

УДК 620.179.14

М. Л. АНТОНОВ, В. Ф. БЕЗОТОСНИЙ, В. В. КОЗЛОВ, О. В. НАБОКОВА**ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНІТОПРУЖНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ**

У роботі показано, що тривалість перехідних процесів у магнітопружних перетворювачах може бути зменшена до значень, які не перевищують тривалості розповсюдження механічних напруг у об'єкті дослідження, і це може бути досягнуто правильним вибором кількості витків і частоти намагнічувального струму. Це дозволяє використовувати магнітопружні перетворювачі для контролю високочастотних динамічних процесів, а вибір раціональних параметрів МП дозволяє зменшити похибку вимірювань. Для збереження чутливості МП слід підвищувати частоту намагнічувального струму, а при розрахунках слід враховувати поверхневий ефект, що можливо використанням фіктивної магнітної проникності. Додатковими дослідженнями встановлено, що при проектуванні МП потрібне знання припустимої межі міцності матеріалу магнітопроводу, облік анізотропії матеріалу, початкової магнітної проникності та магнітострикції. Прикладом практичного використання наведених досліджень є розроблена система, яка вирішує завдання неруйнуючого експрес контролю феромагнітних матеріалів і конструкцій по визначенню механічних напруг, виникнення яких обумовлено дією експлуатаційних і технологічних факторів.

Ключові слова: магнітопружний перетворювач, перехідний процес, механічні напруги, постійна часу, динамічна характеристика.

Вступ. Магнітопружні перетворювачі (МП) у налазах зворотного зв'язку автоматизованих пристроїв є динамічною системою, що перетворює зусилля в електричний сигнал.

Постановка проблеми. В електричному колі намагнічування магнітопроводу міститься реактивний опір індуктивного характеру, що приводить до виникнення перехідних процесів при зміні факторів, що впливають на нього, у тому числі й при прикладенні до МП зусилля.

Метою даної роботи є аналіз конструкцій магнітопружних перетворювачів та розробка рекомендацій стосовно зменшення постійної часу перехідних процесів.

Динамічні процеси, що відбуваються в перетворювачі, доцільно розглядати відповідно до прийнятої авторами структурною схемою (механічна і електромагнітна ланки) [1].

Час протікання перехідних процесів при ударних східчастих навантаженнях у механічній ланці МП може бути оцінене за періодом власних коливань магнітопроводу [2]

$$T_m = \frac{h}{v_{зв}} = h \sqrt{\frac{\rho_{пл}}{E_p}}, \quad (1)$$

де h – висота магнітопроводу; $v_{зв}$ – швидкість звуку в магнітопроводі; $\rho_{пл}$ – щільність матеріалу магнітопроводу; E_p – модуль пружності в напрямку дії сили.

Тому що швидкість звуку у феромагнітних магнітопроводах датчиків становить близько 5000 м/с [3], то при висоті магнітопроводу (звичайно 5–10 см), застосовані методи класичної механіки. Час сприйняття магнітопроводом миттєвої зміни навантаження має порядок 10^{-5} – 10^{-4} секунди.

Як показано в [3], швидкість зміни намагніченості феромагнетику на кілька порядків вище швидкості розповсюдження механічних напруг, тобто реально не виявляє впливу на швидкодію розглянутих датчиків.

У електромагнітній ланці відбувається перетворення магнітного стану магнітопроводу МП в електричну величину $E_{вих}$ за допомогою вимірювальної обмотки. Намагнічувача та вимірювальна обмотки яв-

ляють собою опори активно-індуктивного характеру й істотно впливають на швидкодію МП. Перетворювач звичайно працює в режимі близькому до режиму холостого ходу. Тоді, враховуючи [4], запишемо вираз в операторній формі для передаточної функції за зусиллям

$$W_p(p) = \frac{E_{вих}(p)}{F(p)} = \frac{kU_n f_n}{1 + pT}, \quad (2)$$

де k – коефіцієнт формуючих факторів МП [5]; U_n – напруга намагнічувальної обмотки; f_n – частота намагнічувального струму; T – постійна часу.

