

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИ-
ТЕТУ
«ХПІ»

Серія: Електроенергетика та перетворювальна тех-
ніка

№ 19 (1062) 2014

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

Харків
НТУ «ХПІ», 2014

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х. : НТУ «ХПІ» – 2014. – №19 (1062). – 196 с.

Державне видання

Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України

КВ № 5256 від 2 липня 2001 року

Збірник виходить українською та російською мовами.

Вісник Національного технічного університету «ХПІ» внесено до «Переліку наукових Фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого постановою президії ВАК України від 26 травня 2010 р. №1 – 05/4. (Бюлетень ВАК України №6, 2010 р., стор. 3, №20).

Координаційна рада:

Л. Л. Товажнянський, д-р техн. наук, проф. (**голова**);

К. О. Горбунов, канд. техн. наук, доц. (**секретар**);

А. П. Марченко, д-р техн. наук, проф.; С. І. Сокол, член-кор. НАН України, д-р техн. наук, проф.; Є. Є. Александров, д-р техн. наук, проф.; А. В. Бойко, д-р техн. наук, проф.; Ф. Ф. Гладкий, д-р техн. наук, проф.; М. Д. Годлевський, д-р техн. наук, проф.; А. І. Грабченко, д-р техн. наук, проф.; В. Г. Данько, д-р техн. наук, проф.; В. Д. Дмитриєнко, д-р техн. наук, проф.; І. Ф. Домнін, д-р техн. наук, проф.; В. В. Спіфанов, канд. техн. наук проф.; Ю. І. Зайцев, канд. техн. наук, проф.; П. О. Качанов, д-р техн. наук, проф.; В. Б. Клепиков, д-р техн. наук, проф.; С. І. Кондрашов, д-р техн. наук, проф.; В. І. Кравченко, д-р техн. наук, проф.; Г. В. Лісачук, д-р техн. наук, проф.; О. К. Морачковський, д-р техн. наук, проф.; В. І. Ніколаєнко, канд. іст. наук, проф.; П. Г. Перерва, д-р екон. наук, проф.; В. А. Пуляев, д-р техн. наук, проф.; М. І. Рищенко, д-р техн. наук, проф.; В. Б. Самородов, д-р техн. наук, проф.; Г. М. Сучков, д-р техн. наук, проф., Ю. В. Тимофіїв, д-р техн. наук, проф., М. А. Ткачук, д-р техн. наук, проф.

Редакційна колегія серії:

Відповідальний редактор: Г.М. Сучков, д-р техн. наук, проф.

Відповідальний секретар: І.Г. Хорошайло

Члени редколегії: С.І. Сокол, член кор. НАН Укр, проф.; В.Б. Клепиков, д-р техн. наук, проф.; Б.В. Клименко, д-р техн. наук, проф.; В.В. Воїнов, канд. техн. наук, доц.; Б.М. Горкунов, д-р техн. наук, проф.; А.Г. Гурин, д-р техн. наук, проф.; С.Н.Глоба, канд. техн. наук, доц.

*У квітні 2013 р. Вісник Національного технічного університету «ХПІ», серія «Електроенергетика та перетворювальна техніка», включений у довідник періодичних видань бази даних **Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)**.*

Рекомендовано до друку вченою радою НТУ «ХПІ»

Протокол № 6 від 26 червня 2014 р.

Ю. Г. БЕЗИМЯННИЙ, д-р техн. наук, зав.від.,
ІПМ НАН України, Київ;
І. Г. ЄВКО, пошукач, асист., НТУ України «КПІ»,
Київ;
К. А. КОМАРОВ, наук.співр., ІПМ НАН України, Київ;
О. В. ТАЛЬКО, мол.наук.співр., ІПМ НАН України, Київ

МЕТОДИКА ОЦІНКИ ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ПОШИРЕННЯ ПРУЖНОЇ ХВИЛІ ПРИ ПОЕТАПНОМУ КОНТРОЛІ ЗРАЗКІВ З ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

В статті розроблена методика та оцінені похибки при вимірюванні швидкості поширення пружної хвилі імпульсним методом на різних етапах формування порошкового матеріалу. Особливості вимірювань пов'язані зі зміною форми зразків на кожному етапі їх формування при відсутності плоскопаралельних поверхонь. Наведено результати вимірювання та оцінка похибки у реальних зразках. Показано, що зміна інформативних значень швидкості поширення пружної хвилі суттєво перевищує похибку їх вимірювань.

Ключові слова: похибка вимірювань, швидкість поширення пружної хвилі, ультразвуковий імпульсний метод, порошковий матеріал.

Вступ. Матеріали на основі порошкового заліза перспективні для використання в деталях і конструкціях з метою здешевлення загальної вартості виробу. Швидкість поширення пружної хвилі (ШППХ) є однією з фізико-механічних характеристик матеріалу, за якою можна контролювати якість зразка або деталі неруйнуючи їх. Наприклад, за ШППХ можна оцінити розподіл властивостей в об'ємі зразка і його зміни після кожного етапу технологічного процесу [1]. Найбільш придатним для цього є ультразвуковий імпульсний метод наскрізного прозвучування зразків з порошкових матеріалів, який дозволяє досліджувати їх пористість; ступінь консолідації, неоднорідність та інше [2].

Аналіз стану досліджень та літератури. Ультразвуковий імпульсний метод визначення ШППХ використовують для експериментального дослідження властивостей матеріалів, у тому числі порошкових, ще з кінця минулого сторіччя [1, 3]. Нами було запропоновано удосконалений варіант цього методу [4], призначений для дослідження розподілу властивостей у зразках з порошкових матеріалів, отриманих при використанні сучасних технологій їх виготовлення на різних стадіях фо-

рмування матеріалу за умов зміни форми його зразків та відсутності традиційних для ультразвукових вимірів плоскопаралельних поверхонь. Використання у цьому варіанті методу буферних стрижнів й трансформацій пружної хвилі підвищує похибку вимірювань та потребує для її оцінки використання врахування усіх можливих складових. Відомі методи оцінки сумарної похибки за бюджетом похибок [5, 6, 7]. В [7] показаний приклад складання діаграми Ісікави Каору. В [6] розглядається загальна методика складання бюджету похибок для ультразвукового прозвучування. Відмінності між непевністю і похибкою результатів вимірювання викладені в [5].

Мета роботи. Метою роботи є розробка методики оцінювання похибки вимірювань ШППХ зразків з порошкового заліза, які мають складну форму та перевірка розробленої методики на реальних вимірах.

Постановка проблеми. У зв'язку з цим доцільно оцінити, наскільки отримані при вимірюваннях ШППХ результати дійсно відображають розподіл властивостей за об'ємом матеріалу. Для цього необхідно визначити похибку вимірювань та порівняти її з результатами оцінки зміни ШППХ.

Матеріали досліджень. Для визначення ШППХ у досліджуваних зразках було використано розроблену в Інституті проблем матеріалознавства НАНУ спеціалізовану установку.

Об'єктом контролю вибрані зразки порошкового заліза, які мали форму наведену на рисунку 1, а після першого технологічного впливу на пористу заготовку з висотою $h_1 = 16$ мм, $h_2 = 20$ мм, відповідно, діаметр – 30 мм. Потім на ці зразки був здійснений другий технологічний вплив. Після нього зразки (див. рис. 1, б) мали наступні розміри висоту $h_1 = 14$ мм, $h_2 = 18$ мм, діаметр – 30 мм.

Схема і особливості прозвучування детально описана в [4, 9].

Оцінювання похибки. ШППХ визначається на основі опосередкованих вимірювань [3] за формулою (1):

$$\tilde{n} = \frac{h}{t - t_0}, \quad (1)$$

де h – висота зразка; t – час поширення пружної хвилі (ПХ) у зразку; t_0 – сумарний час поширення ПХ в п'єзоелектричних перетворювачах (ПЕП) – $t_{\text{ПЕП}}$ і в буферних стрижнях (БС) – $t_{\text{БС}}$; $t_0 = t_{\text{ПЕП}} + t_{\text{БС}}$.

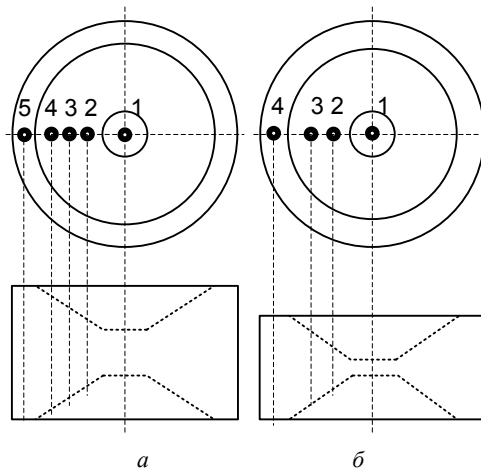


Рис. 1 – Вигляд зразків: *a* – після першого технологічного впливу;
б – після другого технологічного впливу;
цифри 1, 2, 3, 4, 5 позначені напрями прозвучування

Концепція визначення похибок передбачає оцінку сумарної похибки за бюджетом похибок [6,7], який складається на основі аналізу діаграми Ісікави Каору[5]. Така діаграма для вимірювання ШППХ імпульсним акустичним методом наведена на рис.2.

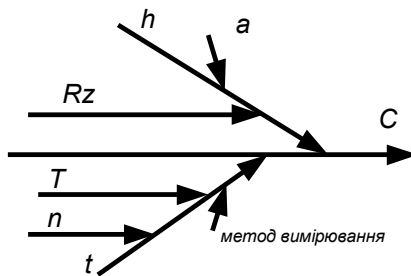


Рис. 2 – Діаграма Ісікави Каору для складання бюджету похибок при вимірюваннях ШППХ

У табл.1 наведено пояснення та тип оцінювання похибок величин представлених на рис.2.

Згідно з діаграмою Ісікави Каору, побудуємо бюджет похибок. При складанні бюджету похибок передбачалось, що випадкові складові сукупності похибок є некорельованими.

Таблиця 1 – Бюджет складових похибок

Позначення	Величина	Тип оцінювання величини
C	Швидкість проходження пружної хвилі в зразку	Розрахункова
H	Висота зразка	Вимірювана (тип А)
R_z	Шорсткість поверхні зразка	Розрахункова
A	Плоскопаралельність зразка	Розрахункова
T	Температура проведення експерименту	Вимірювана (тип А)
T	Часпоширення пружної хвилі в зразку	Вимірювана (тип А)
n	Девіація притиснення зразка	Розрахункова

Похибка u_c , обумовлена неточністю вимірювання ШППХ у зразку.

Відповідно, комбінована похибка[6], обумовлена неточністю вимірювання швидкості поширення пружної хвилі у зразку має вигляд (2)

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{\partial C}{\partial h}\right)^2 * u_h^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial t}\right)^2 * u_t^2}, \quad (2)$$

де u_h – похибка вимірювання висоти зразка в точці прозвучування;
 u_t – похибка вимірювання часу поширення пружної хвилі у зразку в точці прозвучування.

В табл.2 наведено тип та розрахункові формули для визначення коефіцієнтів впливу для кожної складової сумарної похибки. Як видно з таблиці похибки для вимірювання ШППХ – комбіновані, тому потрібно проаналізувати кожен складову похибок окремо.

Похибка вимірюванням висоти зразка u_h залежить від плоскопаралельності поверхні (похибка u_a), інструментальної похибки мікрометра $u_{\text{мікр}}$ та похибки обумовленою шорсткістю Rz поверхонь зразка.

Комбінована похибка [6], обумовлена неточністю вимірювання висоти зразка матиме вигляд (3):

$$u_h = \sqrt{u_{\text{мікр}}^2 + u_a^2}, \quad (3)$$

Таблиця 2 – Похибки вимірювання швидкості поширення пружної хвилі у зразку

Позначення похибки	Тип оцінювання похибки	Коефіцієнт впливу похибки
u_h	Комбінована	$\frac{\partial C}{\partial h} = K_h = \frac{1}{t}$
u_t	Комбінована	$\frac{\partial C}{\partial t} = K_t = -\frac{h}{t^2}$

Похибка мікрометра розподілена за рівномірним законом розподілу ймовірностей і дорівнює значенню $\pm \Delta h$, тоді інструментальна похибка мікрометра [6] рівна: $u_{\text{мікр}} = \frac{\Delta h}{\sqrt{3}}$.

Непаралельність поверхонь зразків викликає зменшення донного сигналу й зміну напряму поширення пружної хвилі в зразках, ПЕП і БС, які відповідають максимальній амплітуді найшвидшого луна-сигналу. Результат вимірювання відповідає середньому значенню товщини на ділянці акустичного контакту перетворювача із зразком. Однак точність вимірювання знижується завдяки зменшенню крутості фронту донного сигналу. Для того, щоб розрахувати цю похибку потрібно виміряти висоту зразка h у чотирьох точках для напрямів прозвучування (див. рис. 1) розташованих на осях симетрії та розрахувати її [5] для кожного напряму прозвучування за формулою (4):

$$u_a = \sqrt{\frac{1}{3} * \sum_{i=1}^4 (h_i - \bar{h})^2}, \quad (4)$$

де \bar{h} - середнє значення; h_i - значення в кожній точці.

Товщина контактнoгo шару (шару рідини) змінюється через різну шорсткість поверхні зразку і різний ступінь притискання ПЕП, БС при настроюванні приладу й вимірюваннях ШППХ. В роботі для похилих поверхонь зразків в якості контактнoгo шару між ПЕП і БС, між БС і зразком був використаний мед в рідкому стані [4], який добре проводить ПХ і практично не проникає в пори порошкового заліза. ПЕП і БС при цьому опирається на найбільш високі нерівності. У результаті похибка стає випадковою. Для зменшення похибки від зміни товщини контактнoгo шару (особливо істотної при проведенні вимірювань на зразках малих розмірів) підвищують вимоги до чистоти поверхні зразків, стабілізують притиснення перетворювача за допомогою притискнoгo пристрою, виконують налаштування приладу й вимірювання на зразках з однакової шорсткістю поверхні. Також необхідно слідкувати за тим, щоб обидва буферні стрижні знаходились на одній осі і не зміщувались в процесі проведення вимірювань ШППХ.

Зразки для досліджень мали достатню чистоту поверхні (R_{z20} і *краще*) та приблизно однакову шорсткість, тому похибкою обумовленою шорсткістю поверхні можна знехтувати.

На похибку часу проходження пружної хвилі u_t впливає температура навколишнього середовища T , девіація притиснення ПЕП зразка на похилій поверхні n та метод вимірювання часу ШППХ у зразку.

ШППХ в зразку змінюється в залежності від температури, зазвичай збільшуючись при охолодженні та зменшуючись при нагріванні. Змінюється також швидкість звуку в матеріалі перетворювача. Для виключення цієї похибки прилад повинен забезпечувати вимірювання часу поширення ПХ між поверхнями зразків і не включати в зазначений інтервал час поширення в ПЕП і інших акустичних затримках. Для вимірювань ШППХ використовували буферні стрижні спеціальної форми, які дозволяли проводити вимірювання локально в напрямках зразків вказаних на рис.1, оскільки ПЕП мають форму і розміри, що не дозволяє поміряти локально в цих напрямках час проходження ПХ. Один буферний стрижень був на ПЕП вхідного сигналу, а другий – на ПЕП, який знімав ПХ, що пройшла крізь похилу площину зразків. Слід за-

значити, що в другому буферному стрижні ПХ поширювалася в дальній зоні, а звідси можна зробити висновок, що ПХ проходить не по прямій з першого буферного стрижня, в зразок, а потім в другий буферний стрижень [4].

Дослідження проводились в лабораторних умовах при підтриманні температури в межах 20 ± 2 С, тому температурним впливом на ШППХ можна знехтувати.

При нестійкому положенні ПЕП луна-сигнали спотворюються, що також призводить до неточних показів. В таких випадках зручно використовувати пружинний V-подібний тримач, який нормує ступінь притискання і створює правильну орієнтацію ПЕП до поверхні зразка.

Похибка від девіації притискання зразка входить в інструментальну похибку часу поширення ПХ у зразку.

Похибка затримки імпульсу в електричних колах системи приведе до виникнення систематичної похибки при вимірюванні ШППХ. При ретельному налаштуванні системи Δt_3 можна знехтувати порівняно з похибкою вимірювання часу Δt .

Похибка вимірювання часу Δt складається з похибок Δt_n обумовлених впливом двох факторів, а саме:

- похибки вимірювального пристрою;
- похибки, пов'язаної з кінцевою тривалістю пружного імпульсу.

Похибка вимірювального пристрою (вона не перевищує 0.05...0.1%) складається з похибки від нелінійності часових розгортки і обмеженої точності індикаторного пристрою.

Похибка, пов'язана з кінцевою тривалістю пружного імпульсу (рис. 3), пропорційна періоду коливань [3]. Вона дорівнює $\Delta t_2 = kT/2$, де T - період коливань, а k - частотна стала. Якщо не прийняти спеціальних заходів, то в результаті дії випадкових факторів відлік часу при двох вимірюваннях (при настроюванні й власне вимірюванні часу поширення ПХ) може бути виконаний по двох різних періодах коливань. У цьому випадку $k=1$ (для приладу із двонапівперіодним випрямлячем $k=0,5$).

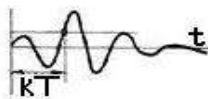


Рис. 3 – Вимірювання імпульсів малої амплітуди $k \geq 1$; тут k – частотна стала, а T – період коливань

Щоб уникнути виникнення більших похибок, частіше всього вимірювання проводять по фронту першого напівперіоду коливань або по фронту другого напівперіоду (випрямляч роблять двонапівперіодним). Для забезпечення виконання цієї умови амплітуду імпульсу (рис. 2,а) підтримують постійною, а вимірювання виконують на постійному рівні.

В нашому випадку після проходження ПХ похилих непаралельних площин і перетворення ПХ в електричний сигнал, який не мав чітко виражену синусоїдальну зростаючо-спадаючу форму, дуже важко було визначити де перший період закінчується. Тому було прийнято рішення фіксувати t_{i0} за появою сигналу, що відповідає найшвидшому променю пружної хвилі і відповідно найменшому часу проходження ПХ, налаштовуючи підсилення вихідного сигналу таким чином щоб його рівень був постійним при всіх вимірюваннях ($k=0,1$). Це дозволило звести до мінімуму вплив шуму на вимірювальний імпульс часу, тому що в нашому методі використовувався радіоімпульс для збудження ПХ. Якщо б був відеоімпульс, який має більшу полосу частот [3], то такий захід не дав би можливості виключити вплив шумової складової на вимірювальний імпульс часу.

Похибка, обумовлена вимірюванням часу [6] поширення ПХ у зразку має вигляд (5):

$$u_i = \sqrt{u_{t_i}^2 + u_{\Delta}^2}, \quad (5)$$

де u_{Δ} - похибка, обумовлена методом вимірювання часу поширення ПХ у зразку;

u_{t_i} - це середньоквадратичне відхилення [6] багаторазового вимірювання часу поширення ПХ в одній точці зразка (6):

$$u_{t_i} = \sqrt{\frac{1}{m-1} * \sum_{i=1}^m (t_i - \bar{t})^2}, \quad (6)$$

де \bar{t} - середнє значення; t_i - значення в кожній точці, m – кількість вимірювань.

Щоб оцінити похибку [6], обумовлену методом вимірювання часу поширення ПХ у зразку, оцінимо значення $\Delta t_{\text{сум}}$ - похибку методу вимірювання часу поширення ПХ у зразку (7):

$$\Delta t_{\text{сум}} = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3, \quad (7)$$

Δt_1 - похибка вимірювального приладу(8):

$$\Delta t_1 = 0,001 * t_{\text{вим}}, \quad (8)$$

де $t_{\text{вим}}$ - виміряне значення часу поширення ПХ у зразку.

Δt_2 - похибка, обумовлена частотою дискретизації (9):

$$\Delta t_2 = \frac{1}{f}, \quad (9)$$

де f - частота дискретизації.

Δt_3 -похибка[3], обумовлена кутоннахилуповерхні вимірювання (10):

$$\Delta t_3 = \tan \beta * (t - t_0), \quad (10)$$

Похибка методу вимірювання часу поширення ПХ у зразку розподілена за нормальним законом розподілу ймовірностей[6],тому відповідний квантіль нормального розподілу, при довірчій ймовірності 0.95, буде дорівнювати 1.96 (11):

$$u_{\Delta} = \frac{\Delta t_{\text{сум}}}{1,96}. \quad (11)$$

У зв'язку з тим, що сумарна похибка результату вимірювання ШППХ складається з великої кількості стандартних похибок приймається гіпотеза про нормальний закон розподілу результатів вимірювання.

Результати досліджень. За розробленою методикою були оцінені похибки вимірювання ШППХ зразків, виготовлених з порошкового заліза (ПРЗ)з додаванням 0,8 % графіту [7] після двох різних технологічних впливів.Отримані похибки результатів вимірювання приведені в таблицях 3 – 6. При розрахунках $u_h = 2,9 * 10^{-5}$ мм для всіх значень.

Таблиця 3 – Похибки вимірювання часу поширення ПХу зразках після першого технологічного впливу в напрямках 1, 2, 3, 4, 5

Зразок	$u_t * 10^4, c$				
	Напрями				
	1	2	3	4	5
ЗРАЗОК 3 $h_1=16\text{мм}$	28	31	33	35	40
ЗРАЗОК 3 $h_2=20\text{мм}$	7	10	13	16	20

Таблиця 4 – Похибки вимірювання часу поширення ПХ у зразках після другого технологічного впливу в напрямках 1, 2, 3, 4

Зразок	$u_t * 10^4, c$			
	Напрями			
	1	2	3	4
ЗРАЗОК 3 $h_1=14\text{мм}$	25	31	33	34
ЗРАЗОК 3 $h_2=18\text{мм}$	29	34	36	37

Таблиця 5 – Похибки вимірювання ШППХ зразків після першого технологічного впливу в напрямках 1, 2, 3, 4, 5

Зразок	$u_c, м/с$				
	Напрями				
	1	2	3	4	5
ЗРАЗОК 3 $h_1=16\text{мм}$	28	21	17	16	13
ЗРАЗОК 3 $h_2=20\text{мм}$	25	17	14	12	11

Таблиця 6 – Похибки вимірювання ШППХ зразків після другого технологічного впливу в напрямках 1, 2, 3, 4

Зразок	$u_c, м/с$			
	Напрями			
	1	2	3	4
ЗРАЗОК 3 $h_1=14\text{мм}$	26	24	21	15
ЗРАЗОК 3 $h_2=18\text{мм}$	21	19	16	14

В результаті вимірювань і розрахунків були отримані значення розподілу ШППХ від центру симетрії до країв рис.4. Ці графіки слід розуміти так, що у всіх радіальних напрямках по відношенню до осі симетрії зразків значення ШППХ повторювались для обох технологічних впливів і мали однакове значення. Також на графіках для відповідних напрямків прозвучування нанесені значення похибок, які розраховані за методикою викладеною вище. Як видно з графіків ШППХ для похилих поверхонь має нелінійну спадаючу залежність при віддаленні від центру.

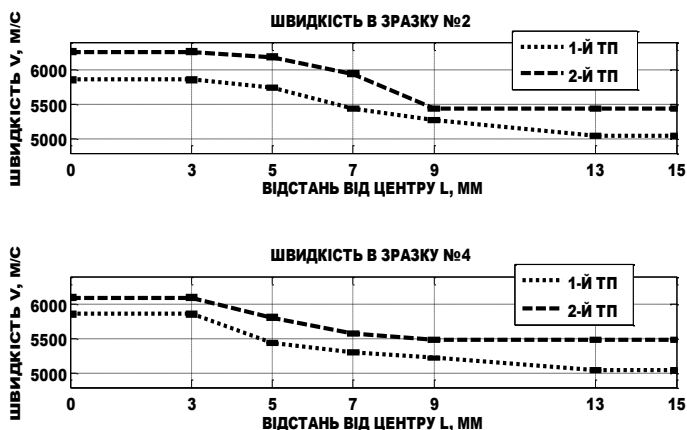


Рис. 4 – Швидкість в зразках: 1-й ТП – перший технологічний вплив; 2-й ТП – другий технологічний вплив

Висновки. Розроблена та експериментально досліджена методика оцінки похибки вимірювання ШППХ зразків із порошкового заліза імпульсним ультразвуковим методом.

Результати розрахованих за цією методикою значень похибок ШППХ для досліджуваних зразків з порошкових матеріалів набагато менші від самих значень змін величин ШППХ як в об'ємі матеріалу, так і зміни величин розподілу їх значень після кожної стадії формування матеріалу, що вказує на можливість застосування запропонованої методики для постадійного контролю порошкових матеріалів.

Подальші напрямки роботи, це детальний розбір за законами променевої акустики проходження променя в акустичному тракті, з метою покращення точності вимірювання ШППХ.

Список літератури: 1. Бальшин М. Ю., Кипарисов С. С. Основы порошковой металлургии. М.: Металлургия, 1978. – 184 с. 2. Безьямный Ю. Г. Возможности акустических методов при контроле структуры и физико-механических свойств порошковых материалов // Порошковая металлургия - 2001. - № 5-6. - С. 23-33. 3. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. - М.: Мир, 1972. – 238 с. 4. Безьямный Ю. Г., Баглюк Г. А., Євко І. Г., Комаров К. А. Постадійний контроль розподілу властивостей в об'ємі заготовок з порошкового заліза. // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Зб. наук. праць. Тематичний випуск "Електроенергетика та перетворювальна техніка". – Харків: НТУ "ХПІ" – № 34. – 2013. – С. 156-162. 5. Дорожовець М. Похибки та непевність результату вимірювання – подібність та відмінність // Вимірювальна техніка та метрологія. – 1996. – Вип. 52. – С. 113-121. 6. Захаров І. П. Теоретическая метрология. – Харьков: ХТУРЕ, 2000. – 172 с. 7. Карасев Н. П. Применения статистических методов в системе менеджмента качества // Вопросы стандартизации и сертификации СО РАН" / 1 - 2007 (г. Новосибирск). 8. Безьямный Ю. Г., Богдан Г. А., Євко І. Г., Іванюк Н. А., Козирацький Е. А. Контроль неоднородності властивостей порошкових матеріалів по результатам акустичних вимірювань // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Зб. наук. праць. Тематичний випуск "Електроенергетика та преобразовательная техника". – Харків: НТУ "ХПІ" – № 19. – 2011. – С. 204-211. 9. Безьямный Ю. Г., Баглюк Г. А., Євко І. Г., Хоменко А. І., Колесников А. М. Акустичний контроль стану порошкового матеріалу в процесі його виготовлення // Акустичний симпозиум "КОНСОНАНС-2009". Збірник праць. – К. – С. 55-60.

Bibliography (transliterated): 1. Bal'shin M. Ju., Kiparisov S. S. *Osnovy poroshkovoymetallurgii*. Moscow: Metallurgija, 1978. 2. Bezimyanniy Y. G. "Vozmozhnosti akusticheskikh metodov pri kontrole strukturyi fiziko-mehani cheskikh svojstv poroshkovykh materialov." *Poroshkovaya metallurgiya*. 5-6 (2001): 23-33. Print. 3. Trujell R., El'baum Ch., Chik B. *Ul'trazvukovyemetody v fiziketverdogotela*. Moscow: Mir, 1972. 4. Bezimyanniy Y. G., Bahljuk G. A., Evko I. G., Komarov K. A. "Postadijnnyj kontrol' rozpodilu vlastivostej v objemizahotovok z poroshkovohozaliza." *Visnyk NTU "KhPI"*. "Nacional'nyjt echnichnyjuniversytet" *Harkivs'kyj politehni chnyj instytut*. NTU "KhPI", 34 (2013): 156-162. Print. 5. Dorozovec M. *Poxybkytanepevnistrezultatuvimjruvannja – podobnist'tavidminnist*. "Ymirjuvalnatexnikatametrolohija, 52(1996): 113-121. Print. 6. Zaharov I. P. *Teoreticheskajametrologija*. Har'kov: HTURE, 2000. 7. Karasev N. P. "Primeneniestatisticheskikhmetodovvsistememenedzhmentakachestva." *Voprosystandardizaciiisertifikacii"SORAN"*, 1(2007). 8. Bezimyanniy Y. G., Bogdan G. A., Evko I. G., Kozirackij E. A. "Kontrol'neodnorodnostisvojstvporoshkovykhmaterialovporezultatam akusticheskikh izmerenij. Kharkov." *Visnyk NTU "KhPI"*. "Nacional'nyjt echnichnyjuniversytet" *Harkivs'kyj politehni chnyj instytut*. NTU "KhPI", 19(2011): 204-211. Print. 9. Bezimyanniy Y. G., Bahljuk G. A., Evko I. G., Xomenko A. I., Kolesnykov A. M. "Akustyschnyj kontrol' stanuporoshkovohomaterialuv procesijohovyhotovlennja." *Akustyschnyjsympozium. "KONSONANS-2009"*. (2009): 55-60. Print.

Поступила (received) 28.05.2014

Ю. Г. БЕЗЫМЯННЫЙ, д-р техн. наук, зав. отд.,
ИПМ НАН Украины, Киев;
Е. А. КОЗИРАЦКИЙ, соискатель, м.н.с. ИПМ НАН Украины,
Киев;
А. Н. КОЛЕСНИКОВ, н.с. ИПМ НАН Украины, Киев;
Л. О. ТЕСЛЕНКО, н.с. ИПМ НАН Украины, Киев

СРАВНЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В работе приведены результаты расчётов, а так же экспериментального определения импульсным и резонансным методами характеристик упругости различных материалов, как широко используемых, так и обладающих специальными свойствами. Отмечено, что разница между получаемыми по этим методам величинами модуля упругости изменяется в зависимости от свойств материала и может достигать 15 %. Для уменьшения расхождений рекомендуется адаптация метода измерений к исследуемому материалу.

Ключевые слова: модуль упругости, скорость распространения упругой волны, резонанс, резонансный метод, импульсный метод.

Введение. Модули упругости – важнейшие характеристики твердого тела [1]. Они являются расчетными параметрами в аналитическом аппарате физической теории деформации и разрушения твердого тела, базирующейся на современной теории дислокаций. Модули упругости входят во все уравнения механики твердого тела и служат основными параметрами в конструкторских расчетах сооружений, машин и механизмов. Модули упругости традиционных материалов можно найти в справочнике, но для вновь создаваемых материалов необходимо эти модули измерить. Для неразрушающего определения модулей упругости используют динамические методы, в основе которых лежат известные соотношения между скоростями распространения (СР) продольных и поперечных объёмных упругих волн (УВ), или УВ в стержне, и характеристиками упругости твердого тела [2].

Анализ последних исследований и литературы. Динамические методы определения характеристик упругости материалов широко используют с шестидесятых годов прошлого столетия [3]. Сегодня изменение величин характеристик упругости динамическими методами остаётся актуальным в связи с постоянным появлением новых материалов с особыми физическими свойствами [4]. Для этих материалов ис-

пользование известных методик может привести к существенным промахам [5]. Назрела необходимость критически пересмотреть эти методики применительно к материалам со специальными свойствами.

Цель статьи. Провести сопоставительный анализ наиболее широко используемых динамических методов измерения характеристик упругости на материалах с различными свойствами.

Постановка проблемы. Существует достаточно большое количество методов измерения характеристик упругости твердых тел, каждый из которых имеет определенные достоинства и недостатки. Выбор того или иного из них определяется диапазоном изменения измеряемой величины, требуемой точностью измерения, размерами деталей, их конфигурацией и рядом других факторов. Представляет интерес, дадут ли различные динамические методы определения характеристик упругости одинаковые результаты и насколько совпадение результатов будет зависеть от свойств материалов.

Материалы исследований. Для сопоставления выбраны наиболее широко используемые динамические методы определения характеристик упругости материалов: импульсный и резонансный.

В соответствии первому в однородной изотропной твердой среде связь характеристик упругости материала со СР УВ определяется известными [6] формулами:

$$E = \frac{c_t^2 \rho (1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)}, \quad G = c_t^2 \rho, \quad \nu = \frac{1 - 2(c_t / c_l)^2}{2(1 - (c_t / c_l)^2)}, \quad (1)$$

где E , G - модули растяжения-сжатия и сдвига, соответственно; c_t , c_l - СР продольной и поперечной УВ, соответственно; ν - коэффициент Пуассона; ρ - плотность.

В соответствии резонансному методу в заданном направлении связь модуля упругости материала со СР УВ определяется известной [2] формулой:

$$E = c_{cm}^2 \rho, \quad (2)$$

c_{cm} - СР УВ в стержне.

Сопоставляя эти два метода, следует сразу отметить, что для определения одного модуля в изотропном теле резонансным методом нужно сделать измерение одной СР УВ, тогда как для импульсного метода измерение одной СР УВ может дать только модуль сдвига, а определение модуля растяжения-сжатия требует обязательного измерения двух СР УВ. Правда, при этом мы получаем полный набор характеристик упругости для изотропного тела. Для анизотропных тел в

резонансном методе для каждого направления необходимо изготавливать отдельный образец [7], тогда как импульсный метод позволяет измерять в одном образце различные модули [8].

В качестве исследуемых материалов были выбраны: органическое стекло как представитель классической однородной изотропной твёрдой среды, применяемые в акустике для эталонных измерений [9]; широко используемые в промышленности углеродистая и нержавеющая стали, представляющие собой квазиизотропные квазиоднородные среды [2]; и порошковое железо – как представитель перспективного трансверсально-изотропного материала с развитой многоуровневой структурой [10]. Данные по акустическим характеристикам этих материалов и их характеристикам упругости, взятые из справочников [1, 2, 3, 9], приведены в табл. 1. Для порошкового железа (ПЖ) разной пористости (θ) в этой таблице приведены оценки характеристик упругости по приближённым формулам [10]:

$$E = E_0(1 - \theta), \quad G = G_0(1 - \theta), \quad \nu = \nu_0(1 - \theta), \quad (3)$$

где индекс "0" относится к беспористому материалу, в нашем случае – железу.

Таблица 1 – Характеристики материалов по данным справочников

№ п/п	Материал	Плотность, 10^3 кг/м^3	Скорость УЗ, 10^3 м/с			Характеристики упругости		
			c_l	c_t	c_{cm}	$E, \text{ ГПа}$	$G, \text{ ГПа}$	ν
1	Стекло органическое	1,18	2,65-2,75	1,10-1,13	1,84-2,14	3-4	-	-
2	Сталь углеродистая	7,77-7,85	5,90-5,94	3,22-3,25	5,10-5,18	200-210	77-81	0,28-0,31
3	Сталь нержавеющая	7,9-8,2	5,66-6,14	3,12-3,25	5,04			
4	Железо	7,80-7,87	5,85-6,06	3,23-3,33	5,17	195-227	81,2-88,5	0,25-0,29
5	ПЖ 1	6,50	-	-	-	~162	~162	~0,22
6	ПЖ 2	6,38	-	-	-	~158	~158	~0,21
7	ПЖ 3	5,75	-	-	-	~157	~157	~0,21

Если, в соответствии с исследуемыми динамическими методами, считать известными c_l и c_t для импульсного метода или c_{cm} – для резонансного, то можно рассчитать модули упругости. Результаты этих расчётов по данным справочников (см. табл. 1) приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Характеристики упругости материалов, рассчитанные по скоростям ультразвука из справочников

№ п/п	Материал	По формулам (1)			По формуле (2)
		E , ГПа	G , ГПа	ν	E , ГПа
1	Стекло органическое	3,9-4,5	1,43-1,51	0,39-0,40	4,0-5,4
2	Сталь углеродистая	195-217	80,6-82,9	0,28-0,31	202-211
3	Сталь нержавеющая	171-258	76,9-86,6	0,25-0,33	201-208
4	Железо	193-234	81,4-87,3	0,26-0,31	209-232

Сопоставительный анализ характеристик упругости в табл. 1 и полученных по формуле (2) в табл. 2 показывает хорошее совпадение для сталей, что свидетельствует о высокой степени изученности этого материала. Для оргстекла неожиданно в табл. 2 получены завышенные значения модуля. Этот факт требует дополнительного изучения. Расхождения для железа можно объяснить наличием анизотропии, что далеко не всегда отмечается в справочниках.

Сопоставление в табл. 2 модулей, рассчитанных по формулам (1) и (2) показывает, что использование двух исходных параметров для оценки модуля расширяет диапазон оценочных значений в импульсном методе. Более низкие значения для оргстекла в расчётах по формулам (1) можно объяснить высоким значением коэффициента Пуассона.

Для сопоставления экспериментальных результатов измерений рассматриваемыми методами на одинаковых объектах были изготовлены образцы исследуемых материалов в форме балок и цилиндров разных размеров (рис. 1). На рис. 1 показаны направления прозвучивания импульсным методом (1, 2) и резонансным (3). Образцы ПЖ были вырезаны из заготовки вдоль и поперёк прилагаемой при формировании этой заготовки нагрузки F (рис. 1, ϵ и ζ). Наличие у ПЖ трансверсальной анизотропии предполагает неодинаковость характеристик упругости материала вдоль и поперёк прессования [10], поэтому сопоставление рассматриваемых методов на одном образце в одинаковых условиях оказалось возможным только в направлении, перпендикулярном прессованию с соответствующей поляризацией поперечной волны (рис. 1, ϵ). Характеристики образцов приведены в табл. 3.

В импульсном методе СВ УВ определяли по времени сквозного прохождения упругого импульса через исследуемый образец. Струк-

турная схема измерений показана на рис. 2. Измерение времени прохождения проводили на частоте 5 МГц методом радиоимпульса с дискретной задержкой [11].

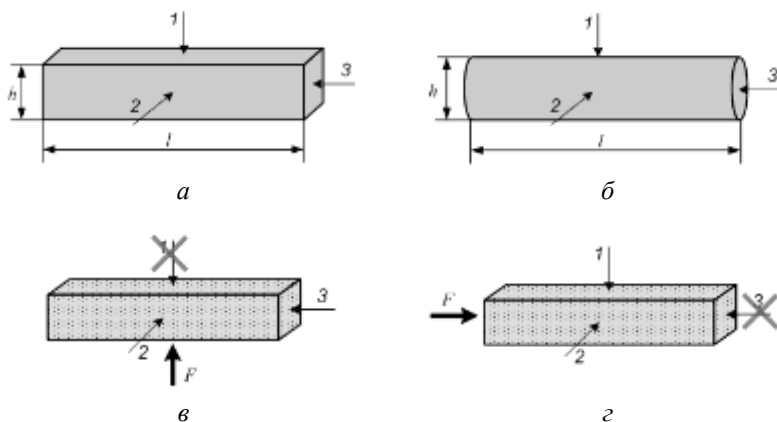


Рис. 1 – Исследуемые образцы, направления их прозвучивания и прессования: *a* – балка; *б* – цилиндр; *в* – образец ПЖ, вырезанный поперёк направления прессования; *г* – образец ПЖ, вырезанный вдоль направления прессования

Таблица 3 – Характеристики исследуемых образцов

№ п/п	Материал	Форма	Размеры, мм		Плотность, 10^3 кг/м ³	Пористость, %
			<i>l</i>	<i>h</i>		
1	Стекло органическое	рис. 1, <i>б</i>	40	6	1,18	-
2	Сталь углеродистая	рис. 1, <i>а</i>	62	8	7,82	-
3	Сталь нержавеющая	рис. 1, <i>б</i>	40	6	7,95	-
4	ПЖ 1	рис. 1, <i>в, г</i>	43	4	6,50	21,4
5	ПЖ 2	рис. 1, <i>в, г</i>	43	4	6,38	20,6
6	ПЖ 3	рис. 1, <i>в, г</i>	43	4	5,75	18,7

СР УВ (продольной или поперечной) определяли по формуле:

$$c = \frac{h}{t_{изм} - t_o}, \quad (4)$$

где $t_{изм}$ – измеряемое время; t_o – систематическая погрешность измерений.

В резонансном методе возбуждали в образцах вынужденные ультразвуковые колебания и определяли первую резонансную частоту. Структурная схема измерений показана на рис.3.

