УДК 621.396.67.01

Б.М. Березюк[*], У.Б. Марікуца[**], Т.В. Свірідова[**]
Національний університет "Львівська політехніка",
[*]кафедра автоматики та телемеханіки,
[**]кафедра систем автоматизованого проектування

РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ БАГАТОПАРАМЕТРИЧНОГО КОНТРОЛЮ МЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ ЗМІННО-ЧАСТОТНИМ МЕТОДОМ ВИХРОВИХ СТРУМІВ

Наведено розв'язання оберненої задачі багатопараметричного контролю феромагнітних матеріалів змінно-частотним методом вихрових струмів. Побудована цільова функція і математичний апарат для її мінімізації методом Флетчера–Пауела, застосування яких дасть змогу використовувати вбудовані у технологічне обладнання системи для контролю якості металевих виробів.

An inverse task solution of multiparameter control of ferromagnetic materials using the variably-frequency method of vortical currents is carried-out. An objective function and mathematical tool for its minimization using Fletchera-Pauela method is presented. Such application allow to use the embedded systems in a technological equipment for control hardware's quality.

Вступ

Сучасні технології дають змогу використовувати вбудовані в об'єкт автоматизації (технологічне обладнання, вимірювальні прилади, транспортні засоби, побутову техніку тощо) системи, які разом з давачами первинних сигналів (сенсорами) містять побудовані на одному кристалі як електронні перетворювачі сигналів, так і блоки обробки інформації та прийняття рішень [1].

Перспективними для побудови вбудованих в технологічне обладнання систем є засоби вихрострумового контролю металевих виробів, які дають змогу контролювати структурний стан, хімічний і фазовий склад, твердість, якість термообробки та інші характеристики за наявності кореляційних зв'язків між ними та електричною провідністю і магнітною проникністю феромагнітного матеріалу та бракувати вироби у разі відхилення їхніх параметрів від заданих значень [2].

Загальна постановка задачі

Під час аналізу роботи ВСП користуються узагальненими параметрами β і α, які визначаються співвідношенням:

$$\beta = R\sqrt{\omega\eta\mu_0}\,, \qquad \alpha = \frac{2h}{R} \tag{1}$$

де R – еквівалентний радіус перетворювача; ω – кругова частота збудження первинного електромагнітного поля (ЕМП); $\eta = \sigma\mu$ – електромагнітний параметр металевого виробу; σ і μ – відповідно питома електрична провідність та магнітна проникність контрольованого феромагнітного матеріалу; $\mu\,0$ – магнітна стала; h – зазор між ВСП та поверхнею контрольованого виробу або товщина лакофарбового покриття на його поверхні [3].

Зміна параметрів α і β впливає на значення внесених контрольованим виробом у параметричний ВСП активного $R_{вн}$ і реактивного $X_{вн}$ опорів та повний внесений опір $Z_{вн}$, який характеризується модулем $|Z_{вн}|$ і фазою φ. Тоді

$$Z_{вн} = \sqrt{R_{вн}^2 + X_{вн}^{\,2}}\,; \qquad \varphi = -arctg\frac{X_{вн}}{R_{вн}} \tag{2}$$

Згідно з [4]:

$$R_{вн} = -\pi\mu_0\omega \frac{W^2 R}{(r_2 - r_1)^2 \alpha^2 \beta} \int_0^\infty (e^{-\alpha\beta y} - 1)^2 e^{-\alpha\beta y} \left[\int_{r_1}^{r_2} \mathrm{I}_1(\beta y r) r dr \right]^2 \operatorname{Im}\varphi(y) \frac{1}{2} dy; \Bigg\} \quad (3)$$

$$X_{вн} = -\pi\mu_0\omega \frac{W^2 R}{(r_2 - r_1)^2 \alpha^2 \beta} \int_0^\infty (e^{-\alpha\beta y} - 1)^2 e^{-\alpha\beta y} \left[\int_{r_1}^{r_2} \mathrm{I}_1(\beta y r) r dr \right]^2 \operatorname{Re}\varphi(y) \frac{1}{y^2} dy; \Bigg\}, \quad (4)$$

де r, r1, r2, – відносні параметри, що характеризують розміри ВСП; W – кількість витків котушки перетворювача; I1(y) – функція Беселя першого роду першого порядку; y – змінна інтегрування; $\operatorname{Im}\varphi$ (y), $\operatorname{Re}\varphi$ (y) – відповідно уявна та дійсна частини функції, що визначає фізичні параметри контрольованого об’єкта.

