

УДК 621.313

ВИДІЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ ВИХРОСТРУМОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА НА ЕЛЕМЕНТАХ ПЕРВИННОГО ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОЛА У ПЕРЕХІДНОМУ РЕЖИМІ

М. Яцун, А. Яцун

*Національний університет "Львівська політехніка"
вул. С. Бандери, 12, Львів 79013, Україна
Львівський інститут пожежної безпеки
вул. Клепарівська, 35, Львів 79000, Україна*

Обґрунтовано форму напруги живлення і струму в обмотці збудження вихрострумове перетворювача, оцінено характер комутації, визначено головні величини первинного вимірювального кола для виділення корисної інформації на вимірювальній обмотці про об'єкт контролю.

Ключові слова: вихрострумівий перетворювач, обмотка збудження, вимірювальна обмотка, первинне вимірювальне коло, інформаційні величини.

Дослідження і розробка засобів неруйнівного контролю матеріалів і виробів імпульсним вихрострумівим методом охоплюють питання вибору форми напруги живлення або струму збудження, схеми первинного вимірювального кола із зосередженими параметрами, в якому працює перетворювач, характеру комутації кола і часового відбору інформації. Всі ці питання треба вирішувати спільно у напрямі якнайповнішого розкриття чутливості перетворювача до сукупності параметрів контролю (виділення і придушення) і чіткого розділення часових зон відбору інформації.

Форма напруги джерела живлення перетворювача впливає на форму вихідного сигналу первинного вимірювального кола шляхом зміни його вимушеної складової. Тому для усунення такого впливу найдоцільніше передбачати комутацію в колі обмотки збудження перетворювача з джерелом постійної напруги. Тоді вимушена складова будь-якого перехідного сигналу є сталою, незалежною від параметрів реактивних елементів вимірювального кола, у тому числі й індуктивності перетворювача, що вноситься об'єктом контролю. З метою підвищення чутливості постійну складову перехідної величини легко вилучити за допомогою розділюючого конденсатора або трансформаторного зв'язку (на вимірювальній обмотці). У практиці імпульсного електромагнітного контролю, коли імпульси треба періодично повторювати, зазначені особливості забезпечують живленням кола перетворювача імпульсами прямокутної форми від мультівібратора. У цьому випадку тривалості наростання і спаду імпульсів повинні бути на два порядки менші, а тривалість усього імпульсу – на порядок більша, ніж еквівалентна стала часу внесеної власної перехідної індуктивності

обмотки збудження перетворювача. Тобто прямокутні імпульси напруги збудження повинні мати певну тривалість і достатньо круті фронт і спад.

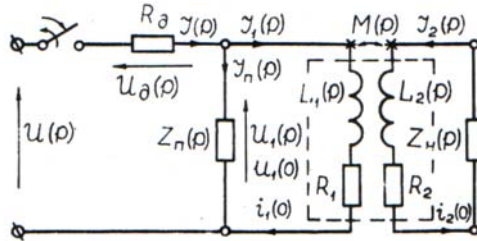
На основі доступної прямокутної форми напруги джерела живлення можна одержати в першому наближенні й прямокутну форму струму збудження, якщо послідовно з обмоткою збудження перетворювача, що має активний опір R_1 , власну початкову індуктивність $L_{1н}$ та еквівалентну сталу часу τ_1 перехідної індуктивності, що вноситься об'єктом контролю, додатково ввести такий значний активний опір R_0 , щоб $\tau_1 \gg L_{1н}/(R_1 + R_0)$. Тоді внесена напругу на вимірювальній обмотці перетворювача за одиничного стрибка струму в обмотці збудження визначатиме у функціях часу вираз $u_{2e}(t) = -d(M_e(t))/dt$, або у зображенні за Лапласом $U_{2e}(p) = -M_e(p)$.

Це означає, що чутливість внесеної напруги на вимірювальній обмотці до певного контрольованого параметра дорівнює узятій з оберненим знаком швидкості зміни чутливості внесеної взаємної перехідної індуктивності до того ж параметра контролю. Зазначена чутливість до головних первинних параметрів контролю розглянута в [3].

Якщо ж струм в обмотці збудження зростає в часі за лінійним законом $i \equiv t$, то $u_{2e}(t) = -M_e(t)$ або $U_{2e}(p) = -M_e(p)/p$, тобто в останньому випадку чутливість до параметрів контролю внесеної напруги на вимірювальній обмотці і взаємної внесеної індуктивності збігаються. Оскільки струм в обмотці збудження не може безмежно зростати, то у практиці вихрострумове контролю подібний режим роботи перетворювача за характером перехідного процесу можна отримати в разі живлення обмотки збудження від джерела пилоподібної напруги через досить великий активний опір. Умова вибору цього опору визначена вище, причому проміжок часу між сусідніми зломами графіка напруги джерела, як і тривалості прямокутного імпульсу, повинен на порядок перевищувати еквівалентну сталу часу внесеної перехідної індуктивності.