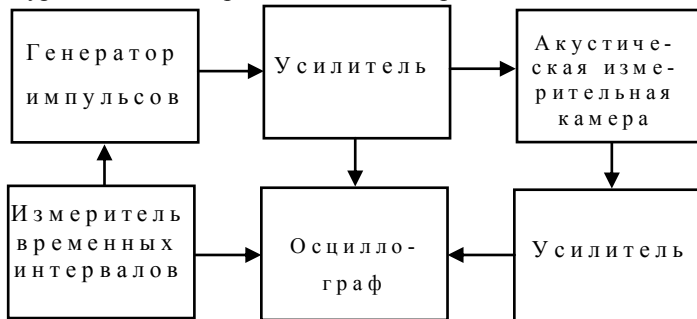


Рис. 2 — Структурная схема измерений СР УВ импульсным методом

По резонансной частоте f , рассчитывали СР УВ в стержне [3], по формуле:

$$c_{cm} = \frac{f}{2l}, \quad (5)$$

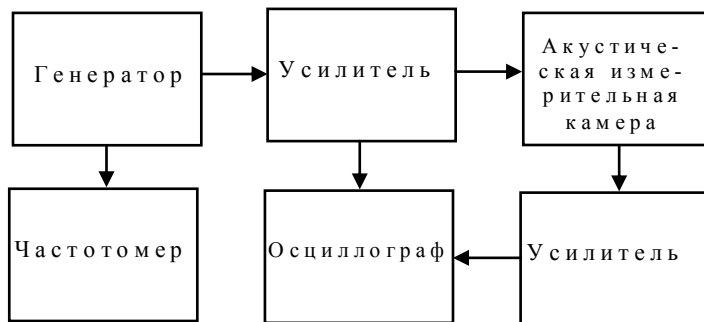


Рис. 3 — Структурная схема измерений СР УВ резонансным методом

Погрешность определения СР УВ в исследуемых образцах для обоих методов не превышала 0,5 %, а модулей упругости – 1 %.

Результаты измерений СР УВ двумя методами для образцов из разных материалов и соответствующие значения модулей упругости приведены в табл. 4.

Сопоставление экспериментальных результатов (табл. 4) с расчётными (табл. 2) показывает хорошее совпадение между ними для всех материалов.

Таблица 4 – Результаты измерений

Материал	$c_t, 10^3$ м/с	$c_s, 10^3$ м/с	$c_{cm}, 10^3$ м/с	$E_{имп},$ ГПа	$G,$ ГПа	ν	$E_{рез},$ ГПа
Оргстекло	2,68	1,10	1,99	3,96	1,43	0,40	4,67
Сталь углеродистая	5,95	3,14	5,17	202,0	77,3	0,306	208,8
Сталь нержавеющая	5,56	2,97	4,86	182,3	70,1	0,30	187,4
ПЖ 1	4,47	2,63	4,42	100,7	39,7	0,25	112,1
ПЖ 2	4,42	2,61	4,20	99,5	43,5	0,25	112,3
ПЖ 3	4,94	2,85	4,32	113,1	52,9	0,30	121,2

Большое расхождение результатов между оценочными (табл. 1) и экспериментальными (табл. 4) значениями для ПЖ указывает на несовершенство расчётных моделей, отображаемых формулами (3).

Сопоставление экспериментальных результатов по рассматриваемым методам показывает, что динамические модули упругости, определённые импульсным и резонансным методами, отличаются для сталей не более, чем на 3 %, для ПЖ – не более, чем на 7-12 %, в зависимости от пористости, а для оргстекла – на 15 %.

Анализ полученных результатов позволяет выделить следующие тенденции, приводящие к увеличению разницы между величинами модулей упругости, определяемых импульсным и резонансным методами. Во-первых, это увеличение коэффициента Пуассона. Во-вторых, – увеличение неоднородности материала, приводящее к неодинаковым условиям взаимодействия УВ с его элементами структуры для разных методов. Эта неодинаковость может быть обусловлена различными механизмами, например распределением напряжений внутри материала [12] или более высоким на частотах импульсного метода затуханием вследствие рассеяния и поглощения УВ на элементах структуры [5].

Выводы. В результате расчётов по известным справочным данным, а так же экспериментального определения импульсным и резонансным методами характеристик упругости различных материалов, как широко используемых, так и обладающих специальными свойствами, установлено, что разница между получаемыми по этим методам величинами

модуля упругости изменяется в зависимости от свойств материала и может достигать 15 %.

Поскольку метод измерений не должен влиять на объективные значения характеристик упругости материала, следует искать пути совершенствования методов измерений. Один из таких путей может быть связан с адаптацией метода измерений к исследуемому материалу.

Список литературы: 1. Физические величины: Справочник / Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с. 2. Францевич И. Н., Воронцов Ф. Ф., Бакута С. А. Упругие постоянные и модули упругости металлов и неметаллов. Справочник – К.: Наукова думка, 1982. – 285 с. 3. Ультразвук. Маленькая энциклопедия. Глав. ред. И. П. Голямина. – М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с. 4. Безымянный Ю. Г. Возможности акустических методов при контроле структуры и физико-механических свойств пористых материалов // Порошковая металлургия. – 2001. № 5-6. – С 23-33. 5. Безымянный Ю. Г. Акустическое отображение материалов, изготовляемых методами порошковой металлургии. // Акустичний вісник. – т. 9. № 2. – 2006. – С 3–16. 6. Ландау Л. Д., Лившиц Е. М. Теория упругости. – М., 1965. 7. Шутилов В. А. Основы физики ультразвука. – Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1980. – 280 с. 8. Алешин А. П., Белый В. Е., Вopilкин А. Х. и др. Методы акустического контроля металлов. – М.: Машиностроение, 1989. – 456 с. 9. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник. / Под ред. В. В. Клочова. – М.: Машиностроение, 2003. – 656 с. 10. Роман О. В., Скороход В. В., Фридман Г. Р. Ультразвуковой и резистометрический контроль в порошковой металлургии. – Мн.: Выssh. shk., 1989. – 182 с. 11. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. – М.: Мир, 1972. – 302 с. 12. Машиностроение: Энциклопедический справочник: В 15 т. / под общ. ред. Е. А. Чудакова. Т. 4: Материалы машиностроения. – М.: Госуд.н.-т. из-во машиностроительной литературы, 1947. – 429 с.

Bibliography (transliterated): 1. Grigor'eva I. S., Mejlilova. E. Z. *Fizicheskie velichiny: Spravochnik*. Moscow.: Jenergoatomizdat, 1991. 2. Francevich I. N., Voronov F. F., Bakuta S. A. *Uprugie postojannye i moduli uprugosti metallov i nemetallov. Spravochnik*. Kiev.: Naukova dumka, 1982. 3. *Ul'trazvuk. Malen'kaja jenciklopedija*. Ed. Goljamina. I. P. Moscow.: Sovetskaja jenciklopedija, 1979. 4. Bezimyanniy Y. G. *Vozmozhnosti akusticheskikh metodov pri kontrole struktury i fiziko-mehaničeskikh svojstv poristykh materialov // Poroshkovaja metallurgija*. No 5-6. – 2001. 23-33. Print. 5. Bezimyanniy Y. G. *Akusticheskoe otobrazhenie materialov, izgotovljaemykh metodami poroshkovoj metallurgii. // Akustichnij visnik*. No 2. – 2006. 3–16. Print. 6. Landau L. D., Livshic E. M. *Teorija uprugosti*. Moscow., 1965. 7. Shutilov V. A. *Osnovy fiziki ul'trazvuka*. Izd-vo Leningradskogo un-ta, 1980. 8. Aleshin A. P., Belyj V. E., Vopilkin A. H. *Metody akusticheskogo kontrolja metallov*. Moscow.: Mashinostroenie, 1989. 9. *Nerazrushajushij kontrol' i diagnostika: Spravochnik*. / V. V. Kljuev. Moscow.: Mashinostroenie, 2003. 10. Roman O. V., Skorohod V. V., Fridman G. R. *Ul'trazvukovoj i rezistometricheskij kontrol' v poroshkovoj metallurgii*. Mn.: Vyssh. shk., 1989. 11. Trujell R., Jel'baum Ch., Chik B. *Ul'trazvukovyje metody v fizike tverdogo tela*. Moscow.: Mir, 1972. 12. Chudakov E. A. *Mashinostroenie: Jenciklopedičeskij spravochnik: V 15 t.* / Vol. 4: *Materialy mashinostroenija*. – Moscow: Gosud.n.-t. iz-vo mashinostroitel'noj literatury, 1947. Print.

Поступила (received) 02.06.2014

Й. І. СТЕНЦЕЛЬ, докт. техн. наук, проф. ТІ СНУ ім.В.Даля,
Севєродонецьк;
С. П. ПАВЛОВ, докт. техн. наук, проф. ВНТУ, Вінниця;
К. А. ЛІТВІНОВ, магістрант ТІ СНУ ім. В.Даля, Севєродонецьк

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ БІОЛОГІЧНОГО ОРГАНІЗМУ

На основі результатів клінічних досліджень температурних змін здорової та хворої людини, принципів реологічних переходів кількості теплової енергії та методу нульового градієнта розроблені математичні моделі термодинамічних процесів біологічного організму. Показані причини зміни термодинамічного поля здорової та хворої людини. На амплітуду зміни температури чинить вплив температура організму та час кровообігу, а також витрата крові.

Ключові слова: температура, градієнт, амплітуда, швидкість, інфекція, захворювання, кровоносна система, біологічний організм, витрата, реологічний перехід, теплова енергія.

Вступ. Біологічні організми (БО) у своїй більшості відносяться до теплокровних, для котрих характерним є наявність температурного поля, котре стабілізується за рахунок кровоносної системи. За нормальну температуру людського організму прийнята температура від $T_0 = 36,4^0C$ до $36,6^0C$. Вимірювання температури виконується в кожного хворого. Воно дає можливість виявити лихоманний стан і має велике значення для діагностики захворювань [1]. Стабілізація температурного поля БО здійснюється біологічною системою регулювання, об'єктом керування якої є кровоносна система. Джерелом теплової енергії є шлунково-кишкова система, котра за рахунок біохімічних перетворень формує теплову енергію, яка передається шляхом теплоперенесення через стінки розгалуженої судинної системи до крові. Так як можливість такого джерела в БО є достатньо обмеженою, то зберігання теплового балансу здійснюється за рахунок зовнішньої системи енергозбереження. Збільшення температури БО може здійснюватися за рахунок появи додаткових як внутрішніх так і зовнішніх джерел теплової енергії, наприклад, за рахунок вірусного накопичення, опікового чи хімічного враження поверхні організму, внутрішніх біохімічних процесів, обумовлених тими чи іншими захворюваннями тощо. Зменшення температури БО, як правило, обумовлене, порушенням теплового балансу з навколишнім середовищем і

захворюваннями судинної системи. Особливу роль в стабілізації температурного режиму БО відіграє центральна нервова система. Вона фактично забезпечує зворотний зв'язок за температурою, організовує порівняння з нормованим значенням, визначає неузгодженість між цими сигналами і видає сигнал на зміну роботи джерела теплової енергії. Якщо ця система дає відхилення від норми, то це призводить або до відчуття надмірної температури БО, або до зменшення чутливості до її зміни. Для БО, в тому числі й для людського, є притаманне зовнішнє температурне поле, яке охоплює всю зовнішню його поверхню. Як вказується в [2], при фізичній діагностиці стану здоров'я людини вимірювальний контроль температури виконується не тільки в певних її точках, але й шляхом оцупування тих чи інших зовнішніх елементів (наприклад, суглобів) або за зміною фотометричного стану (забарвлення) ділянок тіла. Значно менше в медичній практиці для діагностики стану здоров'я людини користуються методом температурної аури – розподіленням температурного поля за периметром організму. У науковій літературі такий метод називається методом пограничного шару [3-5]. Як і в нагрітих тілах, у БО за рахунок гравітаційних сил створюються теплові потоки, а відповідно й товщина теплового шару. Але на відміну від температурних полів неорганічних матеріалів у біологічному організмі можуть спостерігатися різноманітні форми їх зміни, про що свідчить зміна температури зранку та вечором, температури здорового та хворого БО в залежності від типу захворювання, температури з другорядними ефектами – відчуття жари при низькій та холододу при високій температурі, потовиділення тощо. Як показано в [1], кожне відхилення температури організму від нормальної при наявності додаткових показників зміни теплової енергії свідчить про наявність того чи іншого захворювання, а швидкість зміни термодинамічних показників – про ступінь поглиблення захворювання людини, або ступінь її видужування. У клінічній практиці використовуються дві джокерні точки контролю за температурою тіла людини: як правило, ранкова джокерна точка в межах від 7 до 9 години та вечірня – від 16 до 20 годин. За отриманими таким чином температурними точками будують ломану лінію, яка називається температурною кривою. Як правило, в першій джокерній точці температура є нижчою, від температури другої джокерної точки. На протязі дня (приблизно 12 годин) температура зростає, а на протязі ночі – спадає. Температурні добові криві навіть для здорової людини можуть мати різні форми як показано на рис. 1. Характерною ознакою температурного поля умовно здорового організму є практично незмінна амплітуда коливань температури,

наприклад, в межах від 0,3 до 0,5 °С на протязі достатньо великого часу. У період між джокерними точками термодинамічні зміни БО, як правило, не вивчаються і не використовуються для діагностування стану здоров'я. На рис. 2 показані температурні криві, котрі отримані через кожні 4 години на протязі доби. З рисунків видно, що джокерні (управляючі) точки не повністю відображають характер добової зміни організму, що іноді приводить до не зовсім правильного діагнозу процесу захворювання особливо на початковому його стані. Кожний тип температурної кривої характеризує те чи інше захворювання, його складність і багато інших особливостей причин зміни температури організму. Як правило, зміна температури людини є наслідком порушення роботи того чи іншого органу, який іноді важко визначити за загальним температурним показником.

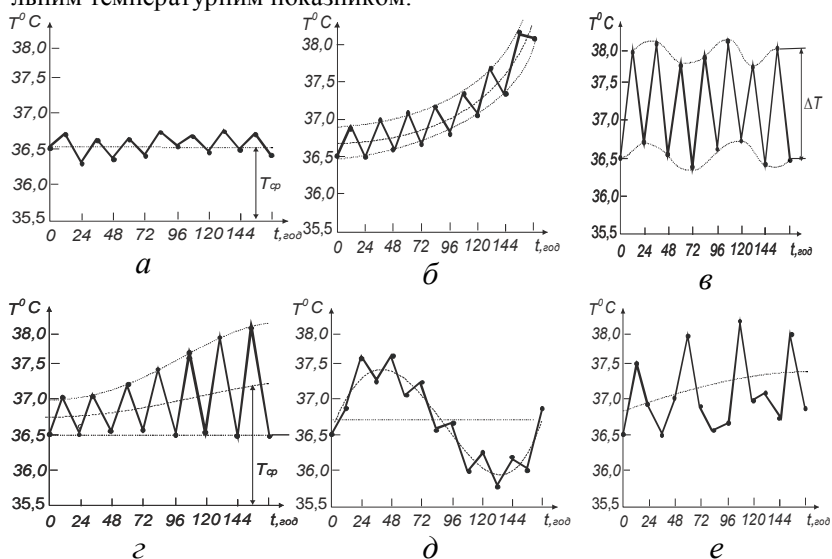


Рис. 1 – Типи температурних кривих людини в залежності від характеру добового коливання температури: *а* – температура здорової людини; *б* – прогресуюча параболічна температура параболічного типу; *в* – гектична зміна температури; *г* – прогресуюча параболічно-гектична температура; *д* – хвилеподібна зміна температури; *е* – гектично-параболічна зміна температури

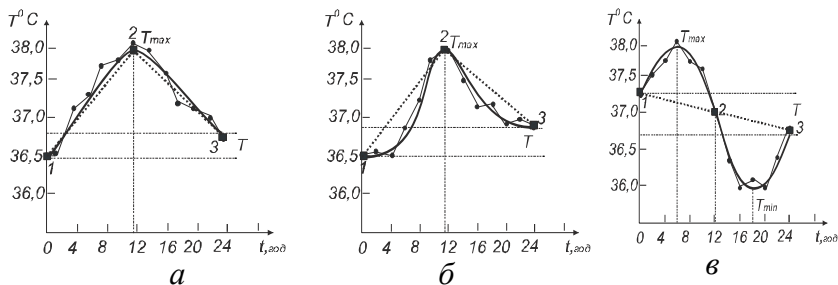


Рис. 2 – Типи температурних кривих в залежності від характеру чотирьохгодинного коливання температури: а – інтегральна зміна температури першого порядку; б – інтегральна зміна температури високого порядку; в – коливальна зміна температури

Зміна температурного поля БО тісно пов'язана з масообмінними та біохімічними процесами, котрі протікають в хворому органі, і характеризуються багатьма фізико-хімічними параметрами [2]. Окрім того, появляються термодинамічні процеси, котрі характеризуються швидкістю перенесення теплової енергії. Так як зміна температури є рушійною силою, то для БО вона приводить, по-перше, до зміни швидкості масоперенесення та біохімічних процесів організму в цілому. Тому вивчення термодинамічних процесів людини є одним із основних напрямків для створення нових принципів діагностування. Метою статті є теоретичне описання термодинамічного поля біологічного організму при наявності в ньому реологічних переходів, котрі супроводжуються біохімічними процесами.

Постановка задачі. Як показано в [3], всі термодинамічні процеси жорстко пов'язані з біохімічними перетвореннями за рахунок інфекційних або інших захворювань. Такий процес у загальному випадку описується наступним диференціальним рівнянням

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left[\frac{\partial T_P}{\partial \theta} + \frac{q_P}{c_P \rho V_P} z \exp(-E / RT_P) \right] = \text{div} \left(\frac{\lambda}{c_P \rho} \text{grad } T_P + v T_P \right), \quad (1)$$

- де T_P - поточна температура біохімічного перетворення;
 c_P - питома теплоємність біологічного середовища;
 ρ - щільність середовища;
 θ - час теплоперенесення джерела теплової енергії (біохімічного перетворення);
 λ - коефіцієнт теплопровідності середовища;

q_p - кількість теплоти, яке виділяється при хімічному перетворенні;

z - експоненціальний коефіцієнт;

E - енергія активації біохімічної реакції;

R - універсальна стала;

V_p - об'єм біохімічного перетворення;

v_p - лінійна швидкість перенесення теплової енергії.

Після диференціювання рівняння (1) за змінними і часом біохімічного перетворення отримуємо

$$\left[\frac{\partial^2 T_p}{\partial \theta^2} + \frac{z}{c_p \rho V_p} \frac{\partial q_p}{\partial \theta} \exp(-E / RT_p) + \left(\frac{q_p z}{c_p \rho V_p} \frac{E}{RT_p^2} \right) \frac{\partial T_p}{\partial \theta} \exp(-E / RT_p) \right] = \text{div} \left(\frac{\lambda}{c_p \rho} \text{grad } T_p + v T_p \right) \quad (2)$$

Приймаючи до уваги, що $\frac{\partial T_p}{\partial \theta} = \frac{1}{c_p \rho V_p} \frac{dq}{d\theta}$, а

$\frac{\partial^2 T_p}{\partial \theta^2} = \frac{1}{c_p \rho V_p} \frac{d^2 q}{d\theta^2}$, де q - кількість теплової енергії, яка переноситься від джерела тепла потоком з температурою T_p , рівняння (2) приймає наступну форму

$$\frac{d^2 q}{d\theta^2} + z \frac{\partial q_p}{\partial \theta} \exp(-E / RT_p) + \left(\frac{q_p z}{c_p \rho V_p} \frac{E}{RT_p^2} \right) \frac{dq}{d\theta} \exp(-E / RT_p) = c_p \rho V_p \text{div} \left(\frac{\lambda}{c_p \rho} \text{grad } T_p + v T_p \right) \quad (3)$$

Якщо $\frac{dq}{d\theta} = \frac{\partial q_p}{\partial \theta}$, то

$$\frac{d^2 q}{d\theta^2} + \left[1 + \frac{q_p}{c_p \rho V_p} \frac{E}{RT_p^2} \right] z \exp \left(- \frac{E}{RT_p} \right) \frac{\partial q_p}{\partial \theta} = c_p \rho V_p \text{div} \left(\frac{\lambda}{c_p \rho} \text{grad } T_p + v T_p \right) \quad (4)$$

Позначимо $\frac{1}{\tau_p} = z \left(1 + \frac{q_p}{c_p \rho V_p} \frac{E}{RT_p^2} \right) \exp \left(-\frac{E}{RT_p} \right)$. Тоді рівняння (4)

спрощується й приймає таку форму

$$\tau_p \frac{\partial^2 q_p}{\partial \theta^2} + \frac{\partial q_p}{\partial \theta} = \frac{v_p \lambda V_p}{a} \left(\frac{a}{v_p} \frac{\partial^2 T_p}{\partial x^2} + \frac{\partial T_p}{\partial x} \right), \quad (5)$$

де τ_p - стала часу процесу створення теплової енергії за рахунок біохімічного перетворення; x - напрямок перенесення теплової енергії.

Математичні моделі термодинамічних процесів. У біологічному організмі перенесення теплової енергії здійснюється, як правило, за рахунок кровоносної системи. Основний кровоносний потік здійснюється аортою з об'ємною витратою $F_A = v_A S_A = \pi D_A^2 v_A$, де v_A - лінійна швидкість крові в аорті; S_A - поперечний перетин аорти; D_A - умовний її діаметр. Нехай лінійна швидкість v_p перенесення теплової енергії від інфікованої ділянки БО до потоку крові є пропорційною лінійній швидкості v_A руху крові, тобто $v_p = k_A v_A$, де k_A - коефіцієнт пропорціональності, який залежить від місця захворювання організму. Якщо у місці захворювання (наприклад, внутрішні органи) є багато кровоносних судин, то коефіцієнт k_A збільшується. Швидкість v_A руху крові в аорті можна визначити за формулою: $v_A = F_A / \pi D_A^2$. Якщо прийняти, що лінійна швидкість $v_A = L / \mathcal{G}$, де L - умовна довжина кровоносної системи; \mathcal{G} - час перенесення крові в організмі, то $x = k_A v_A \mathcal{G} = k_A F_A \mathcal{G} / \pi D_A^2$. Для кожної людини час \mathcal{G} є індивідуальний і залежить від структури кровоносного розгалуження, його еквівалентного діаметру, тиску наповнення і фізико-хімічних параметрів крові. Враховуючи сказане, рівняння (5) запишемо в такій формі

$$\tau_p \frac{d^2 q}{d\theta^2} + \frac{\partial q_p}{\partial \theta} = \left(\frac{\pi}{k_A} \right) \left(\frac{\lambda}{a} \right) \left(\frac{V_p}{\mathcal{G}} \right) \left(\frac{L D_A^2}{\mathcal{G}} \right) \left[\left(\frac{\pi}{k_A} \right) \left(\frac{a}{L v_A} \right) \left(\frac{L D_A^2}{\mathcal{G}} \right) \frac{\partial^2 T_p}{\partial F_A^2} + \frac{\partial T_p}{\partial F_A} \right] \quad (6)$$

Аналізуючи рівняння (6) з точки зору розмірності, можна зробити наступні висновки. Добуток $\left(\frac{\lambda}{a} \right) \left(\frac{V_p}{\mathcal{G}} \right) = \frac{\Delta q_p}{\Delta T_p} = \frac{d q_p}{d T_p} = K_q = const$ - є градієнтом зміни теплової енергії, яка викликає відповідну зміну температури нагріву крові (можна прийняти, що для даного БО є сталим);

відношення $LD_A^2/\mathcal{G} = F_{A0}$ - об'ємна витрата крові в кровоносній системі здорової людини; $L\nu_A = a_0$ - коефіцієнт температуропровідності кровоносної системи здорової людини; $a/a_0 = \delta_a$ - відносне значення температуропровідності. З врахуванням обумовленого, рівняння (6) приймає вигляд

$$\tau_P \frac{d^2 q}{d\theta^2} + \frac{\partial q_P}{\partial \theta} = \frac{\pi K_q F_{A0}}{k_A} \left[\frac{\pi \delta_a F_{A0}}{k_A} \frac{\partial^2 T_P}{\partial F_A^2} + \frac{\partial T_P}{\partial F_A} \right]. \quad (7)$$

Рівняння (7) описує процес захворювання біологічного організму, в результаті чого збільшується кількість теплової енергії, а відповідно, підвищується його температура. Аналізуючи рівняння (7), можна зробити наступні висновки:

1. У результаті захворювання проходить біохімічний процес, який супроводжується виділенням теплової енергії в часі θ тривалості хвороби, котра переноситься в організмі кровоносною системою.

2. Ступінь захворювання K_q визначається об'ємною витратою теплової енергії, яка переноситься від інфекційної частини організму і залежить від сталої τ_P біохімічної реакції, а також від часу \mathcal{G} кровообігу крові в кровоносній системі.

3. Швидкість підвищення температури організму залежить від об'ємної витрати F_{A0} крові в кровоносній системі, від відносного значення температуропровідності хворого та здорового організму. .

Рівняння (7) запишемо таким чином

$$\tau_{2P}^2 \frac{d^2 q_P(\theta)}{d\theta^2} + \tau_{1P} \frac{\partial q_P(\theta)}{\partial \theta} = \frac{\pi \delta_a F_{A0}}{k_A} \frac{\partial^2 T_P(\mathcal{G}, F_A)}{\partial F_A^2} + \frac{\partial T_P(\mathcal{G}, F_A)}{\partial F_A}, \quad (8)$$

де $\tau_{2P}^2 = \frac{k_A}{\pi K_q F_{A0}} \tau_P^2$; $\tau_{1P} = \frac{k_A}{\pi K_q F_{A0}}$ - сталі часу.

З (8) випливає, що права його частина описує кількість теплової енергії, котра передається від інфікованої частини організму до інших його частин. Так як рівняння (8) є оптимізаційним, котре визначає рівність теплової енергії, котра виділяється в результаті біохімічного процесу і виводиться з інфікованого об'єму. Таке рівняння згідно з теорією реологічних переходів можна описати наступною системою диференціальних рівнянь:

$$\frac{\pi\delta_a F_{A0}}{k_A} \frac{\partial^2 T_P(\vartheta, F_A)}{\partial F_A^2} + \frac{\partial T_P(\vartheta, F_A)}{\partial F_A} = -\frac{T_P(\vartheta, F_A)}{F_{A0}}; \quad (9)$$

$$\tau_{2P}^2 \frac{\partial^2 q_P(\theta)}{d\theta^2} + \tau_{1P} \frac{\partial q_P(\theta)}{\partial \theta} + q_P(\theta) = 0, \quad (10)$$

де $q_{0P}(\theta, F_{A0})$ - кількість теплової енергії, яка передається кровоносній системі здорової людини.

Рівняння (9), яке описує процес перенесення температури від інфекційної ділянки тіла до кровоносної системи, запишемо таким чином

$$\frac{\pi\delta_a F_{A0}^2}{k_A} \frac{\partial^2 T_P(\vartheta, F_A)}{\partial F_A^2} + F_{A0} \frac{\partial T_P(\vartheta, F_A)}{\partial F_A} + T_P(\vartheta, F_A) = 0, \quad (11)$$

де T_{P0} - температура нагріву поразеної частини організму.

Так як кількість теплової енергії $\partial q(\theta) = c_P \rho F_A \partial T_P(\theta)$, то рівняння (10) можна записати таким чином

$$\tau_{2P}^2 \frac{\partial^2 T_P(\theta)}{d\theta^2} + \tau_{1P} \frac{\partial T_P(\theta)}{\partial \theta} + T_P(\theta) = T_{P0}. \quad (12)$$

У рівнянні (11) виконаємо наступне. Так як об'ємна витрата $F_A = V_K / \vartheta$, де V_K - об'єм крові в кровоносній системі, то, диференціюючи це рівняння за часом ϑ перенесення теплової енергії, отримуємо, що $\partial F_A = (V / \vartheta_0) \partial \vartheta$, де ϑ_0 - час кровообміну здорової людини. Враховуючи обумовлене, рівняння (11) приймає наступну форму

$$\tau_{2F}^2 \frac{\partial^2 T_P(\vartheta, F_A)}{\partial \vartheta^2} + \tau_{1F} \frac{\partial T_P(\vartheta, F_A)}{\partial \vartheta} + T_P(\vartheta, F_A) = 0, \quad (13)$$

де $\tau_{2F}^2 = \frac{\pi\delta_a F_{A0}^2 \vartheta_0^4}{k_A V_K^2}$; $\tau_{1F} = \frac{F_{A0} \vartheta_0^2}{V_K}$ - сталі часу перенесення теплової енергії кровоносною системою.

Як показує рівняння (13), процес перенесення температури $T_P(\vartheta, F_A)$, яка формується тепловим потоком хворої ділянки тіла, у залежності від об'ємної витрати крові в судинній системі описується градієнтним рівнянням другого порядку. Це свідчить про те, що в результаті зміни витрати крові F_A за рахунок теплопередачі проходить

нагрівання крові, у результаті чого збільшується температура організму. У залежності від зміни цієї витрати температура крові може приймати як аперіодичний, так і коливальний характер. Якщо врахувати, що поточна температура $T_p(\vartheta, F_{A0}) = T_p[(\vartheta_0 \pm \Delta\vartheta), F_{A0}]$, то рішення рівняння (11) може приймати наступні форми:

- аперіодичний характер зміни температури

$$\Delta T_p(\vartheta, F_{A0}) = \Delta T_p(\theta) \left\{ \begin{aligned} &1 - \frac{p_1}{p_2 - p_1} \exp[-p_1 k_X (\vartheta_0 \pm \Delta\vartheta)] + \\ &+ \frac{p_2}{p_2 - p_1} \exp[-p_2 k_X (\vartheta_0 \pm \Delta\vartheta)] \end{aligned} \right\}; \quad (14)$$

- коливальний характер зміни температури

$$\Delta T_p(\vartheta, F_{A0}) = \Delta T_p(\theta) \left\{ \begin{aligned} &1 - \exp[-\alpha k_X (\vartheta_0 \pm \Delta\vartheta)] \cos[\omega k_X (\vartheta_0 \pm \Delta\vartheta)] + \\ &+ \frac{\alpha}{\omega} \sin[\omega k_X (\vartheta_0 \pm \Delta\vartheta)] \end{aligned} \right\}; \quad (15)$$

- критичний характер зміни температури

$$\Delta T_p(\vartheta, F_{A0}) = \Delta T_p(\theta) \left\{ 1 - \frac{k_X (\vartheta_0 \pm \Delta\vartheta)}{\tau_{2F}} \exp\left[-\frac{k_X (\vartheta_0 \pm \Delta\vartheta)}{\tau_{2F}}\right] \right\}, \quad (16)$$

де $p_{1,2} = -\frac{\tau_{1F}}{2\tau_{2F}^2} \pm \sqrt{\left(\frac{\tau_{1F}}{2\tau_{2F}^2}\right)^2 - \frac{1}{\tau_{2F}^2}}$ - корені характеристичного рівняння;

$\alpha_F = \frac{\tau_{1F}}{2\tau_{2F}^2}$ - ступінь загасання;

$\omega_F = \sqrt{\frac{1}{\tau_{2F}^2} - \left(\frac{\tau_{1F}}{2\tau_{2F}^2}\right)^2}$ - власна частота коливань;

k_X - характерний коефіцієнт типу лихорадки.

Як показують експериментальні дослідження (рис. 1), температурні криві мають коливальний характер. Тому можна вважати, що відношення сталих часу τ_{1p} / τ_{2p} є завжди більше двох., тобто температурний процес є коливальним з більшою або меншою амплітудою T_{p0} . Період коливання зміни температури є практично однаковим і можна

рахувати, що він дорівнює 12 годинам. При наступних початкових умовах: $\theta = 0$ $T_p(0) = 0$, при $\theta \rightarrow \infty$ $T_p(\infty) = T_p(\vartheta, F_{A0})$ рішенням рівняння (12) буде:

$$\Delta T_p(\theta) = T_{p0} [1 - \exp(-\alpha_T \theta) \cos(\omega_T \theta)], \quad (17)$$

де $\alpha_T = -\tau_{1p} / 2\tau_{2p}^2$ - ступінь загасання амплітуди температурного поля;

$$\omega_T = \sqrt{\frac{1}{\tau_{2p}^2} - \left(\frac{\tau_{1p}}{2\tau_{2p}^2}\right)^2} \quad \text{- власна частота коливань.}$$

З врахуванням (17) математичні моделі температурних кривих мають вигляд:

1. Для здорового організму при нормальній температурі T_{p0}

$$\Delta T_p(\theta) = T_{p0} \left\{ 1 - \frac{p_1}{p_2 - p_1} \exp[-p_1 k_X \vartheta_0] + \frac{p_2}{p_2 - p_1} \exp[-p_1 k_X \vartheta_0] \right\}^* \cdot \exp(-\alpha_T \theta) \cos(\omega_T \theta) \quad (18)$$

2. Для хворої людини з підвищеною температурою тіла і сталою її зміною в часі

$$\Delta T_p(\Delta \vartheta, \theta) = T_{p0} \left\{ \begin{aligned} & 1 - \frac{p_1}{p_2 - p_1} \exp[-p_1 k_X (\vartheta_0 - \Delta \vartheta)] - \\ & - \frac{p_2}{p_2 - p_1} \exp[-p_1 k_X (\vartheta_0 - \Delta \vartheta)] \end{aligned} \right\}^* \cdot \exp(-\alpha_T \theta) \cos(\omega_T \theta) \quad (19)$$

3. Для хворої людини з підвищеною температурою тіла і наростаючим характером її зміни в часі

$$\Delta T_p(\Delta \vartheta, \theta) = T_{p0} \left\{ \frac{k_X (\vartheta_0 - \Delta \vartheta)}{\tau_{2F}} \exp \left[-\frac{k_X (\vartheta_0 - \Delta \vartheta)}{\tau_{2F}} \right] \right\}^* \cdot \exp(-\alpha_T \theta) \cos(\omega_T \theta) \quad (20)$$

4. Для хворої людини з коливальною наростаючою зміною температури

$$\Delta T_P(\Delta \vartheta, \theta) = T_{P0} \left\{ \begin{aligned} &1 - \exp[-\alpha_F k_X (\vartheta_0 - \Delta \vartheta)] \cos[\omega_F k_X (\vartheta_0 \pm \Delta \vartheta)] + \\ &+ \frac{\alpha_F}{\omega_F} \sin[\omega_F k_X (\vartheta_0 - \Delta \vartheta)] \end{aligned} \right\}^* \quad (21)$$

$$* \exp(-\alpha_T \theta) \cos(\omega_T \theta)$$

5. Для хворої людини з коливальною зміною температури та практично сталою її амплітудою

$$\Delta T_P(\Delta \vartheta, \theta) = T_{P0} \{ 1 - \exp[-\alpha_F k_X (\vartheta_0 - \Delta \vartheta)] \cos[\omega_F k_X (\vartheta_0 - \Delta \vartheta)] \}^* \quad (22)$$

$$* \exp(-\alpha_T \theta) \cos(\omega_T \theta)$$

Тривалість часу ϑ_0 кровообігу для кожної людини є індивідуальним, від якого залежить амплітуда коливання температури особливо хворої людини. У середньому цей час визначається об'ємом крові в організмі та параметрами роботи серця – об'ємом крові ν_{li} [мл], який виштовхується в аорту за 1 такт і кількістю тактів N_i роботи серця за хвилину. Таким чином, об'ємну витрату крові в i -ому організмі можна визначити за формулою: $F_{iK} = 0,06 \nu_{li} N_i$ [м³/год]. Якщо об'єм крові в i -ому організмі дорівнює V_{0i} , то час кровообігу $\vartheta_{0i} = 16,7 V_{0i} / \nu_{li} N_i$ [год]. При підвищенні температури організму швидкість кровообігу збільшується, що приводить до зменшення часу ϑ на величину $\Delta \vartheta$, а відповідно до збільшення швидкості перенесення теплової енергії. Таким чином створюється ефект позитивного зворотного зв'язку, котрий приводить до ще більшої температури тіла, як показано на рис. 1 б, з і е.

Висновки. Розглянуті теоретичні основи процесів теплоперенесення в біологічному організмі при умові, що останнє знаходиться в деякому середовищі з ідеальними теплоізолюючими властивостями. Теплова енергія, яка виділяється в результаті біохімічної реакції в тій чи іншій частині організму, розповсюджується за рахунок реологічних переходів через стінки кровоносних судин до потоку крові та рівномірно розноситься по всьому його об'ємі. При цьому приймалося, що теплова енергія від її джерела (вражена область організму) накопичується в об'ємі кровоносної системи та рівномірно в часі передається мускульній та іншій частині організму. Так як вимірювальний контроль температури здійснюється через значні проміжки часу (приблизно через 12 годин), то приймалося, що її значення на поверхні тіла (у певних її місцях) приблизно дорівнює температурі крові. За аналогією з хімічними процесами біохімічні реакції теж можна характеризувати

енергією біологічної активації E , котра визначається ступенем взаємодії біологічної тканини з подразниками. Добова зміна температури організму здійснюється за косинусною формою незалежно від стану його здоров'я. Амплітуда коливань добової температури для здорового організму практично є сталою і визначається ступенем загасання температурного поля, котрий залежить від таких параметрів організму, як: градієнта зміни теплової енергії від температури $\partial q_p / \partial T_p$, об'ємної витрати F_{A0} крові в кровоносній системі, кількості поточної теплової енергії q_{p0} , котра виділяється в організмі, теплофізичних параметрів крові (як правило, теплоємності та густини), об'єму V_p кровоносної системи. Важливим параметром, який визначає амплітуду $\Delta T_p = T_{pp} - T_{pb}$, де T_{pp}, T_{pb} - ранкова та вечірня температури відповідно, зміни температури є час ϑ_0 кровообігу в організмі. Чим меншим є цей час, тим меншою є різниця між ранішньою та вечірньою температурами такого організму. Величина амплітуди ΔT_p залежить від номінальної температури T_{p0} організму. Чим нижчою є нормальна температура організму, тим меншою буде амплітуда ΔT_p . Збільшення амплітуди зміни температури при нормальному її значенні свідчить про початок захворювання організму (наприклад, інкубаційний період інфекційного захворювання, початок онкологічного чи серцево-судинного захворювання). При захворюванні, котре супроводжується зміною (збільшенням або зменшенням) температури організму відповідно збільшується або зменшується час кровообігу на величину $\Delta \vartheta = \vartheta_0 - \vartheta$, де ϑ - поточний час кровообігу. Якщо $\Delta \vartheta > 0$ збільшується перенесення теплової енергії, в результаті чого відчувається ефект «жари» навіть у тому випадку, коли температура тіла є близькою до нормальної. При $\Delta \vartheta < 0$ відчувається ефект «холоду» навіть у тому випадку, коли температура тіла є значно більшою від нормальної.

Список літератури. 1. Ремизов А. Я. Медицинская и биологическая физика. - М.: «Высшая школа». - 1987. - 638 с. 2. Препедевтика внутренних болезней / Под ред. В.Х. Василенко, А.Л. Гребенева, Н.Д. Михайловой. - М.: Медицина, 1974. - 528 с. 3. Стенцель Й. І., Зленко С. М., Павлов С. В. Фізичне та математичне моделювання термодинамічних методів діагностики стану здоров'я людини. Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. Міжнародний науково-технічний журнал. №1 (25). - 2013. С. 66-73. 4. Хоблер Т. Теплопередача и теплообмнники. - М.: Медицина, 1974. - 528 с. 5. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. - М.: Машгиз, 1962. - 368 с. 6. Лыков А. В. и Михайлов Ю. А. Теория тепло-и массопереноса. - М.: Госэнергоиздат, 1963. - 389 с. 7. Де Гроот С., Мазур П. Неравновесная термодинамика. Пер. с франц. - М.: Мир, 1964, - 456 с. 8. Эжкерт Э. Р., Дрейк Р. М. Теория тепло-и массообмена. - М.: Госэнергоиздат, 1962. - 562 с. 9. Лыков А. В. Теория теплопроводности. - М.:

Высш. шк., 1967. – 599 с. **10.** Мак-Адамс В. Х. Теплопередача. Пер с англ.- М.: Металлургиздат, 1961. – 669 с. **11.** Таганов И. Н. Моделирование процессов массо- и энергопереноса. – Л.: Химия, 1979. – 203 с. **12.** Стенцель Й. И. Математичне моделювання технологічних об'єктів керування: Навч. посібник. – К.: ІСДО, 1993. – 328 с. **13.** Стенцель Й. И. Математичне моделювання хімічних процесів на основі теорії реологічних переходів. Вісник Східноук.нац університету. Науковий збірник. №5 (111), Ч.2.- 2007. – С. 91-97. **14.** Стенцель Й. И., Рябіченко А. В., Петросян Л. И., Літвінов К. А. Принципи реологічних переходів при діагностуванні роботи серцевої системи електрокардіологічним методом. Вісник НТУ «ХПІ» Збірник наукових праць. Серія «Енергоенергетика та перетворювальна техніка». №34(1007).- 2013. С. 24-32.

