УДК 620.179.14

М .М. СІРЕНКО, Б .М. ГОРКУНОВ, С. Г. ЛЬВОВ

ФУНКЦІЯ ПЕРЕТВОРЕННЯ ВИХОРОСТРУМОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА З НЕМАГНІТНИМИ ВИРОБАМИ

Розглянута теорія електромагнітного перетворювача, яка заснована на виділенні екстремуму функції зміни нормованої амплітуди вихідного сигналу. Отримані функції перетворення поєднують електричні і геометричні параметри циліндричного металевого виробу з вихідними сигналами електромагнітного перетворювача. Вони дозволяють розрахувати величини електропровідності і радіуса контрольованого прутка, використовуючи вимірювані параметри сигналу перетворювача при одній частоті. Розроблений метод значно спрощує реалізацію двохпараметрового контролю без застосування складних математичних функцій.

Ключові слова: електромагнітний перетворювач, нормований сигнал, питома електропровідність, амплітуда, фаза, екстремум функції перетворення.

Вступ. Удосконалення високочутливих засобів вимірювальної техніки показує, що метрологічні характеристики автоматизованих пристроїв систем неруйнівного контролю в основному визначаються параметрами вимірювальних перетворювачів. Тому, для підвищення точності і чутливості вимірювальних пристроїв до контрольованих параметрів потрібно знаходити оптимальні режими роботи первинних вимірювальних перетворювачів. Найбільш конструктивно простими, надійними і практичними у застосуванні є вихорострумові трансформаторні перетворювачі (ВТП). Особливістю цих датчиків є те, що вони дозволяють здійснювати безконтактні вимірювання відносно об'єкта в реальному вимірі часу в процесі руху виробів, наприклад на прокатних станах металургійних заводів.

Постановка проблеми. Актуальним практичним завданням є автоматизований безконтактний контроль кількох фізико-механічних параметрів каліброваних стальних немагнітних прутків, які випускаються металургійними заводами. Такими параметрами, в основному, є діаметр (або радіус *a*) циліндричних прутків та питома електропровідність σ матеріалу цих виробів.

Найбільш розвинутими методами такого контролю є електромагнітні способи одночасного визначення кількох параметрів немагнітних виробів [1–3]. В основу них покладений принцип складання ряду незалежних нелінійних рівнянь, що зв'язують параметри електромагнітного перетворювача (або його сигналу) з контрольованими характеристиками виробу. Однак такі рівняння складні, до того ж містять, як правило, комбінації спеціальних функцій [3-5], що суттєво ускладнює проведення розрахунків, знижує швидкодію пристроїв. Тому, виходячи з узагальнених характеристик об'єкта контролю, необхідно провести попереднє спрощення теоретичних формул та отримати відносно прості функції перетворювання.

Ціль статті. Дослідження двохпараметрового безконтактного вихорострумового перетворювача для контролю діаметру та електропровідності немагнітних прутків, призначеного для автоматизації промислового контролю якості стандартних каліброваних прутків з немагнітних металів.

Основна частина. З наукової літератури [3-5] відомо, що так звана «внесена» ЕРС $\dot{E}$ електромагнітного трансформаторного перетворювача з циліндричним виробом залежить від його радіусу *a* (у комплексній формі):

$$\dot{E} = \left(\dot{\mu}_r \dot{K} - 1\right)\frac{a^2}{a_{\text{п}}^2} E_0, \qquad (1)$$

де μ_r – відносна магнітна проникність матеріалу контрольованого виробу;

$\dot{K}_0$ – питома нормована електрорушійна сила перетворювача при заданій частоті *f* електромагнітного поля;

E_0 – ЕРС перетворювача без контрольованого виробу на частоті зондуючого поля *f*.

Якщо контрольований виріб буде немагнітним (μ_r =1), то з рівняння (1) можна виділити комплексний нормований параметр $\dot{N}$:

$$\dot{N} = \dot{K} - 1 = \dot{E} \cdot a_{\text{п}}^2 / \left(\dot{E}_0 \cdot a^2\right) \qquad (2)$$

Звідси модуль (числові значення) цього параметру для різних числових значень узагальненого параметру *X* можна розрахувати, за формулою:

$$N = \sqrt{\left(1 - \operatorname{Re} K\right)^2 \left(\operatorname{Im} K\right)^2}\ . \qquad (3)$$

Особливістю цієї залежності є той факт, що на інтервалі зміни узагальненого параметру *X* від 1,61 до 1,62 спостерігається найбільша крутизна цієї характеристики. Цей факт можна уточнити, якщо побудувати залежність похідної комплексного параметру *N* від узагальненого параметру *X*, тобто залежність $dN/dX = F(X)$, поблизу її екстремуму та проаналізувати характер її поводження (рис. 1). Такий аналіз показав, що ця функція має екстремальну точку перегину.