Серед методів вихрових струмів підвищеними метрологічними характеристиками відрізняється змінно-частотний метод вихрових струмів (ЗМВС), який забезпечує під час контролю феромагнітних виробів стабільність узагальненого вихрострумового параметра β. Зміни корельованого зі структурою матеріалу параметра компенсуються відповідними змінами частоти ω збудження первинного електромагнітного поля. Забезпечується оптимальне значення фази φ вихідного сигналу ВСП, однозначно пов’язане з узагальненим параметром β. Інформативним параметром є частота ωо балансу фаз, яка забезпечує рівність фази внесених у ВСП параметрів заданому значенню, що відповідає режиму високої чутливості перетворювача. Тобто, у разі забезпечення виконання умови $\varphi = \varphi_{зад}$ частота збудження ЕМП може характеризувати контрольований параметр виробу: $\omega = F(\eta, h)$.

Крім цього, ЗМВС забезпечує постійну товщину контрольованого шару металу, що є важливим фактором під час контролю, наприклад, термічно оброблених сталей, в яких параметр η може змінюватися за глибиною виробу.

За своєю суттю методи вихрових струмів (МВС) належать до багатопараметрових, в яких на амплітуду і фазу вимірювального сигналу разом з електропровідністю і магнітною проникністю впливають і інші чинники, з яких найістотнішим є зазор між вихрострумовим перетворювачем (ВСП) та поверхнею контрольованого виробу або товщина лакофарбового покриття на його поверхні. Однак ЗМВС не дає змоги з належною точністю відлаштуватися від факторів, які заважають в широкому діапазоні частоти збудження первинного ЕМП, а також виконувати роздільне вимірювання параметрів η і h .

Багатопараметровий контроль виробу змінно-частотним методом вихрових струмів можна здійснити за наявності математичної моделі, тобто залежності вихідних сигналів ВСП від контрольованих параметрів:

$$Y = F(X) \quad (5)$$

де Y=(y1, y2, …, yn)T – вектор-стовпчик виміряних сигналів; X=(x1, x2,…, xm) – вектор параметрів металевого виробу, які контролюють; F=(F1, F2,…,Fn)T – вектор-функція зв’язку; T – символ транспонування.

Виділення параметрів із рівняння (1) полягає в розв’язанні оберненої задачі

$$X^T = F^{-1}(Y^T) \quad (6)$$

Якщо для одного і того самого об’єкта контролю значення частоти ω балансу фаз визначити за двох різних заданих значень зсуву фаз φ1 та φ2 [5], то отримаємо:

$$\left.\begin{aligned} \omega_1 &= F_1(\eta, h, \varphi_1); \\ \omega_2 &= F_2(\eta, h, \varphi_2) \end{aligned}\right\}. \quad (7)$$

На підставі аналізу математичної моделі ЗМВС можна побудувати цільову функцію, яка дасть змогу для заданих φ1 та φ2, задаючись початковими значеннями η0 і h0 у визначеному інтервалі їхньої зміни оцінити розбіжність між обчисленими та виміряними значеннями ω1 та ω2. Ця цільова функція повинна відповідати вимогам диференційованості і бути додатною в області її визначення [6]. Якщо одним із методів знаходження екстремуму багатопараметричних функцій буде знайдений мінімум побудованої цільової функції, то тим самим буде розв'язана задача знаходження числових значень параметрів η і h контрольованого об'єкта.