Bibliography (transliterated): **1.** Remizov A. Ja. *Medicinskaja i biologičeskaja fizika.* - Moscow. «Vysshaja shkola». – 1987. **2.** *Prepedevitka vnutrennih boleznij* /Pod red. V. H. Vasilenko, A. L. Grebeneva, N. D. Mihajlovoj. – Moscow: Medicina, 1974. **3.** Stencil' J. I., Zlepko S. M. end Pavlov S. V. "Fizy'chne ta matematy'chne modelyuvannja termody'namichny'x metodiv diagnosty'ky' stanu zdorov'ya lyudy'ny'". *Opy'ko-elektroenni informacijno-energety'chni tehnologii. Mizhnarodny'j naukovy'j zhurnal.* #1 (25). – 2013. 66-73. Print. **4.** Xobler T. *Teploperedacha y' teploobminny'ky'.* Per. s pol's. – L.: Gosxy'my'zdat, 1961. **5.** Kutateladze S. S. *Osnovy teorii teploobmena.* – . Moscow: Mashgiz, 1962. **6.** Lykov A. V. i Mihajlov Ju. A. *Teorija teplo-i massoperenosa.* – Moscow.: Gosjenergoizdat, 1963. **7.** De Groot S., Mazur P. *Neravnovesnaja termodinamika.* Per. S franc. – M.: Mir, 1964. **8.** Jekkert Je. R. end Drejk R. M. *Teorija teplo-i massoobmena.* - MG Moscow osjenergoizdat, 1962. **9.** Lykov A. V. *Teorija teploprovodnosti.* – Moscow.: Vyssh. shk., 1967. **10.** Mak-Adams V. H. *Teploperedacha.* Per s angl.- . Moscow: Metallurgizdat, 1961. **11.** Taganov I. N. *Modelirovanie processov masso- i jenergooperenosa.* – L.: Himija, 1979. **12.** Stencil' J. I. *Matematy'chne modelyuvannja tehnologichny'x ob'yektiv keruvannja:* Navch. posibny'k. – K.: ISDO, 1993. **13.** Stencil' J. I. "Matematy'chne modelyuvannja ximichny'x procesiv na osnovi teorii reologichny'x perexodiv." *Visny'k Sxidnouk.nacz universy'tetu. Naukovy'j zbirny'k.* #5 (111),.Ch.2.- 2007. – 91-97. Print. **14.** Stencil' J. I., Ryabichenko A. V., Petrosyan L. I, end Litvinov K. A. "Pry'ncy'p reologichny'x perexodiv pry' diagnostuvanni roboty' sercevoyi sy'stemy' elektrokardiologichny'm metodom." *Visny'k NTU «XPI» Zbirny'k naukovy'x prac'.* Seriya "Energoenergety'ka ta peretvoryval'na tehnika". #34(1007).- 2013. 24-32. Print.

Поступила (received) 30.05.2014

Й. І. СТЕНЦЕЛЬ, докт. техн. наук, проф. ТІ СНУ ім. В. Даля,
Северодонецьк;
С. М. ЗЛЕПКО, докт. техн. наук, проф. ВНТУ, Вінниця;
А. В. РЯБІЧЕНКО, канд. техн. наук, с.н.с. ТІ СНУ ім. В. Даля,
Северодонецьк

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТЕПЛОБМІННИХ ПРОЦЕСІВ ЛЮДИНИ ПРИ ЗОВНІШНЬОМУ СТОКУ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ

Виконані дослідження термодинамічних явищ в людському організмі, котрі обумовлені біохімічними та теплообмінними процесами. Показано, що процес перенесення теплової енергії за рахунок роботи серцево-судинної системи є коливальним, амплітуда яких визначається температурою біохімічних перетворень, а власна частота - роботою серця, станом судинної системи, а також процесом теплоперенесення в навколишнє середовище.

Ключові слова: термодинаміка, явище, організм, людина, серце, судини, коливання, частота, теплоперенесення, тепла енергія, захворювання.

Вступ. Для теплокровних біологічних організмів (БО) характерним є наявність температурного поля, яке проявляється у формі відповідної температурної аури, котра тісно пов'язана з електромагнітною аурою. Температурне та електромагнітне поле взаємодіють поміж собою, викликаючи стабілізацію першого. Така взаємодія полів пояснюється тим, що характер ламінарних потоків від БО значно відрізняються від таких же потоків твердих тіл неорганічного походження [1]. Наприклад, товщина зовнішнього ламінарного шару теплової енергії людини майже співпадає з товщиною електромагнітного шару - чим товщий тепловий шар людини, тим менше вона відчуває зміну температури навколишнього середовища: холод чи жару. Температурна аура (відповідно й електромагнітна) хворої людини є меншою, ніж здорової. Таким чином, за станом температурної чи електромагнітної аури, а фактично за товщиною зовнішнього ламінарного шару теплової енергії можна оцінювати стан здоров'я БО [2]. Відхилення товщини зовнішнього теплового ламінарного шару людини від інших тіл нагрітих до однакової температури можна пояснити тим, що зовнішнє теплове поле людини складається з двох складових: випромінюючого теплового поля, котре формується електромагнітним полем, і конвекційного, яке

формується за рахунок руху молекул навколишнього середовища, наприклад, повітря. Як вказувалося в [3], джерелом теплової енергії є шлунково-кишкова система, котра формує основний потік теплової енергії, та різного роду захворювання, котрі формують додаткову теплову енергію, яка приводить до підвищення температури тіла людини. Зберігання теплового балансу здійснюється за рахунок зовнішньої системи енергозбереження. Зменшення температури БО, як правило, обумовлене, порушенням теплового балансу БО з навколишнім середовищем і захворюваннями судинної системи. Як вказується в [4], при фізичній діагностиці стану здоров'я людини вимірювальний контроль температури виконується не тільки в певних її точках, але й шляхом оцупування тих чи інших зовнішніх елементів (наприклад, суглобів) або за зміною фотометричного стану (забарвлення) ділянок тіла. Значно менше в медичній практиці для діагностики стану здоров'я людини користуються методом температурної аури – розподіленням температурного поля за периметром організму.

Мета і постановка задачі. У науковій літературі такий метод називається методом пограничного шару [5-8]. У клінічній практиці температуру людини оцінюють за температурою в підпашовій ямці руки. З метою більш точного визначення температури виконують її вимірювання в прямій кишці. У цьому разі температура на $0,5-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ є вищою. Це пояснюється тим, що шкіряний шар являє собою зону реологічного переходу між температурою нагріву крові та зовнішньою температурою шкіри. Шкіряний шар відіграє значну роль в підтримуванні температури організму на відповідному рівні. Температура T_C навколишнього середовища не відчувається, коли різниця $\Delta T = T_C - T_O = 0$, де T_O - температура зовнішнього шкіряного шару. Якщо $\Delta T < 0$, то в людини настає відчуття «холоду», а при $\Delta T > 0$ - відчуття «тепла». Для здорової людини відчуття «холоду» призводить до підвищення температури в зоні реологічного переходу за рахунок розширення судин, а відповідно, до збільшення притоку крові, а при появі відчуття «тепла» - до розширення водовідвідних отворів шкіри, що призводить до так званого потовиділення. Як відомо [9, 10], збільшення виділення вологи з організму призводить до її випарювання, процес якого є ендотермічним, а відповідно зменшується температура зовнішньої поверхні шкіряного шару. Таким чином внутрішня температура організму залишається практично сталою. Інша картина спостерігається для хворої людини. Якщо прийняти, що температура навколишнього середовища є сталою і дорівнює нормальній зовнішній температурі організму, то при підвищеній його температурі T_p може відчуватися як стан «теп-

ла», так і стан «холоду». Теж саме можна спостерігати, коли температура T_P є нижчою, від нормальної T_{P0} . Вивчення процесів теплообміну між навколишнім середовищем і людським організмом є важливою задачею для діагностування стану здоров'я людини.

Основна частина. Як показано в [3], всі термодинамічні процеси людського організму пов'язані з біохімічними перетвореннями, які проходять в шлунково-кишковій системі та інфікованих його частинах. Такий процес у загальному випадку описується наступним диференціальним рівнянням

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left[\frac{\partial T_P}{\partial \theta} + \frac{q_P}{c_P \rho V_K} z \exp(-E/RT_P) \right] = \operatorname{div} \left(\frac{\lambda}{c_P \rho} \operatorname{grad} T_P + v T_P \right), \quad (1)$$

де T_P - поточна температура біохімічного перетворення;

c_P - питома теплоємність біологічного організму;

ρ - щільність середовища;

θ - час теплоперенесення від біохімічного джерела;

λ - коефіцієнт теплопровідності середовища;

q_P - теплота, яка виділяється при хімічному перетворенні;

z - коефіцієнт швидкості біохімічної реакції;

E - енергія; R - універсальна стала;

V_K - об'єм кровоносної системи;

v_P - лінійна швидкість перенесення теплової енергії.

Після відповідного перетворення та деякого спрощення рівняння (1) можна привести до наступної форми

$$\tau_P \frac{d^2 q_P}{d\theta^2} + \frac{\partial q_P}{\partial \theta} = -\frac{v_P V_K}{a S_K} \left(a_P \frac{\partial^2 T_P}{\partial x^2} + \frac{\partial T_P}{\partial x} \right), \quad (2)$$

де $\tau_P = \frac{1}{z} \frac{c_P \rho V_K R T_P^2}{c_P \rho V_K R T_P^2 + q_P E} \exp\left(\frac{E}{R T_P}\right)$ - стала часу біохімічного перетворення;

$a_P = \lambda / c_P \rho$ - узагальнена температуропровідність від джерела теплової

енергії до кровоносної системи;

x - координата перенесення теплової енергії.

Якщо прийняти, що вся створена в організмі тепла енергія рівномірно передається по всьому його об'єму, то можна вважати, що температура T_{P0} у всіх точках тіла організму дорівнює температурі T_P біохімічного перетворення. Кількість теплової енергії, котра передається від джерела до всіх ділянок тіла потоком крові з витратою F_K дорівнює: $\partial q_P = c_P \rho V_P \partial T_K$. Тоді рівняння (1) приймає наступну форму

$$\tau_P \frac{\partial^2 T_P}{\partial \theta^2} + \frac{\partial T_P}{\partial \theta} + a_P \frac{\partial^2 T_K}{\partial x^2} + v_P \frac{\partial T_K}{\partial x} = k_\gamma \gamma(t), \quad (3)$$

де T_K - температура організму;
 $\gamma(t)$ - функція швидкості стоку теплової енергії з поверхні тіла;
 k_γ - коефіцієнт передачі.

Як показано в [11-13], передача теплової енергії через стінку складається з кількості теплової енергії, яка накопичується в стінці та її кількості, котра передається в навколишнє середовище. Приймаючи до уваги, що такою стінкою є шкіра товщиною y , рівняння для швидкості стоку теплової енергії матиме вигляд

$$\gamma(t, y) = \tau_{2C} \frac{d^3 T_O}{dt^3} + \tau_{1C} \frac{d^2 T_O}{dt^2} + \frac{dT_O}{dt} + D_Y \frac{\partial^2 T_C}{\partial y^2} + v_k \frac{\partial T_C}{\partial y}, \quad (4)$$

де τ_{1C}, τ_{2C} - сталі часу стоку теплової енергії;
 D_Y - коефіцієнт дифузії в навколишнє середовище;
 y - напрямок руху теплового потоку від зовнішньої поверхні тіла;
 v_k - конвекційна складова швидкості стоку теплового потоку.

Враховуючи (4), рівняння (3) приймає наступний вигляд

$$\tau_P \frac{\partial^2 T_K}{\partial \theta^2} + a_P \frac{\partial^2 T_P}{\partial x^2} + v_P \frac{\partial T_P}{\partial x} = k_\gamma \left(\tau_{2C} \frac{d^3 T_O}{dt^3} + \tau_{1C} \frac{dT_O}{dt^2} + \frac{dT_O}{dt} + D_Y \frac{\partial^2 T_C}{\partial y^2} + v_k \frac{\partial T_C}{\partial y} \right). \quad (5)$$

Рівняння (5) є нелінійним і для його аналітичного розв'язку розглянемо наступні крайні умови. Виходячи з принципу рівності теплового балансу та методу нульового градієнта рахуватимемо, що кількість

теплової енергії, яка створюється в організмі людини (джерело енергії), дорівнює кількості теплової енергії, котра відводиться від джерела в об'єм тіла та рівна кількості тепла, котре відводиться з зовнішньої поверхні організму. При такому підході до даної задачі приймаємо, що кількість теплової енергії, котра забезпечує життєдіяльність організму є сталою величиною. При таких умовах рівняння (5) розділяється на наступну систему нелінійних диференціальних рівнянь:

$$a_P \frac{\partial^2 T_K}{\partial x^2} + v_P \frac{\partial T_K}{\partial x} + \tau_P \frac{\partial^2 T_P}{\partial \theta^2} = 0; \quad (6)$$

$$D_Y \frac{\partial^2 T_C}{\partial y^2} + v_k \frac{\partial T_C}{\partial y} + \tau_{2C}^2 \frac{d^3 T_O}{dt^3} + \tau_{1C} \frac{dT_O}{dt^2} = 0. \quad (7)$$

Довжина напрямку x практично повністю визначається об'ємною витратою F_K потоку крові в судинній системі. Таким чином можна записати, що $F_K \partial \vartheta = S_K \partial x$ або $\partial x = (F_K / S_K) \partial \vartheta$, де ϑ - час кровообігу в організмі (час стоку теплової енергії); S_K - еквівалентний поперечний перетин кровеносної системи. З врахуванням цього рівняння (6) приймає наступну форму

$$a_P \left(\frac{S_K}{F_K} \right)^2 \frac{\partial^2 T_K}{\partial \vartheta^2} + v_P \frac{S_K}{F_K} \frac{\partial T_K}{\partial \vartheta} + \tau_P \frac{\partial^2 T_P}{\partial \theta^2} = 0. \quad (8)$$

Якщо прийняти, що зміна процесу створення теплової енергії й зміна її перенесення потоком крові проходять одночасно, тобто $\partial \vartheta = \partial \theta$, а зміна температури ∂T_P біохімічного процесу приблизно дорівнює зміні температури ∂T_K крові в кровеносній системі, то рівняння (8) спрощується та набуває такого вигляду

$$\tau_T \frac{\partial^2 T_K(\vartheta)}{\partial \vartheta^2} + \frac{\partial T_K(\vartheta)}{\partial \vartheta} = 0, \quad (9)$$

де $\tau_T = \frac{a_P S_K^2 + \tau_P F_K^2}{(v_P S_K + F_K) F_K^2}$ - стала часу перенесення теплової енергії кровеносною системою.

Рішенням рівняння (9) при початкових умовах: $\theta = 0 \quad T_P(0) = T_{P0}$, а при $\theta = \infty \quad \frac{dT_P(\infty)}{d\theta} = 0$ буде

$$T_K(\vartheta) = T_{P0} \exp(-\vartheta/\tau_T) = T_{P0} \cos \left[-\frac{\vartheta F_K^2 (v_P S_K + F_K)}{a_P S_K^2 + \tau_P F_K^2} \right]. \quad (10)$$

Якщо лінійна швидкість крові $v_K = F_K/S_K$, то рівняння (10) приймає наступну форму

$$T_K(\vartheta) = T_{P0} \exp(-\vartheta/\tau_T) = T_{P0} \cos \left[-\frac{\vartheta \left[\left(\frac{v_P}{v_K} \right) + 1 \right]}{\tau_P \left(\frac{a_P}{\tau_P v_K^2} + 1 \right)} \right]. \quad (11)$$

Позначимо $\delta_v = v_P/v_K$, $a_K = \tau_P v_K^2$ - температуропровідність організму при перенесенні теплової енергії потоком крові, $\delta_a = a_P/a_K$. Тоді рівняння (11) набуває вигляду

$$T_K(\vartheta) = T_{P0} \cos \left[-\left(\frac{\vartheta}{\tau_P} \right) \frac{(\delta_v + 1)}{(\delta_a + 1)} \right]. \quad (12)$$

Враховуючи, що границі розділу «тіло-навколишнє середовище» зберігається відповідний тепловий баланс, який являє собою інтегральну імпульсну дельта-функцію Дірака з ядром, яке описується рівнянням (7), а також метод нульового градієнта, отримуємо таку систему рівнянь:

$$\tau_{2C}^2 \frac{d^2 T_O}{dt^2} + \tau_{1C} \frac{dT_O}{dt} + T_O = k_O T_K(\vartheta); \quad (13)$$

$$\frac{D_Y}{v_k} \frac{\partial^2 T_C(y,t)}{\partial y^2} + T_C(y,t) = k_C T_O(t). \quad (14)$$

де k_O, k_C - коефіцієнти передачі.

Рівняння (14) описує процес перенесення теплової енергії через шкіряний елемент, який являє собою зону реологічного переходу. При початкових умовах: $T_C(0,t) = T_O(t)$, $T_C(\infty,t) = T_{C0}$, де T_{C0} - температура навколишнього середовища, рішенням рівняння (13) буде

$$\Delta T_C(y,t) = [T_O(t) - T_{C0}] \cos(-y v_{II} / D_Y). \quad (15)$$

Швидкість v_{Π} конвекційного потоку, який виникає навколо біологічного організму, можна визначити за формулою [14]

$$v_{\Pi} = \sqrt{2gL \frac{T_O(t) - T_{C0}}{T_{C0}}}, \quad (16)$$

де $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ - прискорення земного тяжіння;

L - висота об'єкта теплоперенесення.

Підставивши (16) у (15), отримуємо

$$\Delta T_C(y, t) = [T_O(t) - T_{C0}] \cos \left(-\frac{y}{D_Y} \sqrt{2gL \left(\frac{T_O(t)}{T_{C0}} - 1 \right)} \right). \quad (17)$$

З рівняння (13) видно, що характер зміни температури поверхні тіла людини визначатиметься відношенням сталих часу τ_{1C} / τ_{2C} . Для здорової людини $\tau_{1C} / \tau_{2C} \geq 2$. Тоді рішенням рівняння (13) буде

$$T_O(t) = k_O T_K(\vartheta) \left[\frac{p_1}{p_2 - p_1} \exp(-p_1 t) - \frac{p_2}{p_2 - p_1} \exp(-p_2 t) \right], \quad (18)$$

де $p_{1,2} = -\frac{\tau_{1C}}{2\tau_{2C}^2} \pm \sqrt{\left(\frac{\tau_{1C}}{2\tau_{2C}^2} \right)^2 - \frac{1}{\tau_{2C}^2}}$ - корені характеристичного рівняння.

Позначимо $n = \tau_{1C} / \tau_{2C}$, $\beta_C = 1 / \tau_{2C}$ і $\alpha_C = n\beta / 2$. Тоді отримуємо:

мо: $\frac{p_{1,2}}{p_2 - p_1} = -0,5 \pm 0,5 \sqrt{1 - 4/n^2}$. Позначивши $B = \sqrt{1 - 4/n^2}$, маємо

$$T_O(t) = \frac{k_O}{2} T_K(\vartheta) \left\{ -\left(\frac{1}{B} + 1 \right) \exp[-(\alpha_C)(1 - B)t] + \left(\frac{1}{B} - 1 \right) \exp[-\alpha_C(1 + B)t] \right\} \quad (19)$$

Для хворої людини, коли температура тіла $T_K(\vartheta)$ піднімається, створюються умови, коли відношення $\tau_{1C} / \tau_{2C} < 2$. У цьому випадку, (наприклад, при послаблюючій лихоманці, при гнійних захворюваннях, пневмонії) зміна температури поверхні тіла описуватиметься рівнянням

$$T_O(t) = k_O T_K(\vartheta) \left\{ \exp(-\alpha t) \left[\cos(\omega_0 t) + (\alpha / \omega_0) \sin(\omega_0 t) \right] \right\} \quad (20)$$

або при коливальній лихоманці (наприклад, бруцельозі, лімфогранулематозі)

$$T_o(t) = k_o T_K(\vartheta) [\exp(-\alpha t) [\cos(\omega_0 t)]] , \quad (21)$$

де $\alpha = -\tau_{1C} / 2\tau_{2C}^2$ - ступінь загасання коливання;

$\omega_0 = \sqrt{\beta^2 - \alpha^2}$ - власна частота коливань.

Підставивши (18) у рівняння (17) і враховуючи (12), для аперіодичної зміни зовнішньої температури людини (у тому числі й для здорової) маємо

$$\Delta T_C(y,t) = \left[k_o T_{P0} \cos \left[\left(\frac{\vartheta}{\tau_p} \right) \left(\frac{\delta_v + 1}{\delta_a + 1} \right) \right] \left\{ \left[\left(\frac{1}{B} + 1 \right) \exp[-(\alpha t)(1-B)] - \right] \right. \right. \\ \left. \left. \left[- \left(\frac{1}{B} - 1 \right) \exp[-\alpha t(1+B)] \right] \right\} - T_{C0} \right] * \\ * \exp \left(- \frac{y}{D_Y} \sqrt{2gL \left(k_o \frac{T_{P0}}{T_{C0}} \cos \left[\left(\frac{\vartheta}{\tau_p} \right) \left(\frac{\delta_v + 1}{\delta_a + 1} \right) \right] \left\{ \left[\left(\frac{1}{B} + 1 \right) \exp[-(\alpha t)(1-B)] - \right] \right. \right. \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left[- \left(\frac{1}{B} - 1 \right) \exp[-\alpha t(1+B)] \right] \right\} - 1 \right) \right) \quad (22)$$

Для хворої людини коливання зовнішньої температури описуватиметься рівнянням

$$\Delta T_C(y,t) = \left[k_o T_{P0} \cos \left[\left(\frac{\vartheta}{\tau_p} \right) \left(\frac{\delta_v + 1}{\delta_a + 1} \right) \right] \left\{ \exp(-\alpha t) [\cos(\omega_0 t) + (\alpha / \omega_0) \sin(\omega_0 t)] \right\} - T_{C0} \right] \cdot \\ \cdot \exp \left(- \frac{y}{D_Y} \sqrt{2gL \left(k_o \frac{T_{P0}}{T_{C0}} \cos \left[\left(\frac{\vartheta}{\tau_p} \right) \left(\frac{\delta_v + 1}{\delta_a + 1} \right) \right] \left[\alpha \tau_p - \frac{(\delta_v + 1)}{(\delta_a + 1)} \right] [\cos(\omega_0 t) + (\alpha / \omega_0) \sin(\omega_0 t)] - 1 \right) \right) \quad (23)$$

Рівняння (22) і (23) описують зміну температури поверхні людського організму у залежності від різних впливових факторів. Якщо людина має теплову ізоляцію, то можна прийняти, що товщина y ламінарного шару незначна, якою можна знехтувати. Тоді ці рівняння приймають вигляд

$$\Delta T_C(t) = \left[k_o T_{P0} \cos \left[\left(\frac{\vartheta}{\tau_p} \right) \left(\frac{\delta_v + 1}{\delta_a + 1} \right) \right] \left\{ \left[- \left(\frac{1}{B} + 1 \right) \exp[-(\alpha t)(1-B)] + \right] \right. \right. \\ \left. \left. \left[+ \left(\frac{1}{B} - 1 \right) \exp[-\alpha t(1+B)] \right] \right\} - T_{C0} \right] ; \quad (24)$$

$$\Delta T_C(t) = \left[k_O T_{P0} \cos \left[\left(\frac{\mathcal{G}}{\tau_P} \right) \left(\frac{\delta_v + 1}{\delta_a + 1} \right) \right] \left\{ \exp(-\alpha t) \left[\begin{array}{l} \cos(\omega_0 t) + \\ + (\alpha / \omega_0) \sin(\omega_0 t) \end{array} \right] \right\} - T_{C0} \right]. \quad (25)$$

З достатньою для практики точністю можна прийняти, що $\delta_v \approx 1$ і $\delta_a \approx 1$. Час кровообігу в організмі знайдемо з формули: $\mathcal{G} = V_K / F_K$.

Враховуючи, що об'ємна витрата матеріального потоку $F_K = \frac{\pi g \Delta P_K}{8 L_C \mu} R_C^4$

[5], де ΔP_K - перепад тиску крові (рушійна сила); R_C - еквівалентний радіус кровоносних судин; L - еквівалентна їх довжина; μ - динамічна

на в'язкість крові, отримуємо $\mathcal{G}_0 = \Omega_K \mu / \Delta P_K$, де $N_K = \frac{8 L_C V_K}{\pi g R_C^4}$. Зворотна

величина сталої часу $\left(\frac{1}{\tau_P} \right) = z \left(1 + \frac{E}{RT_H} \right) \exp \left(- \frac{E}{RT_H} \right) = \Omega(T_P, E)$ -

функція біохімічного перетворення а фактично є частотою власних коливань $\Omega(T_P, E)$ перенесення теплової енергії від джерела до крові.

Приймаючи до уваги, що температуру тіла людини вимірюють практично при усталеному її значенні, тобто при $t \approx \infty$ і враховуючи вище обумовлене, рівняння (24) приймає наступний вигляд

$$\Delta T_C = k_O T_{P0} \cos[\mathcal{G} \Omega(T_P, E)] - T_{C0}. \quad (26)$$

З рівняння (26) видно, що зміна температури поверхні тіла людського організму прямопропорційна температурі T_{P0} , яка створюється джерелом теплової енергії та температурі навколишнього середовища. Окрім того, вона залежить від геометричного показника Ω_K кровоносної системи, динамічної в'язкості крові, рушійної сили, яка визначається перепадом тиску кровоносної системи, а також біохімічним процесом. Аналогічно виконуючи дослідження рівняння (25), бачимо, що зміна температури поверхні тіла в часі залежить від параметрів теплопередачі теплової енергії одночасно від джерела захворювання до кровоносної системи та в навколишнє середовище, котре визначається сталими часу стоку цієї енергії. Якщо стала часу $\tau_{1C} \ll \tau_{2P}$, то можна прийняти, що ступінь загасання $\alpha \rightarrow 0$. Тоді зміна температури тіла описуватиметься рівнянням

$$\Delta T_C(0, t) = k_O T_{P0} \cos[\mathcal{G} \Omega(T_P, E)] \exp(\alpha t) - T_{C0} \quad (27)$$

Для такого режиму характерним є те, що власна частота коливального процесу $\omega_{0кр} = 1/\tau_{2C}$ і є критичною для організму так як амплітуда зміни температури є найбільшою. Якщо частота $\omega_0 < \omega_{0кр}$, то рівняння (27) приймає наступну форму

$$\Delta T_C(0,t) = k_O T_{P0} \cos(\xi \Omega(T_P, E)) \{ \exp(-\alpha t) [\cos(\omega_0 t) + (\alpha/\omega_0) \sin(\omega_0 t)] \} - T_{C0} \quad (28)$$

Враховуючи, що $\alpha = -0,5\tau_{1C}\omega_{0кр}^2$, а $\omega_0 = \omega_{0кр} \sqrt{1 - 0,25\tau_{1C}^2\omega_{0кр}^2}$, отримуємо

$$\Delta T_C(0,t) = k_O T_{P0} \cos[\xi \Omega(T_P, E)] \exp(-0,5\tau_{1C}\omega_{0кр}^2 t) * \left[\begin{array}{l} \cos\left(\omega_{0кр} t \sqrt{1 - 0,25\tau_{1C}^2\omega_{0кр}^4}\right) + \left(\frac{0,5\tau_{1C}\omega_{0кр}}{\sqrt{1 - 0,25\tau_{1C}^2\omega_{0кр}^4}}\right) * \\ * \sin\left(\omega_{0кр} t \sqrt{1 - 0,25\tau_{1C}^2\omega_{0кр}^4}\right) \end{array} \right] - T_{C0} \quad (29)$$

Амплітуда температурних коливань $A_T = k_O T_{P0} \cos(\xi \Omega(T_P, E))$, де ξ - період пульсації роботи серця. Амплітуда A_T визначається також температурою T_{P0} біохімічного перетворення, а також іншими параметрами, котрі характеризують роботу серцево-судинної системи. Як показано в [15, 16], перехідний процес не має коливань, коли ступінь коливання $\alpha = -0,5$, а значить при $\tau_{1C}\omega_{0кр}^2 = 1$. З останнього рівняння при відомій критичній частоті власних коливань можна знайти сталу часу τ_{1C} . У [17] показано, що стала часу для трубопроводу круглого перетину $\tau_{1C} = \tau' + \tau''$, де часткові сталі часу

$$\tau' = \frac{V_K}{F_K} = \frac{8}{g} \left(\frac{L_C}{R_C}\right)^2 \frac{\mu}{\Delta P}; \quad \tau'' = \sqrt{\frac{L_{II}}{2g} \frac{T_{C0}}{\Delta T_{OC}(t)}} \quad \text{Враховуючи, що}$$

$V_K = S_C L_C = \pi R_C^2 L_C$, рівняння для сталої часу τ_{1C} приймає вигляд

$$\tau_{1C} = \frac{8}{g} \left(\frac{L_C}{R_C}\right)^2 \frac{\mu}{\Delta P_K} + \sqrt{\frac{L_{II}}{2g} \left(\frac{T_{C0}}{\Delta T_{OC}(t)}\right)}, \quad (30)$$

де $\Delta T_{OC}(t) = T_O(t) - T_{C0}$ - різниця температури поверхні тіла та навколишнього середовища.

Враховуючи те, що стала часу $\tau_{2C} = \sqrt{\tau'\tau''}$, то критичну частоту температурних коливань можна визначити за формулою

$$\omega_{0kp} = K_O \sqrt{\left(\frac{\Delta P_K}{\mu}\right)} \sqrt{\left(\frac{\Delta T_{OC}(t)}{T_{C0}}\right)}. \quad (31)$$

де $K_O = \frac{R_C}{L_C} \sqrt{\frac{g^3}{32L_{\Pi}}}$ - стала людського організму.

За аналогією теорії подібності гідродинамічних процесів відношення $(L_C/R_C) = K_{\Pi}$ є лінійним геометричним критерієм, характерним для кожного організму людини. Як видно з рівняння (29), коливальний температурний процес визначається добутком

$$\tau_{1C} \omega_{0kp}^2 = \frac{g}{8K_{\Pi}^2} \left(\frac{\Delta P_K}{\mu}\right) \left[1 + 8K_{\Pi}^2 \left(\frac{\mu}{\Delta P_K}\right) \sqrt{\frac{2}{gL_{\Pi}} \left(\frac{\Delta T_{OC}(t)}{T_{C0}}\right)} \right]. \quad (32)$$

Якщо вираз у квадратних дужках близький до одиниці, то добуток $\tau_{1C} \omega_{0kp}^2 = \frac{g}{8K_{\Pi}^2} \left(\frac{\Delta P_K}{\mu}\right)$ і повністю визначається відношенням $\Delta P_K / \mu$.

Такий режим організму характерний при серцево-судинних захворюваннях. При $8K_{\Pi}^2 \left(\frac{\mu}{\Delta P_K}\right) \sqrt{\frac{2}{gL_{\Pi}} \left(\frac{\Delta T_{OC}(t)}{T_{C0}}\right)} \gg 1$ рівність (32) приводиться

до наступної $\tau_{1C}^2 \omega_{0kp}^4 = \frac{2g}{L_{\Pi}} \left(\frac{\Delta T_{OC}(t)}{T_{C0}}\right)$. У цьому випадку збудником температурних коливань є охолодження або вірусні захворювання, котрі викликають високу температуру організму.

Висновки. Теоретичні дослідження термодинамічних процесів, котрі проходять в організмі людини, показують, що за поточними змінами її температури можна оцінювати стан здоров'я, або виконувати діагностику багатьох захворювань. Показано, що температурний режим людини є коливальним. Власну частоту коливань температури тіла можна визначити за формулою $\omega_0 = \omega_{0kp} \sqrt{1 - (\tau_{1C} \omega_{0kp})^2}$. Критична частота температурних коливань викликає судорожний стан організму, який супроводжується як малою так і великою їх амплітудою, котра

визначається змінами температури біохімічного процесу і роботою серцево-судинної системи, а відповідно, мускульної системи. Критична частота температурних коливань є індивідуальною для кожної людини. Вона визначається сталою організму K_O , яка мало змінюється для здорової людини й пропорційно зростає зі захворювання судинної системи і призводить до збільшення судорожних коливань організму. З цього випливає, що сталу організму можна віднести до основних показників людини, за значенням котрого можна оцінювати стан всієї судинної системи. Клінічні дослідження показують, що відхилення добової температури $\Delta T_{\varnothing} = T_{\max} - T_{\min}$, де T_{\max} , T_{\min} - максимальна та мінімальна добова температури відповідно, при захворюванні є більшим, ніж при його відсутності. Власна частота температурних коливань кровеносної системи обумовлена роботою серцевої системи і для здорового організму практично співпадає з власною частотою роботи серця $\omega_C = 1/\xi$, де ξ - тривалість одного повного удару серця. Якщо частота ω_C збільшується (наприклад при фізичному навантаженні), то відповідно підвищується частота $\Omega(T_P, E)$, що призводить до збільшення амплітуди температурних коливань. Для здорового організму власна частота ω_C роботи серця, як правило, синхронізована з власною частотою $\Omega(T_P, E)$ перенесення теплової енергії та її стоку ω_0 , тобто $\Omega(T_P, E) \approx \omega_C \approx \omega_0$. При відхиленні організму від норми змінюються частоти: $\Omega(T_P, E) = \Omega_0 \pm \Delta\Omega(T_P, E)$, $\omega_C = \omega_{C0} \pm \Delta\omega_C$ і $\omega_0 = \omega_{00} \pm \Delta\omega_0$ останні можуть складуватися, що викликає різке підвищення температури, або відніматися, що призводить до значного її пониження, викликаючи лихоманки різного роду, а відповідно, методи діагностування хвороби. Особливо важливим є розробка методів діагностування роботи серцево-судинних захворювань за характером зміни термодинамічних процесів.

Список літератури: 1. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. Пер. с нем. – М.: Наука, 1960. – 742 с. 2. Предеветика внутренних болезней /Под ред. В. Х. Василенко, А. Л. Гребенева, Н. Д. Михайловой. – М.: Медицина, 1974. – 528 с. 3. Стенцель Й. І., Зленко С. М., Павлов С. В. Фізичне та математичне моделювання термодинамічних методів діагностики стану здоров'я людини. Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. Міжнародний науково-технічний журнал. №1 (25). – 2013. С. 66-73. 4. Ремизов А. Я. Медицинская и биологическая физика. - М.: «Высшая школа». – 1987. - 638 с. 5. Хоблер Т. Теплопередача и теплообменники. Пер. с польс. – Л.: Госхимиздат, 1961. – 820 с. 6. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. – М.: Машгиз, 1962. – 368 с. 7. Лыков А. В. и Михайлов Ю. А. Теория тепло-и массопереноса. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 389 с. 8. Эккерт Э. Р., Дрейк Р. М. Теория тепло-и массообмена. - М.: Госэнергоиздат, 1962. – 562 с. 9. Мак-Адамс В. Х. Теплопередача. Пер с англ.- М.: Металлургиздат, 1961. – 669 с. 10. Де Гроот С., Мазур П. Неравновесная термодинамика. Пер. с

франц. – М.: Мир, 1964, - 456 с. **11.** Лыков А. В. Теория теплопроводности. – М.: Высш. шк., 1967, – 599 с. **12.** Мак-Адамс В. Х. Теплопередача. Пер с англ.- М.: Metallurgizdat, 1961. – 669 с. **13.** Таганов И. Н. Моделирование процессов массо- и энергопереноса. – Л.: Химия, 1979. - 203 с. **14.** Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. Пер. с нем. – М.: Наука, 1960. – 742 с. **15.** Зевеке Г. В., Ионкин П. А. и др. Основы теории цепей. М.: Энергия, 1975. – 468 с. **16.** Стенцель Й. I. Математичне моделювання технологічних об'єктів керування: Навч. посібник. – К.: ІСДО, 1993. – 328 с.

Bibliography (transliterated): 1. Shlihting G. *Teorija pograničnogo sloja*. Per. s nem. – М.: Nauka, 1960. – 742. 2. *Prepedevitka vnutremih boleznej* /Pod red. V. H. Vasilenko, A. L. Grebeneva end N. D. Mihajlovoj. – Moscow: Medicina, 1974. – 528. 3. Stencil' J. I., Zlepko S. M. end Pavlov S. V. "Fizy'čne ta matematy'čne modelyuvannya termody'namičny'x metodiv diagnosty'ky' stanu zdorov'ya lyudy'ny'". *Opty'ko-elektronni informacijno-energety'čni tehnologiyi. Mizhnarodny'j naukoivo-texničny'j zhurnal*. #1 (25). – 2013. 66-73. Print. 4. Remizov A. Ja. *Medicinskaja i biologičeskaja fizika*.- Moscow: «Vysshaja shkola». – 1987. 638. 5. Hobler T. *Teploperedacha i teploobmīnniki*. Per. s pol's. – L.: Goshimizdat, 1961. – 820. 6. Kutateladze S. S. *Osnovy teorii teploobmena*. – Moscow.: Mashgiz, 1962. – 368. 7. Lykov A. V. end Mihajlov Ju. A. *Teorija teplo-i massoperenosa*. – Moscow.: Gosjenergoizdat, 1963. – 389. 8. Jekkert Je. R. end Drejk R. M. *Teorija teplo-i massoobmena*. - M.: Gosjenergoizdat, 1962. – 562. 9. Mak-Adams V. H. *Teploperedacha*. Per s angl.- Moscow: Metallurgizdat, 1961. – 669. 10. De Groot S. end Mazur P. *Neravnovesnaja termodinamika*. Per. S franc. – Moscow.: Mir, 1964, - 456 s. 11. Lykov A. V. *Teorija teploprovodnosti*. – Moscow.: Vyssh. shk., 1967. – 599. 12. Mak-Adams V. H. *Teploperedacha*. Per s angl.- Moscow.: Metallurgizdat, 1961. – 669. 13. Taganov I. N. *Modelirovanie processov masso- i jenergooperenosa*. – L.: Himija, 1979. - 203. 14. Shlihting G. *Teorija pograničnogo sloja*. Per. s nem. – Moscow.: Nauka, 1960. – 742. 15. Zevеke G. V. end Ionkin P. A. i dr. *Osnovy teorii cepej*. Moscow.: Jenergija, 1975. – 468. 16. Stencil' J. I. *Matematy'čne modelyuvannya tehnologičny'x ob'yektiv keruvannya*: Navch. posibny'k. – Kiev.: ISDO, 1993. – 328.

Поступила (received) 30.05.2014

УДК 681.586.773

О. І. ШАПОВАЛОВ, аспірант ТІ СНУ ім. В.Даля, Сєвєродонецьк

ФІЗИЧНІ МОДЕЛІ ПЕРЕТВОРЕНЬ ЕЛЕКТРИЧНОГО ІМПУЛЬСУ В МАГНІТОСТРИКЦІЙНОМУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ⁵

Показано, що вимірювання рівня рідин магнітострикційним методом засновано на реологічних переходах збуджуючого імпульсу хвилеводу в ультразвуковій коливання. Досліджено процеси перетворення струмового імпульсу в енергію електромагнітного поля та вплив на магнітне поле перетворювача. Показано, що зміна електромагнітного поля за довжиною хвилеводу є нелінійною, що впливає на діапазон вимірювального контролю рівня таким методом.