Якщо розглянути числові табличні дані, що були використані для побудови цієї залежності (табл. 1), то можливо визначити конкретне числове значення параметру *X*, яке відповідає екстремуму цієї функції і дорівнює 1,6175 (табл. 1).

Але, модуль параметру $\left|\dot{N}\right|$ також залежить від геометричних параметрів деталі (радіусу *a*) і

© М. М. Сіренко, Б. М. Горкунов, С. Г. Львов, 2016

параметрів перетворювача (радіусу $a_п$) , а також від його сигналів E і E_0:

$$N = E\frac{a_п^2}{(E_0 a^2)} = \frac{E^*}{\eta}, \qquad (4)$$

де η – коефіцієнт заповнення площі перетину внутрішньої порожнини перетворювача площею перетину виробу, значення якого дорівнює відношенню квадратів радіусів a та $a_п$).

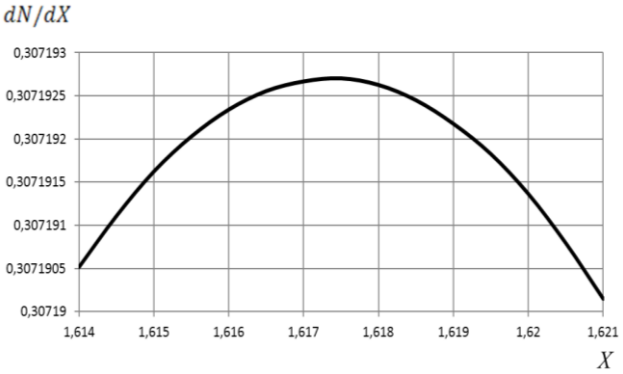

Рис. 1 – Графічне представлення залежності $dN/dX = F(X)$

Табл. 1 – Залежність $dN/dX = F(X)$

X	dN/dX	N
1,615	0,30719162442	0,29758765
1,6155	0,30719202914	0,29774125
1,616	0,3071923411	0,29789484
1,6165	0,307192555847	0,29804844
1,617	0,30719266761	0,29820204
1,6175	***0,30719270308***	**0,29835563**
1,618	0,30719262668	0,29850923
1,6185	0,30719244933	0,29866282
1,619	0,30719217648	0,29881642
1,6195	0,30719182632	0,29897002
1,62	0,3071913643	0,29912361

Продиференцюємо обидві частини цього рівняння по dX:

$$\frac{dN}{dX} = \frac{d(E^*)}{\eta dX}. \qquad (5)$$

Враховуючи, що узагальнений параметр X для немагнітного виробу

$$X = a\sqrt{\mu_0\sigma 2\pi}\sqrt{f}, \qquad (6)$$

то отримаємо наступне рівняння:

$$\eta\frac{dN}{dX} = \frac{d(E^*)2\sqrt{f}}{a\sqrt{\mu_0\sigma 2\pi}df}. \qquad (7)$$

Оскільки, як було показано вище, функція $dN/dX = F(X)$ має екстремум, то умова узгодження екстремумів двох функцій (які надані у вигляді лівої та правої частини рівняння (7) буде наступною:

$$\left[\frac{dN}{dX}\right]_{extr} = \frac{2}{\eta a\sqrt{2\pi\mu_0\sigma}}\left[\sqrt{f}\frac{d(E^*)}{df}\right]_{extr}. \qquad (9)$$

Аналіз цього співвідношення показує, що функція $\frac{2}{\eta a\sqrt{2\pi\mu_0\sigma}}\left[\sqrt{f}\frac{d(E^*)}{df}\right] = F(f)$ є залежністю зміни нормованого сигналу E^* перетворювача з немагнітним виробом від частоти f змінного електромагнітного поля датчика, тобто функцією перетворення цього датчику. Крім того, видно, що екстремум цієї функції перетворення співпадає з екстремумом узагальненої функції $dN/dX = F(X)$.