Тому що $T = \frac{L_n}{R_n}$, а $L_n = \frac{w_n^2}{R_m}$, то одержимо

$$T = \frac{w_n^2}{R_m} \cdot \frac{S_m}{l_m} \mu_\sigma, \quad (3)$$

де L_n й R_n – індуктивність і активний опір намагнічувальної обмотки; S_m – площа ретини магнітопроводу; l – довжина магнітопроводу вздовж середньої лінії; μ_σ – магнітна проникність матеріалу магнітопроводу при механічних напругах σ у них [6]

$$\mu_\sigma = \frac{\mu_n}{1 - \frac{1}{\pi} \mu_n \lambda_0 \sigma}, \quad (4)$$

де μ_n – початкова магнітна проникність матеріалу магнітопроводу; λ_0 – початкова магнітострикція.

Урахуємо, що

$$\mu_n = \frac{1}{1 + \frac{a_2}{a_1}} \cdot \mu_{n[100]}, \quad (5)$$

де a_1 – коефіцієнт лінійних розмірів; a_2 – коефіцієнт анізотропії; $\mu_{n[100]}$ – початкова магнітна проникність у напрямку кристалографічної осі легкого намагнічування [100].

Тоді запишемо

$$T = \frac{w_n^2}{R_m} \cdot \frac{S_m}{l_m} \cdot \frac{1}{1 + \frac{a_2}{a_1}} \cdot \frac{\mu_{n[100]}}{1 - \frac{1}{\pi} \mu_{n[100]} \lambda_0 \sigma}. \quad (6)$$

Як видно з даного виразу, для зменшення тривалості перехідного процесу, пов'язаного з індуктивністю намагнічувальної обмотки, слід зменшувати кіль-

кість витків w_n . Одночасно, для збереження чутливості МП, слід підвищувати частоту намагнічувачого струму, що відповідає реальному фізичному змісту.

При виборі раціональної частоти намагнічувачого струму, яка звичайно значно вище промислової, слід урахувати поверхневий ефект, що можливо шляхом використання фіктивної магнітної проникності [7]. Тоді одержимо

$$T = \frac{w_n^2}{R_m} \cdot \frac{S_m}{l_m} \cdot \frac{1}{1 + \frac{a_2}{a_1}} \cdot \frac{\sqrt{\mu_n}}{b\sqrt{2\pi f_n \gamma} - \frac{1}{\pi} \lambda_o \sigma_{\max} \sqrt{\mu_n}}, \quad (7)$$

де γ – електропровідність матеріалу магнітопроводу; b – товщина однієї пластини шихтованого магнітопроводу.

Комп'ютерний аналіз отриманого співвідношення для постійної часу МП показує, що шляхом правильного вибору кількості витків і частоти струму намагнічування, тривалість перехідних процесів у магнітопружних перетворювачах може бути зменшена до значень, що не перевищують тривалості розповсюдження механічних напруг у магнітопроводі. Таким чином, МП здатні контролювати динамічні процеси з частотами до 10 кГц і вище.

Розглянемо вплив підвищеної частоти намагнічувачого струму на вихідну напругу МП, магнітопружний гістерезис, лінійність вихідної характеристики, коливання вихідної напруги від девіації частоти. Аналіз виконаємо для Ф-подібного МП [8]. Цей перетворювач може бути використаний і в системах очування робототехнічних комплексів [9–12].

Значення ЕРС, що наводиться у вимірювальній обмотці МП пропорційна частоті намагнічувачого струму. Відхилення вихідної характеристики МП від теоретично лінійної пояснюється втратами в магнітопроводі й прийнятими раніше допущеннями. Для зменшення похибки вимірювань необхідно підтримувати постійною не тільки частоту, але й форму живлячої напруги.

Частота живлячої напруги значно впливає на значення ЕРС, що наводиться у вимірювальній обмотці МП. Залежність $E_{\text{вих}} = \varphi(f_n)$ при значеннях механічних напруг $\sigma = 1,2 \cdot 10^7$ Н/м² у елементі перетворювача, який деформується, приведена на рис. 1.

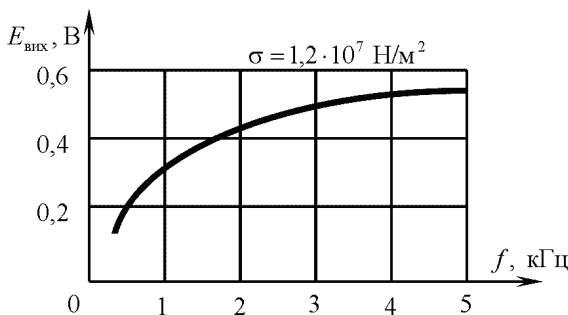


Рисунок 1 – Залежність вихідного сигналу МП від частоти при $\sigma = \text{const}$

Дослідження показали, що помітне збільшення вихідної напруги МП спостерігається при збільшенні частоти намагнічувачого струму порядку 2–3 кГц.

