способностью не менее 0,03 мкм, а при $\Delta > 20$ мкм – не менее 0,1 мкм. Разрешающая способность обычного токовихревого метода составляет примерно 5 мкм.

ВЫВОДЫ

Таким образом, точность контроля толщины покрытий токовихревым частотно-балансным методом значительно увеличивается за счет практически полной отстройки от влияния девиации частоты и величины намагничивающего тока, а также благодаря использованию в качестве выходной информации частоты намагничивающего тока, что позволяет эффективно использовать цифровую измерительную аппаратуру.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безотосний В.Ф., Власенко Е.В., Козлов В.В., Афанасьева І.О., Набокова О.В. Деякі актуальні напрямки неруйнуючого контролю властивостей матеріалів електромагнітними методами // Електротехніка і електромеханіка. – 2008. – № 6. – С. 45-48.
2. Безотосний В.Ф., Козлов В.В., Набокова О.В. Современные подходы и перспективные направления разработки систем управления по силовому параметру // Електротехніка і електромеханіка. – 2008. – № 3. – С. 5-6.
3. Чаплыгин В.И., Безотосний В.Ф. Электромагнитный преобразователь усилий // Изв. вузов. Электромеханика. Москва. – 1977. – № 10. – С. 1159-1163.
4. Безотосний В.Ф., Козлов В.В. Використання частотно-балансного методу в системах керування обладнанням за силовим параметром // Тези доповідей наук.-техн. конф. "Тиждень науки". ЗНТУ. – 2008. – С. 51-52.
5. Безотосний В.Ф., Козлов В.В., Набокова О.В. К вопросу повышения точности расчета выходных характеристик базового многофункционального магнитоупругого датчика // Вісник НТУ "ХПИ". – 2010. – № 48. – С. 56-59.
6. Власенко Е.В., Безотосний В.Ф. Використання частотно-балансного методу в системах керування обладнанням за силовим параметром // Тези доповідей наук.-техн. конф. "Тиждень науки". ЗНТУ. – 2008. – С. 63-64.
7. Ламмерян И., Штафль М. Вихревые токи. М.: Энергия, 1987. – 210 с.

Поступила 27.10.2010

Безотосний Владимир Федорович, к.т.н., доц.
 Козлов Владимир Владимирович, к.т.н., доц.
 Набокова Ольга Владимировна
 Запорожский национальный технический университет
 кафедра "Теоретична та загальна електротехніка"
 69063, Запоріжжя, вул. Жуковського, 64
 тел. (061) 228-16-12

V.F. Bezotosniy, V.V. Kozlov, O.V. Nabokova
Non-destructing control of the properties of materials by electromagnetic methods.

The questions of the control of non-electrical and electrical parameters of materials by electromagnetic methods are considered in this article. The system of the automatic non-destructing control of mechanical pressures in the details of the radio-electronical equipment is offered.

Key words – control of non-electrical parameters, non-destructing control, mechanical pressures.