У деяких випадках доцільно збуджувати перетворювач періодичними імпульсами визначеної вище тривалості з фронтом, що лінійно наростає, і крутим спадом, або такими ж за тривалістю імпульсами, що відображають за формою різницю між одиничним стрибком і одиничною загасаючою експонентою, тобто $i = 1 - \exp(-\alpha t)$.

Для живлення обмотки збудження й раціонального відбору інформації вихрострумове перетворювача про об'єкт контролю виникає необхідність ввести в кола збуджувальної і вимірювальної обмоток елементи із зосередженими параметрами і забезпечити потрібне поєднання комутацій. Така сукупність двох кіл, зв'язаних магнітно за допомогою збуджувальної і вимірювальної обмоток перетворювача, утворює узагальнене первинне вимірювальне коло, можливий варіант якого показано схемою на рисунку.



Принципова схема первинного вимірювального кола вихрострумowego перетворювача.

Наведене первинне вимірювальне коло забезпечує перебіг перехідного процесу під час вмикання та вимикання кола. Таку безперервну по чергову зміну характеру комутації кола можна виконати за допомогою напівпровідникового триода, який працює у ключовому режимі і керований мультівібратором. Додатковий опір R_d забезпечує в разі вмикання кола режим заданої форми струму, що збігається у першому наближенні з формою прикладеної напруги, і аперіодичність перехідних напруг u_1 і u_2 на збуджувальній і вимірювальній обмотках перетворювача.

При індуктивному перетворювачі гілку з операторним опором $Z_n(p)$, підімкнену паралельно до збуджувальної обмотки перетворювача з активним опором R_1 , доцільно реалізувати ємнісним елементом. Тоді операторний опір $Z_n(p) = 1/pC$. В разі відімкнення кола від джерела живлення в контурі зі збуджувальною обмоткою перетворювача можна одержати перехідний процес у формі власних загасаючих коливань.

У початковий момент власних загасаючих коливань струм у збуджувальній обмотці дорівнює усталеному струму в цій обмотці в разі вмикання кола, тобто на першому етапі комбінованого перехідного процесу. Тоді за одиничного стрибка прикладеної напруги $i_1(0) = 1/(R_d + R_1)$ напруга на конденсаторі $u_1(0) = R_1/(R_d + R_1)$. У цьому випадку запас енергії магнітного поля перетворювача $W_m = L_{1к} i_1^2(0)/2$, а електричного поля конденсатора C_1 – $W_e = C_1 u_1^2(0)/2$. Звичайно $W_m \gg W_e$, тому після вимикання вимірювального кола протягом приблизно першої чверті періоду власних загасаючих коливань відбувається подальше зарядження конденсатора до напруги

$$u_{1m} \approx \sqrt{2(W_m + W_e)/C_1} = \sqrt{u_1^2(0) + L_{1к} i_1^2(0)/C_1} \approx i_1(0) \sqrt{L_{1к}/C_1}.$$

Після цього починається зворотний перехід енергії з конденсатора у перетворювач і подальше чергування напрямку перетікання енергії. У цьому разі енергія поступово розсіюється у перетворювачі й об'єкті контролю, перетворюючись у тепло.

Отже, за сталих параметрів додаткових елементів первинного вимірювального кола і достатньо високої частоти власних загасаючих коливань максимальне значення напруги першої півхвилі залежить від повної (основної і

внесеної) індуктивності $L_{1к} = L_{10} + L_{1ек}$ у початковий момент часу. Ця напруга визначає головню лише магнітну проникність об'єкта контролю і проміжку між ним та перетворювачем, вона мало чутлива до електричної провідності об'єкта контролю.

Вимірювальну обмотку перетворювача з активним опором R_2 доцільно навантажити на достатньо великий активний опір, що практично унеможливило її розмагнічувальну дію на збуджувальну обмотку і забезпечує необхідну чутливість до магнітної проникності і проміжку внесеної перехідної напруги на цій обмотці у початковий момент власних загасаючих коливань.

При $Z_n = R_n$ і $Z_{2n} = R_{2n}$ перехідний процес у разі вмикання первинного вимірювального кола (див. рисунок) є аперіодичним, як і у випадку його вмикання.