Тому такий підхід дозволить вирішити завдання отримання рівнянь для розрахунків діаметру і електропровідності циліндричних немагнітних стрижнів без застосування складних математичних функцій Беселя, що і є необхідним для реалізації двухпараметрового контролю.

Визначення частоти екстремуму функції перетворення ВТП

Рівняння (9) є математичним представленням умови узгодження екстремумів двох функцій:

$$\left[\frac{dN}{dX}\right]_{extr} = \frac{\sqrt{2}a_n^2}{a^3\sqrt{\mu_0\sigma\pi}}\left[\sqrt{f}\frac{d(E/E_0)}{df}\right]_{extr}. \qquad (10)$$

При цьому першою функцією є залежність похідної нормованого параметра N (ліва частина рівняння) від узагальненого параметра X:

$$\left[\frac{dN}{dX}\right]_{extr} = F(X). \qquad (11)$$

Друга функція – це залежність комбінації параметрів виробу і перетворювача (в тому числі і його сигналів E і E_0) від частоти f поля перетворювача:

$$\frac{2}{\eta a\sqrt{\mu_0\sigma 2\pi}}\left[\sqrt{f}\frac{d(E/E_0)}{df}\right] = F(f). \qquad (11)$$

Аналізуючи останнє рівняння можна встановити, що, знайшовши екстремум (тобто максимальне числове значення) частини цього рівняння у квадратних дужках у лівій частині цього співвідношення, від частоти f змінного електромагнітного поля перетворювача, можна відразу ж визначити конкретну величину параметра X = 1,6175, що відповідає екстремуму першої залежності (11).

Величина перед рівнянням у квадратних дужках у правій частині рівняння (10) і в лівій частині співвідношення (11) являють собою величини, які є постійними (константами) для конкретного перетворювача й досліджуваного виробу, оскільки залежить лише від їхніх параметрів. Тому її чисельне значення не змінює величину X, а змінює лише крутизну графічної залежності поблизу точки екстремуму цієї функції.

Таким чином, змінюючи дискретно частоту f намагнічувального поля з інтервалом $df = \Delta f$, а також

вимірюючи щораз величину $\left[\sqrt{f}\,\frac{\Delta(E/E_0)}{\Delta f}\right]$ і фіксуючи її екстремальне (максимальне) значення, можна визначати точне значення параметру X= 1,6175 і пов'язану з ним величину N=0,29835563 (див. табл. 1).

Таким чином, процедура визначення частоти f_0, яка відповідає екстремуму функції перетворення датчика із виробом, пов'язана із прямими вимірюваннями величин E та E_0, та частоти f намагнічувального поля перетворювача з контрольованим об'єктом відповідними стандартними вимірювальними приладами: вольтметром змінного струму та частотоміром. Оскільки при цьому потрібно стабілізувати напруженість намагнічувального поля, то контроль намагнічувального змінного струму відбувається за допомогою амперметру змінного струму.

Слід зауважити , що функція (11) може бути досить пологою поблизу свого екстремуму. Тому потрібно уточнити значення екстремальної частоти f_0 шляхом вимірювання не величин $\left[\sqrt{f}\,\frac{\Delta(E/E_0)}{\Delta f}\right]$, а їхніх приростів $\Delta\left[\sqrt{f}\,\frac{\Delta(E/E_0)}{\Delta f}\right]$ поблизу екстремальної точки функції перетворення (11).

Для цього змінюють частоту f намагнічувального поля дискретно з постійним шагом. Частоту f_0 визначають у момент зміни знака на протилежний (або рівності нулю) подвійним приростом нормованої ЕРС датчика, розраховуючи її чисельне значення за формулою:

$$f_0 = \frac{\left|\Delta(\sqrt{f}\,\Delta E^*)/\Delta f\right|_i \cdot f_{(i+1)} + \left|\Delta(\sqrt{f}\,\Delta E^*)/\Delta f\right|_{(i+1)} \cdot f_i}{\left|\Delta(\sqrt{f}\,\Delta E^*)/\Delta f\right|_i + \left|\Delta(\sqrt{f}\,\Delta E^*)/\Delta f\right|_{(i+1)}}, \quad (12)$$

де $\left|\Delta(\sqrt{f}\,\Delta E^*)/\Delta f\right|_i$ і $\left|\Delta(\sqrt{f}\,\Delta E^*)/\Delta f\right|_{(i+1)}$ – величини модулів відповідно останнього позитивного (негативного або нульового) і першого нульового або негативного (позитивного) подвійного приросту ЕРС E^* при збільшенні (зменшенні) частоти поля з постійним кроком Δf ;

f_i і $f_{(i+1)}$ – відповідні вказаним приростам значення частот поля перетворювача.