© О. І. Шаповалов, 2014

Ключові слова: вимірювання, перетворення, магнітострикція, метод, струм, імпульс, хвилевід, ультразвук, магнітне, поле.

Вступ. Як відомо [1-4], принцип роботи магнітострикційних перетворювачів (МСП) контролю рівня рідинних середовищ (РРС) заснований на тому, що при подачі на вхід хвилеводу (виготовленого з магнітострикційного матеріалу) електричного (струмового) імпульсу в ньому збуджується електромагнітне поле (ЕМП), котре у формі імпульсу рухається вздовж хвилеводу і при досягненні цим полем іншого магнітного поля вступає з ним у взаємодію, що призводить до виникнення імпульсу електрорушійної сили (ЕРС) з частотою ультразвукових коливань (УЗК). ЕРС має направленість протилежну до напрямку руху ЕМП хвилеводу, тому імпульс УЗК повертається до початку хвилеводу, де розташований вимірювальний перетворювач трансформаторного типу, котрий сприймає ці коливання та направляє їх у блок обробки вимірювальної інформації.

Мета статті і постановка досліджень. Метою статті є теоретичні дослідження принципу перетворення імпульсу магнітної енергії хвилеводу в ЕРС на основі теорії реологічних переходів і методу нульового градієнта. Приймемо, що активний опір R_0 , індуктивність L_0 та ємність C_0 хвилеводу розподілені рівномірно вздовж його довжини. На вхід хвилеводу подається електричний збуджуючий імпульс (ЕЗІ) прямокутної форми амплітудою I_0 і тривалістю ϑ . Якщо довжину хвилеводу розділити на окремі ділянки довжиною Δx , яку проходить ЕЗІ зі швидкістю v , то на кожній такій ділянці виникає агнітне поле. Нехай на кожній такій ділянці створюється у формі, аналогічній ЕЗІ. Для кожного конкретного хвилеводу активна складова струмового вхідного сигналу, який має прямокутну форму, визначатиметься найменшим активним опором одного із всіх ділянок хвилеводу, тобто $I_{0a} = U / R_{\min}$. За елементарний елемент (ЕЕ) хвилеводу прийматимемо його довжину, яка накривається ЕЗІ тривалістю ϑ . Кожний елементарний елемент являє собою чотириполюсник, як показано на рис. 1.

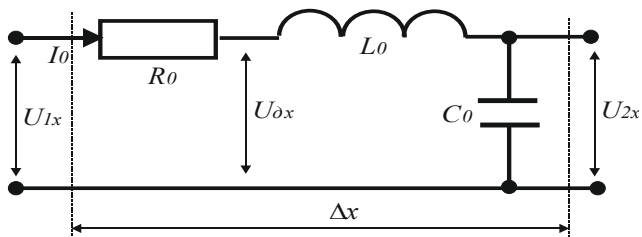


Рис. 1 - Структура елементарного елемента хвилеводу

Реактивна складова струму на кожній ділянці довжиною Δx , яка характеризується індуктивністю L_0 та ємністю C_0 , дорівнює

$$\Delta I_{0p} = \frac{U_{\Delta x}}{\sqrt{X_L^2 + X_C^2}} = \frac{U_{\Delta x}}{\sqrt{(\omega L_0)^2 + (1/\omega C_0)^2}} = \frac{\omega_0 C_0 U_{\Delta x}}{\sqrt{(\omega_0^2 L_0 C_0)^2 + 1}}. \quad (1)$$

де X_L, X_C - відповідно індуктивний та ємнісний опір;

ω_0 - кутова частота власних коливань елемента хвилеводу.

Запишемо рівняння (1) дещо в іншій формі, враховуючи, що вздовж хвилеводу проходить електромагнітна хвиля з кутовою частотою ω_0 , коефіцієнт розповсюдження якої $\beta = \omega_0 \sqrt{L_0 C_0}$, а коефіцієнт фази $\gamma_\Phi = j\omega_0 \sqrt{L_0 C_0}$. Тоді маємо

$$\Delta I_{0p} = \frac{\omega_0 C_0 U_{\Delta x}}{\sqrt{\omega_0^2 \beta^4 + 1}} \quad (2)$$

Якщо $1 \ll \omega_0^2 \beta^4$, то отримуємо $\Delta I_{0p} = C_0 U_{\Delta x} / \beta^2$. З останнього видно, що реактивна складова струму, яка визначає величину електромагнітного поля (ЕМП) хвилеводу, суттєво залежить від коефіцієнта розповсюдження ЕМП, а значить від швидкості проходження ЕЗІ по довжині хвилеводу.

Фізичні моделі перетворень. У хвилеводі протікають електромагнітні процеси, які супроводжуються перетвореннями електричної енергії. Нехай у деякій розглядуваній області хвилеводу існує неоднорідне фізичне тіло (імпульс електричної енергії). Неоднорідність розподілення потенціалу перенесення $\phi(\vec{x}, \theta)$ електричної енергії $W(\vec{x}, \theta)$ приводить до відхилення від стану рівноваги ЕМП і є причиною виникнення потоків перенесення. У цій області має місце рух

ЕМЕ, який характеризується полем швидкостей $v(\bar{x}, \theta)$, де \bar{r} - вектор направленості руху перенесення; θ - час перенесення. Джерела або стоки потенціалу перенесення $\gamma(t)$ за час t характеризуються об'ємною напруженістю електромагнітного поля $H(\bar{x}, \theta)$. Перенесення потенціалу φ через поверхню розглядуваного об'єму складається з перенесення за рахунок руху та потоку перенесення ЕМЕ, який позначимо через q . Таким чином, вираз для сумарного електромагнітного потоку Q можна подати у вигляді

$$\bar{Q} = \bar{\varphi} \cdot \bar{v} + \bar{q}. \quad (3)$$

В інтегральній формі умова зберігання електромагнітного потенціалу для даного об'єму V має наступну форму

$$\int_V \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} dV = \oint_S Q d\bar{f} + \int_V \gamma dV, \quad (4)$$

де S - поверхня об'єму;

$d\bar{f} = \bar{n} d\zeta$ - елемент поверхні;

\bar{n} - одиничний вектор елемента $d\zeta$.

Для довільного об'єму рівняння (4) буде наступним

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \theta} + \text{div} Q - \gamma(t) = 0. \quad (5)$$

З врахуванням співвідношення (3) рівняння (5) приймає вигляд

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \theta} + \text{div}(\varphi, \bar{v}) = -\text{div} \bar{q} + \gamma(t). \quad (6)$$

Якщо в розглядуваному об'ємі має місце електромагнітне перетворення, яке є наслідком взаємодії ЕЗІ з хвилеводом, то, позначивши $W(\bar{x}, \theta)$ - зміну електричної енергії, $v_i(\bar{x}, \theta)$ - швидкість її зміни і $\gamma(t)$ - інтенсивність стоку електричної енергії в одиницю об'єму, рівняння перенесення електричної енергії приймає наступну форму

$$\frac{\partial W}{\partial \theta} + \text{div}(W, \bar{v}) = \text{div}(k^2 \nabla W) + \gamma(t). \quad (7)$$

Нехай рух ЕМП незначний у порівнянні зі зміною електромагнітного поля, тобто швидкість $\vec{v}(\vec{x}, \theta) \rightarrow 0$. Тоді рівняння перенесення електричної енергії в хвилеводі приймає наступну форму

$$\frac{\partial W}{\partial \theta} = \text{div}(\Psi \nabla W) + \gamma(t). \quad (8)$$

де Ψ - коефіцієнт перенесення.

Якщо Ψ мало залежить від процесу перенесення, то рівняння (7) спрощується й приймає вигляд

$$\frac{\partial W}{\partial \theta} = \Psi \nabla^2 W + \gamma(t). \quad (9)$$

Припустимо, що в деякому елементарному об'ємі хвилеводу знаходиться ЕЗІ та його електричні параметри, котрі в деякий момент часу $t > 0$ пов'язуються електромагнітним полем. При $t \rightarrow \infty$ перехідний процес перенесення електричної енергії ЕЗІ в елементарному елементі закінчується. Електрична енергія ЕЗІ, який має певну амплітуду та тривалість, на вході в хвилеводі дорівнює $W_{E1} = U_0 I_0 \mathcal{G}$. Проходячи через умовний перший елементарний елемент хвилеводу (ЕЕХ), частина цієї енергії витрачається в активному та реактивному опорах. Згідно з теорією перенесення енергії приймаючи до уваги, що процес є одностроннім, рівняння (9) приймає форму

$$\frac{\partial W_i(\theta, x)}{\partial \theta} = \Psi \frac{\partial^2 W_i(\theta, x)}{\partial x^2} - \gamma_i(t), \quad (10)$$

де $W_i(\theta, x)$ - зміна електричної енергії ЕЗІ за час її перенесення θ на довжині відрізка x_i ;

Ψ - коефіцієнт перенесення енергії;

$\gamma_i(t)$ - стік електричної енергії ЕЗІ на елементарному елементі.

Енергія електричного збуджуючого імпульсу в елементарному елементі перетворюється в інші види енергії, як правило, в теплову на активному опорі та електромагнітну на індуктивності та ємності. Перехід електричної енергії ЕЗІ в інші форми енергії є перехідним процесом для елементарного елемента, швидкість якого можна описати наступним диференціальним рівнянням

$$\gamma_i(t) = \tau_2^2 \frac{d^3 W_i(t)}{dt^3} + \tau_1 \frac{d^2 W_i(t)}{dt^2} + \frac{dW_i(t)}{dt}, \quad (11)$$

де $\tau_1 = L_{0i} / R_{0i}$, $\tau_2 = L_{0i} C_{0i}$ - сталі часу перетворення електричної енергії ЕЗІ;

R_{0i} , L_{0i} , C_{0i} - відповідно активний опір, індуктивність та ємність елементарного елемента.

Підставивши (10) у рівняння (9), отримуємо нелінійну математичну модель перенесення електричної енергії ЕЗІ у хвилеводі в такій формі

$$\frac{\partial W_i(\theta, x)}{\partial \theta} + \Psi \frac{\partial^2 W_i(\theta, x)}{\partial x^2} = \tau_2^2 \frac{d^3 W_i(t)}{dt^3} + \tau_1 \frac{d^2 W_i(t)}{dt^2} + \frac{dW_i(t)}{dt}. \quad (12)$$

Інтегральна імпульсна дельта-функція Дірака є асиметричною і описується рівнянням

$$\int_{t_1+0_1}^{t_2} f_1(\xi) \delta(\xi - t_{10}) d\xi = \begin{cases} 0 & t_{10} < t_{11}, \quad t_{10} \geq t_{12} \\ f_1(t_{10} + 0) & t_{11} < t_{10} < t_{12} \end{cases}, \quad (13)$$

де ξ - деяка змінна;

$\delta(\xi - t_{10})$ - ядро лінійного інтегрального перетворення;

t_{10} - середнє значення часу фазового переходу.

Ядром інтегральної імпульсної дельта-функція Дірака є нелінійне диференціальне рівняння (12), яке згідно з методом нульового градієнта розділяється на систему з двох наступних диференціальних рівнянь:

$$\frac{\partial W_i(\theta, x)}{\partial \theta} + \Psi \frac{\partial^2 W_i(\theta, x)}{\partial x^2} = 0; \quad (14)$$

$$\tau_2^2 \frac{d^2 W_i(t)}{dt^2} + \tau_1 \frac{dW_i(t)}{dt} + W_i(t) = W_i(\theta, x). \quad (15)$$

При граничних умовах: $x = 0$ $W_i(0, \theta) = W_{0i}$, а при $x = \infty$ $\frac{\partial W_i(x, \infty)}{\partial \theta} = 0$ рішенням рівняння (14) буде

$$W_i(x, \theta) = W_{0i} \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{\Psi \theta}} \right). \quad (16)$$

З рівняння (16) видно, що розподілення електромагнітної енергії (ЕМЕ) за довжиною x хвилеводу є нелінійним і залежить від коефіцієнта перенесення Ψ цієї енергії та часу θ . Так як тривалість ЕЗІ є обмеженою, то час θ не може бути більшим тривалості ЕЗІ \mathcal{G} . Якщо коефіцієнт Ψ не залежить від процесу перенесення електромагнітної енергії, то, прийнявши $\theta = \mathcal{G}$ і $\Psi = const$, маємо

$$W_i(x, \theta) = W_{0i} \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{\Psi \mathcal{G}}} \right). \quad (17)$$

З останнього рівняння випливає важливий висновок, котрий полягає в тому, що для збільшення ефективної робочої довжини хвилеводу необхідно збільшувати тривалість збуджуючого імпульсу. Процес реологічного перетворення електричної енергії ЕЗІ в ЕМП Φ_M хвилеводу пояснюється рис. 2. Інтегральна імпульсна дельта-функція Дірака описується рівнянням (13), ядром котрої є нелінійне диференціальне рівняння перенесення електричної енергії (12). Враховуючи, що енергія $W_i(t)$ перетворюється в ЕМП і то що $\Phi_M = \mu_a I_0 S / 2\pi a$, де μ_a - абсолютна магнітна проникливість; I_0 - сила струму ЕЗІ; S - поперечний перетин хвилеводу; a - відстань розповсюдження магнітних силових ліній, а також приймаючи до уваги, що енергія $W_i(t) = \Phi_M(t) I / 2$, рівняння (12) приймає наступну форму

$$\frac{\partial W_i(\theta, x)}{\partial \theta} + \Psi \frac{\partial^2 W_i(\theta, x)}{\partial x^2} = 0,5 I_0 \left[\tau_2^2 \frac{d^3 \Phi_M(t)}{dt^3} + \tau_1 \frac{d^2 \Phi_M(t)}{dt^2} + \frac{d\Phi_M(t)}{dt} \right] \quad (18)$$

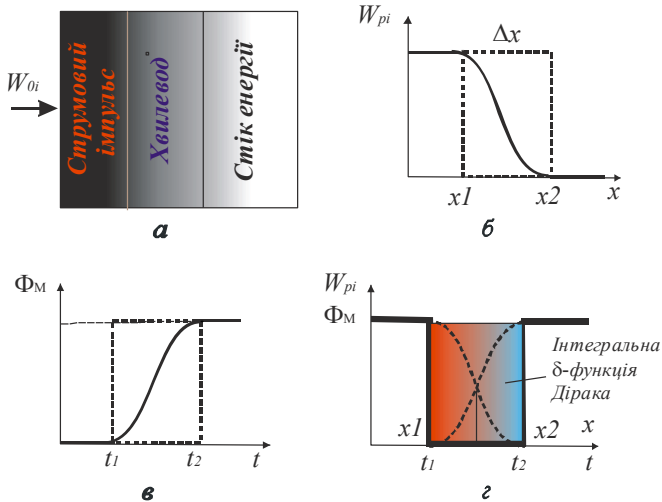


Рис. 2 – Фізична модель: *a* – схема незворотних реологічних перетворень; *б* – зміни електричної енергії ЕЗІ в елементарному елементі; *в* – зміна електромагнітного поля; *г* – інтегральна імпульсна дельта-функція Дірака.

При невеликих довжинах хвильоводу від місця подачі ЕЗІ перехідні процеси є коливально-загасаючими для основної гармоніки, а при великих – вони є практично аперіодичними з коливальним накладанням на них гармонік вищого порядку (рис. 3). Для довжин хвильоводу можна прийняти, що перехідні процеси, котрі характеризують стік електромагнітної енергії, є слабо коливальними. Таким чином можна стверджувати, що відношення сталих часу у рівнянні (15) $\tau_1/\tau_2 < 2$. Тоді при початкових умовах: $t = 0 \quad W(0) = W(x, \theta)$, а при $t = \infty$

$$\frac{dW(\infty)}{dt} = 0 \text{ маємо}$$

$$W_i(t) = W_i(x, \theta) \left\{ \exp(-t\alpha) \left[\cos(\omega_0 t) + \frac{\alpha}{\omega_0} \sin(\omega_0 t) \right] \right\}, \quad (19)$$

де $\alpha = \frac{\tau_{1K}}{2\tau_{2K}^2}$ - ступінь загасання перехідного процесу;

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{\tau_{2K}^2} - \left(\frac{\tau_{1K}}{2\tau_{2K}^2}\right)^2} \text{ - власна частота коливань ЕЕ.}$$

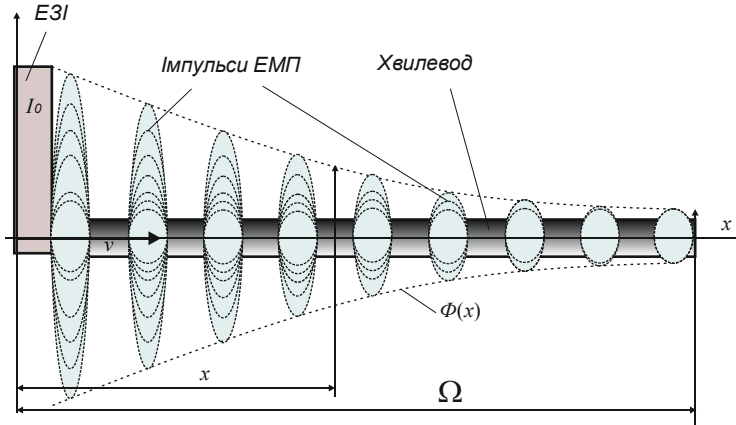


Рис. 3 – Фізична модель руху імпульсу ЕМП по хвилеводу

Підставивши (17) у рівняння (19), отримуємо

$$W_i(t) = W_{E1} \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_E g}}\right) \left\{ \exp(-t\alpha) \left[\cos(\omega_0 t) + \frac{\alpha}{\omega_0} \sin(\omega_0 t) \right] \right\}. \quad (20)$$

Електромагнітна індукція, яка виникає в провіднику, по котрому проходить ЕЗІ, [5-7] $B = \mu_a I / 2\pi a$, де I – струм провідника; μ_a – магнітна стала; a – відстань від поверхні провідника. Якщо прийняти, що площа, через яку проходять лінії магнітної індукції, розташована до них перпендикулярно, то електромагнітний потік $\Phi_i = BS = \mu_a IS / 2\pi a$. Тоді рівняння (20) приймає вигляд

$$\Phi_i(t) = I_0 \frac{\mu_a S}{2\pi a} \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_E g}}\right) \left\{ \exp(-t\alpha) \left[\cos(\omega_0 t) + \frac{\alpha}{\omega_0} \sin(\omega_0 t) \right] \right\} \quad (21)$$

Рівняння (21) є аналітичною математичною моделлю первинного вимірювального перетворювача магнітострикційного засобу контролю РРС. Магнітний потік $\Phi_i(t)$, який створюється навколо хвилеводу, в

основному визначається вхідним струмовим імпульсом і магнітною проникливістю матеріалу хвилеводу, а також від геометричних його параметрів. З достатньою для практики точністю час t перехідного процесу в кожному ЕЕ, як правило, обмежується тривалістю \mathcal{G} ЕЗІ. Враховуючи сказане, рівняння (21) спрощується і приймає вигляд

$$\Phi_i(t) = I_0 K_g \frac{\mu_a S}{2\pi a} \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_E \mathcal{G}}} \right), \quad (22)$$

де
$$K_g = \exp(-\mathcal{G}\alpha) \left[\cos(\omega_0 \mathcal{G}) + \frac{\alpha}{\omega_0} \sin(\omega_0 \mathcal{G}) \right].$$

Висновки. Теоретичні та експериментальні дослідження магніто-стрикційних засобів контролю рівня рідинних середовищ показують, що магнітний потік, який створюється на елементарному елементі хвилеводу визначається амплітудою струмового імпульсу I_0 і магнітною проникливістю магнітострикційного матеріалу μ_a , а також поперечним його перетином. Так як у більшості випадків хвилевод являє собою провідник круглої форми, то $S = \pi r^2$, то r - його радіус. Параметр « a » - це відстань від центру хвилеводу, тому можна записати, що $a = r + \mathfrak{R}$, де \mathfrak{R} - відстань від поверхні хвилеводу. Подальша задача полягає в тому, щоби визначити, яким чином електромагнітне поле змінюється при взаємодії з магнітним полем постійного магніту, в результаті чого створюється електричний сигнал. Відстань \mathfrak{R} повинна бути такою, щоби між магнітними полями створювалося зусилля для достатнього відхилення доменів хвилеводу від усталеного значення та створення електрорушійної сили.

Список літератури: 1. Измерение в промышленности. Справочное пособие (Под ред. проф. докт. Профоса. Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1980. – 648 с. 2. Каталог компании Emerson Process Management и Промышленной группы «Метран». Выпуск 10 «Уровнемеры» - М.: Изд-во каталогов, 2011. - 206 с. 3. Каталог F1 01 фирмы Siemens. Контрольно-измерительные приборы. Уровень. 2007. - 188 с. 4. *Стенцель Й.І., Томсон А.В., Шаповалов О.І.* Аналіз магнітострикційних засобів контролю рівня рідинних середовищ. Східно-Європейський журнал передових технологій. Харків, № 3/5 (45) 2010. – с. 53- 56. 5. *Зевеке Г.В., Ионкин П.А.* и др. Основы теории цепей. – М.: Высш. школа, 1975. – 664 с. 6. *Бессонов Л.А.* Теоретические основы электротехники. – М.: Высш. школа, 1978. – 528 с. 7. *Евдокимов Ф.Е.* Теоретические основы электротехники. – М.: Высш. школа, 1981. -488 с. 8. *Стенцель Й.І., Томсон А.В.* Математичні моделі ультразвукових п'єзоелектричних перетворювачів рівня речовин // Вопросы химии и химической технологии. - 2007. - №4. – С. 182-185.

Bibliography (transliterated): 1. *Izmerenie v promyshlennosti. Spravochnoe posobie* (Pod red. prof. dokt. Profosa. Per. s nem. – Moscow.: Metallurgija, 1980. 2. *Katalog kompanii Emerson Process Management i Promyshlennoj grupy "Metran"* Vypusk 10 "Urovnemery" - Moscow.: Izd-vo katalogov, 2011.. 3. *Katalog Fl 01 firmy Siemens. Kontrol'no-izmeritel'nye pribory. Uroven'*. 2007. 4. Stencil' J. I., Tomson A. V. end Shapovalov O. I. "Analiz magnitostroy'kcijny'x zasobiv kontrolyu rivnya ridy'nyy'x seredovy'shh." *Sxidno-Yevropejs'ky'j zhurnal peredovy'x tehnologij*. Kharkov, # 3/5 (45) 2010. Print. 5. Zeveke G. V. end Y'onky'n P. A. y' dr. *Osnovy teorii cepej*. – Moscow.: Vyssh. shkola, 1975. 6. Bessonov L. A. *Teoreticheskie osnovy jelektronehniki*. – M.: Vyssh. Shkola, 1978. 7. Evdokimov F. E. *Teoreticheskie osnovy jelektronehniki*. – M.: Vyssh. Shkola, 1981. 8. Stencil' J. I. end Tomson A. V. "Matematy'chni modeli ul' trazvukovy'x p'yezoelektry'chny'x peretvoryuvachiv rivnya rechovy'n" // *Voprosy xy'my'y' y' xy'my'cheskoj tehnology'y'*. - 2007. - #4. Print.

Поступила (received) 30.05.2014

УДК 539.124.18.08

Д. В. ТИТОВ, студент, НТУ «ХПИ», лаб.ННЦ «ХФТИ», Харьков;
Е. Л. НОЗДРАЧЁВА, канд. техн. наук, доцент НТУ «ХПИ»;
В. А. ШЕВЧЕНКО, вед. инж.-исл., ННЦ «ХФТИ», Харьков

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ ПРИ ОБРАБОТКЕ ПРОДУКЦИИ НА ЛИНЕЙНОМ УСКОРИТЕЛЕ ЭЛЕКТРОНОВ

Рассмотрена схема проведения облучения продукции медицинского и иного назначения с целью стерилизации, а также контроля стерилизационной дозы на ускорителе электронов ЛУ-10 ННЦ «ХФТИ» с энергией 10МэВ. Приведен пример дозиметрического сопровождения технологии с использованием дозиметров Harwell RedPerspex 4034 и дозиметрической плёнки RISO В-3. Показан пример эффективности работы данного метода дозиметрии и его приборного обеспечения.

Ключевые слова: Технологическая дозиметрия, поглощенная доза, линейный ускоритель электронов, дозиметр, дозиметрическая пленка

Из всех областей, связанных с радиационной обработкой, стерилизация медицинских изделий претерпела наибольшие качественные изменения. Прежде всего, это связано с широким внедрением в мировую медицинскую практику средств одноразового использования – перевязочных материалов, медицинской одежды, покрытий и белья, шприцов, хирургических нитей, катетеров, систем переливания крови и др. Также стерилизуются такие изделия медицинского назначения, как иглы для инъекции, скарификаторы, перчатки, различные имплантаты и т.д. В последнее время к медицинским изделиям, стерилизуемым

© Д. В. Титов, Е. Л. Ноздрачёва, В. А. Шевченко, 2014

радиацией, добавилась продукция фармации (как сырье, так и готовые формы), а также отдельные виды пищевой продукции (главным образом, травяные чаи). Направляемая на радиационную стерилизацию продукция пакуется в картонные гофроящики, размер и масса которых предварительно согласовываются для обеспечения требуемого режима обработки.

Основным параметром радиационной обработки является поглощенная доза излучения. Доза равна отношению средней энергии, переданной ионизирующим излучением веществу в элементарном объеме, к массе вещества в этом объеме. В системе СИ поглощенная доза измеряется в Грехах (Гр). $1 \text{ Грей} = 1 \text{ Дж/кг} = 100 \text{ рад}$. [1].

Стандартная технологическая установка для стерилизации включает ускоритель электронов с системой сканирования пучка, а также конвейер для дистанционной транспортировки ящиков с обрабатываемыми изделиями в зону облучения. Развётка пучка осуществляется на ширину ящиков перпендикулярно к направлению их движения.

Доза в любой точке ящика зависит от энергии электронов, среднего тока, ширины развётки, скорости конвейера, толщины и плотности объекта, а также самого материала, который находится между окном вывода пучка, и данной точкой. На дозу также может оказывать влияние наличие неоднородностей в обрабатываемом материале вследствие рассеяния электронов на границах раздела. В процессе обработки величина получаемой продукцией поглощенной дозы обеспечивается поддержанием скорости конвейера, исключающей появление недооблученных участков.

Чтобы знать какую дозу необходимо сообщить обрабатываемой продукции для обеспечения ее стерильности (стерилизационная доза) необходимо предварительно провести испытания. Например, для проведения испытаний из предназначенной для обработки партии бинтов произвольно отбирают 5 ящиков, каждому из которых необходимо сообщить определенную дозу по степени нарастания: на первый – 5 кГр, второй – 10 кГр, далее – 15, 20, и 25 кГр. После облучения эти пять ящиков (образцов) отправляют в бактериологическую лабораторию. Последняя после проведения исследований на стерильность дает заключение, какая доза является стерилизационной для данной партии продукции. Кроме того, целью испытаний является установление максимально допустимого значения дозы. Процедура эта является обязательной, так как при превышении допустимого значения можно разрушить материал образца. Если, например, бинту дать завышенную дозу, то он будет расплываться, если ещё большую, то будет рассы-

паться. Если дать малую дозу, то бинт не будет полностью стерилизован, и не будет пригоден к использованию.

В Харьковском Физико-техническом Институте (ХФТИ) имеется участок радиационной обработки (УРО) - рис.1, состоящий из ускорителя электронов ЛУ-10 и конвейера с регулируемой скоростью в диапазоне $0,3 \div 6$ см/сек. Энергия электронов E составляет 10 МэВ, средний ток пучка $I_{cp} = 800$ мкА, длительность импульсов пучка - 4 мкс, частота следования импульсов - 250 Гц. Развёртка пучка с частотой 3 Гц осуществляется сканером на основе управляемого от ПК электромагнита. Оператор УРО, исходя из требуемого режима обработки, с помощью ПК управляет током в магните, задавая ширину развёртки на объекте в диапазоне от 25 см до 42 см. [2]

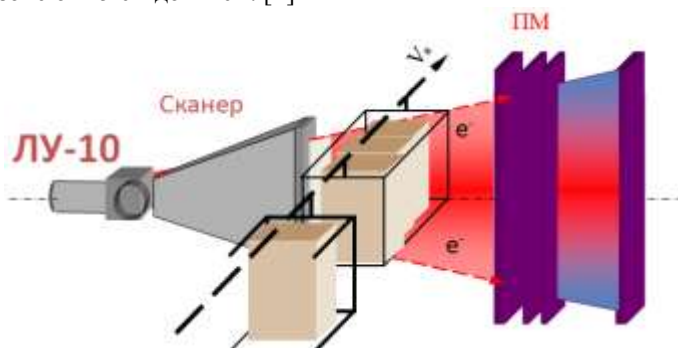


Рис. 1 – Оборудование участка радиационной обработки ЛУ-10

Расстояние от выходного окна сканера до передней плоскости транспортного контейнера с обрабатываемыми изделиями составляет 110 см. За конвейером размещен пластинчатый монитор ПМ (8 алюминиевых пластин, расположенных за конвейером, с системой съема и обработки информации), в котором поглощается часть пучка, оставшаяся после взаимодействия с объектом. Получаемая с ПМ информация позволяет контролировать параметры пучка ускоренных электронов и режим обработки.

На участке радиационной обработки используются два типа дозиметров: Nagwell RedPerspex 4034 и дозиметрическая плёнка RISO В-3.[3] Дозиметр Nagwell RedPerspex 4034 (рис.2) изготовлен из полиметилметакрилата с добавкой радиационно чувствительного красителя в виде пластинок размером 30х11 мм и толщиной 3 ± 0.4 мм.



Рис.2– Дозиметры Harwell RedPerspex 4034

Диапазон измерения дозы составляет 5-50 кГр. Для этого определяется оптическая плотность (absorbance) дозиметра на длине волны 640 нм (*красный*). Изначально дозиметр имеет ярко красный цвет, а с получением дозы начинает темнеть (рис. 2) После облучения дозиметр пригоден для измерений в течение двух дней. В дальнейшем он начинает осветляться и имеет уже совсем другую оптическую плотность.

У плёнки RISO В-3 (рис. 3) диапазон измерения дозы составляет 5-100 кГр, а измерение оптической плотности проводится на длине волны 554 нм (*зелёная область*). Перед измерением дозы плёнку следует прогреть при температуре 75 С в течение 5 минут. После этого дозиметрическая плёнка будет сохранять оптическую плотность (дозу) на протяжении 1 года. Плёнку выпускают толщиной 0.018 мм и разного формата. Ее калибровка осуществляется с помощью специальных калориметрических дозиметров RISO, которые являются референтными (высшего порядка) с прослеживаемостью к Национальному эталону поглощенной дозы Великобритании.



Рис. 3 – Дозиметрическая плёнка RISO В-3

Для измерения дозы, получаемой изделиями при обработке, дозиметры приклеивают на поверхность ящика и/или вкладывают внутрь. После этого ящик ставят в транспортный контейнер (*подвес*) конвейера (рис.4), перемещающий его через защитный лабиринт в зону обработки пучком и обратно в зал загрузки.



Рис. 4 – Транспортный контейнер с обрабатываемыми изделиями и дозиметром Harwell RedPerspex 4034

Чтобы определить, какую дозу получил дозиметр, необходимо измерить его оптическую плотность или коэффициент пропускания. С помощью спектрофотометра можно измерить оба параметра. В ХФТИ на участке радиационной обработки имеются два спектрофотометра: СФ-46 ЛОМО отечественного производства и UVmini-1240 Shimadzu, изготовленный в Японии. В основу спектрофотометров положен принцип измерения отношения двух световых потоков: потока прошедшего через исследуемый образец и потока, падающего на исследуемый образец (или прошедшего через контрольный образец). Оба прибора имеют одинаковый диапазон по длине волны - от 190 нм до 1100 нм, что представляет собой значительное удобство при измерениях. [4]

Для определения поглощенной дозы дозиметр помещается в спектрофотометр и определяется его оптическая плотность D по формуле:

$$D = \lg T, \quad (1)$$

где T – коэффициент пропускания измеряемого образца. Сам коэффициент пропускания определяется по формуле:

$$T = U_x/U_0, \quad (2)$$

где U – это световой поток, прошедший через образец, U_0 – световой поток, падающий на образец

По результатам измерения оптической плотности с помощью таблиц с градуировочными характеристиками данной партии дозиметров определяется поглощенная объектом доза. Возможна корректировка скорости конвейера для обеспечения требуемого значения дозы. Во время обработки партии и в конце ее производится контрольная дозиметрия для подтверждения, что вся партия обработана надлежащим образом. [5]

Поскольку распределение дозы в объеме обрабатываемого изделия неравномерно, то для обеспечения гарантированного уровня стерильности принято давать дозу немного больше полученного по результатам испытаний значения, поскольку на периферии ящика она ниже, чем на передней поверхности, где обычно размещают дозиметры. Для более точного мониторинга проводится контроль всех параметров, определяющих качество обработки.

Выводы. Показано, что эффективным методом стерилизации медицинских изделий является ее обработка пучком ускоренных электронов. Обязательным условием технологии является установление и поддержание в заданных пределах параметров пучка, а также точное измерение поглощенной дозы с помощью современных средств технологической дозиметрии.

Авторы выражают благодарность проф. Уварову В.Л. за консультацию.

Список литературы: 1. *Поленов. Б. В.* Дозиметрические приборы для населения / *Б. В. Поленов.* – М. : Энергоатомиздат, 1991. – с. 5-11. 2. *Рябухин Ю. С.* Ускоренные пучки и их применение / *Ю. С. Рябухин, А. В. Шальнов.* – М. : Атомиздат, 1980. – 141 с. 3. *Arne Miller.* Dosimetry. Riso Higt Dose Reference Laboratoru. / *Arne Miller* // Technical University of Denmark. DK-4000 Roskilde. – С. 3-32. 4. *Гвай А. С.* Современные методы и средства дозиметрии ионизирующих излучений в медицине. / *А.С. Гвай, Л.А.Аверьянова, О.Ю. Шалёна* // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 3/9 (57) – 2012. – С. 40-44 5. *Ростов В. В.* Сильноточный импульсно-периодический ускоритель электронов прямого действия как средство стерилизации медицинских изделий однократного приме-

нения. / В. В. Ростов, П. И. Алексеев, П. В. Выходцев // Известия Томского политехнического института. – Т.321. №2. – Томск, 2012, – с. 48-54

Bibliography (transliterated): 1. Polenov B. V. *Dozimetricheskie pribory dlja naselenija*. Moscow : Jenergoatomizdat, 1991. Print. 2. Rjabuhin Ju. S., Shaŕ'nov V. *Uskoremnye puchki i ih primenenie*. Moscow : Atomizdat, 1980. Print. 3. Arne Miller. *Dosimetry. Riso Higt Dose Reference Laboratoru*. Technical University of Denmark. DK-4000 Roskilde. CD. 4. Gvaj A. S., Aver'janova L. A., Shaljopa O. Ju. *Sovremennye metody i sredstva dozimetrii ionizirujushih izluchenij v medicene*. Vostochno-Evropskij zhurnal peredovyh tehnologij, 3/9 (57), 2012. 40-44 Print. 5. Rostov V. V., Alekseenko P. I., Vyhodcev P. V. *Sil'notochnyj impul'sno-pereodicheskij uskoritel' jelektronov prjamoĝo dejstvija kak sredstvo sterilizacii medicinskih izdelij odnokratnogo primenenija*. Izvestija Tomskogo politehnicheskogo instituta. Vol.321. №2. Tomsk, 2012. 48-54. Print.

Надійшла (received) 05.05.2014

УДК 621.318

И. А. ШВЕДЧИКОВА, д-р. техн. наук, проф. ВНУ им. В. Даля,
Луганск;
Ю. А. РОМАНЧЕНКО, асп. ВНУ им. В. Даля, Луганск

КЛАССИФИКАЦИЯ ПОЛИГРАДИЕНТНЫХ МАГНИТНЫХ СЕПАРАТОРОВ

Проанализированы функциональные и конструктивные особенности существующих разновидностей полиградиентных магнитных сепараторов. На основе анализа информационных источников установлено, что в магнитных сепараторах данного класса нашли преимущественное применение стержневые, пластинчатые, шарообразные и решетчатые полиградиентные (гетерогенные) среды. Построена классификация магнитных сепараторов, учитывающая структурные свойства полиградиентных сред.

Ключевые слова: магнитный сепаратор, полиградиентная среда, магнитное поле, классификация.

Введение. Важным этапом различных технологических процессов переработки исходного сырья, промежуточных или конечных продуктов является разделение смесей сыпучих материалов, выделение твердой фракции из жидкой или газообразной среды. В настоящее время для этих целей применяются технические устройства – сепараторы, принцип действия которых основан на использовании физических полей разной природы и некоторых физических свойств материалов: плотности, электропроводности, диэлектрической проницаемости, намагниченности, смачиваемости и адсорбции, отражательной способности и т.д. [1]. На практике широкое применение получил метод маг-

© И. А. Шведчикова, Ю. А. Романченко, 2014

нитной сепарации, основанный на использовании различий в магнитной восприимчивости частиц разделяемых сред. Наиболее сложным при этом является процесс извлечения из немагнитных сред слабомагнитных и мелкодисперсных ферромагнитных включений крупностью порядка 0,05 мм и менее. Для удаления таких включений применяются разнообразные по конструкции полиградиентные магнитные сепараторы. В их рабочих объемах созданы условия для обеспечения максимального значения напряженности H магнитного поля (до 1600 кА/м и выше) и величины $gradH$ за счет формирования локальных зон с трехмерной неоднородностью магнитного поля путем введения в рабочее пространство различных ферромагнитных тел, например стальных шариков [1, 2]. И хотя полиградиентные магнитные сепараторы имеют широкое распространение, обобщающие структурно-системные исследования этого класса устройств до сих пор не проводились.

Анализ последних исследований и литературы. Анализ информационных источников [1, 2] показал, что основными структурными элементами полиградиентных магнитных сепараторов являются: источник магнитного поля (магнитная или электромагнитная система); рабочий орган, выполненный в виде неподвижной кассеты (матрицы) или вращающегося ротора, заполненный полиградиентной (гетерогенной) средой; вспомогательные подсистемы, обеспечивающие бесперебойную работу магнитного сепаратора (например, подсистема подачи сепарируемого материала в рабочую зону, подсистема обеспечения удаления из рабочей зоны магнитной и немагнитной фракций и т. д.).

Электромагнитные системы полиградиентных сепараторов предназначены для создания первичного магнитного поля, могут быть открытого или закрытого типа. В рабочих зонах электромагнитных систем размещаются матрицы или кассеты с полиградиентной средой из ферромагнитных тел (шаров, цилиндров, стержней, стальной ваты, заостренных пластин и т. д.), за счет которых происходит изменение первичного магнитного поля, повышающее градиент его напряженности, и, как следствие, надежность извлечения слабомагнитных и мелкодисперсных ферромагнитных частиц из материала [1]. Если в электромагнитных системах открытого типа полюса располагаются только с одной стороны рабочей зоны, то рабочие зоны электромагнитных систем закрытого типа ограничены полюсами с обеих сторон.

В научно-технической литературе, например, в [3, 4], приведены классификации магнитных сепараторов, учитывающие целый ряд технологических признаков, в том числе: способ подачи материала в рабочую зону; характер поведения магнитных частиц в магнитном поле; направление движения материала, подлежащего сепарации; способ

удаления продуктов разделения из рабочей зоны; конструкцию устройств для удаления магнитных включений и т.д.

В работе [2] представлена классификация полиградиентных магнитных сепараторов, включающая, в частности, следующие характеристики: расположение полюсов в рабочем органе сепаратора (сепараторы с чередующейся полярностью по окружности барабана и сепараторы с постоянной полярностью); направление движения потока пульпы в ферромагнитных средах (сепараторы с противоточным движением пульпы в полиградиентной среде, у которых ферромагнитная среда движется навстречу потоку пульпы, и сепараторы с прямоточным движением пульпы, у которых ферромагнитная среда движется в направлении движения потока пульпы).

