

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОЙ ЧАСТОТЫ ТОКА НАМАГНИЧИВАНИЯ ТОКОВИХРЕВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПРИ КОНТРОЛЕ МАТЕРИАЛОВ

У статті розглядається одержання розрахункових співвідношень для вибору раціональної частоти струму, що намагнічує, при контролі електромагнітних властивостей матеріалів за складовими комплексного опору обмотки намагнічування. Отримано аналітичний вираз для розрахунків раціональної частоти струмовихревого перетворювача з урахуванням геометричних параметрів і електромагнітних властивостей контролюваних матеріалів.

В статье рассматривается получение расчетных соотношений для выбора рациональной частоты намагничивающего тока при контроле электромагнитных свойств материалов по составляющим комплексного сопротивления обмотки намагничивания. Получено аналитическое выражение для расчета рациональной частоты токовихревого преобразователя с учетом геометрических параметров и электромагнитных свойств контролируемых материалов.

Токвихревые преобразователи нашли широкое применение для контроля электромагнитных свойств материалов, в том числе магнитной проницаемости и электропроводности [1-5]. Теория и расчет подобных преобразователей достаточно полно освещена в литературе [1-4, 6-8]. Однако вопрос выбора рациональной частоты намагничивающего тока преобразователей при проведении подобных измерений недостаточно полно исследован и до настоящего времени решается большей частью экспериментально.

Целью данной работы является получение расчетных соотношений для выбора рациональной частоты намагничивающего тока при контроле электромагнитных свойств материалов по составляющим комплексного сопротивления обмотки намагничивания. Дальнейший анализ проведен для случая контроля свойств по мнимой составляющей.

В общем случае, как показано в [6, 7, 10] мнимая составляющая вносимого импеданса определяется действительной составляющей эффективной магнитной проницаемости. При размещении контролируемого изделия в проходном преобразователе электродвижущая сила, наводимая в измерительной обмотке, определяется соотношением

$$U_{вих} = 2\pi f \frac{\pi d^2}{4} \mu_{эф} \mu H W_u, \quad (1)$$

где f – частота намагничивающего тока; d – диаметр контролируемого материала; $\mu_{эф}$ – эффективная магнитная проницаемость; μ – относительная магнитная проницаемость материала; H – напряженность магнитного поля; W_u – число витков измерительной обмотки.

Эффективная магнитная проницаемость в соотношении (1) учитывает влияние вихревых токов и, согласно [8], определяется выражением

$$\mu_{эф} = \frac{2}{ka} \cdot \frac{I_1(ka)}{I_0(ka)}, \quad (2)$$

где $I_0(ka)$ и $I_1(ka)$ – функции Бесселя нулевого и первого порядков.

Аргумент функции Бесселя в (2) равен

$$ka = \sqrt{j \cdot f / f_g}. \quad (3)$$

Частота, соответствующая случаю, когда модуль аргумента равен единице, называется граничной и определяется выражением

$$f_g = \frac{5066}{\mu \gamma d^2}. \quad (4)$$

В работе [8] доказано, что эффективная магнитная проницаемость контролируемого материала с достаточной точностью описывается уравнением

$$\mu_{эф} = \frac{2 \left[\sin \left(\frac{ka}{\sqrt{2}} - \frac{\pi}{2} \right) - j \cos \left(\frac{ka}{\sqrt{2}} - \frac{\pi}{8} \right) \right]}{\sqrt{j \frac{f}{f_g}} \left[\cos \left(\frac{ka}{\sqrt{2}} - \frac{\pi}{2} \right) + j \sin \left(\frac{ka}{\sqrt{2}} - \frac{\pi}{8} \right) \right]}. \quad (5)$$

С учетом выражения (4), соотношение (5) примет вид

$$\mu_{эф} = \frac{142,4}{d \sqrt{j f \mu \gamma}} \frac{\sin \left(0,01d \sqrt{f \mu \gamma} - \frac{\pi}{2} \right) - j \cos \left(0,01d \sqrt{f \mu \gamma} - \frac{\pi}{8} \right)}{\cos \left(0,01d \sqrt{f \mu \gamma} - \frac{\pi}{2} \right) + j \sin \left(0,01d \sqrt{f \mu \gamma} - \frac{\pi}{8} \right)}. \quad (6)$$

Обозначив

$$\begin{aligned} U &= 0,01d \sqrt{f \mu \gamma} - \pi/2; \\ V &= 0,01d \sqrt{f \mu \gamma} - \pi/8; \end{aligned} \quad (7)$$