Цільова функція G, яка відповідає вищеназваним вимогам, матиме вигляд:

$$G(\eta,h)=2\sqrt{\left[tg\varphi_1-P_1(\eta,h)\right]^2+\left[tg\varphi_2-P_2(\eta,h)\right]^2}\ , \tag{8}$$

$$\text{де: } P_1(\eta,h)=\frac{X_{BH}(\eta,h,\omega_1)}{R_{BH}(\eta,h,\omega_1)}\ ,\qquad P_2(\eta,h)=\frac{X_{BH}(\eta,h,\omega_1)}{R_{BH}(\eta,h,\omega_2)}\ ; \tag{9}$$

де R_{BH}, X_{BH} – відповідно активна і реактивна складові внесеного у ВСП контрольованим об'єктом комплексного опору.

Отже, задача розділення параметрів зводиться до задачі обчислення

$$G_k=\frac{\min G}{(h,\eta)}=\min 2\sqrt{\left[tg\varphi_1-P_1(\eta,h)\right]^2+\left[tg\varphi_2-P_2(\eta,h)\right]^2} \tag{10}$$

за обмежень $h_{\min}\le h\le h_{\max}$, $h>0$; $\eta_{\min}\le\eta\le\eta_{\max}$, $\eta>0$, накладених на параметри η і h. Початкові значення шуканих параметрів η(0) і h(0) вибирають з області їхніх можливих значень. Значення h(к) і η(к), за яких G=Gk і будуть шуканими значеннями зазору між поверхнею контрольованого об'єкта і вихрострумовим перетворювачем та параметра, корельованого з фізико-механічними характеристиками матеріалу об'єкта.

Для розв'язання оптимізаційної задачі мінімізації цільової функції G (8) доцільно застосувати метод Флетчера–Пауела [7], в якому поєднуються переваги методів оптимізації як першого, так і другого порядків. При апроксимації гесіана цільової функції методом Флетчера–Пауела використовують її градієнт.

Градієнт вибраної цільової функції визначається такою формулою:

$$gradG(h,\eta)=\begin{pmatrix}\dfrac{dG}{dh}\\ \dfrac{dG}{d\eta}\end{pmatrix}, \tag{11}$$

де $\dfrac{dG}{dh}$ та $\dfrac{dG}{d\eta}$ – відповідно похідні цільової функції $G(h,\eta)$ за змінними h і η.

Функцію (8) можна привести до вигляду

$$G(h,\eta)=2\sqrt{C(h,\eta)}\ , \tag{12}$$

де

$$\left.\begin{array}{c}C(h,\eta)=\left[T_1(\omega_1)\right]^2+\left[T_2(\omega_2)\right]^2;\\ T_1(\omega_1)=tg\varphi_1-P_1(h,\eta);T_2(\omega_2)=tg\varphi_2-P_2(h,\eta)\end{array}\right\} \tag{13}$$

Тоді похідні $\dfrac{dG}{dh}$ та $\dfrac{dG}{d\eta}$ будуть визначатися такими формулами

$$\left.G^h(h,\eta)=\frac{1}{\sqrt{C(h,\eta)}}C^h(h,\eta);G^\eta(h,\eta)=\frac{1}{\sqrt{C(h,\eta)}}C^\eta(h,\eta);\right\} \tag{14}$$

де

$$C^h(h,\eta)=\frac{dC}{dh},\qquad C^\eta(h,\eta)=\frac{dC}{d\eta}.$$

Для визначення похідних $C^h(h,\eta)$ та $C^\eta(h,\eta)$ продиференціюємо (12) за h та η:

$$\left.\begin{aligned} C^h(h,\eta) &= -2\left[T_1(\omega_1)P_1^h(h,\eta)+T_2(\omega_2)P_2^h(h,\eta)\right]; \\ C^\eta(h,\eta) &= -2\left[T_1(\omega_1)P_1^\eta(h,\eta)+T_2(\omega_2)P_2^\eta(h,\eta)\right]; \end{aligned}\right\} \tag{15}$$