В работе [5] рассмотрена классификация гетерогенных регулярных структур, которые, в частности, используются в фильтрах-матрицах полиградиентных магнитных сепараторов. Под гетерогенной структурой понимается неоднородная система, состоящая из двух или более однородных частей (фаз). В [5] представлены наиболее распространенные типы упорядоченных с четко выраженной периодичностью гетерогенных структур, которые применяются в различных технических устройствах и материалах. В общем случае правильные гетерогенные структуры могут быть многофазными и многокомпонентными, когда в пределах одной из фаз имеется несколько фракций (компонентов) [6]. Гетерогенные структуры можно классифицировать по геометрическим параметрам (форме и размерам элементов дисперсной фазы); концентрации включений; показателям симметрии (упорядоченные – с четко выраженной периодичностью – и неупорядоченные); по физическим свойствам (изотропные и анизотропные, линейные и нелинейные, электрические, магнитные, диэлектрические, гальваномагнитные и др.); по агрегатному состоянию дисперсионной среды (газовые, жидкие или твердые).

Цель статьи. Целью настоящей работы является анализ функциональных особенностей и построение классификации магнитных сепараторов с учетом структурных свойств их полиградиентных (гетерогенных) сред.

Постановка проблемы. Процессы, происходящие в рабочем органе сепаратора – полиградиентной среде, в теоретическом и практическом отношении являются наиболее важными. В то же время в известных классификациях магнитных сепараторов структурные свойства полиградиентных сред не учитываются.

Материалы исследований. В магнитных сепараторах нашли преимущественное применение стержневые, пластинчатые, шарооб-

разные и решетчатые полиградиентные среды [7]. Соответственно, в зависимости от геометрической формы и размеров ферромагнитных тел, образующих полиградиентные среды, могут быть выделены четыре основных типа магнитносепарирующих устройств.

1. В магнитных сепараторах *со стержневыми полиградиентными средами* ферромагнитные тела, размещенные в фильтр-матрицах, представляют собой стержни различного поперечного сечения (круглые, треугольные, квадратные или прямоугольные).

На рис. 1 представлена конструкция магнитного сепаратора, полиградиентная среда которого образована стержнями круглого сечения [8]. Сепаратор включает магнитную систему 1, расположенную внутри рабочего органа 2 с полиградиентными элементами 3. Последние закреплены параллельно друг другу на рабочем органе 2 и выполнены в виде стержней 4 с резьбой, в углублениях которой уложена проволока 5 из магнитомягкого материала, закрепленных на рабочем органе параллельно друг другу.

Исходный материал поступает в зону действия магнитного поля, создаваемого магнитной системой 1, на полиградиентную среду 3. Немagnetные частицы вместе с основным количеством воды уходят в соответствующий приемник, а магнитные и слабомагнитные частицы закрепляются на витках проволоки 5, распределяясь равномерно по всей поверхности полиградиентной среды 3, выносятся рабочим органом 2 из рабочей зоны и смываются водой в приемник магнитной фракции. Резьба стержня обеспечивает постоянный зазор между витками проволоки по всей длине элемента полиградиентной среды.

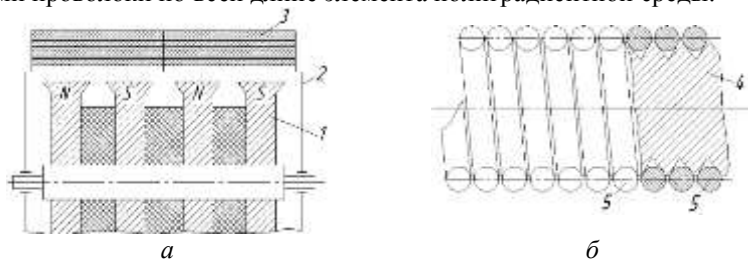


Рис. 1 - Полиградиентный магнитный сепаратор [8]:

а – продольный разрез сепаратора; б – элементы полиградиентной среды

Полиградиентный магнитный сепаратор, изображенный на рис. 2, содержит матрицу, заполненную ферромагнитными телами треугольного сечения [9]. Устройство включает магнитную систему 1 с полюсами 2, ротор 3, установленный с возможностью вращения, рабочую

камеру с ферромагнитными матрицами 4, установленными вертикально вдоль направления движения пульпы и перпендикулярно поверхности полюсов с образованием вертикальных каналов 5 для прохождения пульпы, загрузочный 6 и разгрузочные 7 патрубки. Каждая матрица 4 выполнена двухрядной из ферромагнитных тел 8 треугольного сечения, расположенных параллельно друг другу в плоскости матрицы, а ферромагнитные тела обращены одной из своих поверхностей в сторону канала 5 для прохождения пульпы. Пространство между ферромагнитными телами 8 заполнено немагнитным материалом.

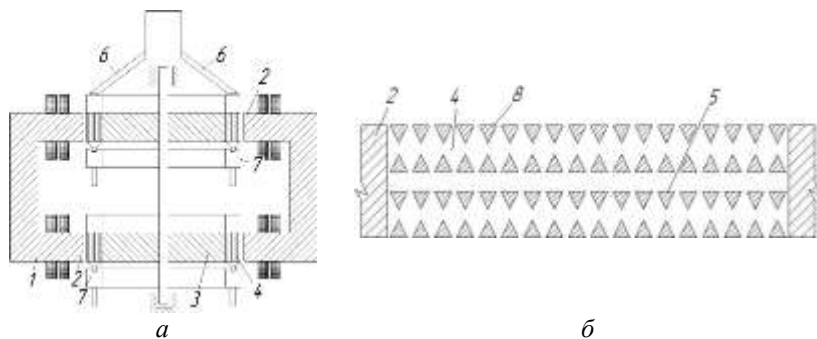


Рис. 2 – Полиградиентный магнитный сепаратор [9]:
 а – общий вид магнитного сепаратора; б – конструкция матрицы

Магнитный сепаратор работает следующим образом. Исходный продукт в виде пульпы через загрузочный патрубок 6 поступает в часть рабочей камеры, размещенной в межполюсном зазоре магнитной системы. Проходя через каналы 5, под воздействием магнитного поля магнитные частицы, находящиеся в пульпе притягиваются к рабочей поверхности матриц 4, концентрируясь у острых углов ферромагнитных тел, в зоне наибольшего значения градиента напряженности магнитного поля. Под воздействием промывной воды от притянувшихся магнитных частиц отмываются налипшие на них немагнитные частицы, которые вместе с водой разгружаются в приемники для немагнитного продукта через патрубки 7. При выходе матриц 4 из зоны действия магнитного поля в каналы 5 подают смывную воду, которая смывает с рабочей поверхности матриц магнитные частицы в приемник для концентрата через патрубки 7.

2. В магнитных сепараторах с пластинчатыми полиградиентными средами ферромагнитные тела, размещенные в фильтр-матрицах,

представляют собой гладкие или зигзагообразные пластины. Поверхности пластин также могут быть выполнены в виде чередующихся выступов и желобков.

На рис. 3 показан магнитный сепаратор с пластинчатой полиградиентной средой [10]. Сепаратор включает магнитную систему 1 с полюсами, в межполюсном зазоре которой расположен рабочий орган в виде кассеты 2, заполненный пакетами 3, составленными из чередующихся магнитных 4 и немагнитных 5 полос. Полосы своими длинными сторонами ориентированы в направлении от питателя 6 к приемнику 7 немагнитного продукта, т.е. размещены вертикально. Между поверхностями смежных пакетов имеется зазор, образующий канал 8 для прохода пульпы.

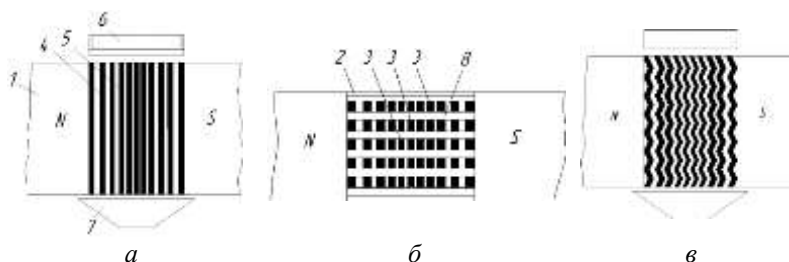


Рис. 3 – Магнитный сепаратор [10]:

a – схема сепаратора; *б* – размещение наполнителя с кассетами, в которых полосы обращены в сторону полюсов своими плоскостями; *в* – схема сепаратора с зигзагообразными полосами

Сепаратор работает следующим образом. Пульпа обогащаемого материала из питателя 6 подается на стенки пакетов 3 и, удерживаясь на них под действием сил поверхностного натяжения, движется тонким слоем. При этом середина канала 8 остается пустой, что позволяет иметь любую необходимую для предотвращения забивания ширину канала.

Под действием магнитных сил слабомагнитные зерна притягиваются к поверхности пакетов 3 на краях магнитных полос 4, а немагнитные зерна попадают в приемник 7 немагнитного продукта. После выключения магнитной системы или вывода кассеты 2, собранной из пакетов 3, из зоны между полюсами магнитный продукт смывается с пакетов 3 в соответствующий приемник. Благодаря уменьшению толщины немагнитных полос 5 в пакетах 3 в направлении от полюсов к центру межполюсного зазора условия извлечения магнитных частиц из

потока пульпы становятся одинаковыми по всей площади пакета, и тем самым исключается возможность проскока магнитных частиц в центре межполюсного зазора, что, в свою очередь, приводит к повышению извлечения магнитной фракции. Благодаря зигзагообразной форме полос 4 и 5 практически все частицы попадают в зону действия магнитных сил. Кроме того, зигзагообразная форма полос обеспечивает создание дополнительного градиента магнитного поля, причем чем меньше угол поворота зигзагов, тем выше градиент, а следовательно, и извлекающие магнитные силы.

Полиградиентная среда магнитного сепаратора, представленного на рис. 4, образована пластинами, поверхность которых выполнена в виде чередующихся выступов и желобков [11].

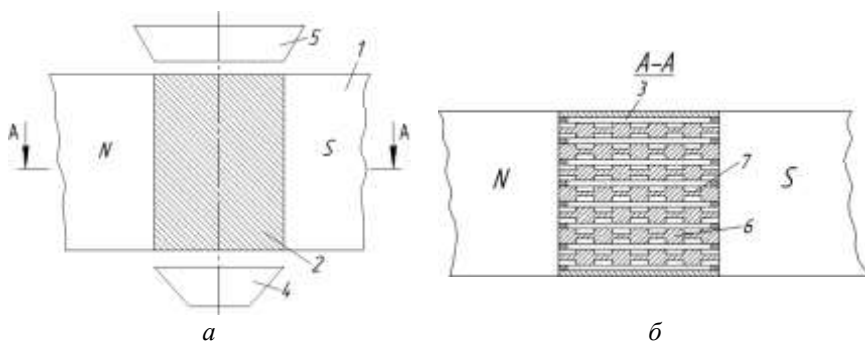


Рис. 4 – Магнитный сепаратор для сепарации слабомагнитных материалов [11]:
а – схема сепаратора; б – разрез А-А

Магнитный сепаратор (рис. 4) работает следующим образом. Включается магнитная система 1 и намагничиваются пластины 2. При этом высокоградиентное магнитное поле образуется как на острых краях выступов 6, так и на конусообразных выступах, образованных зернами железного порошка на поверхности выступов 6 и желобков 7. Пульпа обогащаемого материала подается на намагниченные пластины 2, движется по ним и частично в канале 3, образованном смежными пластинами 2. Часть пульпы, проходящая по пластинам, движется преимущественно по желобкам 7 наклонно вниз, а также перетекает из желобков 7 через края выступов 6. При движении пульпы по желобку магнитные частицы под действием магнитных сил притягиваются не только к краям выступов 6, но и (большей частью) к центрам микроградиентов, образованным зернами магнитомягкого железного порош-

ка. В результате извлечения слабомагнитных частиц из потока и осаждение их на пластину происходят практически по всей ее поверхности (как на выступах 6, так и на желобках 7), что повышает осадительную способность ферромагнитного наполнителя.

В результате размещения пластин 2 вдоль силовых линий магнитного поля значительно снижается вероятность механического забивания зазоров 3 сильномагнитными и инородными телами, и вся полезная площадь пластины выполняет свою непосредственную функцию - извлечение слабомагнитных материалов, причем градиент напряженности магнитного поля вдоль поверхности пластины обеспечивает эффективный силовой режим разделения.

Расположение выступов 6 и желобков 7 с обеих сторон одной и той же пластины с противоположным углом наклона позволяет получить во всех зазорах 3 потоки пульпы, движущиеся в одном и том же направлении, что обеспечивает создание одинаковых условий извлечения во всех зазорах 3, а также равномерный износ пластин. Кроме того, перекрещивание выступов и желобков с обеих сторон одной и той же пластины увеличивает ее жесткость и снижает опасность механической поломки.

3. В магнитных сепараторах с шарообразными полиградиентными средами ферромагнитные тела, размещенные в фильтр-матрицах, представляют собой шары одинакового или разного диаметра. Пример конструкции магнитного сепаратора с шарообразной полиградиентной средой приведен на рис. 5 [12].

Сепаратор содержит корпус 1 из немагнитного материала, например цилиндрической формы, стенки которого выполнены гофрированными, с входным 2 и выходным 3 отверстиями, перфорированный поддон 4, на котором внутри корпуса 1 расположены ферромагнитные шары 5. С наружной стороны корпуса 1 расположена магнитная система с полюсами 6, магнитопроводом 7 и полюсными наконечниками 8. Радиус закругления впадин гофр больше радиуса ферромагнитных шаров 5, а поверхность полюсных наконечников 8, обращенная к корпусу 1, выполнена эквидистантной поверхности наружных стенок корпуса 1. Кроме этого, полюсные наконечники 8 могут быть выполнены в виде немагнитных емкостей 9, заполненных ферромагнитными частицами 10. Одна из стенок емкости 9, без зазора прилегающая к наружной стенке корпуса 1, выполнена из эластичного материала, а магнитопровод замыкает оба полюса 6. Немагнитная емкость 9 может прилегать к корпусу 1 открытой стороной, снижая магнитное сопротивление контакта наконечника и емкости.

Поток очищаемой среды подается во входное отверстие 2 корпуса 1 и омывает ферромагнитные шары 5. Металлические включения, содержащиеся в очищаемой среде, притягиваются к ферромагнитным шарам 5. В средней части корпуса 1 очищаемая среда движется между шарами зигзагообразно, омывая шары 5 со всех сторон, что способствует увеличению пути, проходимого очищаемой средой, и тем самым увеличению эффективности сепарации. Так же зигзагообразно движется очищаемая среда и вдоль стенок корпуса 1, так как располагающиеся во впадинах гофр шары 5 препятствуют прямолинейному движению очищаемой среды.

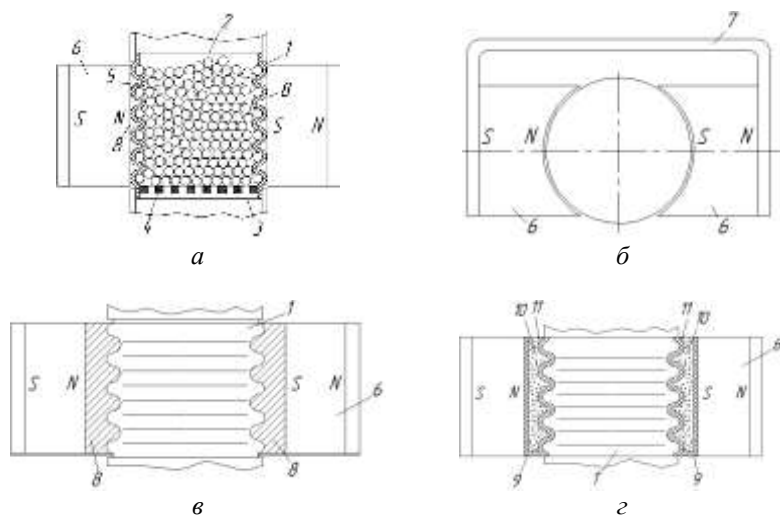


Рис. 5 – Магнитный сепаратор [12]:

а – поперечный разрез сепаратора; *б* – вид сверху сепаратора; *в, г* – примеры выполнения магнитного сепаратора

4. В магнитных сепараторах с *решетчатыми полиградиентными средами* применяются прямоугольные и сотовые решетки.

На рис. 6 приведена конструкция сепаратора с полиградиентной средой в виде прямоугольной решетки [13]. Полиградиентный сепаратор имеет электромагнитную систему 2, питатель 3, брызгала 4, приемники продуктов разделения 5 и рабочий орган 1 с расположенной в нем полиградиентной средой, выполненной в виде размещенных одна над другой решеток 6, образующих квадратные ячейки. Решетки уста-

новлены со смещением одна относительно другой с расположением вершины ячейки выше лежащей решетки над центром ячейки ниже лежащей решетки, а в вершинах ячеек установлены жестко закрепленные на них шары 7.

Устройство работает следующим образом. Исходный материал поступает в рабочий орган в зоне действия магнитного поля. Магнитные частицы притягиваются к шарам и выносятся при вращении рабочего органа из зоны действия магнитного поля, а немагнитные частицы под действием силы тяжести проходят через решетки в приемники для немагнитной фракции. Из брызгал на решетки при выходе их из зоны действия магнитного поля подается вода, которая смывает с шаров магнитные частицы. Благодаря постоянным зазорам между шарами происходит отмывка шаров, что повышает эффективность процесса сепарации.

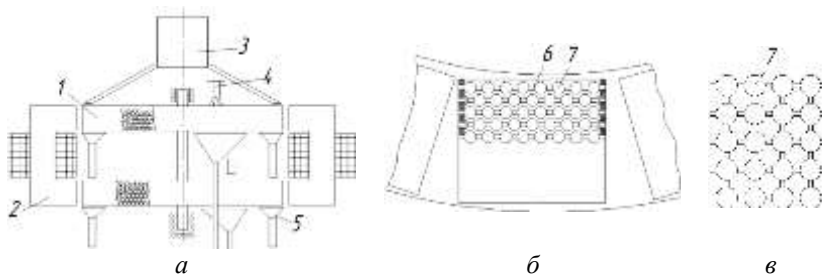


Рис. 6. Полиградиентный электромагнитный сепаратор [13]:
а – общий вид; б – установка решеток в рабочем органе; в – вид решетки

Для очистки технологических газов в черной и цветной металлургии, машиностроительной и химической промышленности нашли применение магнитные фильтр-сепараторы с полиградиентной средой в виде сотовой решетки (рис. 7) [14]. Такой фильтр содержит входной патрубком 1, корпус 2, сотообразную решетку 3 из немагнитного материала (например, фторопласта или алюминия), сферические тела 4 (шарики из ферромагнитного материала), распределительную и крепежную решетку 5, систему брызгал (форсунок) 6 для смыва и регенерации фильтра, шламоотводной элемент 7, каплеотбойник 8, магнитную систему 9 (соленоид) и выходной патрубком 10.

Магнитный фильтр-сепаратор работает следующим образом. Запыленный газ подводится по входному патрубку 1 в корпус 2, равномерно распределяясь по каналам сотообразной решетки 3 и приводя во взвешенное состояние шарики 4, чему способствует пондеромоторная

магнитная сила введенной в действие магнитной системы 9. Ферромагнитные шарики 4 приобретают возвратно-поступательное движение, двигаясь вдоль силовых линий магнитного поля; при этом с максимальной эффективностью реализуется инерционно-ударный «эффект мишени» и кулоновское взаимодействие масс (ферромагнитная пылинка в полюс магнита).

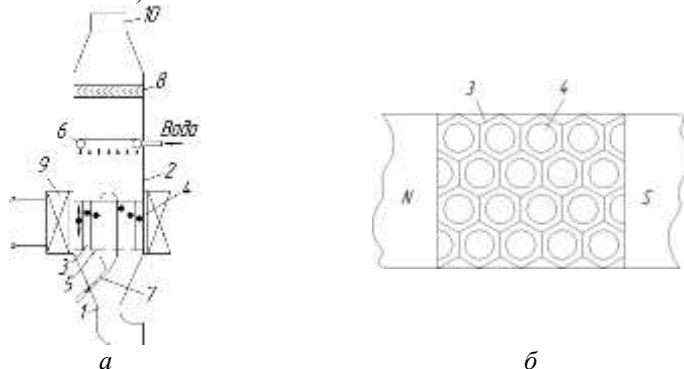


Рис. 7 – Магнитный фильтр [14]
а – общий вид; б – вид решетки

Водой из брызгал (форсунок) 6 осажденные пылинки смываются и в виде шлама выводятся из аппарата через шламоотводный элемент 7. Механический вынос влаги устраниется каплеотбойником 8. Очищенный газ выбрасывается в атмосферу или направляется в последующую ступень очистки через выходной патрубок 10.

Результаты исследований. Анализ патентно-информационных источников показал, что полиградиентные магнитные сепараторы нашли широкое применение на практике для извлечения из немагнитных сред слабомагнитных или мелкодисперсных ферромагнитных включений крупностью порядка 0,05 мм и менее. В результате проведенных исследований установлено, что в рабочих органах магнитных сепараторов (фильтр-матрицах, кассетах) нашли преимущественное применение стержневые, пластинчатые, шарообразные и решетчатые полиградиентные (гетерогенные) среды. Это позволило построить классификацию магнитных сепараторов с учетом структурных свойств таких сред.

Выводы. Таким образом, в работе выполнен анализ функциональных особенностей и построена классификация магнитных сепараторов с учетом структурных свойств их полиградиентных (гетероген-

ных) сред. Полученные результаты могут быть использованы для проведения дальнейших структурно-системных исследований магнитных сепараторов данного класса.

Список литературы: 1. Загирняк М. В. Магнитные сепараторы. Проблемы проектирования : моногр. / М.В. Загирняк, Ю.А. Бранспиз, И.А. Шведчикова ; под ред. М.В. Загирняка. – К. : Техніка, 2011. – 224 с. 2. Полиградиентные магнитные сепараторы : моногр. / под ред. Н.Ф. Мясникова. – М. : Недра, 1973. – 160 с. 3. Деркач В.Г. Специальные методы обогащения / В.С. Деркач. – М. : Недра, 1966. – С. 338. 4. Кармазин В.В. Магнитные и электрические методы обогащения / В.В. Кармазин, В.И. Кармазин. – М. : Недра, 1988. – 304с. 5. Толмачев С.Т. Классификация гетерогенных структур и условие их дwoякопериодичности / С.Т. Толмачев, С.Л. Бондаревский // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – № 5 / 5 (65). – С. 24-28. 6. Островский Г.М. Прикладная механика неоднородных сред [Текст] / Г.М. Островский. – СПб. : Наука, 2000. – 359 с. 7. Шведчикова И.А. Анализ структурного разнообразия полиградиентных магнитных сепараторов / И.А. Шведчикова, Ю.А. Романченко // Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації : XII міжнародна науково-технічна конференція молодих учених і спеціалістів, 10-11 квітня 2014 р. : тези доповідей. – Кременчук, 2014. – С. 245-246. 8. А.с. 1373443 СССР, МКІЗ³ В 03 С 1 / 02. Полиградиентный магнитный сепаратор / В.В. Кармазин, И.М. Рожков (СССР). – № 4107820/22-03 ; заявл. 16.05.1986 ; опубл. 15.02.1988, Бюл. № 6. 9. А.с. 1502109 СССР, МКІЗ³ В 03 С 1 / 30. Магнитный сепаратор / Б.А. Кравец, Л.А. Ломовцев, Н.А. Стрелкин (СССР). – № 4129502 / 23-03 ; заявл. 03.10.1986 ; опубл. 23.08.1989, Бюл. № 31. 10. А.с. 1338895 СССР, МКІЗ³ В 03 С 1 / 30. Магнитный сепаратор / В.В. Кармазин, И.М. Рожков (СССР). – № 4056550 / 22-03 ; заявл. 14.04.1986 ; опубл. 23.09.1987, Бюл. № 35. 11. А.с. 1351678 СССР, МКІЗ³ В 03 С 1 / 30. Магнитный сепаратор для обогащения слабомагнитных руд / В.В. Кармазин, И.М. Рожков (СССР). – № 4079662 / 22-03 ; заявл. 23.06.1986 ; опубл. 15.11.1987, Бюл. № 41. 12. А.с. 1532080 СССР, МКІЗ³ В 03 С 1 / 08. Магнитный сепаратор / Е.Г. Васильев, Н.А. Жуков, А.А. Искандеров и др. (СССР). – № 4393268 / 22-03 ; заявл. 16.03.1988 ; опубл. 30.12.1989, Бюл. № 48. 13. А.с. 580905 СССР, МКІЗ³ В 03 С 1 / 08. Полиградиентный электромагнитный сепаратор / Б.А. Кравец (СССР). – № 1918961 / 22-03 ; заявл. 11.05.1973 ; опубл. 25.11.1977, Бюл. № 43. 14. А.с. 345970 СССР, МІ. Кл. В 03 С 1 / 30. Магнитный фильтр / Ю.А. Измодёнов, Л.С. Лагунова, Н.Я. Топычканов (СССР). – № 1452150 / 23-26 ; заявл. 15.06.1970 ; опубл. 28.07.1972, Бюл. № 23.

Bibliography (transliterated): 1. Zagirnjak M. V., Ju. A. Branspiz and I. A. Shvedchikova. *Magnitnyye separatory. Problemy proektirovaniya: monogr.* Ed. M. V. Zagirnjak. Kiev: Tehnika, 2011. Print. 2. N. F. Mjasnikov, ed. *Poligradiyentnyye magnitnyye separatory: monogr.* Moscow: Nedra, 1973. Print. 3. Derkach V. G. and V. S. Derkach. *Special'nye metody obogashheniya.* Moscow: Nedra, 1966. Print. 4. Karmazin V. V. and V. I. Karmazin. *Magnitnyye i jelektriicheskie metody obogashheniya.* Moscow: Nedra, 1988. Print. 5. Tolmachev S. T. and S. L. Bondarevskij. "Klassifikacija geterogennyh struktur i uslovie ih dvojakoperiodichnosti." *Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij.* No. 5. 2013. 24–28. Print. 6. Ostrovskij G. M. *Prikladnaja mehanika neodnorodnyh sred.* St. Petersburg: Nauka, 2000. Print. 7. Shvedchikova I. A. and Ju. A. Romanchenko "Analiz strukturnogo raznoobrazija poligradiyentnyh magnitnyh separatorov." *Elektromehanični ta energetični sistemi, metody modeljuvannja ta optyimizacii': XII mizhnarodna naukovo-tehnichna konferencija molodyh uchenyh i special'istiv, 10-11 kvitnja 2014 r.: tezy dopovidej.* Kremenčuk: KrNU, 2014. 245–246. Print. 8. A.s. 1373443 SSSR, MKI3 V 03 S 1 / 02. Karmazin V. V. and I. M. Rozhkov. *Poligradiyentnyj magnitnyj separator.* No 4107820/22-03 ; zjavl. 16.05.1986 ; opubl. 15.02.1988, Bjul. No 6. Print. 9. A.s. 1502109 SSSR, MKI3 V 03 S 1 / 30. Kravec B. A., L. A. Lomovcev and N. A.

Strelkin. *Magnitnyj separator*. No 4129502 / 23-03 ; zajavl. 03.10.1986 ; opubl. 23.08.1989, Bjul. No 31. Print. **10**. A.s. 1338895 SSSR, MKI3 V 03 S 1 / 30. Karmazin V. V. and I. M. Rozhkov. *Magnitnyj separator*. No 4056550 / 22-03 ; zajavl. 14.04.1986 ; opubl. 23.09.1987, Bjul. No 35. Print. **11**. A.s. 1351678 SSSR, MKI3 V 03 S 1 / 30. Karmazin V. V. and I. M. Rozhkov. *Magnitnyj separator dlja obogashhenija slabomagnitnyh rud*. No 4079662 / 22-03 ; zajavl. 23.06.1986 ; opubl. 15.11.1987, Bjul. No 41. Print. **12**. A.s. 1532080 SSSR, MKI3 V 03 S 1 / 08. Vasil'ev E. G. et al. *Magnitnyj separator*. No 4393268 / 22-03 ; zajavl. 16.03.1988 ; opubl. 30.12.1989, Bjul. No 48. Print. **13**. A.s. 580905 SSSR, MKI3 V 03 S 1 / 08. Kravec B. A. *Poligradientnyj jelektromagnitnyj separator*. No 1918961 / 22-03 ; zajavl. 11.05.1973 ; opubl. 25.11.1977, Bjul. No 43. Print. **14**. A.s. 345970 SSSR, M1. Kl. V 03 S 1 / 30. Izmodjonov Ju. A., L. S. Lagunova and N. Ja. Topychkanov. *Magnitnyj fil'tr*. No 1452150 / 23-26 ; zajavl. 15.06.1970 ; opubl. 28.07.1972, Bjul. No 23. Print.

Поступила (received) 05.04.2014

УДК 616 – 073.65

Н. А. ЛЮБИМОВА, канд. техн. наук, доцент ХНАУ
им. В. В. Докучаева, Харьков

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРИ МНОГОМЕРНОМ КОНТРОЛЕ ПРОЦЕССОВ ЗАГРЯЗНЕ- НИЯ

Представлены результаты сравнительного анализа дисперсии ошибок прогнозирования (экстраполяции второго порядка) для двух вариантов обработки первичной информации при контроле многомерных (многокомпонентных) процессов промышленного загрязнения окружающей среды. Особенность исследуемой модели прогнозирования – коррекция условного математического ожидания случайного вектора входных сигналов на величину параметра нестационарности, учитывающего асимметрию закона распределения контролируемого процесса. Предложенная модель контроля может быть использована в экологическом мониторинге энергоемких предприятий.

Ключевые слова: модель, прогнозирование, многокомпонентное, загрязнение, экология.

Введение. Технологический процесс является основой любого производства. Он обеспечивает целенаправленное последовательное изменение свойств сырья, полупродуктов, вспомогательных материалов для получения нового продукта с заранее заданными свойствами. Технологический регламент является основным техническим документом, определяющим рецептуру, режим и порядок проведения операций технологического процесса. В специальном разделе регламента перечисляются все отходы производства (твердые, жидкие, газообразные), используемые и неиспользуемые, указываются их количества и технические характеристики. В регламенте дан перечень сточных вод и вы-

© Н. А. Любимова, 2014

бросов в атмосферу, указаны их количества, нормы содержания примесей, применяемые методы обезвреживания, а также меры по устранению нарушений режимов очистки стоков и выбросов в атмосферу. Для обеспечения технологического регламента при многомерном контроле выбросов и сбросов отходов энергоемких и энергетических предприятий необходимо совершенствовать модели прогнозирования. Это также даст возможность безаварийной работе предприятия и выполнению норм природопользования.

Постановка проблемы. Если рассматривать многокомпонентный процесс загрязнения как объект контроля и прогнозирования выбросов, то следует отметить принципиальное отличие такого объекта от многомерных (векторных) случайных процессов с прогрессирующей нестационарностью по математическому ожиданию.

Наличие в многокомпонентном процессе загрязнения хотя бы одного экстремального выброса по любой из компонент указывает на модель случайных скачкообразных изменений нестационарности по математическому ожиданию (и, возможно, по дисперсии). Регрессионные модели экстраполяции таких выбросов – неприемлемы, поскольку связаны с фильтрацией и использованием значительных выборок, распределенных во времени наблюдения.

Контроль многокомпонентного процесса связан с его параметрическим тестированием на базе критериальной статистики, в которой операция суммирования учитывает результаты измерений значений составляющих входного вектора.

Выбор приоритетной вычислительной процедуры:

- а) «суммирование – прогноз полученной суммы - тестирование»;
- б) «прогноз отдельно по составляющим – суммирование экстраполированных значений - тестирование»,

является достаточно сложной задачей оптимизации по минимуму дисперсии ошибки прогноза и заслуживает корректного статистического исследования.

Анализ литературы. Методы статистического прогноза (экстраполяции) случайных процессов достаточно широко используют в задачах контроля технического состояния сложных объектов, в машиностроении [1, 2], энергетике [3,4,5], когда контролируемые процессы узкополосны и имеют широкие автокорреляционные функции. Дискретизированные отсчеты таких процессов отличаются высокой связностью, что позволяет, используя регрессионные модели экстраполяции [6, 7], осуществлять прогнозирование параметрических отказов, работоспособности и остаточного ресурса промышленных технических объектов [8, 9]. Однако, все перечисленные методы не сопровождаются

обоснованием выбора последовательности вычислительных процедур, особенно, если имеются варианты их практического применения.

Цель статьи – описание модели статистического анализа вычислительных операций прогнозирования векторного случайного процесса, когда по результатам прогноза принимается решение о соответствии процесса контрольным нормативам.

Модель прогнозирования. В известной процедуре экстраполяции второго порядка [11], спрогнозированное на время экстраполяции Θ значение случайного процесса $x(t)$ равно:

$$\hat{x}(t_0 + \Theta) = m + \rho(\Theta)[x(t_0) - m], \quad (1)$$

где $x_0(t)$ - последний отсчет процесса в момент времени t_0 ;

m - условное математическое ожидание процесса;

$\rho(\Theta)$ - нормированный коэффициент линейной корреляции между двумя отсчетами процесса $x(t)$, разделенных интервалом времени Θ .

Если к математическому ожиданию m добавить поправку Δ , учитывающую асимметрию закона распределения процесса $x(t)$, то новая модель экстраполяции примет вид

$$\hat{x}(t_0 + \Theta) = m + \Delta + \rho(\Theta)[x(t_0) - m], \quad (2)$$

Модель двухэтапных вычислительных процедур прогнозирования.

Можно выделить два варианта использования вычислительных процедур при многомерном прогнозировании выбросов в многокомпонентных процессах загрязнения.

а). Предварительное суммирование пронормированных процессов

$$\overset{\circ}{x}_1(t), \dots, \overset{\circ}{x}_n(t)$$

$$\psi(t_0) = \sum_{i=1}^n \overset{\circ}{x}_i(t_0), \quad (3)$$

и экстраполяция значения полученной суммы на интервал Θ

$$\hat{\psi}(t_0 + \Theta) = \rho_{\psi}(\Theta) \cdot \psi(t_0). \quad (4)$$

б). Экстраполяция значений каждого из i процессов ($i = \overline{1, n}$) $x_1(t), \dots, x_n(t)$ на интервал Θ

$$\hat{x}_i(t_0 + \Theta) = \rho_i(\Theta) \cdot x_i(t_0), \quad (5)$$

И суммирование по экстраполированным значениям

$$\psi_{\Sigma}(t_0 + \Theta) = \sum_{i=1}^n \hat{x}_i(t_0 + \Theta). \quad (6)$$

Исследуем дисперсии ошибок прогнозирования $D^{(a)}_{\varepsilon}$ и $D^{(б)}_{\varepsilon}$ для вариантов а) и б) вычислительных процедур, с учетом использования скорректированной, на величину параметра нестационарности Δ , модели прогнозирования

$$\hat{x}(t_0 + \Theta) = m + \Delta + \rho(\Theta)[x(t_0) - m] \quad (7)$$

Вариант а). Дисперсия суммы $\psi(t_0)$, выражение (1), равна

$$D_{\psi} = n + \sum_{i=1}^n \Delta^2_i, \quad (8)$$

где Δ_i - параметр нестационарности процесса $x_i(t)$,

($i = \overline{1, n}$).

Нормированная автокорреляционная функция случайного вектора $\bar{x}(t)$ определяется суммой ковариаций (ненормированных автокорреляционных функций) составляющих $x_1(t), \dots, x_n(t)$ вектора $\bar{x}(t)$, отнесенных к дисперсии D_{ψ} :

$$\rho_{\psi} = \left(n + \sum_{i=1}^n \Delta^2_i \right)^{-1} \sum_{i=1}^n k_{x_i t}(\Theta) \quad (9)$$

Дисперсия ошибки многомерного прогноза по варианту а), в общем случае, равна:

$$D^{(a)}_{\varepsilon} = D_{\psi} \left[1 - \rho_{\psi}^2(\Theta) \right]$$

С учетом выражений (8), (9) получим

$$D^{(a)}_{\varepsilon} = n + \sum_{i=1}^n \Delta_i^2 - \left(n + \sum_{i=1}^n \Delta_i^2\right)^{-1} \left[\sum_{i=1}^n k_{x_{it}}(\Theta) \right]^2. \quad (10)$$

Вариант б). Дисперсия ошибки прогноза для i -го процесса $x_i(t)$, с учетом его нормировки, равна

$$D_{\varepsilon i} = (1 + \Delta_i^2) \left[1 - (1 + \Delta_i^2)^{-2} K_{x_{it}}^2(\Theta) \right] \quad (11)$$

Дисперсия суммы величин $D_{\varepsilon i}, i = \overline{1, n}$ определяется выражением

$$D^{(\delta)}_{\varepsilon} = n + \sum_{i=1}^n \Delta_i^2 - \sum_{i=1}^n K_{x_{it}}^2(\Theta). \quad (12)$$

Для уточнения, какая из дисперсий $D^{(a)}_{\varepsilon}$ или $D^{(\delta)}_{\varepsilon}$ минимальна, найдем их разность

$$e = D^{(a)}_{\varepsilon} - D^{(\delta)}_{\varepsilon} \quad (13)$$

и определим ее знак.

Подставляя выражения (10) и (12) для $D^{(a)}_{\varepsilon}$ и $D^{(\delta)}_{\varepsilon}$ в уравнение (13), получим:

$$e = n \left\{ \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_{x_{it}}^2(\Theta) \right] - \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_{x_{it}}(\Theta) \right]^2 \right\} + \left[\sum_{i=1}^n K_{x_{it}}(\Theta) \right]^2 \left[\frac{1}{n} + \frac{1}{n + \sum_{i=1}^n \Delta_i^2} \right] \quad (14)$$

Выражение в фигурных скобках множителя в первом слагаемом – это дисперсия ковариации $K_{x_{it}}(\Theta)$, которая всегда положительна

$$D_K = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_{x_{it}}^2(\Theta) \right] - \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_{x_{it}}(\Theta) \right]^2 > 0. \quad (15)$$

Положительным является и второе слагаемое в правой части выражения (14), поскольку:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left[\sum_{i=1}^n K_{x_i t}(\Theta) \right]^2 > 0 \\ \frac{1}{n} - \frac{1}{n + \sum_{i=1}^n \Delta_i^2} > 0 \end{array} \right. \quad (16)$$

Неравенства (15) и (16) показывают, что разность e (13) положительна, а следовательно,

$$D^{(a)}_{\varepsilon} > D^{(b)}_{\varepsilon}. \quad (17)$$

Следует отметить, что $e > 0$, т. е. условие (17) - справедливо независимо от соотношений между корреляционными функциями $K_{x_i t}(\Theta)$, $i = \overline{1, n}$, даже если они одинаковы, т. е.:

$$K_{x_1 t}(\Theta) = \dots = K_{x_n t}(\Theta), \quad (18)$$

если не равны нулю параметры нестационарности Δ_i

$$\Delta_i \neq 0 \text{ для всех } i = \overline{1, n}. \quad (19)$$

Если же вместо скорректированной модели прогноза (2) использовать традиционную модель (1), то условие (18) приводит к равенству дисперсий $D^{(a)}_{\varepsilon}$ и $D^{(b)}_{\varepsilon}$

$$D^{(a)}_{\varepsilon} = D^{(b)}_{\varepsilon},$$

что устраняет различия между вариантами а) и б), снимая вопрос минимизации, за счет выбора структуры вычислительных процедур, дисперсии ошибки прогноза.

Если же корреляционные функции процессов $x_1(t), \dots, x_n(t)$ неодинаковы, то разность e , выражение (13), всегда положительна, а вариант б) тем предпочтительнее, чем больше величины $\Delta_1, \dots, \Delta_n$ в скорректированной модели прогноза

$$\hat{x}(t_0 + \Theta) = m + \Delta + \rho(\Theta)[x(t_0) - m].$$

Модель контроля экстраполированного процесса.

