

МОЩНОСТЬ ПОТРЕБЛЕНИЯ И ФАЗОВЫЙ СДВИГ МЕЖДУ НАПРЯЖЕНИЕМ И ТОКОМ НАКЛАДНОГО КОЛЬЦЕВОГО ЭКРАНИРОВАННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАД ПРОВОДЯЩЕЙ ПЛАСТИНОЙ

Андрей Яцун

Львовский национальный аграрный университет

г. Дубляны, ул. Владимира Великого 1

Andriy Yatsun

Lviv National Agrarian University

Аннотация: Исследованы чувствительности потребляемой мощности и угла сдвига фаз между напряжением и током в начальный момент времени накладного экранированного кольцевого первичного преобразователя прямоугольного поперечного сечения над проводящей пластиной как объектом контроля к ее магнитной проницаемости и электрической проводимости после выключения первичной измерительной цепи с конденсатором от источника постоянного напряжения

Ключевые слова: неразрушающий контроль, накладной преобразователь, затухающие колебания, переходное напряжение, преобразование Лапласа, измерительная цепь, потребляемая мощность, сдвиг фаз.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Исследование и разработка средств неразрушающего электромагнитного контроля геометрических размеров и физико-механических параметров электропроводных материалов, деталей и изделий включают вопрос чувствительности информативных величин в соответствующие размеры и параметры.

В случае первичного преобразователя параметрического типа для контроля материалов и изделий импульсным вихретоковым методом информативными величинами могут служить потребляемая мощность и угол сдвига фаз между напряжением и током после выключения первичной измерительной цепи с конденсатором (рис. 1) от источника постоянного напряжения [2], когда возникают в цепи собственные затухающие колебания, которые периодически повторяются при питании цепи преобразователя импульсами прямоугольной формы.

Эти вопросы (особенности) и рассматриваются в данной статье.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

В литературе [1] обоснована форма напряжения питания и тока в обмотке возбуждения вихретокового преобразователя, дана оценка характера коммутации и определены основные величины первичной измерительной цепи для выделения полезной информации об объекте контроля на обмотках возбуждения и измерения. В литературе [2 и 3] получено выражение в операторной форме для напряжения на обмотке возбуждения накладного экранированного кольцевого первичного преобразователя прямоугольного поперечного перереза (датчика) над проводящей пластиной (объектом контроля) после выключения первичной измерительной цепи с конденсатором от источника постоянного напряжения и исследованные зависимости начальной величины и амплитуды, частоты и коэффициента затухания переходного напряжения датчика от относительной магнитной проницаемости и удельной электрической проводимости.

ПОСТАНОВКА ЗАДАНИЯ

Целью исследования является исследование чувствительности потребляемой мощности и угла сдвига фаз между напряжением и током в начальный момент времени накладного экранированного кольцевого первичного преобразователя прямоугольного поперечного сечения над проводящей пластиной как объектом контроля к ее магнитной проницаемости и электрической проводимости после выключения первичной измерительной цепи с конденсатором от источника постоянного напряжения (рис. 1).

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Из [2] для напряжения в форме преобра-

МОЩНОСТЬ ПОТРЕБЛЕНИЯ И ФАЗОВЫЙ СДВИГ МЕЖДУ НАПРЯЖЕНИЕМ И ТОКОМ НАКЛАДНОГО КОЛЬЦЕВОГО ЭКРАНИРОВАННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАД ПРОВОДЯЩЕЙ ПЛАСТИНОЙ

зования за Лапласом (в операторной форме) на обмотке возбуждения накладного экранированного кольцевого первичного преобразователя прямоугольного поперечного пере-реза над проводящей пластиной (рис. 2) и тока в этой обмотке после выключения первичной измерительной цепи с конденсатором от источника единичного постоянного напряжения получим выражения:

$$U_1 = -I_1 Z_p + \frac{U_{1p}}{p}; \quad I_1 = \frac{U_{10}}{Z_{1p}}, \quad (1)$$