де $$P_i^h(h,\eta)=\frac{dP_i}{dh}; \qquad P_i^\eta(h,\eta)=\frac{dP_i}{d\eta}; \qquad \text{i=1,2.}$$

Для визначення $P_i^h(h,\eta)$ та $P_i^\eta(h,\eta)$ продиференціюємо (9) за η та h:

$$\left.\begin{aligned} P_i^h(h,\eta) &= \frac{X_i^h(\omega_i)R_i(\omega_i)-X_i(\omega_i)R_i^h(\omega_i)}{\left[R_i(\omega_i)\right]^2} \\ P_i^\eta(h,\eta) &= \frac{X_i^\eta(\omega_i)R_i(\omega_i)-X_i(\omega_i)R_i^\eta(\omega_i)}{\left[R_i(\omega_i)\right]^2} \end{aligned}\right\} \tag{16}$$

де $$X_i(\omega_i)=X_{BH}(h,\eta,\omega_i); \qquad R_i(\omega_i)=R_{BH}(h,\eta,\omega_i); \quad X_i^h(\omega_i)=\frac{dX_i}{h};$$

$$X_i^\eta(\omega_i)=\frac{dX_i}{d\eta}; \quad R_i^h(\omega_i)=\frac{dR_i}{dh}; \qquad R_i^\eta(\omega_i)=\frac{dR_i}{d\eta}; \qquad \text{i=1, 2.}$$

Визначимо похідні внесених активного та реактивного опорів по h та η.

Вирази які визначають, внесені полем реакції у вихрострумовий плоский перетворювач активний (3) та реактивний (4) опори, можна переписати у вигляді :

$$\left.\begin{aligned} X_i(\omega_i) &= -Q(\omega_i)\int_0^\infty F(\alpha,\beta_i)\operatorname{Re}\varphi(y)dy; \\ R_i(\omega_i) &= Q(\omega_i)\int_0^\infty F(\alpha,\beta_i)\operatorname{Im}\varphi(y)dy; \end{aligned}\right\} \tag{17}$$

де $$F(\alpha,\beta_i)=\beta_i e^{-\alpha\beta_i y}\left[\int_{r_1}^{r_2} rI_1(r\beta_i y)dr\right]^2; \tag{18}$$

$$Q(\omega_i)=\pi\mu_0\omega_i\frac{W^2R^3}{(r_2-r_1)} \tag{19}$$

Із функцій, які входять у вираз [17], лише $F(\alpha,\beta_i)$ є функцією змінних h та η. Продиференціюємо її за h і η:

$$\left.\begin{aligned} \frac{dF(\alpha,\beta_i)}{d\eta} &= \frac{dF}{d\beta}\cdot\frac{d\beta}{d\eta} = \\ &= e^{-\alpha\beta_i y}\int_{r_1}^{r_2} rI_1(r\beta_i y)dr\left[2\beta_i y\int_{r_1}^{r_2} r^2 I_0(r\beta_i y)dr-(1+\beta_i y)\int_{r_1}^{r_2} rI_1(r\beta_i y)dr\right]\frac{\beta_i}{2\eta}; \\ \frac{dF(\alpha,\beta_i)}{dh} &= \frac{dF}{d\alpha}\cdot\frac{d\alpha}{dh} = -\frac{2}{R}\beta_i^2 y e^{-\alpha\beta_i y}\left[\int_{r_1}^{r_2} rI_1(r\beta_i y)dr\right]^2. \end{aligned}\right\} \tag{20}$$