Розрахунок радіуса і питомої електропровідності прутків

Використовуючи вираз (4), отримаємо рівняння для розрахунку радіуса a виробу, що залежить лише від параметрів (E, E_0) сигналу перетворювача (при частоті f_0 поля, що відповідає екстремуму функції перетворення датчика з виробом) і відомих констант:

$$a = a_{\text{п}}\sqrt{\frac{E}{E_0 N^*}}, \quad (13)$$

де N^* – нормований параметр, чисельне значення якого у точці екстремуму функції перетворення дорівнює 0,29835563 (табл. 1).

Враховуючи це, вказане рівняння можна представити в іншому вигляді:

$$a = 1{,}83077\,a_{\text{п}}\sqrt{\frac{E}{E_0}}. \quad (14)$$

Як видно, це рівняння залежить тільки від значень вимірюваних сигналів перетворювача.

Щоб вивести співвідношення для розрахунку питомої електричної провідності σ, скористаємося формулою:

$$\sigma = \frac{X^2}{a^2\mu_0 2\pi f_0} \quad (15)$$

де f_0 – частота намагнічувального поля, яка відповідає екстремуму функції перетворення (11) датчика із виробом.

Оскільки при зазначеному екстремумі величина X=1,6175, то

$$\sigma = \frac{1{,}308153}{a^2\mu_0\pi f_0}. \quad (16)$$

Але ця формула призначена для послідовного розрахунку спочатку радіусу a, потім питомої електропровідності σ. Якщо у цей вираз підставити співвідношення (14), то можна отримати формулу для паралельного циклу спільних вимірювань a і σ:

$$\sigma = \frac{0{,}3902932E_0}{\mu_0\pi f_0 a_{\text{п}}^2 E}. \quad (17)$$

Отже, отримані рівняння дозволяють як послідовно, так і одночасно (паралельно), розрахувати величини електропровідності і радіуса контрольованого прутка, використовуючи лише вимірювані параметри сигналу перетворювача при одній, конкретній для кожного окремого виробу, «екстремальній» частоті f_0.

При проведенні вихорострумового контролю встановити режим роботи перетворювача, що відповідає зазначеній конкретній величині X = 1,6175, можна шляхом вимірювання значень $\left[\sqrt{f}\,\frac{d(\frac{E}{E_0})}{df}\right]$ і пошуком їхніх екстремальних значень при дискретній зміні частоти з рівним інтервалом і підтримці стабільності напруженості електромагнітного поля перетворювача.

Безумовна перевага розробленого способу вихорострумового контролю полягає в тому, що вимірювання двох параметрів виробу здійснюють тільки на одній певній частоті f_0 поля. Істотно, що для виробів різноманітних асортиментів значення цієї частоти будуть змінюватися, тому що положення максимуму функції залежить від двох (a і σ) параметрів виробу.

Характерною рисою розробленого методу є те, що для всіх виробів величини σ визначаються на одній і тій же відносній глибині δ/*a* проникнення магнітного поля в циліндричний виріб, тому що узагальнений параметр *X* пов'язаний з радіусом циліндричного виробу співвідношенням

$$X = a\frac{\sqrt{2}}{\delta} \qquad (18)$$

де δ – глибина проникнення:

У практиці неруйнівного контролю більше зручним є використання відносної еквівалентної глибини δ_e / a проникнення поля у пруток, яка розраховується за формулою:

$$\delta_e / a = 1 - \sqrt{1-K}\ . \qquad (19)$$

Якщо екстремальне значення X = 1,6175, то значення параметру K дорівнює 0,92299477. Тоді відносна глибина проникнення електромагнітного поля у виріб складає δ_e / a = 0,723.

Отже, пошук екстремальних значень розглянутої функції перетворення вихорострумового перетворювача з виробом дозволяє безпосередньо визначити екстремальну частоту намагнічувального поля а разом з нею і конкретну величину параметра *X*. Використання наведеного алгоритму вимірювальних і обчислювальних процедур дозволяє визначати два досліджених параметри виробу як у послідовному циклі, так і одночасно.