где: $Z_p = \frac{1}{pC_1}; U_{1p} = \frac{R_1}{R_d + R_1};$

$$Z_{1p} = Z_1 + Z_p; \quad Z_1 = R_1 + pL_1;$$

$$L_1 = L_{10} + L_{1b}; \quad S_1 = \int_{r_1}^{r_2} J_1(p_1 r) r dr;$$

$$U_{10} = U_{1p}/p + L_{1k} I_{1p}; \quad U_{1p} = R_1/(R_d + R_1);$$

$$L_{1k} = L_1|_{p=0}; \quad L_1 = L_{10} + L_{1b};$$

$$I_{1p} = 1/(R_d + R_1);$$

$$L_{10} = \frac{4\pi\mu_0 W_1^2}{a_1^2 b_1^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{a_1^2 S_1^2}{\lambda_i^2 J_0^2(\lambda_i)} \times \left[b_1 + \frac{Y_{01} ch(p_1 z_1) - Y_{91} ch[p_1(H - z_2)]}{p_1 sh(p_1 H)} \right];$$

$$L_{1b} = \frac{4\pi\mu_0 W_1^2 R}{a_1^2 b_1^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{S_1^2 Y_{01}^2 Y_1}{\lambda_i^3 J_0^2(\lambda_i) Y sh(p_1 H)};$$

$$Y = th(p_2 d_2) [p_2^2 sh(p_1 d_1) sh(p_1 d_3) + \mu_r^2 p_1^2 \times ch(p_1 d_1) ch(p_1 d_3)] + \mu_r p_1 p_2 sh[p_1(d_1 + d_3)];$$

$$Y_1 = th(p_2 d_2) [p_2^2 sh[p_1(d_2 + d_3)] \times sh(p_1 d_3) - \mu_r^2 p_1^2 ch(p_1 d_3) \times ch[p_1(d_2 + d_3)]] + \mu_r p_1 p_2 sh(p_1 d_2)$$

$$Y_{01} = ch[p_1(H - z_2)] - ch[p_1(H - z_1)];$$

$$Y_{91} = ch(p_1 z_2) - ch(p_1 z_1); \quad \mu = \mu_r \mu_0;$$

$$p_1 = \lambda_i / R; \quad p_2 = \sqrt{p_1^2 + p\mu\gamma};$$

где: J_0 – функция Бесселя первого рода нулевого порядка; J_1 – функция Бесселя первого рода первого порядка; λ_i – корни уравнения

$$J_1(\lambda) = 0.$$

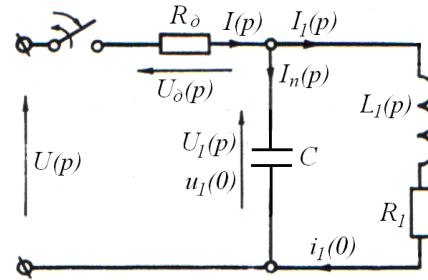


Рис.1. Принципиальная схема первичного измерительной цепи вихретокового преобразователя

Fig. 1. Circuit diagram of primary measuring chain of eddy current transducer

На рис. 2 и в поданных выражениях приняты следующие обозначения: μ_0 – магнитная постоянная; μ_r и γ – относительная магнитная проницаемость и удельная электрическая проводимость пластины толщиной d_2 ; d_1 и d_3 – толщина слоя воздуха над и под пластиной; r_1 и r_2 – внутренний и внешний радиусы обмотки возбуждения; a_1 и b_1 – ширина и высота обмотки возбуждения; z_1 и z_2 – нижняя и верхняя ординаты обмотки возбуждения; W_1 – количество витков обмотки возбуждения; R и H – радиус и высота экрана.