Введемо позначення:

$$\left.\begin{aligned} H_i^h(\alpha,\beta_i,y) &= \frac{2}{R}\beta_i y\int_{r_1}^{r_2} rI_1(r\beta_i y)dr; \\ H_i^\eta(\alpha,\beta_i,y) &= \frac{1}{2\eta}\left[2\beta_i y\int_{r_1}^{r_2} r^2 I_0(r\beta_i y)dr-(1+\beta_i y)\int_{r_1}^{r_2} rI_1(r\beta_i y)dr\right]. \end{aligned}\right\} \tag{21}$$

Тоді похідні функцій (17) за h та η із урахуванням (21) будуть визначатися такими виразами:

$$\left.\begin{aligned} X_i^h(\omega_i) &= Q(\omega_i)\int_0^\infty H_i^h(\alpha, \beta_i, y)\beta_i e^{-\alpha\beta_i y}\int_{r_1}^{r_2} rI_1(r\beta_i y)dr \,\mathrm{Re}\,\varphi(y)dy; \\ R_i^h(\omega_i) &= Q(\omega_i)\int_0^\infty H_i^h(\alpha, \beta_i, y)\beta_i e^{-\alpha\beta_i y}\int_{r_1}^{r_2} rI_1(r\beta_i y)dr \,\mathrm{Im}\,\varphi(y)dy; \end{aligned}\right\} \tag{22}$$

$$\left.\begin{aligned} X_i^\eta(\omega_i) &= -Q(\omega_i)\int_0^\infty H_i^\eta(\alpha, \beta_i, y)\beta_i e^{-\alpha\beta_i y}\int_{r_1}^{r_2} rI_1(r\beta_i y)dr \,\mathrm{Re}\,\varphi(y)dy; \\ R_i^\eta(\omega_i) &= Q(\omega_i)\int_0^\infty H_i^\eta(\alpha, \beta_i, y)\beta_i e^{-\alpha\beta_i y}\int_{r_1}^{r_2} rI_1(r\beta_i y)dr \,\mathrm{Im}\,\varphi(y)dy; \end{aligned}\right\} \tag{23}$$

Щоб отримати аналітичний вираз для визначення градієнта цільової функції $gradG(h,\eta)$, необхідно (22) – (23) з урахування (14) і (15) підставити у (11)

Висновки

Отже, в результаті розв’язання поставленої задачі побудована цільова функція, яка дає змогу оцінити різницю між виміряними і обчисленими заченнями частоти збудження ЕМП, та розроблений математичний апарат для її мінімізації методом Флетчера–Пауела.

Отримані результати дають змогу використовувати вбудовані у технологічне обладнання системи на базі змінно-частотного методу вихрових струмів для багатопараметричного контролю якості металевих виробів під час їхнього виготовлення. Такі системи забезпечать контроль не тільки фізико-механічних характеристик, корельованих з електромагнітним параметром η матеріалу, а й товщини захисного покриття поверхні виробу.

1. Лобур М., Марікуца У. Перспективи використання хімічних сенсорів у вбудованих системах // Матеріали II Міжнародної конференції молодих вчених MEMSTECH 2005 “Перспективні технології і методи проектування МЕМС” 23–25 травня 2006, Львів–Поляна, Україна. 2. Березюк Б. Прилади для контролю якості термообробки складнолегованих сталей: Фізичні методи контролю середовищ, матеріалів та виробів // Збірник наукових праць. – К., 1999. – С. 111–112. 3. Дякин В.В., Сандовский В.А. Теория и расчет накладных вихретоковых преобразователей. – М., 1981. 4. Березюк Б.М. Математическая модель цифрового вихретокового измерителя електропроводности // В кн.: Неразрушающие физические методы и средства контроля". Тезисы докладов Х Всесоюзной научно- технической конференции (Львов, 25–27 сентября 1984г.). – Львов, 1984. 5. А.С. № 1337753 (СССР) Способ измерения електропроводности металлических изделий и устройство для его осуществления / Березюк Б.М. – Опубл. в Б.И., 1987, № 34. 6. Химмельблау Д. Прикладное линейное программирование. – М., 1976. 7. Колохан Д. Методы машинного расчета электронных схем. – М., 1970.