Вариант б) процедуры многомерной экстраполяции может быть задан оператором $L\{x(t_0), \Theta\}$, реализующим модель (2) с учетом остаточного отклонения ε , дисперсия которого минимизирована и определяется выражением (12):

$$\hat{x}(t_0 + \Theta) = L\{x(t_0), \Theta\} + \varepsilon.$$

Остаток ε можно использовать для принятия решений γ_0 (процесс $x(t)$ соответствует норме), γ_1 (процесс норме не соответствует).

Правило выбора решения, при уровне значимости $\alpha = 0,05$, следующее:

$$\begin{aligned} \gamma_0: & \text{если } \varepsilon \in (-1,96\sqrt{D^{(\delta)}}; 1,96\sqrt{D^{(\delta)}}); \\ \gamma_1: & \text{если } \varepsilon \notin (-1,96\sqrt{D^{(\delta)}}; 1,96\sqrt{D^{(\delta)}}). \end{aligned}$$

Выводы. Проведенный сравнительный анализ вариантов вычисленных процедур преобразования первичной информации в результаты контроля показывает, что:

1. при использовании экстраполяции (прогнозирующих фильтров) следует учитывать последовательность этапов преобразования;
2. более эффективны при контроле случайных процессов процедуры кратковременного прогнозирования.

Список литературы: 1. Диментберг М. Ф. Случайные процессы в динамических системах с переменными параметрами. – М.: Наука, 1989. – 176 с. 2. Динамика транспортно-тяговых колесных и гусеничных машин / Е.Е.Александров, Д. О. Волонцевич, В. А. Карпенко, А. Т. Лебедев и др. / Х.: Из-во ХГФДЕУ (ХАДИ), 2001. – 642 с. 3. Бондаренко В.Е. Повышение эффективности эксплуатационного измерительного контроля трансформаторных масел: Монография / В.Е. Бондаренко, П.Ф. Щапов, О.В.Шутенко. – Х.: НТУ "ХПИ", 2007. – 452 с. 4. Шутенко О. В. Снижение неопределенности результатов испытаний при синтезе моделей старения трансформаторных масел / О. В.Шутенко, В. Е.Бондаренко, П. Ф. Щапов / 2 НТС «Неопределенность измерения: нормативные, научные, методические и производственные аспекты». -Х.: ХНУРЭ, 2005. – С. 85 – 87. 5. Щапов П. Ф. Дисперсионный анализ линейных моделей старения трансформаторных масел / П. Ф. Щапов, О. В. Шутенко, Д. В. Бондаренко / Интегровані технології та енергозбереження. – Х.: НТУ «ХП». – 2003. - №4. – С. 92 – 97. 6. Малайчук В.П. Обработка многомерных неста-

ционарных случайных пространственно-временных рядов в задачах мониторинга. [Текст] / В.П.Малайчук, А.В. Мозговой // Методи та прилади контролю якості. – Івано-Франківськ – 2005. - № 15 – с.90-93. 7. Щапов П. Ф. Планирование профилактического контроля маслonaполненного энергетического оборудования для выявления процессов старения с заданной достоверностью принятия решений // П.Ф.Щапов/ X.: Электротехника та електромеханіка. - 2005. - №3. - С. 65 – 68. 8. Филипов М. В. Подходы к оценке остаточного ресурса технических объектов [Текст] / М. В. Филипов, А. С. Фурсов, В.В.Клюев / К.: Контроль. Диагностика. - 2006. - №8 (98). – С. 6-16. 9. Бондаренко В. Е. Оптимизация системы информационных показателей качества трансформаторного, для технического эксплуатационного контроля маслonaполненного энергетического оборудования / В. Е. Бондаренко, О.В.Шутенко / X.:Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. №2– 2003. – С. 46 – 50. 10. Надежность и эффективность в технике: Справочник в 10 т. / Ред сонет: В. С. Авдуевский (предс.) и др. – М.: Машиностроение, 1987 – Т.9:Техническая диагностика. Под.. ред. В.В.Клюева, Г. П. Пархоменко. – 352 с. 11. Щапов П. Ф. Многоканальная термометрия при прогнозировании сосотояний термодинамических систем // П. Ф. Щапов/ Вісник НТУ «ХПІ»: 36. Наук. праць. Тематичний випуск: Автоматика та приладобудування. – 2003. - №7. – Т.3. – С.155-160. 12. Любимова Н.А. Информационный анализ процедур контроля загрязняющих выбросов энергоемких предприятий / Н.А. Любимова. – Технологический аудит и резервы производства // Технологический аудит и резервы производства. – 2014.№2/1 (16). – С. 8-11.

Bibliografy (transliterated): 1. Dimentberger M. F. *Random processes in dynamical systems with variable parameters*. - Moscow: Nauka, 1989. 2. *Dynamics of transport and traction of wheeled and tracked vehicles* Е.Е.Александров , D.O.Volontsevich, V. A. Karpenko, T. Lebedev et al H.: Out-of HGFDEU (HADI), 2001. 3. Bondarenko V. E. *Improving the efficiency of the operational control of the measuring transformer oils* : Monograph V. E. Bondarenko, P. F. Shchapov , O.V.Shutenko . - H.: NTU "KPI", 2007. 4. Shutenko O. V. *Reduced uncertainty of test results in the synthesis models of aging transformer oil* O.V.Shutenko , V.E.Bondarenko , PF Shchapov 2 NTS " Measurement uncertainty : regulatory, scientific , methodological and operational aspects." – Kharkov.. : KNURE 2005. - 85–87, Print. 5. Shchapov PF ANOVA linear models of aging transformer oil P. F. Shchapov, O. V. Shutenko, D. V. Bondarenko *Integrovani tehnologii that energoberezhennya*. - H.: NTU "KhPI ." - 2003. No4. 92-97, Print. 6. Malaychuk V. P. Processing of multidimensional non-stationary random space- time *Series in the monitoring problems* . [Text] V. P. Malaychuk , AV Brainstorming / Method that adjusted the control yakosti. - Ivano-Frankivsk. No15. 2005. 90- 93. Print 7. Shchapov P. F. *Planning preventive control of oil-filled equipment Emulcifying to identify aging with a given decision-making reliability* H.: Elektrotehnika that elektromehanika. No 3. 2005. 65-68. Print. 8. Filipov M.V. *Approaches to residual life assessment of technical objects* [Text] K.: Control. Diagnostics. No 8(98). 2006. 6-16. Print 9. Bondarenko V. E. *System optimization information of quality transformer, for technical operational control of oil-filled power equipment: Informatsiyno - keruyuchi system on zaliznichnomu transport*. No 2. 2003. 46-50. Print 10. Reliability and efficiency in engineering: Reference 10 tons Red sonnet : V. S. Avduevskii (preds.), etc. – Moscow. Mechanical Engineering . 1987. Vol. 9. Technical diagnostika . Under. Ed. V.V. Klyueva , G. P. Parkhomenko. 352. Print. 11. Shchapov P. F. *Multichannel sosotoyanie termometry in predicting thermodynamic systems*. News NTU "KhPI " : SC . Sciences . Prace. Tematichnee Preview Issue: Automation that priladobuduvannya. No7. 2003. Vol. 3. 155-160. Print. 12. Lyubimova N. A. *Information analysis procedures for monitoring pollutant emissions intensive enterprises*. Technology audit and production reserves . No 2/1(16). 2014. 8 - 11. Print.

Поступила (received) 05.04.2014

С. Н. ГЛОБА, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ";

ЛЕ ЧИ ХИЕУ, асп., НТУ "ХПИ";

Г. М. СУЧКОВ, докт. техн. наук, проф., НТУ "ХПИ";

А. А. ХЛЫБОВ, докт. техн. наук, проф., НГТУ, Нижний Новгород,
Россия

СОСТОЯНИЕ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ ТОЛЩИНЫ ПОКРЫТИЙ (ОБЗОР)

В работе проанализированы современные методы и средства контроля толщины неэлектропроводящих защитных покрытий на электропроводящем основании. Описаны достоинства, недостатки, возможности и условия применения основных методов контроля толщины покрытий. Установлена перспективность применения вихретокового метода. Описан принцип работы вихретокового метода контроля. Выделены три основных метода, которые целесообразно использовать для контроля толщины покрытий. Рассмотрены вихретоковые преобразователи и способы их подключения. Показана необходимость применения трансформаторных компенсированных преобразователей и исследования их возможностей.

Ключевые слова: контроль толщины покрытий, неэлектропроводящее покрытие, электропроводящее основание, вихретоковый метод, вихретоковый преобразователь, возбуждающая катушка, регистрирующая катушка.

Введение. Среди методов неразрушающего контроля толщины неэлектропроводящих покрытий на электропроводящем основании основополагающее место занимает вихретоковый метод, который в настоящее время интенсивно развивается. Такое положение обусловлено тем, что вихретоковый метод позволяет проводить контроля как ферромагнитных, так и ферромагнитных изделий. Он высокопроизводительный. Реализующие его приборы компактны и потребляют мало энергии.

Цель работы – анализ методов и средств неразрушающего контроля толщины неэлектропроводящих покрытий на электропроводящем основании, их возможностей и условий применения для контроля наиболее распространенных материалов основания, что важно для дальнейшего развития данного научного направления.

Общие вопросы контроля толщины неэлектропроводящих покрытий на электропроводящем основании.

Мировая промышленность чрезвычайно широко использует защитные покрытия [1-6]. Это обусловлено огромными экономическими

потерями от коррозии металлов. По оценкам специалистов различных стран, эти потери в промышленно развитых государствах составляют от 2 до 4 процентов валового национального продукта в год [7]. При этом потери металла, включающие массу вышедших из строя металлоконструкций, изделий и оборудования, составляют от 10 до 20% годового производства стали. Выход из строя оборудования вызывает простои, снижение мощности, расход металла и времени восстановления и т.д.

Огромную роль в обеспечении заданной прочности изделий и оборудования и их конструктивной надежности играет толщина защитных покрытий [8]. Ее величина определяет долговечность изделий, так как в процессе эксплуатации толщина может изменяться из-за эрозии, коррозии и механических повреждений. Поэтому проведение контроля толщины покрытий, как при производстве изделий, так и при их эксплуатации является необходимой операцией.

Для контроля толщины покрытий применяют разрушающие [8] и неразрушающие методы [7-11]. Разрушающие методы применяют в случаях невозможности использования неразрушающих методов, или для проверочных операций [8].

Методы контроля толщины покрытий.

Метод контроля толщины покрытия разрушением [8, 12]. Этот метод является универсальным, т.к. позволяет контролировать изделия, изготовленные из различного материала и при различных материалах основания. Однако он приводит к повреждению покрытия и применяется редко.

Неразрушающие методы контроля толщины покрытий. Основные методы неразрушающего контроля толщины покрытия определяются стандартом [13]. Чаще всего применяются: магнитный, акустический, вихретоковый, радиационный, термоэлектрический, оптический, электрический, тепловой, радиоволновой и др.

Магнитный метод контроля [14-23] основан на оценке характеристик взаимодействия магнитной системы с контролируемым изделием. С использованием магнитных методов производят контроль диэлектрических и электропроводных покрытий на ферромагнитных изделиях.

Среди магнитных методов наиболее часто применяются: магнитоиндукционный, магнитоиндуктивный, магнитостатический, магнитный пондеромоторный.

Магнитоиндукционный метод [7, 24] основан на определении изменения магнитного участка цепи (первичный преобразователь – ферромагнитная контролируемая деталь), зависящего от толщины покры-

тия, как правило по величине амплитуды, наводимой в измерительной катушке первичного преобразователя, возбуждающая катушка которого питается током низкой частоты.

Магнитоиндуктивный метод [21-22] основан на изменении индуктивного сопротивления обмотки первичного преобразователя, возбуждаемой переменным напряжением, в зависимости от толщины ферромагнитного покрытия на ферромагнитном основании. Как правило, применяют низкие частоты 50...1000 Гц. Изменение толщины покрытия вызывает изменение индуктивности и активного сопротивления катушки преобразователя. К недостаткам этого метода следует отнести зависимость результатов контроля от электромагнитных и ферромагнитных характеристик материала основания. Достаточно сложно выделить малый полезный сигнал на фоне возбуждающего. У него низкая чувствительность при контроле больших толщин покрытий.

Магнитостатический метод [7, 19] основан на измерении толщины покрытий с помощью магниточувствительных элементов: датчики Холла, магниторезисторов. Магнитное поле создается с помощью постоянных магнитов или электромагнитов, питаемых постоянным током. Датчики помещаются в разрыв магнитной цепи и измеряют изменение индукции магнитного поля, обусловленное изменением толщины покрытия. Недостатками такого метода является зависимость показаний от температуры и ферромагнитных характеристик материала основания.

Магнитный пондеромоторный метод [7, 18] основан на измерении силы отрыва, возникающей при растяжении пружины, прикрепленной к постоянному магниту, который располагается на поверхности диэлектрического покрытия. В момент равенства силы притяжения магнита к изделию и силы растяжения пружины. Длина растяжения пружины в этот момент обратно пропорциональна толщине покрытия. Недостатком этого метода является низкая чувствительность и зависимость показаний от формы магнита и поверхности изделия.

Ультразвуковой метод контроля толщины покрытий [24-26] основан на взаимодействии ультразвуковых колебаний с границами раздела материалов с различными акустическими свойствами. Могут применяться как импульсные, так и непрерывные ультразвуковые колебания. Используются продольные, сдвиговые, изгибные и поверхностные волны. Метод безопасный. Имеет широкий диапазон измерений толщин покрытий. Однако, в настоящее время применяется редко в виду достаточно сложной интерпретации результатов контроля, что обусловлено сложной картиной результирующего акустического поля. Существенно осложняет контроль необходимость создания акустиче-

ского контакта через слой специальной жидкости.

Радиационный метод контроля толщины покрытий [27-32] основан на регистрации и анализе ионизирующего излучения после его взаимодействия с покрытием и основанием изделия. Традиционно регистрируют изменение интенсивности потока обратного рассеяния бета-излучения в зависимости от толщины контролируемого покрытия. При бета-распаде часть излучения, попадая на вещество, поглощается им, а другая часть, отражаясь, рассеивается.

Достоинствами этого метода являются: дистанционность, удобство применения в автоматизированных системах контроля, долговечность источника излучения.

Существенными недостатками являются: малый диапазон измеряемых толщин, опасность для персонала, необходимость сложной тарировки и др.

Оптический метод контроля толщины покрытий [7, 33-36] основан на регистрации параметров оптического излучения, взаимодействующего с покрытием и материалом изделия. Оптический метод обладает высокой разрешающей способностью и чувствительностью. Он позволяет автоматизировать обработку получаемых изображений.

Оптические методы применяют для измерения толщины покрытий, обладающих хорошими оптическими свойствами, нанесенные на хорошо подготовленную поверхность. Покрытия могут быть прозрачными (лаковые, стеклянные, пластиковые), полупрозрачными (эпоксидные и аналогичные) и непрозрачными. Наиболее часто используют поляризационный, интерферометрический, фазовый и другие. Большинство оптических методов из-за сложности расчетов и применяемой дорогой аппаратуры используют только в лабораторных условиях для выборочного контроля или для проведения исследовательских работ.

Недостатками оптических методов являются зависимость результатов контроля от правильного выбора геометрических, спектральных, светотехнических и временных характеристик условий освещения и наблюдения объекта контроля.

Емкостный метод [37-41] основан на взаимодействии электрического поля между электродом и электропроводным изделием при наличии неэлектропроводного покрытия между ними. Физической информативной величиной является емкость полученного конденсатора. В случае контроля плоской детали емкость C такого конденсатора определяется из выражения

$$C = \frac{\varepsilon S}{4\pi h}, \quad (1)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость материала подложки;
 S – площадь электрода емкостного преобразователя;
 h – толщина покрытия на поверхности изделия.

Для конкретной конструкции емкостного преобразователя толщину покрытия можно определять из выражения

$$h = k \frac{\varepsilon}{C}, \quad (2)$$

где $k = \frac{S}{4\pi}$ – коэффициент, постоянный для данного преобразователя.

Если диэлектрическая постоянная материала покрытия известна, то толщину покрытия можно определить из выражения

$$h = \frac{k_1}{C}, \quad (3)$$

где $k_1 = \frac{\varepsilon S}{4\pi}$ – постоянный коэффициент.

К достоинствам емкостного метода следует отнести относительную простоту реализации при контроле плоских изделий.

К недостаткам емкостного метода следует отнести зависимость результатов контроля от шероховатости поверхности изделия, малый диапазон контролируемых толщин. Существенные сложности при контроле возникают в случае наличия кривизны контролируемой поверхности.

Тепловой метод [7, 42] основан на регистрации распространения тепловых полей в покрытии. При одинаковых свойствах материала покрытия и условиях контроля, чем больше толщина покрытия, тем больше время падения температуры на контролируемом участке, нагреваемым специальным устройством.

Недостатками этого метода являются продолжительность каждого цикла контроля и применимость только к материалам покрытия, выдерживающим нагрев.

Вихретоковые методы [7, 10, 43–90] неразрушающего контроля толщины покрытий основаны на анализе взаимодействия собственного электромагнитного поля вихретокового преобразователя с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в контролируемом объекте, которое зависит от электрофизических и геометрических параметров основного металла, а также характеристик покрытия.

Достоинствами вихретокового метода контроля, по сравнению с

рассмотренными ранее, является высокая производительность, отсутствие влияния на результаты контроля влажности, давления, загрязненность поверхности, простота конструкций вихретоковых преобразователей, отсутствие влияния на экологию окружающей среды и на оператора [7, 55, 66, 71–73, 75–77, 82]. Его можно использовать для контроля практически любых электропроводных или электропроводных и ферромагнитных изделий: листов, труб, сосудов, металлоконструкций, оборудования и др., в том числе с покрытиями, защищающими их от воздействия внешних факторов, без их удаления.

Принцип работы вихретокового метода контроля толщины покрытия можно пояснить с помощью рис. 1. Рассмотрим простой вариант трансформаторного вихретокового преобразователя в виде двух соосно расположенных катушек.

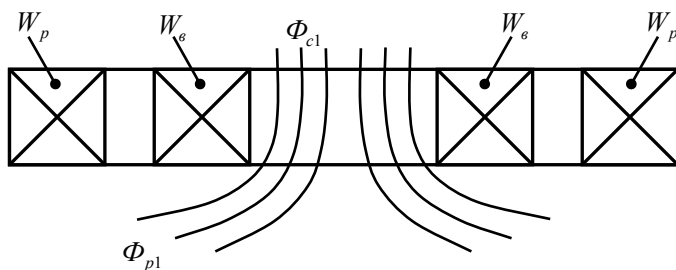


Рис. 1 – Упрощенная модель трансформаторного вихретокового преобразователя с двумя соосными катушками (без изделия в зоне контроля) [7]

Одна из катушек W_e будет возбуждающей, а W_p регистрирующей. Возбуждающая катушка питается переменным током. Тогда витки катушки возбуждения W_e сцеплены с магнитным потоком самоиндукции Φ_{c1} , а витки регистрирующей катушки W_p с магнитным потоком взаимной индукции Φ_{p1} , которую можно определить из выражения

$$\Phi_{p1} = \Phi_{c1} - \Phi_n, \quad (4)$$

где Φ_n – поток рассеяния.

Амплитуда магнитного потока самоиндукции Φ_{c1} в случае круглой катушки возбуждения можно выразить как

$$\Phi_{c1} = L_e I_e, \quad (5)$$

где L_e – индуктивность катушки возбуждения;

I_e – амплитуда тока в катушке возбуждения.

Соответственно [7, 36]

$$L_g = \mu_0 W_g^2 S_g / l, \quad (6)$$

где μ_0 – абсолютная магнитная постоянная;

W_g – число витков в катушке возбуждения преобразователя;

S_g – площадь эквивалентного витка катушки возбуждения;

l – средняя длина магнитных линий контура.

$$\Phi_{c1} = M I_g / W_p, \quad (7)$$

где M – коэффициент взаимной индукции между возбуждающей и регистрирующей катушками преобразователя;

W_p – число витков в регистрирующей обмотке.

Коэффициент взаимной индукции между возбуждающей и регистрирующей катушками определяется следующим образом

$$M = K \sqrt{L_g L_p}, \quad (8)$$

где L_p – индуктивность регистрирующей обмотки;

K – коэффициент связи, зависящий от геометрии и взаимного расположения катушек вихретокового преобразователя

В рассмотренном случае не использовались ферритовые сердечники и экраны. Следовательно, можно утверждать, что коэффициент связи обратно пропорционален потоку рассеяния.

ЭДС взаимной индукции будет равна [52, 71]

$$e(t) = -W_p d\Phi_{c1} / dt = -M dI_g / dt. \quad (9)$$

Как правило, для питания вихретокового преобразователя применяют гармонический ток возбуждения

$$I_g = I_0 \sin(\omega t), \quad (10)$$

где ω – круговая частота;

тогда

$$e(t) = -\omega W_p \Phi_{c1} \cos(\omega t). \quad (11)$$

Если в зону магнитного поля возбуждающей катушки внести электропроводящий объект, то в нем будет индуцирован вихревой ток. Вихревой ток, согласно закону Ленца, будет направлен таким образом,

что созданное им магнитное поле будет противодействовать магнитному полю, которое его создало. Следовательно, первичное магнитное поле исказится в пространстве, как показано на рис. 2.

Магнитное поле преобразователя и вихревых токов складываются по принципу суперпозиции [7, 48, 72]. Очевидно, что распределение плотности вихревых токов и фазы в различных точках объема электропроводного изделия будут различными. Наибольшая плотность вихревых токов будет наблюдаться в случае нулевого расстояния (зазора) h между катушками преобразователя и поверхностью изделия непосредственно под возбуждающей катушкой. При увеличении зазора (эквивалент толщины h покрытия на металле) плотность тока будет уменьшаться, а объем с наибольшей плотностью будет смещаться в наружную сторону [72]. Если катушки будут иметь круглую форму радиуса r_k , то радиус r_s наибольшей плотности тока можно определить по эмпирической формуле [7]

$$r_s = r_k + 1,5h. \quad (12)$$

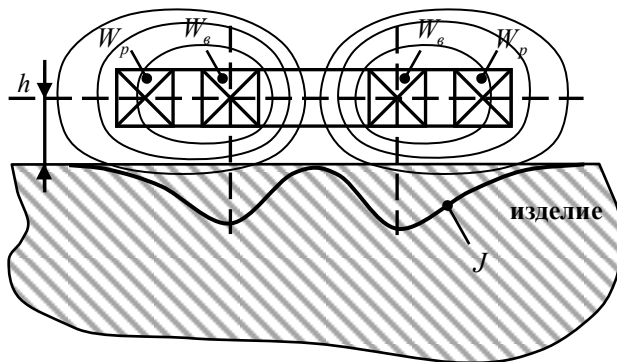


Рис. 2 – Модель пространственного распределения магнитного поля вихревого трансформаторного двухкатушечного преобразователя при наличии в зоне действия электропроводного изделия (J – плотность вихревых токов) [7, 44–45]

С увеличением глубины плотность вихревого тока уменьшается по закону близкому к экспоненциальному [81].

Значение фазы вихревого тока в области его наибольшей плотности, непосредственно на поверхности изделия, сдвинуто на угол более 180 относительно фазы тока в катушке возбуждения. С увеличением глубины от поверхности металла разница фазы становится еще больше [7, 84].

Глубина проникновения вихревых токов определяется размером

катушки возбуждения, частотой тока питания, электропроводностью и магнитной проницаемостью материала изделия [88]. Т.е. полезный сигнал, получаемый на регистрирующей катушке, будет зависеть как от параметров возбуждающей катушки, так и от характеристик материала контролируемого изделия.

Существенным недостатком описанного варианта преобразователя является то, что при взаимодействии с объектом контроля амплитуда и фаза регистрируемого сигнала относительно мала. Так приращение амплитуды сигнала не превышает 3...10 %, а фазы – 1...3 градуса [7]. При этом чувствительность к толщине покрытия может быть соизмерима с величиной электромагнитных помех, а выделение полезного приращения сигнала на фоне возбуждающего становится проблематичным [76].

Увеличить чувствительность контроля толщины диэлектрических покрытий возможно за счет применения частотного метода измерения. Для его реализации применяется, как правило, одна катушка индуктивности, включенная в резонансный контур генератора [7, 67]. При изменении толщины покрытия изменяется индуктивность катушки преобразователя и его активное сопротивление. Соответственно изменяется и частота колебаний, величину которой достаточно легко измерить с высокой точностью. Поскольку резонансная частота будет зависеть от электропроводности и магнитной проницаемости материала изделия, то необходимо выбирать обобщенный параметр β [7] в диапазоне 60...200.

К преимуществам частотного метода следует отнести возможность изготовления вихретокового преобразователя с высокой частотой генерации. И самое главное – простота конструкции преобразователя и схем включения.

Главным недостатком является существенная зависимость результатов контроля от локальных электрофизических характеристик материала изделия [50–51].

Одним из методов существенного увеличения чувствительности к толщине покрытия является использование способов компенсации возбуждающего напряжения [61, 68–70, 76]. Как правило, компенсацию проводят при условии отсутствия изделия в зоне контроля, т.е. при h стремящимся к бесконечности. Наиболее разработанным вихретоковым преобразователем, реализующий дифференциальный метод, является четырехобмоточный трансформаторный датчик [76]. Его результирующее напряжение будет нелинейно зависеть от толщины покрытия. Наибольшей чувствительностью такой метод обладает при малых величинах толщины покрытий.

К недостаткам такого метода относится также существенная зависимость амплитуды информационного сигнала от электромагнитных свойств материала, из которого изготовлено изделие [50–51]. Для частичной компенсации влияния электропроводности изделия параметры преобразователя и напряжение возбуждения выбирают такими, чтобы обобщенный параметр β по величине был значительным, как правило, на уровне 60.

Для уменьшения влияния мешающих факторов применяют фазовый метод вихретокового контроля толщины неэлектропроводных покрытий [7, 15, 48]. В таком варианте измеряемым, и компенсируемым при калибровке, является фаза информационного сигнала. Этот метод дает возможность компенсировать частично влияние изменения электропроводности ферромагнитных материалов изделия. При контроле электропроводных и ферромагнитных материалов, а таких материалов подавляющее большинство, точность контроля будет недостаточной.

Более сложный вариант метода вихретокового контроля толщины покрытия является амплитудно-фазовый [7, 66, 68–72]. В этом случае информативными параметрами являются амплитуда и фаза регистрируемого сигнала. Его реализация существенно сложнее ранее описанных, дорогая в реализации, и, как правило, применяется при контроле многослойных покрытий изготовленных из электропроводных и (или) ферромагнитных материалов.

Таким образом, можно выделить три основных метода, которые целесообразно использовать для контроля толщины покрытий:

1. Амплитудный метод, основанный на измерении амплитуды разностного напряжения преобразователя (применим для измерения толщины неэлектропроводных покрытий на электропроводном и (или) ферромагнитном основании);
2. Фазовый метод, основанный на изменении фазы разностного сигнала преобразователя (универсальный метод);
3. Амплитудно-фазовый метод, основанный на регистрации фазы и амплитуды разностного напряжения преобразователя (позволяет частично отстраиваться от влияния мешающих факторов).

Недостатками отмеченных методов является необходимость изготовления с высокой точностью нескольких катушек вихретоковых преобразователей, а также сложность функциональных преобразований для определения первичных информативных параметров.

Известным методом повышения чувствительности вихретоковых преобразователей является использование ферритовых сердечников [74, 81, 83–84]. Однако их применение дает существенный положительный эффект только при стабильных температурах среды, в кото-

рых используется преобразователь [7]. Кроме того, в преобразователях с ферритовыми сердечниками создаваемое поле сосредоточено в малом объеме и, следовательно, результаты контроля будут зависеть от локальных неоднородностей электрофизических свойств материала объекта контроля [50–51]. Поэтому целесообразно создавать датчики без ферритовых или аналогичных сердечников.

Еще одним перспективным методом повышения чувствительности преобразователей для контроля является использование пространственного расположения электромагнитных полей возбуждения относительно регистрирующей катушки трансформаторного вихретокового преобразователя [52, 87–88]. Такое техническое решение позволяет, во всяком случае, при дефектоскопии изделий, заметно ослабить влияние магнитной проницаемости и электропроводности материала на результаты контроля. При этом вихретоковый преобразователь не требует высокоточного изготовления, не имеет ферромагнитных сердечников, охватывает при контроле достаточно большую площадь поверхности, что исключает весомое влияние локальных неоднородностей свойств поверхности изделия

Вихретоковые преобразователи для контроля толщины покрытий и методы их подключения.

Разнообразие задач контроля предполагает несколько возможных исполнений первичных преобразователей, которые можно разделить по следующим основным признакам [7, 10, 66, 68, 79, 86, 87–88]:

По взаимному расположению катушек и объекта контроля на: накладные; проходные; экранные; комбинированные.

По количеству и назначению катушек на: однокатушечные; трансформаторные; дифференциальные; абсолютные.

По наличию и типу сердечника: с неферромагнитным сердечником; с ферритовым сердечником.

По наличию и типу внешнего экрана на: неэкранированные; экранированные ферритовым экраном; экранированные стальным разрезным экраном; экранированные стальным неразрезным экраном; экранированные неразрезным неферромагнитным экраном.

По схеме подключения обмоток и их балансировке на: небалансируемые; балансируемые витками; балансируемые дополнительными ферритовыми сердечниками; балансируемые электрическим способом.

На рис. 3 приведены основные конструкции вихретоковых преобразователей для измерительного контроля.

Трансформаторные преобразователи как правило включают по дифференциальной схеме [52, 88]. При этом возможны реализации схем сравнения со стандартным образцом и схем «самосравнения» [7].

В первом случае рабочий и образцовый ВТП не связаны индуктивно и имеют независимые регистрирующие и возбуждающие обмотки [45]. Во втором случае обмотка возбуждения служит общей для двух регистрирующих. Однако в ряде случаев регистрирующую обмотку включают последовательно с регулятором амплитуды и фазы напряжения, необходимые для компенсации [72]. При этом компенсатор выполняет функцию образцового датчика. Когда рабочим преобразователем контролирует стандартный образец, то компенсатором устанавливается необходимое напряжение компенсации. Такая схема позволяет устранить нестабильность, связанную с разогревом стандартного образца вихревыми токами.

С помощью дифференциальных вихретоковых преобразователей можно резко повысить отношение полезный сигнал-помеха в дефектоскопии [7]. При этом обмотки преобразователя размещают так, чтобы их сигналы исходили от близкорасположенных участков контроля одного объекта. Такой подход позволяет уменьшить влияние плавных изменений электрофизических и геометрических параметров изделия.

Для решения широкого круга задач дефектоскопии различных металлических объектов применяют накладные вихретоковые преобразователи. Накладными вихретоковыми преобразователями контролируют в основном объекты с плоскими поверхностями и объекты сложной формы. Они применяются, когда необходимо обеспечить локальную и высокую чувствительность контроля.

Накладные вихретоковые преобразователи размещают вблизи поверхности ОК. Они имеют одну или несколько обмоток. Их оси располагают нормально к поверхности ОК, т.е. прикладывают торцом к ОК, как показано на рис. 3, где приведены основные конструкции накладных вихретоковых преобразователей.

Чаще всего для контроля большинства изделий используют накладные преобразователи. Они могут иметь несколько отличающихся измерительных обмоток с разным расположением их относительно оси возбуждающей обмотки, т.е. комбинированные [52, 68]. Измерительные обмотки такого трансформаторного преобразователя могут отличаться радиусами, пространственным расположением, расстоянием до возбуждающей обмотки, числом витков, формой витков и т.п.

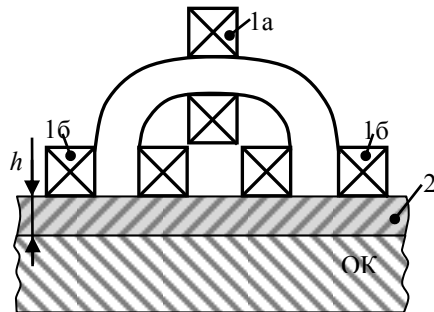
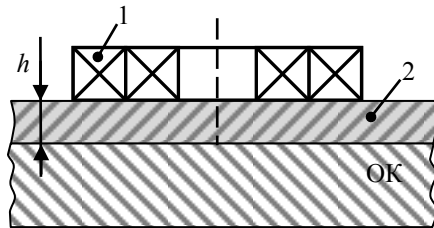
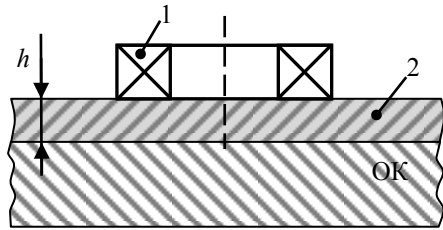


Рис. 3 – Упрощенные конструкции первичных вихрековых накладных преобразователей для измерительного контроля толщины покрытий [7]:

1 – вихрековый преобразователь; 2 – покрытие; ОК – объект контроля;
 1а – регистрирующая обмотка; 1б – возбуждающая обмотка

Расположение регистрирующих катушек относительно возбуждающей может быть самым разнообразным как по линейным, так и по угловым показателям. Комбинированные накладные преобразователи часто позволяют сравнительно просто подавлять влияние различных мешающих факторов.

Примером комбинированного накладного ВТП является дифференциальный датчик с двумя идентичными и встречно включенными обмотками, расположенными в одной плоскости со смещением их относительно центра возбуждающей катушки и симметричным их расположением [88] (рисунок 4). Выходное напряжение этого преобразователя равно нулю при однородном контролируемом объекте и реагирует на разность свойств на участках I и II, в частности, на изменение от участка I к участку II удельной электрической проводимости, магнитной проницаемости или толщины, а также на резкие неоднородности в виде дефектов [65].

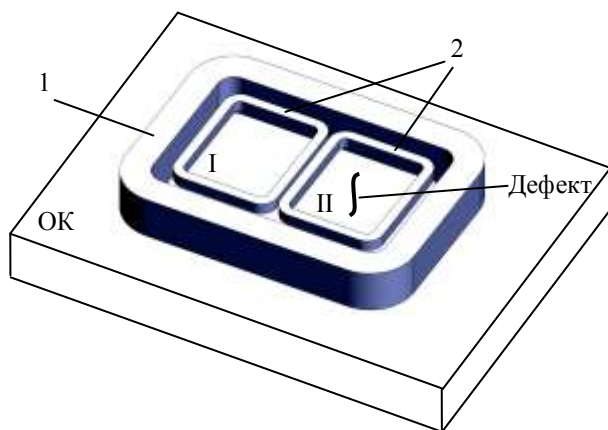


Рис. 4 – Структура дифференциального накладного преобразователя со смещенными обмотками [88]:
1 – возбуждающая обмотка; 2 – измерительная обмотка

Для обнаружения дефектов может быть использован накладной ВТП с ортогональными обмотками (см. рис. 5). Напряжение на вертикально расположенной обмотке при симметричном расположении ВТП относительно ОК будет нулевым, поскольку в этом случае отсутствует составляющая магнитного поля, пересекающая плоскость витков измерительной обмотки ВТП [87–88].

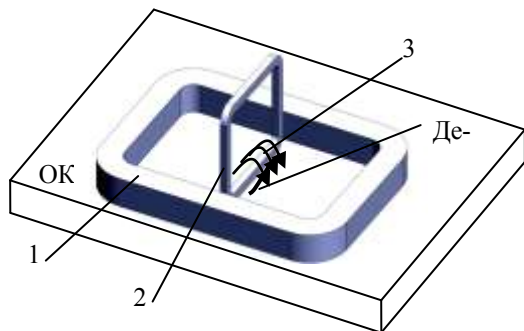


Рис. 5 – Конструкция накладного ВТП с ортогональными обмотками[88]: 1 – возбуждающая обмотка; 2 – измерительная обмотка; 3 – поле рассеяния дефекта

При попадании в зону контроля неоднородности электромагнитных свойств ОК или какого-то дефекта симметрия вихревых токов нарушается, пространственное распределение результирующего электромагнитного поля изменяется и появляется напряжение, связанное с наличием отклонения контролируемого объекта от нормы. Такой принцип является перспективным для измерения толщины покрытия.

В настоящее время широко применяются мультидифференциальные ВТП (см. рис. 6). Они представляют собой многоэлементную систему с одной катушкой возбуждения и несколькими (чаще всего 2 или 4) приемными [66].

Размеры самой малой неоднородности свойств или дефекта, обнаруживаемых приведенными комбинированными преобразователями, зависят от точности их изготовления и влияния факторов, изменяющих их геометрическое расположение относительно ОК. Поэтому для получения хорошего результата контроля необходимо тщательно изготавливать и настраивать комбинированные накладные ВТП во избежание появления ложных сигналов или большого остаточного уровня напряжения недостаточной компенсации. Кроме того, такие преобразователи сложны в изготовлении.

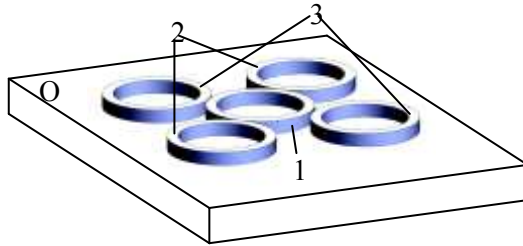


Рис. 6 – Схема мультидифференциального ВТП [66]:

1 – катушка возбуждения; 2 – 1-я пара дифференциально включенных измерительных катушек; 3 – 2-я пара дифференциально включенных измерительных катушек

В работе [7] предложена развернутая классификация вихретоковых накладных преобразователей, позволяющая выделить ряд перспективных конструкций, которые ранее не были классифицированы или относились к классу специальных.

Разнообразие вихретоковых преобразователей приводит к необходимости использования разнообразных соответствующим им схем питания [75, 79, 82, 88].

Использование параметрических вихретоковых преобразователей остается популярным, так как позволяет упростить аппаратуру и обеспечивает её универсальность. Основными вариантами схем включения таких ВТП являются автогенераторные и мостовые схемы [7, 88].

В автогенераторном варианте (см. рис. 7) катушка преобразователя является элементом колебательного контура и таким образом изменение полного ее сопротивления преобразуется в информативный параметр – изменение частоты.

В настоящее время существуют двухконтурные автогенераторные схемы с блоком регенерации колебаний [85], позволяющие отстроиться от влияния зазора. Следовательно, такие преобразователя для контроля толщины покрытия использоваться не могут.

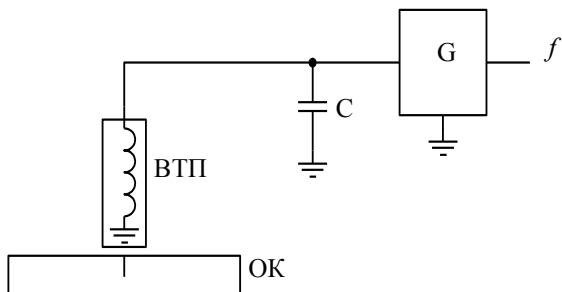


Рис. 7 – Автогенераторная схема включения вихретокового преобразователя [7]

Мостовая схема включения параметрического преобразователя (см. рис. 8) является классической [7]. Полезным сигналом является разностное напряжение и фазовый сдвиг относительно возбуждающего тока. Как видно из схемы приборы, использующие данное включение датчика, она обязательно имеет балансную катушку с индуктивностью L , что создает проблемы, когда значение индуктивности преобразователя значительно отличается от L . Результатом является снижение чувствительности контроля. Однако, современные производители вихретоковой аппаратуры частично решают эту проблему, помещая балансную катушку в элементы кабеля питания датчика или в блок отдельного адаптера [77]. На практике приборы, реализующие автогенераторные и мостовые схемы могут использовать один и тот же преобразователь.