Під час розробки і дослідження засобів неруйнівного контролю матеріалів і виробів імпульсним вихрострумевим методом треба розраховувати перехідні величини напруг і струмів збуджувальної та вимірювальної обмоток первинного перетворювача, а також їхні чутливості до параметрів контролю. Дослідження впливу геометричних розмірів перетворювача й об'єкта контролю, а також фізичних властивостей об'єкта на характер зміни перехідних величин і їхніх чутливостей та виявлення загальних закономірностей контролю з виділенням головних і придушенням чинників, які заважають, зводиться до сумісного розрахунку магнітного поля перетворювача з об'єктом контролю й аналізу перехідного процесу в первинному вимірювальному колі, що охоплює цей перетворювач, тобто до сумісного розв'язування польової і колової задачі. Через складність такого типу задач розв'язки мають форму перетворень за Лапласом. Тоді до оригіналу можна перейти в числовій формі відомими методами [1, 2] або інтерполяційним методом послідовних наближень, запропонованим у [3].

Треба мати на увазі, що початкове і кінцеве значення перехідної величини, а також інтеграл від неї за проміжок часу від нуля до безкінечності (у разі їх існування) визначають безпосередньо з перетворення цієї величини, не вдаючись до його обернення в оригінал, що детально розглянуто в [3].

З рисунка на підставі законів Ома і Кірхгофа в операторній формі в разі вмикання первинного вимірювального кола з нульовими початковими умовами під напругу $U(p)$ для головних перетворених величин одержимо

$$\begin{aligned}
 I_n(p) &= \frac{U(p)[Z_1(p)Z_{2n}(p) - p^2 M^2(p)]}{[R_0 + Z_n(p)][Z_1(p)Z_{2n}(p) - p^2 M^2(p)] + R_0 Z_n(p)Z_{2n}(p)}; \\
 I_1(p) &= \frac{U(p)Z_n(p)Z_{2n}(p)}{[R_0 + Z_n(p)][Z_1(p)Z_{2n}(p) - p^2 M^2(p)] + R_0 Z_n(p)Z_{2n}(p)}; \\
 I_2(p) &= \frac{pU(p)Z_n(p)M(p)}{[R_0 + Z_n(p)][Z_1(p)Z_{2n}(p) - p^2 M^2(p)] + R_0 Z_n(p)Z_{2n}(p)}; \\
 U_1(p) &= I_1(p)Z_1(p); \quad U_2(p) = I_2(p)Z_n(p),
 \end{aligned} \tag{1}$$

де $Z_1(p) = R_1 + pL_1(p)$; $Z_2(p) = R_2 + pL_2(p)$; $L_1(p) = L_{10} + L_{1\epsilon}(p)$;
 $L_2(p) = L_{20} + L_{2\epsilon}(p)$; $Z_{2n}(p) = Z_2(p) + Z_n(p)$; $M(p) = M_0 + M_\epsilon(p)$.

У випадку вимкнення первинного вимірювального кола (див. рисунок) від джерела живлення для головних перетворених величин отримаємо:

$$I_1(p) = \frac{Z_{2n}(p)U_{10}(p) - pM(p)U_{20}(p)}{Z_{1n}(p)Z_{2n}(p) - p^2M^2(p)}; \quad I_2(p) = \frac{Z_{1n}(p)U_{20}(p) - pM(p)U_{10}(p)}{Z_{1n}(p)Z_{2n}(p) - p^2M^2(p)};$$

$$U_1(p) = -I_1(p)Z_n(p) + u_1(0)/p; \quad U_2(p) = I_2(p)Z_n(p) + u_2(0)/p, \quad (2)$$

де $Z_{1n}(p) = Z_1(p) + Z_n(p)$; $U_{10}(p) = u_1(0)/p + L_{1\kappa}i_1(0) + M_\kappa i_2(0)$;

$U_{20}(p) = u_2(0)/p + L_{2\kappa}i_2(0) + M_\kappa i_1(0)$; $u_1(0)$ і $u_2(0)$ – напруги на конденсаторі, відповідно, в колі збуджувальної і вимірювальної обмоток перетворювача у момент відмикання джерела живлення; $i_1(0)$ і $i_2(0)$ – струми у збуджувальній і вимірювальній обмотках у момент вимикання.

Останні величини мають такі значення. Для $Z_n = 1/pC_1$; $Z_n = R_n$ і вимиканні кола від джерела одиничної постійної напруги $u_1(0) = R_1/(R_\delta + R_1)$; $i_1(0) = 1/(R_\delta + R_1)$; $u_2(0) = 0$; $i_2(0) = 0$. Для $Z_n = R_n$; $Z_n = R_n$ і попередній умові комутації $u_1(0) = 0$; $i_1(0) = R_n/(R_\delta R_n + R_\delta R_1 + R_n R_1)$; $u_2(0) = 0$; $i_2(0) = 0$.