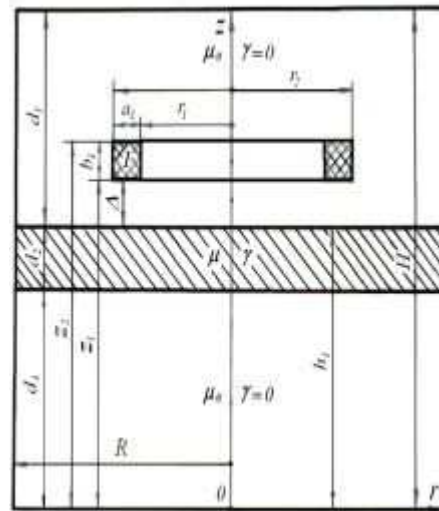


Рис. 2. Расчетная модель накладного экранированного кольцевого первичного датчика над электропроводной пластиной

Fig. 2. Calculating model of plated screen of primary ring transducer over an conductive plate

Приближение изображений за Лапласом (1) выражениями:

$$U_1(p) = \frac{C_u(p + q_u)}{(p + \delta)^2 + \omega^2}, \quad (2)$$

$$I_1(p) = \frac{C_i(p + q_i)}{(p + \delta)^2 + \omega^2}$$

и переход от них к переходным величинам (затухающим колебаниям) напряжения и тока в обмотке возбуждения:

$$u_1(t) = U_{1m} e^{-\delta t} \sin(\omega t + \psi_u), \quad (3)$$

$$i_1(t) = I_{1m} e^{-\delta t} \sin(\omega t + \psi_i)$$

выполнены методом, предложенным в литературе [4], где:

$$U_{1m} = C_u \sqrt{(q_u - \delta)^2 + \omega^2} / \omega;$$

$$\psi_u = \text{ath}[\omega / (q_u - \delta)];$$

$$I_{1m} = C_i \sqrt{(q_i - \delta)^2 + \omega^2} / \omega;$$

$$\psi_i = \text{ath}[\omega / (q_i - \delta)].$$

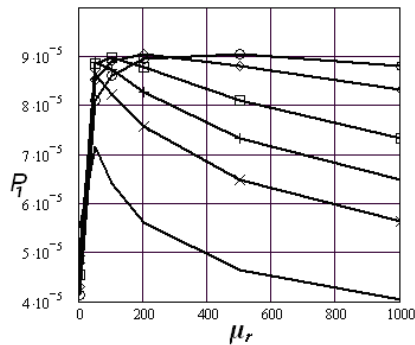


Рис. 3. Зависимость потребляемой мощности датчика в начальный момент времени от относительной магнитной проницаемости при разных значениях удельной электрической проводимости γ (МСм/м):

Fig. 3. Dependence of power consumption of the transducer during the initial moment of time from relative magnetic permeability at different specific electric conductivity values γ (MSm/m):

— 10^5 ; $\times\times\times$ 10^6 ; $+++$ $5 \cdot 10^6$;
 $\square\square\square$ 10^7 ; \diamond $2 \cdot 10^7$; $\circ\circ\circ$ 10^8

На рис. 3-6 приведены результаты расчетов в программной среде MathCAD зависимостей потребляемой мощности $P_1 = U_{1m} I_{1m} \cos(\psi_u - \psi_i) / 2$ и угла сдвига фаз (в радианах) между напряжением и током $\varphi = (\psi_u - \psi_i)$ в начальный момент времени накладного экранированного кольцевого первичного преобразователя прямоугольного поперечного сечения над проводящей пластиной от ее магнитной

проницаемости и электрической проводимости.

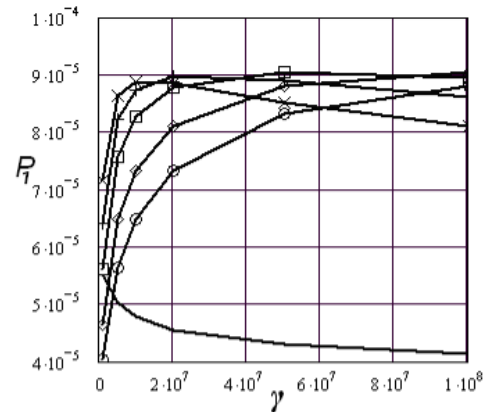


Рис. 4. Зависимость потребляемой мощности датчика в начальный момент времени от удельной электрической проводимости при разных значениях относительной магнитной проницаемости μ_r :