При подальшому збільшенні частоти зростання вихідної напруги відбувається менш інтенсивно. Слід зазначити, що девіація частоти $\Delta f_n = 1\%$ при частотах намагнічувачого струму 100 і 2000 Гц спричиняє до зміни вихідної напруги МП порядку 0,6 і 0,1% – відповідно. Підвищення частоти більш 3 кГц спричиняє також збільшення індуктивного опору обмоток.

Однією із задач, яку необхідно вирішувати для підвищення точності вимірювання зусиль МП, є задача зменшення магнітопружного гістерезису в матеріалі магнітопроводу. Найбільш ефективним методом зменшення втрат на гістерезис є підвищення частоти магнітного поля у феромагнітному матеріалі. Так при збільшенні частоти поля до 2 кГц спостерігалось систематичне зменшення магнітопружного гістерезису. Прийmemo площу петлі гістерезису при частоті 50 Гц за 100%. Відносні площі петлі гістерезису при підвищених частотах для електротехнічної сталі типу Е330 приведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Залежність відносної площі петлі гістерезису від частоти

Частота, Гц	50	600	1200	2000
Площа петлі гістерезису, %	100	51	30	13

Як видно з приведеної таблиці, магнітопружний гістерезис може бути значно зменшений за рахунок підвищення частоти магнітного поля. Збільшення частоти вище 2–3 кГц менше впливає на зменшення площі петлі гістерезису.

Частота намагнічувачого струму, впливає на лінійність вихідної характеристики МП, причому дослідження показали, що підвищення лінійності для базової конструкції МП і її модифікацій відбувається при підвищенні частоти лише до 2–2,5 кГц.

На рис. 2 показані експериментальні залежності вихідного сигналу МП від значення механічних напруг у чутливому елементі перетворювача при різних частотах намагнічувачого струму.

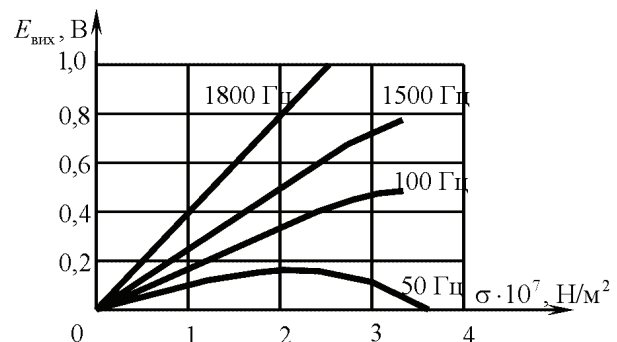


Рисунок 2 – Залежності вихідного сигналу МП від значення механічних напруг при різних частотах намагнічувачого струму

При випробуванні Ф-подібного перетворювача, магнітопровід якого був виготовлений електротехнічної сталі Е330 при товщині пластин 0,3 мм, була досягнута лінійність вихідної характеристики при $\sigma \leq 2 \cdot 10^7$ Н/м² порядку 0,1%. Частота намагнічувачого струму при цьому дорівнювала 1850 Гц.

Таким чином, підвищення частоти намагнічувального струму у МП є ефективним засобом підвищення лінійності їхніх вихідних характеристик.

Результати досліджень, які приведені в роботі [13], показали, що характер зміни магнітної проникності феромагнітних матеріалів при наявності в них механічних напруг, і як наслідок зміна вихідного сигналу МП, збігається з характером зміни амплітуди переважно першої гармоніки вихідного сигналу. Інакше кажучи, точність контролю зусиль магнітопружними перетворювачами залежить від гармонійного складу вихідного сигналу, і буде тем вище, чим менше амплітуда вищих гармонік. Ряд авторів, які рекомендують низькочастотне намагнічування магнітопроводів МП, застосовують спеціальні фільтри для придушення вищих гармонік. Однак такий підхід є складним і найчастіше малоефективним.