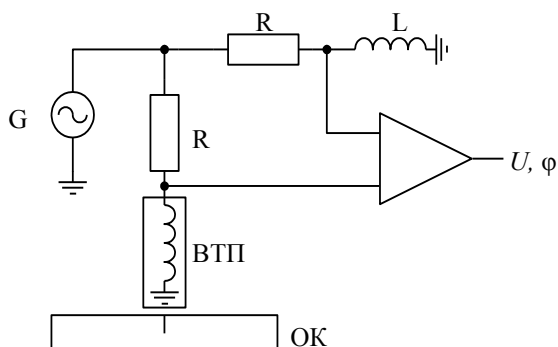


Рис. 8 – Мостовая схема включения ВТП с балансной катушкой L [77]

Более эффективными для вихретокового контроля являются дифференциальные преобразователи, включенные в мостовую схему (см. рис. 9). Такие преобразователи имеют идентичные обмотки, причем одна для другой играет роль балансной [88]. Такая схема выделяет изменения импеданса, вызванные толщиной покрытия или дефектами (или другими воздействиями). После детектирования выходными параметрами могут быть величины, как и в предыдущем варианте с одной обмоткой. Большинство вихретоковых приборов могут работать в таком варианте.

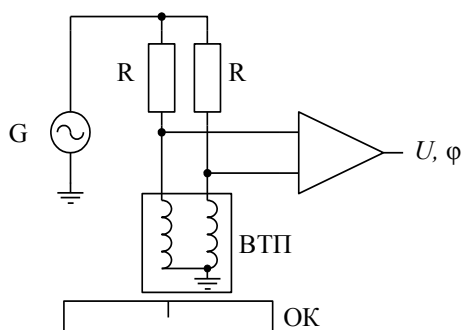


Рис. 9 – Мостовая схема включения дифференциального параметрического ВТП [88]

Рассмотрим схемы включения трансформаторных преобразователей также известных как ВТП типа «передача-прием» [88]. В общем случае этот принцип представлен схемой на рис. 10. Вихревые токи создаются возбуждающей обмоткой подключенной к схеме генератора. Выводы приемной катушки соединены со схемой усиления и детектирования. Выходными параметрами являются амплитуда и фаза. Такая схема нашла большое распространение, так как обеспечивает задание амплитуды тока возбуждения в большом частотном диапазоне без перестройки элементов ВТП.

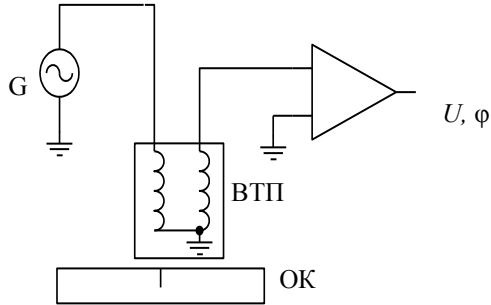


Рис. 10 – Схема включения трансформаторного ВТП [88]

Схемы более сложных трансформаторных ВТП [7, 51, 66] представлены на рис. 11. Такие ВТП имеют более двух обмоток и позволяют получать более информативные сигналы в сравнении с рассмотренными выше.

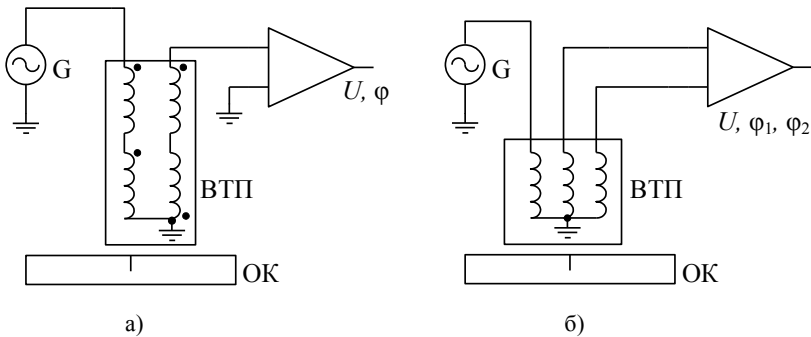


Рис. 11 – Схемы включения дифференциальных трансформаторных ВТП [66]

Как следует из рассмотренных способов включения ВТП, наиболее распространенными являются мостовая схема и схема с трансформаторным преобразователем. Рассмотрим особенности обеих схем.

Усиление. Схемы с трансформаторными ВТП более чувствительны, особенно если настроены на определенную частоту. Это связано с коэффициентом трансформации, который задается соотношением количества витков возбуждающей и измерительной обмоток [45].

Частотный диапазон. В мостовой схеме необходима балансировка, а это возможно лишь в узком частотном диапазоне. Трансформа-

торная схема может работать в большом диапазоне частот, который ограничен лишь возможностью создания тока возбуждения [7].

Дрейф. Дрейф ВТП главным образом вызван температурными изменениями в катушках или сердечниках (при их использовании) [50–51]. Это может быть вызвано окружающими условиями или током генератора. В данном случае у трансформаторного преобразователя явное преимущество.

С учетом вышеизложенного можно констатировать, что для обеспечения качественного контроля толщины диэлектрических покрытий на электропроводных изделиях и объектах целесообразно использовать трансформаторные вихретоковые преобразователи без сердечников. Схемы включения таких преобразователей должны компенсировать влияние возбуждающего напряжения на информационный сигнал. Диапазон измеряемых толщин должен быть значительным. Влияние локальных изменений электрофизических свойств материала изделия на информационные сигналы должно быть минимальным.

Естественно, что применение вихретоковых приборов для контроля толщины покрытий должно обеспечивать точность и достоверность измерений [89-98]. Они обеспечиваются соответствующим метрологическим обеспечением, под которым понимается установление и применение научных организационных основ, технических средств, правил и норм, необходимых для достижения единства и точности контроля толщины покрытий [92]. Строгое следование основным положениям метрологических требований при разработке, производстве и эксплуатации средств контроля являются ключевым условием достоверности получаемых результатов измерений [98].

Выводы

1. В результате анализа информационных источников установлено, что наиболее эффективным для контроля толщины диэлектрических покрытий на электропроводном или электропроводном и ферромагнитном изделии является вихретоковый метод. Он применяется на транспорте, нефтегазовой отрасли, для контроля объектов и оборудования в условиях эксплуатации, при выпуске продукции. Этот метод имеет существенные преимущества перед другими методами. В то же время большинство его реализаций сложные, дорогостоящие и имеют недостаточно широкий диапазон контроля. Уровень чувствительности на различных диапазонах не соответствуют установленным нормам.

2. В связи с повышением требований к качеству выпускаемой продукции с покрытиями и поддержания качества покрытий на эксплуатируемых объектах требуется создание метода и средств контроля

толщины покрытий с широким диапазоном измерений и чувствительностью на соответствующих участках диапазона контроля. Такой метод и реализующие его недорогие приборы могут дополнить традиционный парк вихретоковых устройств.

3. Анализом установлено существенное влияние на результаты контроля локальных изменений магнитной проницаемости и электропроводности материала изделия, температуры, напряжений и других факторов. Необходимо исследовать степень влияния указанных факторов и минимизировать их влияние.

4. Необходимо разработать вихретоковые преобразователи, системы их питания, обработки информации, визуализации результатов контроля, которые бы обладали повышенными эксплуатационными свойствами при относительно незначительной их стоимости. Необходимо исследовать характеристики разработанного прибора.

Список литературы: 1. ГОСТ 9.032-74. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Группы, технические требования и обозначения. – Взамен ГОСТ 9894-61; введ. 01.07.1975. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 20 с. 2. ГОСТ 9.104-79. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Группы условий эксплуатации. – Взамен ГОСТ 9.009-73; введ. 01.07.1980. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 2 с. 3. ГОСТ 9.402-2004. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Подготовка металлических поверхностей к окрашиванию. – Взамен ГОСТ 9.402-80; введ. 01.01.2006. – М: Стандартинформ, 2006. – 38 с. 4. ГОСТ 9.301-86. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Общие требования. – Взамен ГОСТ 9.301-78; введ. 01.07.1987. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 16с. 5. ГОСТ 9.303-84 Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Общие требования к выбору. – Взамен ГОСТ 14623-69; введ. 01.01.1985. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 46 с. 6. ГОСТ Р 51694-2000. Материалы лакокрасочные. Определение толщины покрытия. – введ. 01.01.2002. – М.: Госстандарт России, 2002. – 20 с. 7. *Потапов А. И., Сясько В. А.* Неразрушающие методы и средства контроля толщины покрытия и изделий / Научное, методическое и справочное пособие. – СПб., 2009. – 904 с. 8. *Ямольский А. М.* Контроль качества покрытий. – М.-Л.: Машиностроение, 1966. – 237 с. 9. *Буняев В. А., Болдырев В. Т., Долгих В. В.* Вихревой измеритель толщины покрытий. // Измерительная техника. – 1991, №1 – С. 26-28. 10. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. *В. В. Клюева*. Т.2: В 2 кн. Кн. 1: *А. И. Евлампиев, Е. Д. Попов, С. Г. Сажин, Л. Д. Муравьева, С. А. Добротин, А. В. Половинкин, Ю. А. Кондратьев.* Контроль герметичности. Кн 2: *Ю. К. Федосенко, В. Г. Герасимов, А. Д. Покровский, Ю. Я. Останин.* Вихретоковый контроль. – М.: Машиностроение, 2006. – 688 с. 11. *Бабаджанов Л. С., Маргадзе А. Р.* Прибор для измерения толщины покрытия и геометрических размеров. // Измерительная техника. – 1991, № 11. – С. 28–30. 12. *Абрамсон Д.С., Орлова С. И.* Контроль электролитов и качества гальванопокрытий. – М.- Л.: Машгиз, 1950. – 98 с. 13. ГОСТ 18353-79. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. – Взамен ГОСТ 18353-73; введ.01.07.1980. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 12 с. 14. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. *В. В. Клюева*. Т. 6: В 3 кн. Кн. 1: *В. В. Клюев, В. Ф. Мужижский, Э. С. Горкунов, В. Е. Щербинин.* Магнитные методы контроля. – М.: Машиностроение, 2006. – 832 с. 15. Неразрушающий контроль металлов и изделий: Справочник / Под ред. *Г. С Самойловича*. Т. 2. – М.: Ма-

шиностроение, 1976. – 456 с. **16.** *Вязовой И. П.* Магнитный толщиномер с универсальной шкалой // Заводская лаборатория. – 1959. № 2. – С. 14-18. **17.** Каталог ООО «Контроль. Измерение. Диагностика». Выпуск 3. 2006. – 24 с. **18.** Проспект фирмы «ПАНАТЕСТ». «Приборы для контроля качества покрытий», 2007. – 40 с. **19.** Приборы контроля качества покрытий. Elkometer. – 2007. – 79 с. **20.** Проспект фирмы МЕГА Инжиниринг. – 2004. – 47 с. **21.** Проспект ООО НПП «Технотест-М». Толщиномер покрытий ТМ-2. – 2003. – 1 с. **22.** Модульная система измерения толщины покрытий. www.panatest.ru. **23.** Проспект Ассоциации «Спектр-групп. Магнитный толщиномер МТ-51НП». – 2004. – 1 с. **24.** Неразрушающий контроль: Справочник: в 8 т. Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 3. Ультразвуковой контроль. – М.: Машиностроение, 2003. – 864 с. **25.** Tourin A, Derode A., Peyre and Fink. parameters for an ultrasonic pulsed wave propagating in a multiple scattering medium. J. Acoust. Am. 2000. Vol. 108, N 2. – P. 503–512. **26.** Пат. 2225592 Российская Федерация, МКП G01B17/02. Ультразвуковой толщиномер/ *Сясько В. А., Булатов А. С.*; Заявитель и патентообладатель Санкт-Петербург Федеративное Государственное унитарное предприятие Центральный науч.-исслед. ин-т технологии судостроения заявлен 15.10.02; опубл. 10.03.04. – 2 с. :ил. **27.** ГОСТ 24034-80. Контроль неразрушающий радиационный. Термины и определения. – Введен впервые; введ. 01.07.1981. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 12 с. **28.** Неразрушающий контроль. Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. *В.В. Клюева*. Т. 1: В 2 кн. Кн. 2: *Ф. Р. Соснин*. Радиационный контроль. – М.: Машиностроение, 2006. – 560 с. **29.** <http://www.thermo.com/> **30.** <http://www.upa.com/> **31.** <http://www.karatmeter.com/> **32.** <http://www.oxford-instruments.com/> **33.** ГОСТ 9.302-88. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы контроля. – Взамен ГОСТ 9.302-79; введ. 01.01.1990. – М.: Изд-во стандартов, 1990 – 40с. **34.** *Комраков Б. М., Шапочкин Б. А.* Измерение параметров оптических покрытий. – М.: Машиностроение, 1986. – 132 с. **35.** *Андреев С. В., Губанов Л. А.* Исследование оптических постоянных металлов // Оптические и лазерные технологии. Сб. стат. Санкт-Петербург. – 2001. – С.74-83. **36.** *Валитов А. М., Шилов Г. И.* Приборы и методы контроля толщины покрытий. 1970. – М.: Машиностроение. – 120 с. **37.** *Розенфельд И. Л., Люховников Ю. П.* Емкостной метод определения толщины и сплошности лакокрасочных покрытий на металлах // Заводская лаборатория. – 1958. №2. – С. 26-31. **38.** *Гриневиц Ф. Б.* Измерительные компенсационно – мостовые устройства с емкостными датчиками / Гриневиц Ф.Б., Новик А.И. – К.: Наук. думка, 1987. – 112 с. **39.** *Брайловский В. В., Фуштей Н. М., Шеляг А. Р., Ткаченко О. Т.* Измерение механических перемещений емкостным датчиком. // Измерительная техника. – 1988. №4. – С. 20-21. **40.** *Бухгольц В. П.* Емкостные преобразователи в системах автоматического контроля и управления / Бухгольц В.П., Тисевич Э.Г. – М.: Энергия, 1972. – Вып. 464. – 78 с. **41.** Ацюковский В.А. Емкостные преобразователи перемещений / В.А. Ацюковский. – М.: Л.: Энергия, 1966. – 276 с. **42.** Plog H. Methods and equipment for measuring the thickness of coatings // Metall finishing Journal. 1965, v.11. N 132. — P. 863-870. **43.** ГОСТ 24289-80. Контроль неразрушающий вихрековый. Термины и определения.; введ. 01.07.1981. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 9 с. **44.** *Дорофеев А. Л.* Индукционная толщинометрия / А. Л. Дорофеев, А. И. Никитин, А. Л. Рубин. – М.: Энергия, 1978. – 184 с. **45.** *Герасимов В. Г.* Методы и приборы электромагнитного контроля промышленных изделий / В. Г. Герасимов, В. В. Клюев, В. Е. Шатерников. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 272 с. **46.** *Конюхов Н. Е.* Электромагнитные датчики механических величин / Н. Е. Конюхов, Ф. М. Медников, М. Л. Ничаевский. – М.: Машиностроение, 1987. – 256 с. **47.** *Каневский И. Н.* Неразрушающие методы контроля / И. Н. Каневский, Е. Н. Сальникова. – Владивосток: ДВГТ, 2007. – 243 с. **48.** Дорофеев А.Л., Казамапов Ю.Г. Электромагнитная дефектоскопия.–М.: Машиностроение,1980. – 232 с. **49.** Nondestructive Testing Handbook, Third Edition: Volume 5, Electromagnetic Testing / Satish S Upda (technical editor), Patrick O'Moore (editor). – ASNT, 2004. – 536 p. **50.** *Власов В. В.* Об избирательности накладной поисковой системы к поверхностным

трещинам при электроиндуктивном контроле стальных изделий. I. Анализ физических основ контроля и методика исследований / *В. В. Власов* // Дефектоскопия. – 1970. – № 1. – С. 95–101. **51. Власов В. В.** Об избирательности накладной поисковой системы к поверхностным трещинам при электроиндуктивном контроле стальных изделий. II. Изучение реакции искательного элемента на участки обезуглероживания и наклепа / *В. В. Власов* // Дефектоскопия. – 1970. – № 1. – С. 101–109. **52. Соболев В. С.** Накладные и экранные датчики: для контроля методом вихревых токов. Акад. наук. Ин-т автоматизации и электрометрии / *В. С. Соболев, Ю. М. Шкарлет*. – Новосибирск: Наука, 1967. – 144 с. **53. Зацепин Н. Н.** Исследование магнитного поля вихревых токов над поверхностными дефектами проводящих изделий / *Н. Н. Зацепин* // Дефектоскопия. – 1969. – № 4. – С. 103–112. **54. Сварка. Резка. Контроль:** Справочник. В 2-х томах / Под общ. ред. *Н. П. Алешина, Г. Г. Чернышова*. – М.: Машиностроение, 2004. Т. 1 / *Н. П. Алешин, Г. Г. Чернышов, Э. А. Гладков* и др. – 624 с. **55. Сварка. Резка. Контроль:** Справочник. В 2-х томах / Под общ. ред. *Н. П. Алешина, Г. Г. Чернышова*. – М.: Машиностроение, 2004. Т. 2 / *Н. П. Алешин, Г. Г. Чернышов, А. И. Акулов* и др. – 480 с. **56. Сазонов Ю. И.** Проблемы технической диагностики электронно-лучевой хозяйки / *Ю. И. Сазонов* // Дефектоскопия. – 2006 – № 12. – С. 70–88. **57. Троицкий В. А.** Дефекты сварных соединений и средства их обнаружения / *В. А. Троицкий*. – К.: «Высшая школа», 1983. – 144с. **58. Учанин В. Н.** Вихретоковый контроль сварных соединений / *В. Н. Учанин* // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2008. – № 4. – с. 71–80. **59. Тетерко А. Я.** Селективна вихрострумова дефектоскопія / *А. Я. Тетерко*. – Львів: ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України. 2004. – 248 с. **60. Assler H.** Design of Aircraft Structure under Special Consideration of NDT – 9-th Europ. Conf. for NDT, Berlin. 2006 (интернет-журнал www.ndt.net – 2006. – 11. – № 11). **61. Луценко Г. Г.** Вихретоковый контроль литых деталей с грубо обработанной поверхностью / *Г. Г. Луценко* // Неразрушающий контроль. – 2008. – № 1-2. – С. 29–32. **62. Соболев В. С.** Накладные и экранные датчики / *В. С. Соболев, Ю. М. Шкарлет*. – Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1967. – 143 с. **63.** Вихретоковый метод неразрушающего контроля деталей вагонов: руководящий документ РД 32.150-2000; Утв. Деп-том вагонного хозяйства и Деп-том пассажирских сообщений МПС РФ. – М., 2000. – 98 с. **64.** Інструкція з неруйнівного контролю деталей та вузлів вагонів магнітопорошковим, вихрострумовим та ферозондовим методами та з випробуванням на розтяг. Затверджено наказом Укрзалізниця 28.12. 2003 № 674-Ц. – К., 2003. – 206 с. **65. Луценко Г. Г.** Автоматизированная многоканальная вихретоковая система для выявления и идентификации дефектов глубокозалегающих и поверхностных труб из неферромагнитных сталей / *Г. Г. Луценко* // Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів / Серія: Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. – Львів: Фізико-механічний ін-т ім. Г. В. Карпенка АН України. – 2005. – Вип. 10. – С. 108–111. **66. Учанин В. Н.** Вихретоковые мультидифференциальные преобразователи и их применение / *В. Н. Учанин* // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2006. – № 3. – С. 34–41. **67. Шабатура Ю. В.** Дослідження вимірювальних перетворювачів діелектричного покриття металевих поверхонь з часовим представленням інформації / *Ю. В. Шабатура, К. В. Овчинников* // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Автоматика, вимірювання та керування. – 2006. – № 551. – С. 63–69. **68. Учанин В. Н.** Вихретоковые накладные преобразователи: расширенная классификация, сравнительный анализ и характерные примеры реализации / *В. Н. Учанин* // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2010. – № 4. – С. 24–30. **69. Учанин В. М.** Розширення можливостей вихрострумових дефектоскопів автогенераторного типу / *В. М. Учанин* // Методи та прилади контролю якості. – 2008. – № 21. – С. 30–35. **70. Учанин В. Н.** Автогенераторные вихретоковые дефектоскопы: основные принципы, классификация, сравнительный анализ (обзор) / *В. Н. Учанин* // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2010. – № 2. – С.

18–23. **71. Шкарлет Ю. М.** Общие и частные закономерности теории вихретокового контроля / Ю. М. Шкарлет // Дефектоскопия. – 1991. – №4. – С.71-76.

72. Федосенко Ю. К. Становление, современное состояние и перспективы развития вихретокового контроля / Ю. К. Федосенко // Контроль. Диагностика. – 2005. – №5. – С.71–75. **73.** Пат. №26546 Україна, МПК G01B 5/00. Спосіб вимірювання товщини діелектричних покриттів на металевих поверхнях / Шабатура Ю. В., Овчинников К. В.; Заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № 2000131736/09; заявл. 18.02.2007; опубл. 25.09.2007, Бюл. № 15. – 4 с.: іл. **74. Учанин В. Н.** Развитие вихретоковых методов контроля: задачи, решения, перспективы / В. Н. Учанин // Матеріали 5 Національної науково-технічної конференції і виставки «Неруйнівний контроль та технічна діагностика» (НКТД-2006). – Київ. – 2006. – С. 46–54. **75. Кухарчук В. В.** Индуктивный метод вимірювання товщини діелектричних та недіелектричних покриттів на металах / В. В. Кухарчук, К. В. Овчинников // Збірник тез. доп. НТК ВНТУ, Вінниця. – 2002. – С. 65–67. **76. Клюев В. В.** Вихретоковый контроль: современное состояние и перспективы развития / В. В. Клюев, Ю. К. Федосенко, В. Ф. Мужижский // В мире неразрушающего контроля. – 2007. – №2. – С. 4–9. **77. Шабатура Ю.** Вимірювальний канал товщини діелектричних покриттів металевих поверхонь з підвищеною точністю вимірювання / Ю. Шабатура, К. Овчинников // Матеріали III міжнародної конференції «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2007)». – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007. – С. 59–60. **78. Учанин В. Н.** Совершенствование вихретоковых методов выявления поверхностных дефектов / В. Н. Учанин // Материалы 16-ой международной конференции «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики». – Ялта. – 2008. – С. 69–71. **79. Кучерук В. Ю.** Засоби вимірювального контролю товщини діелектричних покриттів плоских металевих поверхонь / В. Ю. Кучерук, К. В. Овчинников // Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах, ВКДТС-2011, збірник тез доповідей – 2011. – С. 94–96.

80. Бакунов А. С. Вихретоковый неразрушающий контроль в дефектоскопии металлоизделий / А. С. Бакунов, А. Г. Ефимов // Контроль. Диагностика. – 2009. – №4 – С. 21–22.

81. Сясько В. А. Количественная оценка характеристик металлических изделий с использованием вихретоковых методов НК / В. А. Сясько, П. В. Соломенчук // В мире неразрушающего контроля. – 2010. – №4(50). – С. 26–29. **82. Овчинников К. В.** Метод і засіб вимірювального контролю товщини діелектричних покриттів металевих поверхонь. Автореф. дис. к.т.н. 2013. ВНТУ. – 19 с. **83.** Пат. 2365910 Российская Федерация, МПК G01N27/90. Спосіб вихретокового контролю і пристрій для його здійснення / Кибрик Г. Е., Налдаев Н. Д.; Заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью Научно-производственное предприятие "ТИК" (ООО НПП "ТИК"). – 2007103265/28; заявл. 26.01.2007; опубл. 27.08.2009. – 3 с.: ил. **84. Плахтин В. Д.** Вихретоковый контроль поверхностных и подповерхностных дефектов толстолистового проката и слябов / В. Д. Плахтин, А. А. Скворцов, А. В. Скворцов // Производство проката. – 2008. – №5. – С.31–35. **85. Учанин В. М.** Вихрострумова дефектоскопія елементів конструкцій / В. М. Учанин // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2006. – №4. – С.66–73.

86. Пат. №61320 Україна, МПК G01B 7/06. Вимірювальний перетворювач для визначення товщини плоских металевих поверхонь / Овчинников К. В.; Заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет; заявл. 18.02.2007; опубл. 11.07.2011, Бюл. № 13. – 4 с.: іл. **87. Лазарев С. Ф., Копылов С. И.** Ортогональное ВТП для контроля угловых смещений электропроводящих изделий // Дефектоскопия. – 1990. – № 6. – С. 74–79. **88. Хомяк Ю. В.** Вихрострумовий контроль металевих виробів зі складною поверхнею (огляд) / Ю. В. Хомяк // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XVIII міжнародної науково-практичної конференції, Ч. II (12-14 травня 2010 р., Харків) / за ред. проф. ТОВАЖНЯНСЬКОГО Л.Л. – Харків, НТУ «ХПІ», 2010. – С.196–197. **89. ГОСТ 27750-88.** Контроль неразрушающий. Покрытия восстановительные. Методы контроля толщины покрытий. Действующий; введ. 01.07.1989. – М.:

Из-во стандартов, 1988. – 3 с. **90.** ГОСТ Р 51694-2000. Материалы лакокрасочные. Определение толщины покрытия. Действующий; введ. 22.11.2000. – М.: Из-во стандартов, 2001 – 19 с. **91.** Метрологічне забезпечення вимірювання і контролю: навчальний посібник / Є. Т. Володарський, В. В. Кухарчук, В. О. Поджаренко, Г. Б. Сердюк. – Вінниця: ВДТУ, 2001. – 219 с. **92.** *Овчинников К. В.* Статичні метрологічні характеристики вимірювального каналу товщини з індуктивно-резонансним вимірювальним перетворювачем / *К. В. Овчинников* // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: "Обчислювальна техніка та автоматизація". – Вип 171(19). – Донецьк: ДонНТУ, 2010. – С.185–191. **93.** Метрологія та вимірювальна техніка: Навчальний посібник / *В. В. Кухарчук, В. Ю. Кучерук, В. П. Долгополов, Л. В. Грумінська.* – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 252 с. **94.** ДСТУ 2389-94. Технічне діагностування та контроль технічного стану. Терміни та визначення. чинний з 1995.07.01. – К.: Держспоживстандарт України, 1994. – 75 с. **95.** *Дунаев Б. Б.* Точность измерений при контроле качества / *Б. В. Дунаев.* – К.: Техніка, 1981. – 150 с. **96.** *Фрумкин В. Д.* Достоверность контроля средств радиоизмерений и контрольные допуски / *В. Д. Фрумкин, Н. А. Рубичев.* – М.: Издательство стандартов, 1975. – 88 с. **97.** *Коротков В. П.* Основы метрологии и теории точности измерительных устройств: учеб. пособие / *В. П. Коротков, Б. А. Тайц.* – М.: Издательство стандартов, 1978. – 352 с. **98.** ГОСТ 8.051–81. Погрешности, допускаемые при измерении линейных размеров до 500 мм. Действующий; введ. с 01.01.1982. – М.: Изд-во стандартов, 2009. – 10 с.

Bibliography (transliterated): **1.** GOST 9.032-74. *Edinaja sistema zashhity ot korrozii i starenija. Pokrytija lakokrasochnye. Gruppy, tehnicheckie trebovanija i oboznaczenija.* Vzamen GOST 9894-61; vved. 01.07.1975. Moscow: Izd-vo standartov, 1975. Print. **2.** GOST 9.104-79. *Edinaja sistema zashhity ot korrozii i starenija. Pokrytija lakokrasochnye. Gruppy uslovij jekspluatacii.* – Vzamen GOST 9.009-73; vved. 01.07.1980. Moscow: Izd-vo standartov, 1980. Print. **3.** GOST 9.402-2004. *Edinaja sistema zashhity ot korrozii i starenija. Pokrytija lakokrasochnye. Podgotovka metallicheskikh poverhnostej k okrashivaniju.* Vzamen GOST 9.402-80; vved. 01.01.2006. Moscow: Standartinform, 2006. Print. **4.** GOST 9.301-86. *Edinaja sistema zashhity ot korrozii i starenija. Pokrytija metallicheskije i nemetallicheskije neorganicheskie. Obshhie trebovanija.* Vzamen GOST 9.301-78; vved. 01.07.1987. Moscow: Izd-vo standartov, 1986. Print. **5.** GOST 9.303-84 *Edinaja sistema zashhity ot korrozii i starenija. Pokrytija metallicheskije i nemetallicheskije neorganicheskie. Obshhie trebovanija k vyboru.* Vzamen GOST 14623-69; vved. 01.01.1985. Moscow: Izd-vo standartov, 2001. Print. **6.** GOST R 51694-2000. *Materialy lakokrasochnye. Opredelenie tolshhiny pokrytija.* vved. 01.01.2002. Moscow: Gosstandart Rossii, 2002. Print. **7.** Potapov A. I., Sjas'ko V. A. *Nerazrushajushhie metody i sredstva kontrolja tolshhiny pokrytija i izdelij. Nauchnoe, metodicheskoe i spravocnoe posobie.* – SPb., 2009. Print. **8.** Jampol'skij A. M. *Kontrol' kachestva pokrytij.* Moscow: Mashinostroenie, 1966. Print. **9.** Bunjaev V. A., Boldyrev V. T., Dolgih V. V. *"Vihrevoj izmeritel' tolshhiny pokrytij"*. Izmeritel'naja tehnika, 1991. № 1 26–28. Print. **10.** *Nerazrushajushhij kontrol': Spravochnik: V 8 t.* Pod obshh. red. V. V. Kljueva. T.2: V 2 kn. Kn. 1: A. I. Evlampiev, E. D. Popov, S. G. Sazhin, L. D. Murav'eva, S. A. Dobrotin, A. V. Polovinkin, Ju. A. Kond-rat'ev. *Kontrol' germetichnosti.* Kn 2: Ju. K. Fedosenko, V. G. Gerasimov, A. D. Pokrovskij, Ju. Ja. Ostanin. *Vihretokovij kontrol'.* – Moscow: Mashinostroenie, 2006. Print. **11.** Babadzhanov L. S., Margadze A. R. *"Pribor dlja izmerenija tolshhiny pokrytija i geometri-cheskikh razmerov."* Izmeritel'naja tehnika, 1991. № 11. 28–30. Print. **12.** Abramson D. S., Orlova S. I. *Kontrol' jelektrolitov i kachestva gal'vanopokrytij.* Moscow: Mashgiz, 1950. Print. **13.** GOST 18353-79. *Kontrol' nerazrushajushhij. Klassifikacija vidov i metodov.* Vzamen GOST 18353-73; vved.01.07.1980. Moscow: Izd-vo standartov, 1980. Print. **14.** *Nerazrushajushhij kontrol': Spravochnik: V 8 t.* Pod obshh. red. V. V. Kljueva. T. 6: V 3 kn. Kn. 1: V. V. Kljuev, V. F. Muzhickij, Je. S. Gorkunov, V. E. Shherbinin. *Magnit-*

nye metody kontrolja. Moscow: Mashinostroenie, 2006. Print. **15.** *Nerazrushajushhij kontrol' metallov i izdelij: Spravochnik / Pod red. G. S Samojlovicha. T. 2.* Moscow: Mashinostroenie, 1976. Print. **16.** Vjazovoj I. P. "Magnitnyj tolshhinomer s universal'noj shkaloj". Zavodskaja laboratorija. 1959. № 2. 14–18. Print. **17.** Katalog OOO "Kontrol'. Izmerenie. Diagnostika". Vypusk 3. 2006. Print. **18.** Prospekt firmy "PANATEST". "Pribory dlja kontrolja kachestva pokrytija", 2007. – 40 s. 19. Pribory kontrolja kachestva pokrytij. *Elkometer*". 2007. Print. **20.** Prospekt firmy MEGA Inzhiniring. 2004. Print. **21.** Prospekt OOO NPP "Tehnotest-M". *Tolshhinomer pokrytij TM-2*. 2003. Print. **22.** Modul'naja sistema izmerenija tolshhiny pokrytij. www.panatest.ru. **23.** Prospekt Asociacii "Spektr-grupp. Magnitnyj tolshhinomer MT-51NP". 2004. Print. **24.** *Nerazrushajushhij kontrol': Spravochnik: v 8 t.* Pod obshh. red. V. V. Kljueva. T. 3. *Ul'trazvukovoj kontrol'*. Moscow: Mashinostroenie, 2003. Print. **25.** Tourin A, Derode A., Peyre and Fink. "Parameters for an ultrasonic pulsed wave propagating in a multiple scattering medium". J. Acoust. Am. 2000. Vol. 108, N 2. 503–512. Print **26.** Pat. 2225592 Rossijskaja Federacija, MKP G01B17/02. *Ul'trazvukovoj tolshhinomer*. Sjas'ko V. A., Bulatov A. S.; Zajavite! i patentoobladatel' Sankt-Peterburg Federativnoe Gosudarstvennoe unitarnoe predpriятие Central'nyj nauch.-issled. in-t tehnologii sudostroenija ;zajavljen15.10.02.;opubl. 10.03.04. Print. **27.** GOST 24034-80. *Kontrol' nerazrushajushhij radiacionnyj. Terminy i opredelenija.* Vveden v pervye; vved. 01.07.1981. Moscow: Izd-vo standartov, 1981. Print. **28.** *Nerazrushajushhij kontrol'. Spravochnik: V 8 t. / Pod obshh. red. V. V. Kljueva. T. 1: V 2 kn. Kn. 2: F. R. Sosnin. Radiacionnyj kontrol'.* Moscow: Mashinostroenie, 2006. Print. **29.** <http://www.thermo.com/> 30. <http://www.upa.com/> 31. <http://www.karatmeter.com/> 32. <http://www.oxford-instruments.com/> **33.** GOST 9.302-88. *Edinaja sistema zashhity ot korrozii i starenija. Pokrytija metallicheskie i nemetallicheskie neorganicheskie. Metody kontrolja. Vzamen GOST 9.302-79;* vved. 01.01.1990. Moscow: Izd-vo standartov, 1990. Print. **34.** Komrakov B. M., Shapochkin B. A. *Izmerenie parametrov opticheskih pokrytij.* Moscow: Mashinostroenie, 1986. Print. **35.** Andreev S. V., Gubanov L. A. "Issledovanie opticeskih postojannyh metallov". Opticheskie i lazernye tehnologii. Sb. stat. Sankt-Peterburg. 2001. 74–83. Print. **36.** Valitov A. M., Shilov G. I. *Pribory i metody kon-trolja tolshhiny pokrytij.* Moscow: Mashinostroenie. 1970. Print. **37.** Rozenfel'd I. L., Ol'hovnikov Ju. P. "Emkostnoj metod opredelenija tolshhiny i sploshnosti lakokrasochnyh po-krytij na metallah". Zavodskaja laboratorija. № 2. 1958. 26–31. Print. **38.** Grinevich F. B. *Izmeritel'nye kompensacionno – mostovye ustrojstva s emkostnymi datchikami .* Grinevich F.B., Novik A.I. Kiev: Nauk. dumka, 1987. Print. **39.** Brajljovskij V. V., Fushtej N. M., Sheljag A. R., Tkachenko O. T. "Izmerenie mehanicheskikh peremeshhenij emkostnym datchikom". *Izmeritel'naja tehnika.* № 4. 1988. 20–21. Print. **40.** Buhgol'c V. P. *Emkostnyje preobrazovatel-i v sistemah avtomaticheskogo kontrolja i upravlenija.* Buhgol'c V.P., Tisevich Je.G. Moscow: Jenergija, 1972. Vyp. 464. Print. **41.** Acjukovskij V. A. *Emkostnyje preobrazovatel-i pere-meshhenij.* V. A. Acjukovskij. M.: L.: Jenergija, 1966. Print. **42.** Plog H. "Methods and equipment for measuring the thickness of coatings". Metall finishing Journal. 1965, v.11. N 132. 863–870. Print. **43.** GOST 24289-80. *Kontrol' nerazrushajushhij vihretokovyyj. Terminy i opredelenija.*; vved. 01.07.1981. Moscow: Izd-vo standartov, 1981. Print. **44.** Dorofeev A. L. *Indukcionnaja tolshhinometrija.* A. L. Dorofeev, A. I. Nikitin, A. L. Rubin. Moscow: Jenergija, 1978. Print. **45.** Gerasimov V. G. *Metody i pribory jelektromagnitnogo kontrolja promyshlennyh izdelij.* V. G. Gerasimov, V. V. Kljuev, V. E. Shaternikov. M.: Jenergoatomizdat, 1983. Print. **46.** Konjuhov N. E. *Jelektromagitnyje datchiki mehanicheskikh velichin.* N. E. Konjuhov, F. M. Mednikov, M. L. Nichaevskij. Moscow: Mashinostroenie, 1987. Print. **47.** Kanevskij I. N. *Nerazrushajushhie metody kontrolja.* I. N. Kanevskij, E. N. Sal'nikova. Vladivostok: DVGТ, 2007. Print. **48.** Dorofeev A. L., Kazamanov Ju. G. *Jelektromagitnaja defektoskopija.* Moscow: Mashinostroenie, 1980. Print. **49.** *Nondestructive Testing Handbook, Third Edition: Vol-ume 5, Electromagnetic Testing .* Satish S Udpa (technical editor), Patrick O'Moore (editor). ASNT, 2004. Print. **50.** Vlasov V. V. "Obizbiratel'nosti nakladnoj poiskovoj sistemy k poverhnostnym treshinam pri jelektroinduktivnom kontrole stal'nyh izdelij. I. Analiz fizicheskikh osnov kontrolja i metodika issledovanij". Defektoskopija. 1970. № 1. 95–

101. Print. **51.** Vlasov V. V. "*Ob izbiratel'nosti nakladnoj poiskovoj sistemy k poverhnostnym treshhinam pri jelektroinduktivnom kontrole stal'nyh izdelij. II. Izuchenie reakcii iskatel'nogo jelementa na uchastki obezuzerzhivaniya i naklepa*". Defektoskopija. 1970. № 1. 101–109.