получим

$$\mu_{эф} = \frac{142,4}{d \sqrt{j f \mu \gamma}} \frac{\sin U - j \cos V}{\cos U + j \sin V}. \quad (8)$$

Найдем полное приращение эффективной проницаемости при изменении электромагнитных свойств контролируемого материала. Так как эти изменения происходят при фиксированной частоте намагничивающего тока, то

$$d\mu_{эф} = d\mu_{эф\mu} + d\mu_{эф\gamma}. \quad (9)$$

Дифференцируя выражение (6) по γ и μ , получаем

$$\frac{\partial \mu_{эф}}{\partial \gamma} = \frac{1}{\gamma d \sqrt{j f \mu \gamma} (\cos U + j \sin V)^2} \left\{ 1,4 j d \sin \frac{3\pi}{8} \sqrt{f \mu \gamma} - 71,2 \left[\cos \frac{3\pi}{8} \sin(U+V) + j \cos(U+V) \right] \right\}; \quad (10)$$

$$\frac{\partial \mu_{эф}}{\partial \mu} = \frac{1}{\mu d \sqrt{j f \mu \gamma} (\cos U + j \sin V)^2} \left\{ 1,4 j d \sin \frac{3\pi}{8} \sqrt{f \mu \gamma} - 71,2 \left[\cos \frac{3\pi}{8} \sin(U+V) + j \cos(U+V) \right] \right\}. \quad (11)$$

Тогда полное приращение определится соотношением

$$\partial\mu_{\text{эф}} = \frac{d\gamma/\gamma + d\mu/\mu}{d\sqrt{jf\mu\gamma}(\cos U + j\sin V)^2} \left\{ 1,4jd \sin \frac{3\pi}{8} \sqrt{f\mu\gamma} - 71,2 \left[\cos \frac{3\pi}{8} \sin(U+V) + j \cos(U+V) \right] \right\} \quad (12)$$

Приняв обозначение

$$k_1 = -71,2 \left[\cos \frac{3\pi}{8} \sin(U+V) + j \cos(U+V) \right] + 1,4jd \sin \frac{3\pi}{8} \sqrt{f\mu\gamma} \quad (13)$$

и

$$k = d\sqrt{jf\mu\gamma}(\cos U + j\sin V)^2, \quad (14)$$

представим соотношение (12) в виде

$$\partial\mu_{\text{эф}} = \frac{k_1}{k} \left(\frac{d\gamma}{\gamma} + \frac{d\mu}{\mu} \right). \quad (15)$$

Определим рациональную частоту намагничивающего тока, соответствующую максимальному приращению эффективной магнитной проницаемости при изменении электромагнитных свойств материала, из условия

$$\frac{\partial(k_1/k)}{\partial f} = 0 \quad (16)$$

или

$$\frac{\partial k_1}{\partial f} k - \frac{\partial k}{\partial f} k_1 = 0. \quad (17)$$

С учетом соотношений (13) и (14) запишем

$$\frac{\partial k_1}{\partial f} = d\sqrt{\frac{\mu\gamma}{f}} \left\{ 0,7j \sin \frac{3\pi}{8} - 0,4 \left[\cos \frac{3\pi}{8} \cos(U+V) + j \sin(U+V) \right] \right\}; \quad (18)$$

$$\frac{\partial k}{\partial f} = 0,5\sqrt{j\frac{\mu\gamma}{f}}(\cos U + j\sin V) \times [\cos U + j\sin V + 0,02d\sqrt{f\mu\gamma}(\cos U - \sin V)]. \quad (19)$$

Соотношение (16) будет справедливо при

$$\frac{\partial k_1}{\partial f} k - \frac{\partial k}{\partial f} k_1 = 0, \quad (20)$$

поскольку при $k^2 = 0$ теряет физический смысл отношение k_1/k , с учетом соотношений (18) – (20), для действительной составляющей можно записать

$$\begin{aligned} \operatorname{Re} \left[\frac{\partial k_1}{\partial f} k - \frac{\partial k}{\partial f} k_1 \right] = f\mu \left[\frac{-0,4 \cos 3\pi/8 \cos U \cos(U+V)}{\sqrt{f\mu}} + \frac{0,4 \sin V \sin(U+V)}{\sqrt{f\mu}} - \frac{0,7 \sin 3\pi/8 \sin V}{\sqrt{f\mu}} + \frac{71,2 \cos 3\pi/8 \cos U \sin(U+V)}{f\mu} + \frac{71,2 \sin V \cos(U+V)}{f\mu} - \frac{1,4d \cos 3\pi/8 \sin(U+V) \sin U}{\sqrt{f\mu}} + \frac{1,4d \cos V \cos(U+V)}{\sqrt{f\mu}} + \frac{1,4 \sin 3\pi/8 \sin V}{\sqrt{f\mu}} + 0,03d^2 \sin 3\pi/8 \cos V \right] \end{aligned} \quad (21)$$