Для дослідження гармонійного складу вихідного сигналу Ф-подібного перетворювача був проведений експеримент, під час якого МП живився від джерела змінного струму із частотою від 50 до 4000 Гц і навантажувався зусиллями, які створювали в деформуемому датчику перетворювача механічні напруження до $4 \cdot 10^7$ Н/м². Сила намагнічувального струму дорівнювала 50 мА, що відповідає раціональній напруженості поля в матеріалі датчика перетворювача. Аналіз осцилограм дозволяє стверджувати, що застосування намагнічувального струму частотою менш 500 Гц при механічних напруженнях $\sigma < 2 \cdot 10^7$ Н/м² нераціонально через наявність у вихідному сигналі датчика вищих гармонік, що підвищує погрішність вимірювань.

Таким чином, область раціональних частот струму, що намагнічує, лежить у межах 500–2000 Гц. Конкретне значення частоти може бути обране виходячи з вимог, які пред'являються до точності вимірювань для конкретної модифікації МП на основі отриманих висновків.

Установлено, що раціональним значенням напруженості магнітного поля в матеріалі магнітопроводу МП, яке відповідає максимальній зміні магнітної проникності, є напруженість не більш 600–800 А/м (для електротехнічних сталей) [5]. Тому, для одержання максимальної магнітопружної чутливості МП необхідний вибір раціонального значення намагнічувального струму, відповідного до указаній напруженості поля.

Як відомо, значення магнітного потоку, яке створюється обмоткою, що намагнічує, дорівнює

$$\Phi = \frac{F_H}{R_M} = \frac{F_H \mu_\Phi S_M}{l_M} \quad (8)$$

З іншого боку

$$\Phi = H \mu_\Phi S_M \quad (9)$$

Враховуючи приведені співвідношення, запишемо вираз для раціонального значення намагнічувального струму

$$I_{\text{рац}} = \frac{H_{\text{рац}} l_M k}{w_H} \quad (10)$$

де $H_{\text{рац}}$ – раціональне значення напруженості магнітного поля; k – коефіцієнт анізотропії матеріалу магнітопроводу.

Значення магнітної індукції в пластинах, згідно [14]

$$B = \mu_a H_0 \frac{a}{b} \sqrt{\frac{\operatorname{ch} \frac{2b}{a} - \cos \frac{2b}{a}}{\operatorname{ch} \frac{2b}{a} + \cos \frac{2b}{a}}} \quad (11)$$

де a – теоретична глибина проникнення магнітного поля.

Остаточно дістанемо

$$I_{\text{рац}} = \frac{H_{\text{рац}} l_M k}{w_H b} \sqrt{\frac{1}{\pi f_H \mu_H \gamma}} \sqrt{\frac{\operatorname{ch} \frac{2b}{a} - \cos \frac{2b}{a}}{\operatorname{ch} \frac{2b}{a} + \cos \frac{2b}{a}}} \quad (12)$$

Після вибору раціональних параметрів (I_H , f_H , σ_{max}) похибка вимірювання зусиль не перевищує 0,15 %.

Як приклад практичного використання наведених досліджень є розроблена система, яка вирішує завдання неруйнуючого експрес контролю феромагнітних матеріалів і конструкцій по визначенню механічних напруг, виникнення яких обумовлено дією експлуатаційних і технологічних факторів. Для контролю механічних напруг у відповідальних вузлах і деталях складних систем, де кількість контрольованих точок десятки й сотні, а контроль повинен бути діагностичним і оперативним, необхідне використання спеціалізованих або універсальних ЕОМ. В основу побудови автоматичної системи контролю (АСК) механічних напруг в т-точках будь-якої конструкції РЕА або бортових конструкціях різних об'єктів, може бути покладена розроблена блок-схема. Функціональне призначення електронного комутатора (ЕК) і аналого-цифрового перетворювача (АЦП) не жадає пояснень. Кожний вихідний сигнал АЦП має цифровий код, який відповідає значенню параметра, що контролюється перетворювачем параметра. Сигнали з виходу АЦП надходять в арифметичний пристрій (АП), у якому відбувається порівняння з верхнім і нижнім припустимими значеннями кожного параметра. Інформація про припустимі межі зберігається в постійному запам'ятовувальному пристрої (ПЗП) комп'ютера. Пристрій керування (ПК) служить для забезпечення синхронності роботи ЕК, АЦП, АП й ПЗП. Результат порівняння надходить на вхід логічного пристрою (ЛП). Якщо значення параметра, який контролюється, перебуває в поле допуску, воно записується в гніздо оперативної пам'яті. При виході параметра, який контролюється, за межі поля допуску, сигнал з ЛП подається в пристрій керування, який конкретизує номер контрольної точки виміру й значення відхилення механічної напруги від припустимого. При необхідності інформація про параметр поза поля допуску з ЛП подається в підсистему діагностичного контролю (ПДК), яка встановлює причину відхилення.