Fig. 4. Dependence of power consumption of the transducer during the initial moment of time from specific electric conductivity at different relative magnetic permeability values μ_r :

— 1 ; $\times\times\times$ 5 ; $+++$ 20 ;
 $\square\square\square$ 50 ; \diamond 100 ; $\circ\circ\circ$ 1000

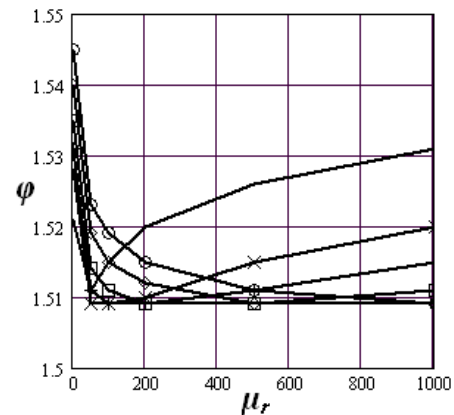


Рис. 5. Зависимость угла сдвига фаз (в радианах) между напряжением и током датчика в начальный момент времени от относительной магнитной проницаемости при разных значениях удельной электрической проводимости γ (МСм/м):

Fig. 5. Dependence of a phase shift (in radians) between voltage and a current the transducer during the initial moment of time from relative magnetic permeability at different specific electric conductivity values γ (MSm/m):

— 10^5 ; $\times\times\times$ 10^6 ; $+++$ $5 \cdot 10^6$;
 $\square\square\square$ 10^7 ; \diamond $2 \cdot 10^7$; $\circ\circ\circ$ 10^8

МОЩНОСТЬ ПОТРЕБЛЕНИЯ И ФАЗОВЫЙ СДВИГ МЕЖДУ НАПРЯЖЕНИЕМ И ТОКОМ НАКЛАДНОГО КОЛЬЦЕВОГО ЭКРАНИРОВАННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАД ПРОВОДЯЩЕЙ ПЛАСТИНОЙ

Эти расчеты выполнены для следующих значений параметров и геометрических размеров (размеры поданы в м): $W_1 = 1000$; $R = 0,1$; $H = 0,1$; $d_1 = 0,05$; $d_2 = d = 0,01$; $d_3 = 0,04$; $r_1 = 0,015$; $r_2 = 0,025$; $a_1 = b_1 = 0,01$; $z_1 = 0,055$; $z_2 = 0,065$. Параметры элементов первичной измерительной цепи (рис. 1): $R_1 = 100$ Ом; $R_d = 1000$ Ом; $C_1 = 10^{-8}$ Ф. Принято также, что измеримый круг питается периодическими импульсами напряжения прямоугольной формы величиной в 1 В.

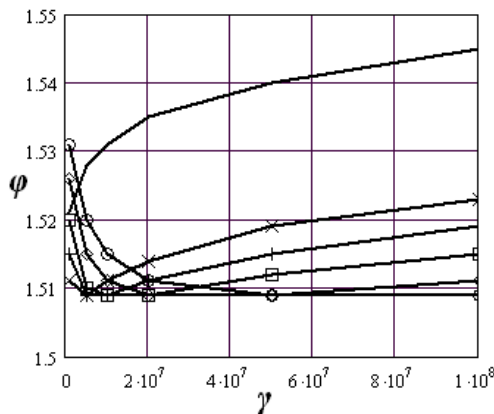


Рис. 6. Зависимость угла сдвига фаз (в радианах) между напряжением и током датчика в начальный момент времени от удельной электрической проводимости при разных значениях относительной магнитной проницаемости μ_r :

Fig. 6. Dependence of a phase shift (in radians) between voltage and a current the transducer during the initial moment of time from specific electric conductivity at different relative magnetic permeability values μ_r :