или

$$\operatorname{Re} \left[\frac{\partial k_1}{\partial f} k - \frac{\partial k}{\partial f} k_1 \right] = f\mu A. \quad (22)$$

С учетом реального физического смысла произведения $f\mu$ не равно нулю. Поэтому

$$A = 0. \quad (23)$$

Учитывая, что значение $f\mu$ велико, а функции \sin и \cos ограничены, соотношение (23) упрощается

$$A = 0,03d^2 \sin \frac{3\pi}{8} \cos V = 0, \quad (24)$$

откуда $\cos V = 0$ или в пределах одного периода

$$V = 0,01d\sqrt{f\mu\gamma} - \frac{\pi}{8} = \frac{\pi}{2}. \quad (25)$$

Тогда рациональная частота намагничивающего тока определится выражением

$$f = \frac{25 \cdot 10^4 \pi^2}{84d^2 \gamma \mu}. \quad (26)$$

В частном случае, при контроле электропроводности материалов, соотношение (15) примет вид

$$\partial\mu_{\text{эф}} = \frac{k_1}{k} \cdot \frac{\partial\gamma}{\gamma}, \quad (27)$$

а при контроле магнитной проницаемости

$$\partial\mu_{\text{эф}} = \frac{k_1}{k} \cdot \frac{\partial\mu}{\mu}. \quad (28)$$

Анализ соотношений (27) и (28) показывает, что рациональная частота намагничивающего тока в обоих случаях определяется выражением (26), из которого следует, что рациональная частота намагничивающего тока определяется как электромагнитными свойствами контролируемого материала, так и его диаметром. Для иллюстрации приведем пример. Контролируемый образец имеет диаметр $d = 0,5$ (см), относительную проницаемость $\mu = 100$ и электропроводность $\gamma = 10$ м/Ом мм². По соотношению (26) для рациональной частоты получим

$$f = \frac{2455}{16} \approx 153,4 \text{ Гц.}$$

При использовании для определения рациональной частоты годографов, приведенных, например в [9], рациональная частота соответствует отношению

$$\frac{f}{f_g} = 8,4.$$

По соотношению (4) получим

$$f_g = \frac{5066}{250} \approx 20,2.$$

Откуда

$$f = 8,4 \cdot 20,2 \approx 170 \text{ Гц.}$$

Как видно, результата расчета по соотношению (26) достаточно хорошо для подобных расчетов согласуются с результатами, полученными с помощью годографа комплексного сопротивления преобразователя.

Таким образом, рациональная частота намагничивающего тока проходных токовихревых преобразователей соответствует максимальному значению приращения эффективной магнитной проницаемости, вызванного изменением электромагнитных свойств контролируемого материала.

ВЫВОДЫ

1. Получены соотношения для расчета приращенной эффективной магнитной проницаемости в зависимости от частоты намагничивающего тока с учетом электромагнитных свойств исследуемых материалов.