Одними з основних елементів будь-якої автоматизованої системи контролю є чутливі елементи-перетворювачі, від чутливості й надійності яких у першу чергу залежить ефективність роботи АСК. Із широкого класу перетворювачів, які можуть бути використані в АСК, як показано вище, слід віддавати пере-

вагу МП, які відрізняються винятковою надійністю й потужним вихідним сигналом. Застосування МП пов'язане з безконтактним способом визначення механічних напруг у напружених елементах конструкцій, а це дозволяє розробляти АСК із більш широкими функціональними можливостями.

Використання різного виду компенсаційних схем для усунення первісного сигналу обмежує швидкість й можливість АСК, тому що необхідні додаткові регульовальні операції при переустановці АСК із об'єкта на об'єкт. З цієї точки зору більш ефективні МП, які виконані за мостовою схемою, що дозволяють відразу одержувати корисну інформацію без накладення первісного сигналу й з мінімальним впливом коливань навколишньої температури на опір обмоток і сполучних проводів. При відсутності механічних напруг в області контролю у вимірювальній обмотці електрорушійна сила (ЕРС) не наводиться. Механічні напруги, які виникають при впливі на матеріал зусиль, що порушують симетрію магнітного поля щодо вимірювального магнітопроводу й приводять до відгалуження частини потоку. Узгодження сигналу МП із блоком цифрового АЦП може здійснюватися як на змінному, так і на постійному струмі. Схеми узгодження на змінному струмі простіше, однак узгодження при цьому має ряд істотних недоліків у порівнянні з методом узгодження на постійному току. Фазове зрушення сигналу перетворювача щодо напруги викривлення вимагає установки у вихідні кола кожного перетворювача фазо зсувних пристроїв та індивідуального регулювання їх при кожній зміні точок контролю механічних напруг у конструкціях. До того ж ці пристрої призводять до додаткових похибок при зміні температури навколишнього середовища. Більшість промислових аналого-цифрових перетворювачів призначене для перетворення постійної аналогової напруги, тому між блоком ЕК і блоком АЦП є кільцевий демодулятор (рис. 3).

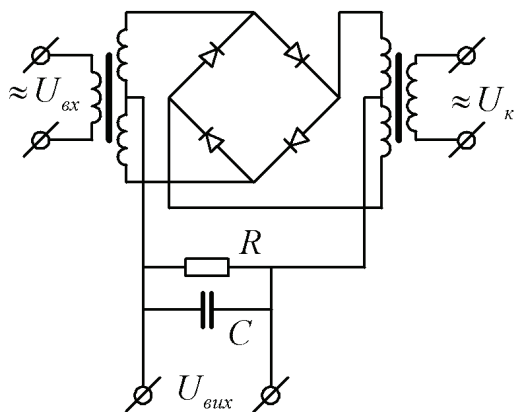


Рисунок 3 – Кільцевий демодулятор

Керуючий сигнал U_k перемикає діоди. При $U_k \gg U_{вх}$ вихідний сигнал лінійно залежить від напруги, що випрямлюється.

Висновки. Аналіз постійних часу МП різних конструкцій дозволяє здійснюючи розрахунки швид-

кодії й стабільності автоматизованих систем контролю й керування.

Додатковими дослідженнями встановлено, що при проектуванні МП потрібне знання припустимої межі міцності матеріалу магнітопроводу, облік анізотропії матеріалу, початкової магнітної проникності та магнітострикції. Для підвищення чутливості МП необхідний також вибір раціональних значень напруженості магнітного поля й частоти.

Розроблена система автоматичного контролю механічних напруг у деталях і вузлах наприклад бортових конструкцій може бути успішно використана для контролю статистичних і динамічних механічних напруг у діапазоні $(0...4) \cdot 10^7$ Н/м² при лінійній залежності вихідного сигналу перетворювача від їхнього значення.