— — — — — 1; ××××× 5; +++ 20;
 ■■■ 50; —●— 100; ○○○ 1000

ВЫВОДЫ

Из результатов расчетов, приведенных на рис. 3 и 4, можно сделать вывод, что зависимости потребляемой мощности и угла сдвига фаз (в радианах) между напряжением и током датчика в начальный момент времени от относительной магнитной проницаемости и удельной электрической проводимости не являются однозначными и монотонными на всем приведенном диапазоне изменения параметров (μ_r и γ) и имеют перегибы при определенных значениях этих па-

раметров. Поэтому потребляемая мощность может служить информативным параметром относительно магнитной проницаемости только в диапазоне относительно больших значений ($\mu_r \geq 200$) и средних значений электрической проводимости ($\gamma = 10^5 \div 10^7$ МСм/м) объекта контроля, причем с увеличением магнитной проницаемости мощность уменьшается, а с увеличением электрической проводимости – возрастает.

Зависимости угла сдвига фаз между напряжением и током датчика в начальный момент времени от относительной магнитной проницаемости и удельной электрической проводимости изменяются в узких пределах и являются однозначными и монотонными в следующих пределах: $\mu_r \geq 400$ и $\gamma \leq 5 \times 10^6$; $\mu_r \leq 50$ и $\gamma \geq 4 \times 10^7$ МСм/м, что видно из рис. 5 и 6.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Yatsun A. 2005. Vydilennya informatsiyi vykhrostrumovoho peretvoryuvacha na elementakh pervynnoho vymiryuval'noho kola u perekhidnomu rezhymi / Teoretychna elektrotehnika. Vyp. 58. – 183-188.
2. Yatsun A. M., Yatsun M. A. 2008. Chutlyvist' kharakterystyk vlasnykh zahasayuchykh kolyvan' perekhidnoyi napruhy nakladnoho vykhrostrumovoho peretvoryuvacha nad ob'yektom kontrolyu u formi plastyny do yiyi mahnitnoyi pronyknosti i elektrychnoyi providnosti // Visnyk NU «L'vivs'ka politehnika». № 615. – 176-181.
3. Yatsun A.M. 2008. Chutlyvist' informatyvnykh velychyn do fizychnykh parametriv ob'yekta pry kontroli impul'snym vykhrostrumovym metodom / Zbirnyk tez dopovidey 5-yi Mizhnarodnoyi naukovotekhnichnoyi konferentsiyi i vystavky "Suchasni pryklady, materialy i tekhnolohiyi dlya neruynivnoho kontrolyu i tekhnichnoyi diahnostryky mashynobudivnoho i naftohazopromyslovoho obladdannya", – Ivano-Frankivs'k.: Vydavnytstvo Ivano-Frankivs'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu, – 133-135.
4. Yatsun A. M. 2010. Nablyzhena chyslova realizatsiya zvorotnoho peretvorennya Laplasa zahasayuchykh kolyvan' u razi neruynivnoho kontrolyu impul'snym vykhrostrumovym