Із (1) і (2) одержимо вирази для внесеної площі перехідної напруги на збуджувальній ($\Psi'_{u1\epsilon}$) і вимірювальній ($\Psi'_{u2\epsilon}$) обмотках у первинному вимірювальному колі з постійною одиничною напругою джерела живлення, $Z_n = 1/pC_1$ і $Z_n = R_n$:

у разі вмикання кола $\Psi'_{u1\epsilon} = \frac{R_\delta L_{1\epsilon\kappa}}{(R_\delta + R_1)^2}$; $\Psi'_{u2\epsilon} = -\frac{R_n M_{\epsilon\kappa}}{(R_\delta + R_1)(R_n + R_2)}$;

у разі вимикання кола $\Psi'_{u1\epsilon} = -\frac{L_{1\epsilon\kappa}}{R_\delta + R_1}$; $\Psi'_{u2\epsilon} = \frac{R_n M_{\epsilon\kappa}}{(R_\delta + R_1)(R_n + R_2)}$;

за комбінованої комутації (вмикання і вимикання кола) $\Psi'_{u1\epsilon} = -\frac{R_1 L_{1\epsilon\kappa}}{(R_\delta + R_1)^2}$;

$\Psi'_{u2\epsilon} = 0$.

В останніх виразах $L_{1\epsilon\kappa}$ і $M_{\epsilon\kappa}$ – кінцеві значення власної і взаємної внесених індуктивностей у разі вмикання кола.

У випадку $Z_n = R_n$ і $Z_n = R_n$ та за інших попередніх умов одержимо:

у разі вмикання кола $\Psi'_{u1\varepsilon} = \frac{R_\partial R_n^2 L_{\text{ек}}}{(R_\partial R_n + R_\partial R_1 + R_n R_1)^2};$

$$\Psi'_{u2\varepsilon} = -\frac{R_n R_n M_{\text{ек}}}{(R_n + R_2)(R_\partial R_n + R_\partial R_1 + R_n R_1)};$$

у разі вимикання кола $\Psi'_{u1\varepsilon} = \frac{R_n^2 L_{\text{ек}}}{(R_n + R_1)(R_\partial R_n + R_\partial R_1 + R_n R_1)}; \Psi'_{u2\varepsilon} = \frac{R_n R_n M_{\text{ек}}}{(R_n + R_2)(R_\partial R_n + R_\partial R_1 + R_n R_1)};$

за комбінованої комутації $\Psi'_{u1\varepsilon} = -\frac{R_1 R_n^3 L_{\text{ек}}}{(R_n + R_1)(R_\partial R_n + R_\partial R_1 + R_n R_1)^2}; \Psi'_{u2\varepsilon} = 0.$

Отже, повна внесена площа перехідної напруги визначена кінцевим значенням власної або взаємної внесеної індуктивності, яке залежить від магнітної проникності феромагнітного об'єкта контролю і проміжку між ним та перетворювачем.

1. Крылов В.И., Скобля Н.С. Методы приближенного преобразования Фурье и обращения преобразования Лапласа. М.: Наука, 1974. 224 с.
2. Математическое обеспечение ЕС ЭВМ / Отв. за выпуск Н.С. Жаврид, Л.В. Матусевич, Л.И. Матюшенкова. Минск: Институт математики АН БССР. 1976. Вып. 11. 172 с.
3. Яцун М.А. Разработка теории экранированных вихрековых преобразователей и их применение для контроля труб нефтяного сортамента: Дисс.... д-ра техн. наук. Ивано-Франковск, 1983. 374 с.

SELECTION OF INFORMATION OF EDDY CURRENT TRANSDUCER ON ELEMENTS OF PRIMARY MEASURING CIRCLE AT TRANSIENT REGIME

M. Yatsun, A. Yatsun

*National University "Lviv Polytechnic"
Bandera Str., 12, Lviv 79013, Ukraine
Lvov institute of fire safety
Kleparivska Str., 35, Lviv 79000, Ukraine*

Grounded form of voltage of feed and current in the coil of excitation of eddy current transducer, this estimation of character commutations and certain basic quantities of primary measuring circuit for the selection of useful information on a measuring coil about the object of control.

Key words: eddy current transducer, coil of excitation, measuring coil, primary measuring circuit, informative quantities.

Стаття надійшла до редколегії 20.06.2005

Прийнята до друку 01.09.2005