Список літератури: 1. Чаплыгин В. И. Электромагнитный преобразователь усилий / В. И. Чаплыгин, В. Ф. Безотосный // Изв. вузов. Электромеханика. – 1977. – № 10. – С. 1159–1163. 2. Дорофеев А. Л. Электроиндуктивная (индукционная) дефектоскопия / А. Л. Дорофеев. – М.: Машиностроение, 1967. – 231 с. 3. 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. 4. 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. 5. Безотосный В. Ф. Выбор рациональной частоты тока намагничивания токовихревых преобразователей при контроле материалов / В. Ф. Безотосный, В. В. Козлов, О. В. Набокова // Электротехника та електромеханіка. – 2012. – № 1 – С. 19–21. 6. Безотосный В. Ф. Дослідження інерційності електромагнітних процесів і розподілу вихрових струмів у ферромагнітних матеріалах / В. Ф. Безотосний, Е. В. Власенко, Г. М. Романіченко // Тиждень науки – 2013: щорічна наук.-практ. конф. викл., молодих вчених, аспірт., студ. ЗНТУ, Запоріжжя, 15–19 квітня 2013 р.: тези допов. – IV, 2013 – Т. 1 – С. 59. 7. Безотосный В. Ф. Система неразрушающего контроля неэлектрических параметров материалов электромагнитными методами / В. Ф. Безотосный, В. В. Козлов, О. В. Набокова // Вісник СевНТУ. Збірник наукових праць. Серія Механіка, енергетика, екологія. Випуск 127. – Севастополь, 2013. – С. 279–283. 8. Chaplygin V. I. A magnetoresilient transformer with a shunting magnetic circuit for stresses / V. I. Chaplygin, V. F. Bezotosny, P. A. Shamin // News of Higher educational institutions. Instrument making. – Т. XIX, № 7. – P. 55-58. 9. Onori M. A. Robot tactile sensing: a new array sensor / M. A. Onori, J. D. Mek Watson // Rob. sens. Vol. – 1986. – № 12. – P. 199-205. 10. Пат. 4584625 США, МКИ H010 7/00. Capacitive tactile sensor / Kellogg Nelson R. (США). – №649312; Заявл. 11.09.84; Оpub. 22.04.86; НКІ 21-302. 11. Nang Fuling An imaging tactile sensor magnetostriuctive transduction / Nang Fuling // Rob. sens. Vol. – 1987. – № 2. – P. 113-122. 12. Klinger D. Kraftsensor / D. Klinger // Roboter. – 1987. – № 6. – P. 62-64. 13. Казаков В. А. Оценка методом высших гармоник структурной повреждаемости стали при циклическом нагружении // Электромагнитные методы контроля качества материалов и изделий: Тезисы докладов 1-ой Всесоюзной межвузовской конференции. – Москва. 1972. – С. 40-43. 14. Ламмеранерр И. Вихревые токи / И. Ламмеранерр, М. Штафль. – М.: Энергия, 1977. – 210 с.

Bibliography (transliterated): 1. Chaplygin V. I. Elektromagnitnyy preobrazovatel' usilyi V. I. Chaplygin, V. F. Bezotosnyy Izv. vuzov. Elektromekhanika. 1977. № 10. 1159–1163 p. 2. Dorofeev A. L. Elektroinduktivnaya (induktsionnaya) defektoskopiya. – Moscow: Mashinostroenie, 1967. 231 p. 3. Bezotosnyy V. F. Uchet energeticheskikh faktorov pri raschete namagnichennosti ferromagnitnykh materialov. V. F. Bezotosnyy, E. V. Vlasenko. Elektrotehnika i elektroenergetika. 2004. No 1. pp. 13–17. 4. Bezotosnyy V. F. K voprosu povysheniya tochnosti rascheta vykhodnykh kharakteristik bazovogo mnogofunktional'nogo magnitoprugogo datchika. V. F. Bezotosnyy, V. V. Kozlov, O. V. Nabokova Vestnik NTU "KhPI". 2010. No 48. pp. 56–59. 5. Bezotosnyy V. F. Vybora ratsional'noy chastoty toka namagnichivaniya tokovikhrvykh preobrazovateley pri kontrole materialov. V. F. Bezotosnyy, V. V. Kozlov, O. V. Nabokova Elektrotehnika ta elektromekhanika. 2012. No 1. pp. 19–21. 6. Bezotosnyy V. F. Doslidzhennya inertsynosti elektromagnitnykh protsesiv i rozpodilu vikhrovikh strumiv u ferromagnitnykh materialakh V. F. Bezotosnyy, E. V. Vlasenko, G. M. Romanichenko. Tizhden' nauki. 2013: shchorichna nauk.–prakt. konf. vinkl., molodikh vchenikh, aspir., stud. ZNTU, Zaporizhzhya, 15–19 kvitnya 2013: tezi dopov. IV, 2013. Vol. 1. 59 p. 7. Bezotosnyy V. F. Sistema nerazrushayuy-