Висновки. Запропонований в роботі метод та пристрій двопараметрових вимірювань дозволяє автоматизувати процес відбраківки немагнітних циліндричних виробів, як за геометричними (радіус *a*) параметрами, так і сортувати їх за фізичними властивостями згідно з величиною електропровідності σ (мідь, алюміній, латунь та інші). Важливим є те, що запропонований перетворювач і режим його роботи завжди забезпечують максимальні значення точності та чутливості не залежно від характеристик об'єкту контролю та геометричних параметрів перетворювача.

Список літератури: 1. *Горкунов Б.М.* Оптимизация работы электромагнитного преобразователя по частоте возбуждающего поля / *Б.М. Горкунов, А.А. Авраменко, С.Г. Львов и др.* // Энергосбережение. Энергетика Энергоаудит. –2014. –Т.2, № 9 (128).– С. 120–124. **2.** *Горкунов Б.М.* Компьютерная система управления механическим упрочнением цилиндрических изделий / *Б.М. Горкунов, Н.Н. Сиренко, А.А. Тищенко, И.Б. Горкунова* // Электротехнические и компьютерные системы. – 2014. –№15(91). – С. 232–234. **3.** Неразрушающий контроль: Справочник. Т.2 / под общ. ред. *В. В. Клюева*. –Москва: Машиностроение, 2003. – 688 с. **4.** Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 3. Электромагнитный контроль: Практическое пособие / Под ред. *В. В. Сухорукова*. – Москва: Высш. шк., 1992. –312 с. **5.** *Ковашевич И. П.* Ферромагнитный цилиндр в проходном вихретоковом преобразователе. Численное решение обратной задачи / *И.П. Ковашевич*// Дефектоскопия. – 1984. – № 9. – С. 8–12.

Bibliography (transliterated): 1. Gorkunov B.M., Avramenko A.A., Lvov S.G. Optimizacija raboty jelektromagnitnogo preobrazovatelja po chastote vozbuzhdajushhego polja / *Jenergosberezhenie. Jenergetika. Jenergoaudit.* –2014. –T.2, no 9 (128).– P. 120–124. Print. **2.** Gorkunov B.M., Sirenko N.N., Tishhenko A.A., Gorkunova I.B. Komp'juternaja sistema upravlenija mehanicheskim uprochneniem cilindricheskih izdelij / *Jelektrotehnicheskie i komp'juternye sistemy*. – 2014. –no 15(91). – P. 232–234. Print. **3.** *Nerazrushajushhij kontrol': Spravochnik. T.2* / Ed. V. V. Kljuev – Moscow: Mashinostroenie, 2003. Print. **4.** *Nerazrushajushhij kontrol'. Vol. 3. Jelektromagnitnyj kontrol': Prakticheskoe posobie* / Ed. V. V. Suhorukov. – Moscow: Vysshaja shkola, 1992. Print. **5.** Kovashevich I. P. Ferromagnitnyj cilindr v prohodnom vihretokovom preobrazovatele. Chislennoe reshenie obratnoj zadachi. –*Defektoskopija*. –1984. –no 9. –P. 8–12. Print.

Надійшла (received) 29.01.2016

Сіренко Микола Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри приладів та методів неруйнівного контролю, м. Харків; тел.: (057) 707-69-34; e-mail: sirnn@mail.ua.

Sirenko Mykola Mykolajovych – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor at the Department of "The devices and methods of nondestructive testing"; Kharkiv; tel. (057) 707-69-34; e-mail: sirnn@mail.ua.

Горкунов Борис Митрофанович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри " Інформаційно-вимірювальні технології та системи", м. Харків; тел.: (057) 707-69-34; e-mail: gorkunov@kpi.kharkov.ua.

Gorkunov Boris Mitrofanovich – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor at the Department of " Information-measuring technologies and systems", Kharkov; tel.: (057) 707-69-34; e-mail: gorkunov@kpi.kharkov.ua.

Львов Сергій Геннадійович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри приладів та методів неруйнівного контролю, м. Харків; тел.: (057) 707-69-34; e-mail: lsg@kpi.kharkov.ua.

Lvov Sergij Gennadijovych – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of "The devices and methods of nondestructive testing"; Kharkiv; tel. (057) 707-69-34; e-mail: lsg@kpi.kharkov.ua.