2. Получено аналитическое выражение для расчета рациональной частоты токовихревого преобразователя с учетом геометрических параметров и электромагнитных свойств контролируемых материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безотосный В.Ф. К вопросу повышения точности расчета выходных характеристик базового многофункционального магнитоупругого датчика / В.Ф. Безотосный, В.В. Козлов, О.В. Набокова // Вестник НТУ "ХПИ". – 2010. – № 48. – С. 56-59.
2. Безотосный В.Ф. Учет энергетических факторов при расчете намагниченности ферромагнитных материалов / В.Ф. Безотосный, Э.В. Власенко // Электротехника и электроэнергетика. – 2004. – № 1. – С. 13-17.
3. Чаплыгин В.И. Электромагнитный преобразователь усилий / В.И. Чаплыгин, В.Ф. Безотосный // Изв. вузов. Электромеханика. – 1977. – № 10. – С. 1159-1163.
4. Чаплыгин В.И. Электромагнитный преобразователь с частотным выходом для контроля электромагнитных свойств ферромагнитных материалов / В.И. Чаплыгин, В.Ф. Безотосный // Дефектоскопия. – 1976. – № 5. – С. 91-94.
5. Безотосный В.Ф. Деякі актуальні напрямки неруйнівочого контролю властивостей матеріалів електромагнітними методами / В.Ф. Безотосний, Е.В. Власенко, В.В. Козлов, І.О. Афанасєва, О.В. Набокова // Електротехніка і електромеханіка. – 2008. – № 6. – С. 23-26.
6. Н.Н. Шумиловский, В.П. Ярмольчук. Метод вихревых токов. – М.: Энергия, 1966. – 161 с.
7. Дорофеев А.Л. Электроиндуктивная (индукционная) дефектоскопия. – М.: Машиностроение, 1967. – 231 с.
8. Дорофеев А.Л. Неразрушающие испытания методом вихревых токов. – М.: Оборонгиз, 1961. – 156 с.
9. Остапенко В.Д. / Исследование возможности контроля качества шлифования закаленных сталей токовихревым методом. В.Д. Остапенко, В.С. Гайдамакин, О.П. Чихаев. – М.: Энергия, 1972. – 173 с.
10. Неразрушающие испытания. Справочник. / Под ред. Мак-Мастера. – М.: Энергия, 1965. – 201 с.

Bibliography (transliterated): 1. Bezotosnyj V.F. K voprosu povysheniya tochnosti rascheta vyhodnyh harakteristik bazovogo mnogofunktional'nogo magnitouprugogo datchika / V.F. Bezotosnyj, V.V. Kozlov, O.V. Nabokova // Vestnik NTU "HPI". - 2010. - № 48. - S. 56-59. 2. Bezotosnyj V.F. Uchet `energeticheskikh faktorov pri raschete namagnichennosti ferromagnitnykh materialov / V.F. Bezotosnyj, E.V. Vlasenko // `Elektrotehnika i `elektro`energetika. - 2004. - № 1. - S. 13-17. 3. Chaplygin V.I. `Elektromagnitnyj preobrazovatel' usilij / V.I. Chaplygin, V.F. Bezotosnyj // Izv. vuzov. `Elektromehanika. - 1977. - № 10. - S. 1159-1163. 4. Chaplygin V.I. `Elektromagnitnyj preobrazovatel' s chastotnym vyhodom dlya kontrolya `elektromagnitnykh svoystv ferromagnitnykh materialov / V.I. Chaplygin, V.F. Bezotosnyj // Defektoskopiya. - 1976. - № 5. - S. 91-94. 5. Bezotosnyj V.F. Deyaki aktual'ni napryamki nerujnyuchogo kontrolyu vlastivostej materialiv elektromagnitnymi metodami / V.F. Bezotosnyj, E.V. Vlasenko, V.V. Kozlov, I.O. Afanas'eva, O.V. Nabokova // Elektrotehnika i elektromehanika. - 2008. - № 6. - S. 23-26. 6. N.N. Shumilovskij, V.P. Yarmol'chuk. Metod vihrevykh tokov. - M.: `Energiya, 1966. - 161 s. 7. Dorofeev A.L. `Elektroinduktivnaya (indukcionnaya) defektoskopiya. - M.: Mashinostroenie, 1967. - 231 s. 8. Dorofeev A.L. Nerazrushayushchie ispytaniya metodom vihrevykh tokov. - M.: Oborongiz, 1961. - 156 s. 9. Ostapenko V.D. / Issledovanie vozmozhnosti kontrolya kachestva shlifovaniya zakalennykh stalej tokovihrevym metodom. V.D. Ostapenko, B.C. Gajdamakin, O.P. Chihayev. - M.: `Energiya, 1972. - 173 s. 10. Nerazrushayushchie ispytaniya. Spravochnik. / Pod red. Mak-Mastera. - M.: `Energiya, 1965. - 201 s.

Поступила 23.11.2011

*Безотосный 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*

Bezotosny V.F., Kozlov V.V., Nabokova O.V.

Rational frequency selection for magnetization current of eddy-current converters at material control.

The paper considers obtaining analytical relations for selection of a rational frequency for magnetization current at material electromagnetic properties control through components of the magnetization winding complex impedance. An analytical expression for an eddy-current converter rational frequency calculation taking into account geometrical parameters and electromagnetic properties of controlled materials is obtained.

Key words – eddy-current converter, current frequency, nondestructive control of materials.