shchego kontrolya neelektricheskikh parametrov materialov elektromagnitnymi metodami. V. F. Bezotosnyy, V. V. Kozlov, O. V. Nabokova. Visnik SevNTU. Zbimik naukovikh prats'. Seriya Mekhanika, energetika, ekologiya. Vipusk 127. Sevastopol', 2013. pp. 279–283. 8. Chaplygin V. I. A magneto resilient transformer with a shunting magnetic circuit for stresses. V. I. Chaplygin, V. F. Bezotosnyy, P. A. Shamin News of Higher educational institutions. Instrument making. Vol. XIX. No 7. pp. 55–58. 9. Onori M. A., Mek Watson J. D. Robot tactile sensing: a new array sensor Rob. sens. 1986. No 12. pp. 199–205. 10. Pat. 4584625 SShA, MKI N010 7/00. Capacitive tactile sensor Kellogg Nelson R. (SShA). № 649312; Zayavl. 11.09.84; Opub. 22.04.86; NKI 21-302. 11. Nang Fuling An imaging tactile sensor magnetostrictive transduction Rob. sens. 1987. No 2. pp. 113–122. 12. Klinger Dietmar. Kraftsensor. Poboter. 1987. No 6. pp. 62–64. 13. Kazakov V. A. Otsenka metodom vysshikh garmonik strukturnoy povrezhdaemosti stali pri tsiklicheskom narguzhenii Elektromagnitnye metody kontrolya kachestva materialov i izdeliy: Tezisy dokladov 1-oy Vsesoyuznoy mezhvuzovskoy konferentsii. Moskow. 1972. pp. 40–43. 14. Lammeraner I., Shtaf' M. Vikhrevye toki. Moskow: Energiya, 1977. 210 p.

Надійшла (received) 03.02.2016

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Антонов Микола Леонідович – кандидат технічних наук, доцент, Запорізький національний технічний університет, декан Електротехнічного факультету; тел.: (061) 764–46–25; e-mail: dekanat_etf@zntu.edu.ua.

Antonov Mykola Leonidovych, Candidate of Technical Sciences, Docent, Zaporozhye National Technical University, the Dean of Electrical Engineering Faculty; tel.: (061) 764–46–25; e-mail: dekanat_etf@zntu.edu.ua.

Безотосний Володимир Федорович – кандидат технічних наук, доцент, Запорізький національний технічний університет, доцент кафедри Теоретичної та загальної електротехніки, тел.: (061) 769-83-94; e-mail: kafedra_tze@zntu.edu.ua.

Bezotosnyy Volodymyr Fedorovych – Candidate of Technical Sciences, Docent, Zaporozhye National Technical University, Associate Professor at the Department of Theoretical and General Electrical Engineering; tel.: (061) 769-83-94; e-mail: kafedra_tze@zntu.edu.ua.

Козлов Володимир Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, Запорізький національний технічний університет, доцент кафедри Теоретичної та загальної електротехніки, тел.: (061) 764–46–25; e-mail: vvkozlov@zntu.edu.ua.

Kozlov Volodymyr Volodymyrovych – Candidate of Technical Sciences, Docent, Zaporozhye National Technical University, Associate Professor at the Department of Theoretical and General Electrical Engineering; tel.: (061) 764–46–25; e-mail: vvkozlov@zntu.edu.ua.

Набокова Ольга Володимирівна – Запорізький національний технічний університет, доцент кафедри Теоретичної та загальної електротехніки, тел.: (061) 769-83-94, ; e-mail: olga.nabokova777@gmail.com.

Nabokova Olga Volodymyrivna – Zaporozhye National Technical University, Associate Professor at the Department of Theoretical and General Electrical Engineering; tel.: (061) 764–46–25; e-mail: olga.nabokova777@gmail.com.