- metodom / Visnyk NU «L'viv's'ka politehnika». № 671. – 140–146.
5. Yatsun A. M. 2010. Nablyzhena chyslova realizatsiya zvorotnoho peretvorennya Laplasya za hasayuchykh kolyvan' u razi neruynivnoho kontrolyu impul'snym vykhrostrumovym metodom / VisnykNU «L'viv's'ka politehnika». № 671. – 140-146.
6. JacunAndrij. 1996. The alternating electric field of disk form capacity data unit with a washer above the imperfect medium / Mychajło Jacun, Mycoła Hirnyk, Andrij Jacun. // XIX SPETO'96, Vol. 1.2 – Gliwice.: USTRON' – 225-227.
7. Jacun Andrij, Jacun Mychajło, Skokljuk Mycoła. 1997. The magnetic field of screen cylindrical winding at the ferromagnetic core // XX SPETO'97, Vol. 1.2, – Gliwice.: USTRON' – 155-158.
8. Yatsun Andriy, Yatsun Mychaylo 1998. The current distribution at the squirrel-cage induction motor rotor winding by the local defects determination electromagnetic method // XXI SPETO'98, – Gliwice.: USTRON', – 409-410.
9. Andriy Yatsun. 1998. The own DW mode of primary measuring circuit with the screen waybill variable-capacitance transducer // XXI SPETO'98, – Gliwice.: USTRON', – 411-412.
10. Yatsun A.M. 2011. Pulsatsiyi strumiv v obmottsi statora asinhronnogo dviguna za nayavnosti defektiv u strizhnyah klitki rotora // MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture – Lublin, Vol. 13D. 203-209.
11. Goshko M.O., Drobot I. M. 2011. Shlyahi zmeshennya energospozhivannya elektroprivodiv na prikladi tehnologichnogo protsesu kormopodribnennya // MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture – Lublin, Vol. 13D. 50-56.
12. Paranyuk V.O., Kovalishin S.Y. 2011. Energooshchadne separuvannya nasinnya kulturnih roslin // MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture – Lublin, Vol. 13D. 95-103.
13. Sirotiyuk V.M. 2011. Eksperimentalne doslidzhennya rezhimiv roboti energooshchadnogo vibratsiynogo dozatora sipuchih kormiv / MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture – Lublin, Vol. 13D. 62-68.
14. Sirotiyuk V. M. 2011. Osoblivosti modelyuvannya elektromechanichnih sistem vitroustanovok maloyi potuzhnosti / MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture – Lublin, Vol. 13D. 251-257.
15. Sirotiyuk V. M. 2011. Uzgodzhennya parametriv akumul'yatornoyi batareyi z parametrami elektrichnogo generatora VEU v umovah minlivosti vitrovogo potoku / Galchak V.P., Sirotiyuk S.V. Boyarchuk V.M., Vorobkevich V.Yu. // MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture – Lublin, Vol. 13D. 217-222.
16. Paranyuk V. O. 2012. Vidtvorennya produktivnosti agrolandshaftiv elektromagnitnimi diyami na nasinnya kulturnih roslin (deklaratsiya naukovogo vidkritt'ya). / MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture – Lublin, Vol. 14. No. 4. 3-10.
17. Sirotiyuk V. M. 2012. Teoretichne viznachennya podachi vibratsiynogo energooshchadnogo dozatora sipuchih kormiv. / MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture – Lublin, Vol. 14 No. 4. 106-109.
18. Sirotiyuk V. M. 2012. Obgruntuvannya strukturi peredavalnih pristroyiv vitroelektrichnih ustanovok silskogospodarskogo pryznachennya / MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture – Lublin, Vol. 14 No. 4. 75-83.
19. Yakimets V. T. 2012. Distantnyi zahist mashin zminnogo strumu. / MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture – Lublin, Vol. 14 No. 4. 160-164.
20. Yatsun M. A. 2004. Elektrichni mashini: navch. posibnik / 2-e vid., stereot. – L'viv : Vidavnistvo Nacional'nogo universitetu «L'viv's'ka politehnika» – 440. – ISBN 966-553-403-3.

POWER OF CONSUMPTION AND PHASE DISPLACEMENT BETWEEN VOLTAGE AND A CURRENT OF THE COVERING RING CAPACITOR TRANSDUCER OVER A CONDUCTING PLATE

Summary: The sensitivities of power consumption and phase displacement between voltage and current in initial time of the covering ring capacitor transducer of rectangular cross-section above conducting plate as testing object

МОЩНОСТЬ ПОТРЕБЛЕНИЯ И ФАЗОВЫЙ СДВИГ МЕЖДУ НАПРЯЖЕНИЕМ И ТОКОМ НА-
КЛАДНОГО КОЛЬЦЕВОГО ЭКРАНИРОВАННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАД ПРОВОДЯЩЕЙ
ПЛАСТИНОЙ

to its permeance and electric conductivity after the primary measuring chain with a condenser is disconnect of source of permanent tension has been explored

Key words: nondestructive testing, covering transducer, dying oscillation, voltage transient, Laplace transformation, measuring chain, power of consumption, phase displacement