Print. **52.** Sobolev V. S. *Nakladnye i jekrannye datchiki: dlja kontrolja metodom vihrevyh tokov. Akad. nauk. In-t avtomatiki i jelektrometrii.* V. S. Sobolev, Ju. M. Shkarlet. Novosibirsk: Nauka, 1967. Print. **53.** Zacepin N. N. "*Issledovanie magnitnogo polja vihrevyh tokov nad poverhnostnymi defektami provodjashhijh izdelij*". Defektoskopija. 1969. № 4. 103–112. Print. **54.** Svarka. *Rezka. Kon-trol': Spravochnik. V 2-h tomah.* Pod obshh. red. N. P. Aleshina, G. G. Chernyshova. Moscow: Mashinostroenie, 2004. T. 1. N. P. Aleshin, G. G. Chernyshov, Je. A. Gladkov i dr. Print. **55.** Svarka. *Rezka. Kontrol': Spravochnik. V 2-h tomah.* Pod obshh. red. N. P. Aleshina, G. G. Chernyshova. M.: Mashinostroenie, 2004. T. 2. N. P. Aleshin, G. G. Chernyshov, A. I. Akulov i dr. Print. **56.** Sazonov Ju. I. "*Problemy tehnicheckoj diagnostiki jelekttron-no-luchevoj svarki*". Defektoskopija. 2006. № 12. 70–88. Print. **57.** Troickij V. A. *Defekty svarnyh soedinenij i sredstva ih obnaruzhenija.* Kiev: «Vysshaja shkola», 1983. Print. **58.** Uchanin V. N. "*Vihretokovij kontrol' svarnyh soedinenij*". Tehnicheckaja diagnostika i nerazrushajushhij kontrol'. 2008. № 4. 71–80. Print. **59.** Teterko A. Ja. *Selektivna vihrostrumova defektoskopija.* L'viv: FMI im. G. V. Karpenka NAN Ukraïni. 2004. Print. **60.** Assler H. *Design of Aircraft Structure under Special Consideration of NDT.* 9-th Europ. Conf. for NDT, Berlin. 2006 (inter-net-zhurnal www.ndt.net. 2006. 11. № 11). Print. **61.** Lucenko G. G. "*Vihretokovij kontrol' li-tyh detalej s grubo obrabotannoju poverhnost'ju*". Nerazrushajushhij kontrol'. 2008. № 1-2. 29–32. Print. **62.** Sobolev V. S. *Nakladnye i jekrannye datchiki.* V. S. Sobolev, Ju. M. Shkarlet. – Novosibirsk: Nauka, Sibirskoe otdelenie, 1967. Print. **63.** *Vihretokovij metod nerazrushajushhego kontrolja detalej vagonov:* rukovodjashhij doku-ment RD 32.150-2000; Utv. Dep-tom vagonnogo hozjajstva i Dep-tom passazhirskih soobshhenij MPS RF. Moscow, 2000. Print. **64.** *Instrukcija z nerujnivnogo kontrolju detalej ta vuzliv vago-niv magnitoporoshkovim, vihrostrumovim ta ferozondovim metodami ta z viprobuvannjam na roz-tjag.* Zatverdzeno nakazom Ukralzniczi 28.12.2003. № 674. Kiev, 2003. Print. **65.** Lucenko G. G. "*Avtomatizirovannaja mnogokanal'naja vihretokovaja sistema dlja vyjavlenija i identifikacii defektov glubokozalegajushhijh i poverhnostnyh trub iz neferromagnitnyh stalej*". Elektromagnitni ta akustichni metodi nerujnivnogo kontrolju materi-aliv ta virobiv. Serija: Fizichni metodi ta zasobi kontrolju seredovishh, materialiv ta viro-biv. L'viv: Fiziko-mehaničnij in-t im. G. V. Karpenka AN Ukraïni. 2005. Vip. 10. 108–111. Print. **66.** Uchanin V. N. "*Vihretokovye mul'tidifferencial'nye preobrazovateli i ih primenenie*". Tehnicheckaja diagnostika i nerazrushajushhij kontrol'. 2006. № 3. 34–41. Print. **67.** Shabatura Ju. V. "*Doslidzhennja vimirjuval'nih peretvorjuvachiv dielek-tričnogo pokrittja metalevih poverhon' z chasovim pred-stavlennjam informacii*". Ju. V. Shabatura, K. V. Ovchinnikov. Visnik Nacional'nogo universitetu «L'vivs'ka politehnika». Avtomatika, vimirjuvannja ta keruvannja. 2006. № 551. 63–69. Print. **68.** Uchanin V. N. "*Vihretokovye nakladnye preobrazovateli: rasshirennaja klassifikacija, sravnitel'nyj analiz i harakternye primery realizacii*". Tehnicheckaja diagnostika i nerazrushajushhij kontrol'. 2010. № 4. 24–30. Print. **69.** Uchanin V. M. "*Rozshirenna mozhlivostej vihrostrumovih defektoskopiv avtogeneratornogo tipu*". Metodi ta priladi kontrolju jakosti. 2008. № 21. 30–35. Print. **70.** Uchanin V. N. "*Avtogene-ratornye vihretokovye defektoskopy: osnovnye principy, klassifikacija, sravnitel'nyj analiz (obzor)*". Tehnicheckaja diagnostika i nerazrushajushhij kontrol'. 2010. № 2. 18–23. Print. **71.** Shkarlet Ju. M. "*Obshhie i chastnye zakonomernosti teorii vihre-tokovogo kontrolja*". Defektoskopija. 1991. № 4. 71–76. Print. **72.** Fedosenko Ju. K. "*Stanovlenie, sovremennoe sostojanie i perspektivy razvitija vihre-to-kovogo kontrolja*". Kontrol'. Diagnostika. 2005. № 5. 71–75. Print. **73.** Pat. №26546 Ukraïna, MPK G01V 5/00. *Sposib vimirjuvannja tovshhini dielektrichnih pokrit' na metalevih poverhnjah* Shabatura Ju. V., Ovchinnikov K. V.; Zajavnik ta patentov-lasnik Vinnic'kij nacional'nij tehničnij universitet. № 2000131736/09; zajavl. 18.02.2007; opubl. 25.09.2007, Bjul. № 15. Print. **74.** Uchanin V. N. "*Razvitie vihretokovyh metodov kontrolja: zadachi, resh-*

enija, perspektivy". Materiali 5 Nacional'noi naukovno-tehnicnoi konferencii i vistavki «Nerujnivnij kontrol' ta tehnicna diagnostika» (NKTD-2006). Kiev. 2006. 46–54. Print. **75**. Kuharchuk V. V., Ovchinnikov K. V. "Induktivnij metod vimirjuvannja tovshhini dielektrichnih ta nedielektrichnih pokrit' na metalah". Zbirnik tez. dop. NTK VNTU, Vinnicja. 2002. 65–67. Print. **76**. Kljuev V. V., Fedosenko Ju. K., Muzhickij V. F. "Vihretokovij kontrol': sovremennoe sostojanie i perspektivy razvitija". V mire nerazrushajushhego kontrolja. 2007. – № 2. 4–9. Print. **77**. Shabatura Ju., Ovchinnikov K. "Vimirjuval'nij kanal tovshhini dielektrichnih pokrit' metaljevih po-verhon' z pidvishhenomu tochnistju vimirjuvannja". Materiali III mizhnarodnoi konferencii «Suchasni problemi radioelektroniki, telekomunikacij ta prilado-buduvannja (SPRTP-2007)». Vinnicja: UNIVERSUM-Vinnicja, 2007. 59–60. Print. **78**. Uchanin V. N. "Sovershenstvovanie vihetokovijh metodov vyjavlenija poverhnostnyh defektov". Materialy 16-oj mezhdunarodnoj konferencii «Sovremennye metody i sredstva nerazrushajushhego kontrolja i tehnichej diagnostiki». Jalta. 2008. 69–71. Print. **79**. Kucheruk V. Ju., Ovchinnikov K. V. "Zasobi vimirjuval'nogo kontrolju tovshhini dielektrichnih po-krit' plaskih metaljevih poverhon". Vimirjuvannja, kontrol' ta diagnostika v tehnicnih sistemah, VKDTS-2011, zbirnik tez dopovidej. 2011. 94–96. Print. **80**. Bakunov A. S., Efimov A. G. "Vihretokovij nerazrushajushhij kontrol' v defektoskopii metal-loizdelij". Kontrol'.Diagnostika. 2009. № 4. 21–22. Print. **81**. Sjas'ko V. A., Solomenchuk P. V. "Kolichestvennaja ocenka charakteristik metallicheskih izdelij s ispol'zova-niem vihetokovijh metodov NK". V mire nerazrushajushhego kontrolja. 2010. № 4(50). 26–29. Print. **82**. Ovchinnikov K. V. *Metod i zasib vimirjuval'nogo kontrolju tovshhini dielektrichnih pokritiv metaljevih poverhon'. Avtoref. dis. k.t.n.* 2013. VNTU. Print. **83**. Pat. 2365910 Rossijskaja Federacija, MPK G01N27/90. *Sposob vihetokovogo kontrolja i ustrojstvo dlja ego osushhestvlenija*. Kibrik G. E., Naldaev N. D.; Zajavitel' i patentoobladatel' Obshhestvo s ogranichennoj otvetstvennostju Nauchno-proizvodstvennoe predpriatie "TIK" (OOO NPP "TIK"). 2007103265/28; zajavl. 26.01.2007; opubl. 27.08.2009. Print. **84**. Plahtin V. D., Skvorcov A. A., Skvorcov A. V. "Vihretokovij kontrol' poverhnostnyh i podpo-verhnostnyh defektov tolstolizovogo prokata i sljabov". Proizvodstvo prokata. 2008. № 5. 31–35. Print. **85**. Uchanin V. M. "Vihrost-rumova defektoskopija elementiv konstrukcij". Fiziko-himicna mehanika mate-riialiv. 2006. № 4. 66–73. Print. **86**. Pat. №61320 Ukraïna, MPK G01V 7/06. *Vimirjuval'nij peretvorjuvach dlja viznachennja tovshhini plaskih metaljevih poverhon'*. Ovchinnikov K. V.; Zajavnik ta patentovlasnik Vinnic'kij nacional'nij tehnicnij universitet; zajavl. 18.02.2007; opubl. 11.07.2011, Bjul. № 13. Print. **87**. Lazarev S. F., Kopylov S. I. "Ortogonal'ne VTP dlja kontrolja uglovijh smeshhenij jelektroprovodjashhijh izdelij". Defektoskopija. 1990. № 6. 74–79. Print. **88**. Homjak Ju. V. "Vihorostrumovij kontrol' metaljevih virobiv zi skladnoju poverhneju (ogljad)". Informacijni tehnologii: nauka, tehnika, tehnologija, osvita, zdorov'ja: Tezi dopovidej HVIII mizhnarodnoi naukovno-practichnoi konferencii, Ch. II (12-14 travnja 2010 r., Harkiv). za red. prof. Tovazhnjanskogo L.L. Harkiv, NTU «HPI», 2010. 196–197. Print. **89**. GOST 27750-88. *Kontrol' nerazrushajushhij. Pokrytija vosstanovi-tel'nye. Metody kontrolja tolshhiny pokrytij*. Dejstvujushhij; vved. 01.07.1989. Moscow: Iz-vo standartov, 1988. Print. **90**. GOST R 51694-2000. *Materialy lakokrasochnye. Opredelenie tolshhiny pokrytija*. Dejstvujushhij; vved. 22.11.2000. M.:Iz-vo standartov, 2001 Print. **91**. Volodars'kij C. T., Kuharchuk V. V., Podzharenko V. O., Serdjuk G. B. *Metrologichne zabezpechennja vimirjuvannja i kontrolju: navchal'nij posibnik*. Vinnicja: VDTU, 2001. Print. **92**. Ovchinnikov K. V. "Statichni metrologichni charakteristiki vimirjuval'nogo kanalu tovshhini z induktivno-rezonansnim vimirjuval'nim peretvorjuvachem". Naukovi pracj Donec'kogo nacional'nogo tehnicnogo universitetu. Serija: "Obchisljuval'na tehnika ta avtomatizacija". Vip 171(19). Donec'k: DonNTU, 2010. 185–191. Print. **93**. Kuharchuk V. V., Kucheruk V. Ju., Dolgopolov V. P., Grumins'ka L. V. *Metrologija ta vimirjuval'na tehnika: Navchal'nij posibnik*. Vinnicja: UNIVERSUM-Vinnicja, 2004. Print. **94**. DSTU 2389-94. *Tehnicne diagnostuvannja ta kontrol' tehnicnogo stanu. Terminy ta viznachennja*. chinnij z 1995.07.01. Kiev: Derzhspozhivstandart Ukraïni, 1994. Print. **95**. Dunaev B. B. *Tochnost' izmerenij pri kontrole kachestva*. Kiev: Tehnika, 1981. Print.

96. Frumkin V. D., Rubichev N. A. *Dostovernost' kontrolja sredstv radioizmerenij i kontrol'ne dopuski*. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1975. Print. 97. Korotkov V. P., Tajc B. A. *Osnovy metrologii i teorii tochnosti izmeritel'nyh ustrojstv: ucheb. Posobie*. M.: Izdatel'stvo standartov, 1978. Print. 98. GOST 8.051–81. *Pogreshnosti, dopuskaemye pri izmerenii linejnyh razмеров do 500 mm*. Dejstvujushhij; vved. s 01.01.1982. Moscow: Izd-vo standartov, 2009. Print.

Поступила (received) 23.04.2014

УДК 620.179.14

Б. М. ГОРКУНОВ, докт. техн. наук, проф., НТУ "ХПИ";
Н. Н. СИРЕНКО, канд. техн. наук, доцент НТУ "ХПИ";
А. А. АВРАМЕНКО, канд. техн. наук, доцент НТУ "ХПИ";
А. А. ТИЩЕНКО, канд. техн. наук, НТУ "ХПИ"

ВИХРЕТОКОВЫЙ КОНТРОЛЬ ГЛУБИНЫ УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ ИЗДЕЛИЙ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

В работе рассмотрен алгоритм функционирования вихретокового устройства для контроля глубины упрочненного слоя металлических изделий, реализующий измерительные, расчетные и управляющие операции. Данный алгоритм позволяет осуществлять ряд процедур по определению контролируемого параметра и проводить статистическую обработку результатов контроля. На основе приведенного алгоритма разработана блок-схема и рассмотрен принцип действия автоматизированного вихретокового устройства. Сделан вывод о том, что данное устройство позволяет проводить контроль объектов в режиме реального времени, что значительно уменьшает временные затраты и повышает эффективность производства.

Ключевые слова: вихретоковый контроль, глубина упрочненного слоя, амплитуда, фаза, автоматизированное устройство.

Введение. Одними из важнейших задач неразрушающего контроля в целом и вихретокового в частности, являются задачи разработки и создания устройств структуроскопии: сортировка материалов по маркам, оценка степени их химической чистоты, оценка глубины и качества поверхностно упрочненных слоев, а также контроль качества термической и химико-термической обработки деталей, состояния поверхностных слоев после механической обработки и т.д. [1, 2].

Устройства для вихретоковой структуроскопии должны совмещать в себе такие функции: использование измерительных процедур и проведение вычислительных операций. В настоящее время уровень развития устройств на базе микропроцессорной техники дает возможность повысить метрологические характеристики и расширить функциональ-

© Б. М. Горкунов, Н. Н. Сиренко, А. А. Авраменко, А. А. Тищенко, 2014

ные возможности данных устройств. Следовательно, переход к построению микропроцессорных вихретоковых устройств для структуросткопии является основным моментом в формировании предпосылок для создания интеллектуальных средств контроля и диагностики.

Цель статьи. Цель данной работы заключается в разработке алгоритма и блок-схемы автоматизированного вихретокового устройства, реализующих контроль глубины упрочненного слоя металлических цилиндрических изделий в режиме реального времени, т.е. в процессе технологической обработки.

Основная часть. Для исключения влияния технологических факторов на результат качества упрочнения разработан метод вихретокового контроля глубины упрочненного слоя металлических изделий, который позволяет проводить контроль данного параметра в режиме реального времени [3]. На основе данного метода разработан алгоритм, реализующий измерительные, расчетные и управляющие операции для обеспечения рациональных режимов работы вихретокового преобразователя (ВТП) и оптимальной работы упрочняющей установки. На рис. 1 приведена структурная схема алгоритма функционирования автоматизированного устройства с применением трансформаторного ВТП. Данный алгоритм реализует метод контроля, заключающийся в сравнении выходных сигналов (амплитуда или фаза) ВТП с объектом контроля (ОК) с соответствующими сигналами ВТП, в котором размещен стандартный образец (СО) с заданной глубиной упрочненного слоя и изготовленный из того же материала, что и ОК.

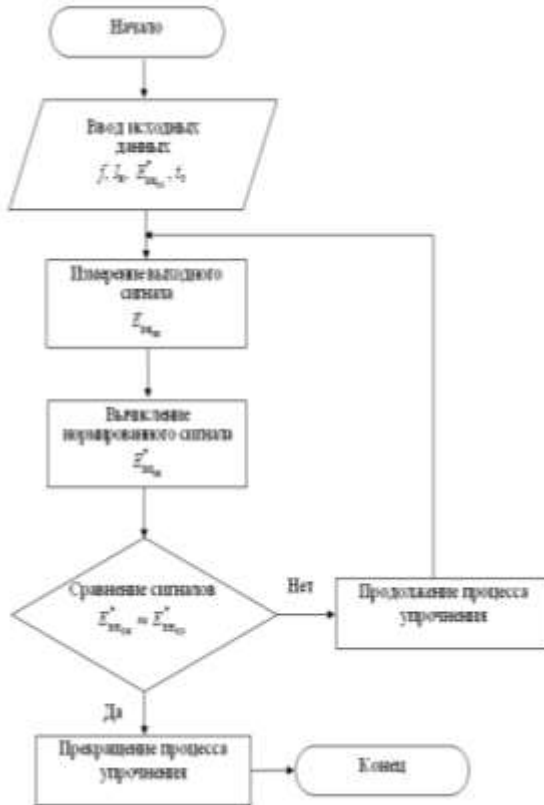


Рис. 1 – Алгоритм функционирования вихретокового устройства для контроля глубины упрочненного слоя металлических изделий

Работа автоматизированного вихретокового устройства по данному алгоритму состоит в следующем: оператором производится ввод начальных данных (частоты зондирующего поля f ; намагничивающего тока I_n ; опорного значения нормированного выходного сигнала амплитуды $E_{внсо}^*$ (или фазы) ВТП с СО; времени упрочнения t_3) в зависимости от выбранного материала, геометрии образца и заданной глубины упрочненного слоя. Затем производится измерение значения выходного сигнала амплитуды $E_{внсо}^*$ ВТП с ОК, прошедшим процедуру упрочнения и рассчитывают значение нормированного выходного сигнала

$E_{\text{вн}_{\text{ок}}}^*$. После этого выполняется сравнение значения выходного сигнала амплитуды $E_{\text{вн}_{\text{ок}}}^*$ ВТП с упрочненным ОК с заранее рассчитанным либо измеренным значением выходного сигнала амплитуды $E_{\text{вн}_{\text{со}}}^*$ ВТП с СО, выполненным из того же материала, что и ОК, имеющего аналогичные геометрические размеры, и упрочненного на заданную глубину. При равенстве сигналов $E_{\text{вн}_{\text{ок}}}^* \approx E_{\text{вн}_{\text{со}}}^*$ делается вывод о том, что ОК упрочнился на заданную глубину. В противном случае операция упрочнения продолжается, пока не выполнится заданное условие.

При необходимости данный алгоритм позволяет осуществлять ряд процедур по определению контролируемого параметра и проводить статистическую обработку результатов контроля. Выбор структуры алгоритма функционирования вихретокового устройства зависит от конкретной задачи. Приведенный алгоритм возможно применять для реализации автоматизированных устройств вихретокового контроля глубины упрочненного слоя изделий, которые работают как в статическом, так и в динамическом режимах.

На рис. 2 приведен вариант построения блок-схемы автоматизированного вихретокового устройства для контроля глубины упрочненного слоя металлических цилиндрических изделий, работающей в режиме реального времени.

Работа устройства происходит следующим образом: блок управления 9 подает команду на включение блока перемещения 2, который помещает ОК в упрочняющую установку 4. Далее блок управления 9 выключает блок перемещения 2 и включает упрочняющую установку 4, в которую помещен ОК, на заданное в начальных условиях время t_3 для прохождения ОК процесса упрочнения поверхности. По истечении заданного времени блок управления 9 отключает упрочняющую установку 4 и подает команду на включение блока перемещения 2, который перемещает ОК из упрочняющей установки 4 в трансформаторный ВТП проходного типа 3. С помощью генератора синусоидального стабильного тока 1 устанавливаются заданные значения намагничивающего тока I_n и его частота f . Далее, сигнал с трансформаторного ВТП проходного типа 3 с упрочненным ОК поступает на амплитудный 5 (или фазовый 6) детектор для выделения сигнала, пропорционального $E_{\text{вн}_{\text{ок}}}^*$, который подается на блок компараторов 8. Также на блок компараторов 8 с задатчика амплитуды 7 подается опорный нормированный сигнал $E_{\text{вн}_{\text{со}}}^*$, который предварительно измеряется либо рассчиты-

вается для ВТП с СО с заданной глубиной упрочненного слоя и выполненного из того же материала, что и ОК. Если значение нормированной амплитуды трансформаторного ВТП проходного типа 3 с ОК принимает значение, равное опорному значению нормированной амплитуды, т.е. выполняется условие $E_{\text{внОК}}^* \approx E_{\text{внСО}}^*$, то блок управления 9 останавливает работу автоматизированного вихретокового устройства и подает сигнал на блок индикации 10.

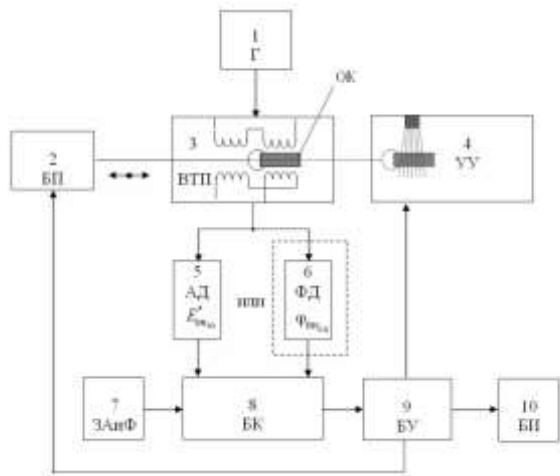


Рис. 2 – Автоматизированное вихретоковое устройство для контроля глубины упрочненного слоя металлических цилиндрических изделий

Сигнал на блоке индикации 10 свидетельствует о том, что ОК упрочнился на заданную глубину. В противном случае, процедура упрочнения и контроля продолжается по вышеописанной методике. Аналогичным образом происходит контроль глубины упрочненного слоя изделия по фазе выходного сигнала ВТП с ОК.

Вывод. Применение данного устройства в промышленности позволит уменьшить брак выпускаемой продукции, а также экономить энергетические ресурсы и уменьшить временные затраты, т.е. повысить эффективность производства.

Список литературы: 1. Карнаш М.О. Обґрунтування комплексного підходу до визнання фізико-механічних характеристик матеріалу металоконструкцій // Методи та прилади контролю якості. – 2004. – №12. – С. 30–33. 2. А.С. Бакунов, В.Ф. Мужичук, С.Е. Шубочкин. Структуроскоп вихретоковий ВЭ-26НП // Дефектоскопия. – 2003. – №11. – С. 67–72. 3. Пат. на корисну модель №52844 (Україна), МПК(2010) G01N27/90.

Вихрострумвий спосіб контролю поверхневого зміцнення / Горкунов Б. М., Тона І. В., Тищенко А. А.; заявник і власник НТУ"ХП". – №u201003240 ; заяв. 22.03.2010 ; надрук. 10.09.2010, Бюл. №17.

Bibliography (transliterated): 1. Karpash, M. O. "Obgruntuvannya kompleksnoho pidkhotu do vyznannya fizyko-mekhanichnykh kharakterystyk materialu metalokonstruktsiy". *Metody ta prylady kontrolyu yakosti*. No. 12. 2004. 30–33 Print. 2. Bakunov, A. S., V. F. Muzhickij, and S. E. Shubochkin. "Strukturoskop vihretokovij VJe-26NP". *Defektoskopija*. No. 11. 2003. – №11. 67–72 Print. 3. Gorkunov, B. M., I. V. Tyupa and A. A. Tyshchenko. *Vykhrostrumovyy sposib kontrolyu poverkhnevoho zmitsnennya*. Pat. na korynsnu model' No. 52844, MPK(2010) G01N27/90. Byul. No. 17. 2010. Print.

Поступила (received) 25.04.2014

УДК 620.179.16

Р. М. ГАЛАГАН, канд.техн. наук, ст. викл. НТУУ «КПІ», Київ

РОЗРОБКА СТОХАСТИЧНОЇ МОДЕЛІ УЛЬТРАЗВУКОВОГО НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ВИРОБІВ ПОРОШКОВОЇ МЕТАЛУРГІЇ

Обґрунтовано розробку стохастичної моделі ультразвукового неруйнівного контролю виробів порошкової металургії у вигляді лінійної системи, яка має породжуючий процес, власну імпульсну реакцію та відгук при наявності дефекту. В результаті виділено інформаційні параметри, за якими можна проводити класифікацію технічного стану виробу – зміна математичного сподівання та дисперсії вибірок вимірних значень швидкості ультразвуку.

Ключові слова: вироби порошкової металургії, фізико-механічні властивості, стохастична модель, ультразвуковий контроль, швидкість ультразвуку.

Вступ. Вироби порошкової металургії (ПМ) сьогодні використовуються в широкому спектрі галузей: від автомобільної та аерокосмічної промисловості до електроінструментів та побутової техніки. Технологія ПМ продовжує стрімко розвиватися; її основною перевагою є те, що вона дозволяє отримати нові матеріали – псевдосплави з композинтів, які неможливо сплавити литтям, з керованими характеристиками: механічними, магнітними, електричними, тепловими та ін. Недоліком ПМ є немінучий розкид властивостей виробів у межах однієї партії [1]. Більше того, в результаті особливостей технологічних процесів і недосконалої технологічного устаткування можливий розкид властивостей порошкового матеріалу в об'ємі окремого зразку або виробу [2].

© Р. М. Галаган, 2014

Для контролю фізико-механічних характеристик виробів ПМ широке застосування знаходять структурночутливі акустичні методи. На сьогоднішній день існує достатня кількість емпіричних детермінованих залежностей, які пов'язують деякі параметри фізико-механічних характеристик виробів ПМ з вимірюваними параметрами ультразвукового контролю [3]. Проте можна зауважити, що на результат ультразвукового контролю виробів ПМ впливає значна кількість випадкових факторів (наприклад, розкид властивостей порошкового матеріалу в об'ємі окремого виробу, складна геометрична форма самого виробу, виникнення похибок в процесі вимірювання тощо), що обумовлюють стохастичну природу отриманих даних.

Метою роботи є розробка стохастичної моделі процесу ультразвукового неруйнівного контролю фізико-механічних характеристик (зокрема, пористості) виробів ПМ.

Постановка задачі. Одним з основних параметрів, який обумовлює фізико-механічні характеристики виробу з порошкового матеріалу є пористість, яка в загальному випадку характеризує ступінь заповнення об'єму матеріалу порами. Основним вимірювальним параметром ультразвукової структуроскопії виробів ПМ, який пов'язаний із пористістю, є швидкість поширення ультразвуку. Наявність пористості приводить до зменшення швидкості поширення ультразвуку в об'єкті контролю (ОК), при цьому згасання зростає в основному завдяки розсіюванню. Пори мають значно більший демпфуючий вплив на процеси поширення пружних коливань у твердому тілі, ніж інші недосконалість структури [4].

Більшість запропонованих детермінованих залежностей між пористістю та швидкістю ультразвуку справедливі для найпростішої моделі пористого тіла, в якій всі пори, число яких не змінюється в процесі спікання, мають сферичну форму, однакові розміри і рівномірно розподілені в об'ємі тіла. На відміну від ідеальної структури порові канали в реальних матеріалах не мають впорядкованого положення і якогонебудь визначеного напрямку. Зазвичай вони хаотично пронизують виріб з порошкового матеріалу у всіх напрямках, перетинаються один з одним та з'єднуються між собою [5]. Тому що врахувати таку хаотичну структуру практично неможливо, емпіричні залежності швидкості поширення ультразвукових коливань (УЗК) від пористості мають певні обмеження в їх застосуванні.

В загальному вигляді залежність швидкості ультразвуку від пористості описується наступним виразом:

$$C_l = C_{l0} \cdot (1 - ap)^n, \quad (1)$$

де C_{10} – швидкість поздовжньої хвилі у відсутності пористості, n – експериментально визначена константа, a – емпіричний коефіцієнт.

Строго кажучи, величину C_{10} не можна вважати швидкістю поздовжньої хвилі у відсутності пористості, тому що в виробих ПМ завжди в тій чи іншій мірі присутня пористість. Швидкість C_{10} в формулі (1) розглядатимемо як функцію багатьох параметрів: температурних режимів випалу виробів з порошкових матеріалів ($T^{\circ}C$), часових режимів випалу ($t_{\text{вип}}$), кількісного складу сировинних компонентів (N_c) та технології виготовлення (R_b):

$$C_{10} = f(T^{\circ}C, t_{\text{вип}}, N_c, R_b). \quad (2)$$

Можна припустити, що залежність швидкості C_{10} від заданих параметрів матиме випадковий характер. Виведення аналітичної детермінованої залежності для зазначених параметрів не видається можливим. Звідси виникають труднощі і з використанням детермінованого порогового значення швидкості УЗК для завдання критеріїв дефектності виробів ПМ. В такому випадку необхідно переходити до аналізу статистичних характеристик результатів ультразвукового контролю.

Розробка стохастичної моделі контролю виробів ПМ. У формулі (1) величина C_l представляє швидкість поздовжньої хвилі при наявності пористості. Припустимо, що величина C_l являє собою вимірюваний параметр, котрий визначають в процесі ультразвукового контролю виробу ПМ. Позначимо її як $C_{l\text{вим}}$. Тоді можемо вважати, що вимірне значення швидкості буде залежати від: базової швидкості у відсутності пористості C_{10} , зміни швидкості за наявності пористості $\Delta C_{l\text{пор}}$ (причому ця складова буде завжди зі знаком «-», тому що пористість призводить до зменшення швидкості поздовжньої хвилі) та сумарної похибки $\Delta C_{l\delta}$ в точці вимірювання, що виникає в процесі контролю:

$$C_{l\text{вим}} = C_{10} - \Delta C_{l\text{пор}} \pm \Delta C_{l\delta}. \quad (3)$$

В формулі (3) величини C_{10} та $\Delta C_{l\delta}$ є випадковими величинами і не мають строгих аналітичних залежностей для їх теоретичного визначення.

Розділимо чинники, що впливають на результат ультразвукового контролю виробів ПМ на дві групи: технологічні та вимірювальні (рис.1).

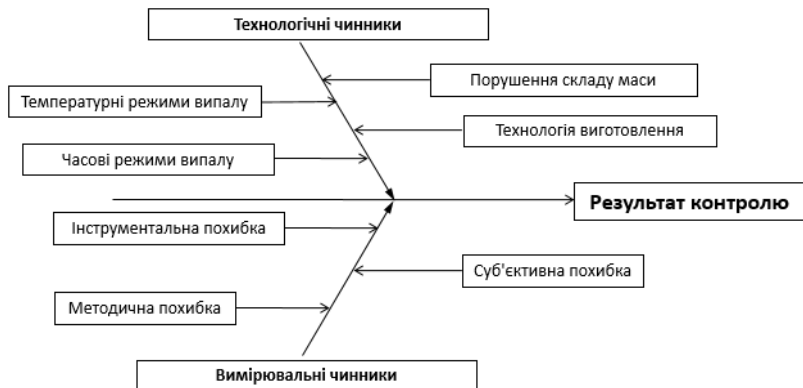


Рис. 1 – Групи чинників, що впливають на результат контролю виробів ПМ

Технологічні чинники впливають глобально на формування результату вимірювання швидкості поширення УЗК в виробах ПМ. Результатом впливу технологічних чинників є формування пористості, яка завжди присутня в тілі виробів ПМ. За наявності пористості на результат вимірювання швидкості УЗК впливатимуть: тип пор, їх геометрія, розмір, наявність в порах вологи і т.п. Зауважимо, що на результат вимірювань впливатиме і геометричне положення перетворювача на поверхні виробу, особливо якщо останній має округлу форму. Вимірювальні чинники впливають локально на формування результату контролю. Під локальним впливом будемо розуміти вплив в певній точці вимірювання на поверхні виробу ПМ.

Для можливості використання статистичних характеристик результатів контролю необхідно проводити багатократні вимірювання швидкості ультразвуку в окремих точках на поверхні виробу. Результат j -го вимірювання швидкості ультразвуку в i -й точці на поверхні виробу ПМ представимо у вигляді [6]:

$$C_{i,j} = C_i(Tf) \pm \Delta C \pm \varepsilon_{i,j}, \quad (4)$$

де $\varepsilon_{i,j}$ – значення сумарної випадкової похибки вимірювання в i -й точці, що характеризується середньоквадратичним відхиленням, ΔC – систематична похибка, яка виникає при калібруванні дефектоскопу, $C_i(Tf)$ – істинне значення швидкості ультразвуку, що є випадковою функцією, яка залежить від впливу технологічних факторів та пористості.

Аналіз факторів, що впливають на вірогідність ультразвукового контролю виробів ПМ, показує, що їх є значна кількість, причому вони незалежні. Згідно центральної граничної теореми теорії ймовірностей сума великого числа незалежних випадкових величин, кожна з яких не домінує над іншими, підкоряється нормальному (гаусовому) розподілу ймовірностей. Тому при побудові стохастичної моделі процесу контролю виробів ПМ робиться припущення, що закон розподілу вимірюваної величини (швидкості ультразвуку) по всьому об'єму ОК не суперечить нормальному закону розподілу.

Стохастичну модель вимірювання швидкості УЗК розглядатимемо як лінійну систему, що має породжуючий процес $\eta(\tau)$, власну імпульсну реакцію системи при наявності дефекту (пористості) $\varphi(\tau, t)$ та відгук $\zeta(t)$ при наявності дефекту (пористості). Нехай на лінійну систему з імпульсною реакцією $\varphi(\tau, t)$ діє породжуючий процес $\eta(\tau)$, що являє собою послідовність окремих імпульсів, кожен з яких характеризується ймовірнісним законом появи у часі. Породжуючий процес $\eta(\tau)$ – це процес впливу акустичного поля на ОК, який вважатимемо випадковим процесом з незалежними приростами, розподіл якого нескінченно ділений. Процес із незалежними приростами в теорії випадкових процесів – це узагальнення поняття суми незалежних випадкових величин.

Нескінченно ділені закони мають велике значення при статистичному підході до аналізу багатьох фізичних процесів. Практичний інтерес до цих розподілів викликаний ще й тим, що вони дозволяють вивчати фізичні випадкові величини та процеси, що представляють собою суми випадкових величин (або процесів), які задовольняють умовам граничної нехтуваності. При цьому закони розподілу окремих доданків, які можуть бути довільними, не розглядають, обмежуючись лише дослідженням безмежно ділених законів, що в ряді випадків значно спрощує рішення прикладних задач.

Важлива властивість безмежно ділених законів розподілу полягає в тому, що для них можна писати в загальному виді характеристичну функцію, іменовану канонічною формою. Логарифм такої функції використовується в трьох різновидах: форма Колмогорова, форма Леві-Хінчина і форма Леві. Ці форми охоплюють гаусів і пуассонівський закони розподілу, а також χ^2 розподіл, логарифмічно нормальний, Максвелла та ін. [7]

Отже, запишемо породжуючий процес у вигляді послідовності випадкових незалежних імпульсів, що виникають у випадкові моменти часу τ_j (моменти випромінювання зондуючого імпульсу), які задовольняють умові незалежності приростів на інтервалах часу, що не перетинаються:

$$\Delta\eta(\tau_j) = \eta(\tau_{j+1}) - \eta(\tau_j), \quad (5)$$

де $j=1,2,3,\dots,n$.

Тоді породжуючий процес у довільний момент поточного часу t можна розглядати як:

$$\eta(t) = \sum_{\tau_j} \Delta\eta(\tau_j), \quad 0 \leq \tau_j \leq t. \quad (6)$$

Приріст процесу $\Delta\eta(\tau)$ будемо розглядати, як вплив на лінійну систему з імпульсною передатною характеристикою $\varphi(\tau, t)$.

Відгук $\zeta(t)$ такої системи в даному випадку являє собою інтеграл Дюамеля по випадковій функції і також описується лінійним випадковим процесом, інтегральне зображення якого [8]:

$$\zeta(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\tau, t) d\eta(\tau), \quad t \in T^*, \quad (7)$$

де $\{\eta(\tau), \tau \in (-\infty; \infty), \eta(0)=0\}$ – випадковий процес з незалежними природами, точки росту якого співпадають з моментами виникнення окремих імпульсів;

$\varphi(\tau, t)$ – ядро інтегрального зображення, невідповідно інтегрована в квадраті функція, що задовольняє умові фізичної реалізованості: $\varphi(\tau, t) \equiv 0$ при $t < \tau, \tau \in [0; \infty)$;

T^* – область завдання процесу, яка може бути як неперервним інтервалом, так і дискретною множиною точок.

Процес $\zeta(t)$ – це процес на прийомному перетворювачі. Вихідний процес $\zeta(t)$ повинен задовольняти умові фізичної реалізованості:

$$M(\zeta(t))^2 < \infty. \quad (8)$$

Тобто дисперсія приростів процесу $\eta(\tau)$ повинна бути кінцевою. Цій умові відповідає клас Гільбертових лінійних випадкових процесів [9].

Якщо породжуючий процес $\eta(\tau)$, що входить у формулу (7), є однорідним стохастичним неперервним процесом з незалежними приростами, то можна визначити характеристичну функцію процесу $\zeta(t)$, яка являє собою перетворення Фур'є щільності розподілу, і тому з неї можна отримати всі необхідні характеристики вихідного процесу. Характеристична функція дозволяє проводити розрахунки, оперуючи тільки параметрами ядра інтегрального зображення вихідного процесу, яке є невідповідною функцією, що значно спрощує процес обчислень.

Породжуючий процес $\eta(\tau)$ – гаусовий процес. Тому що ядро інтегрального зображення $\varphi(\tau, t)$ є лінійним (а отже, не змінює закон розподілу породжуючого процесу), то відгук системи $\zeta(t)$ також являтиме

гаусів процес, для опису якого достатньо знати два параметри – математичне сподівання та дисперсію:

$$M\zeta(t) = M\eta(\tau) \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\tau, t) d\tau ; \quad (9)$$

$$D\zeta(t) = D\eta(\tau) \int_{-\infty}^{\infty} \varphi^2(\tau, t) d\tau , \quad (10)$$

де $M\eta(\tau)$, $D\eta(\tau)$ – відповідно математичне сподівання та дисперсія вхідного процесу.

При застосуванні вищенаведеної моделі для опису процесу неруйнівного контролю виробів ПМ, параметри ядра процесу $\varphi(\tau, t)$ визначаються фізико-механічними характеристиками, на які впливає пористість. При зміні ядра інтегрального зображення $\varphi(\tau, t)$ буде змінюватись математичне сподівання та дисперсія вихідного процесу, тобто матиме місце певний систематичний зсув та зміна розкиду значень вимірюваної величини.

Ядро інтегрального зображення $\varphi(\tau, t)$ дозволяє лише виділити інформативні параметри, тому що має загальний вигляд. Надалі необхідно побудувати просту модель, в якій використовувались би визначені коефіцієнти для її опису. Найпростішим способом математичного опису системи з невідомим коефіцієнтом передачі є лінеаризація передатної характеристики системи.

Вважатимемо, що лінійна передатна характеристика системи не змінює закон розподілу вихідної величини по відношенню до вхідної. Враховуючи, що в результаті контролю вимірюється швидкість поширення УЗК в матеріалі виробу ПМ, опишемо модель процесу контролю відносно даного параметру. Позначимо швидкість УЗК в безпористому зразку як $C_{6п}$, а швидкість у зразку з пористістю як $C_п$. Тоді зв'язок між оцінками математичного сподівання та дисперсії з урахуванням побудованої лінійної моделі процесу контролю виробів ПМ виражається наступним чином:

$$MC_п = A_0 - A_1 \cdot MC_{6п} ; \quad (11)$$

$$DC_п = B_0 + B_1 \cdot DC_{6п} , \quad (12)$$

де A_0 – швидкість, обумовлена фізико-механічними характеристиками виробу, A_1 – коефіцієнт, обумовлений пористістю, B_0 – дисперсія швидкості УЗК, яка визначається анізотропією матеріалу, B_1 – коефіцієнт, що визначається просторовим положенням пористості в об'ємі матеріалу.

Знак «-» у формулі (11) обумовлений тим, що пористість приводить до зменшення швидкості поширення УЗК.

Таким чином, при наявності пористості, змінюватимуться коефіцієнти перетворення по математичному сподіванню та дисперсії A_0, A_1, B_0, B_1 . Ці експериментально-теоретичні коефіцієнти нам невідомі. Визначити їх можна, лише побудувавши регресійну модель на основі експериментальних даних. Для проведення регресійного аналізу, поперше, необхідно виготовити зразки тестових виробів ПМ з різними фізико-механічними властивостями і визначити коефіцієнти передачі по математичному сподіванню та дисперсії у відсутності пористості. Після цього необхідно визначити коефіцієнти передачі для зразків з різною пористістю, використовуючи спеціальні тестові сигнали. В такому випадку матимемо можливість вимірювати кількісне значення пористості. Однак, в силу впливу специфічних факторів на процес виготовлення виробів ПМ практично неможливо виготовити необхідні зразки для побудови регресійної моделі. Іншим підходом до вирішення поставленої задачі є застосування дисперсійного аналізу результатів контролю виробів ПМ, за яким відбувається класифікація дефектного та бездефектного стану виробу.

Висновки. Таким чином, в результаті теоретичних досліджень побудована стохастична модель процесу ультразвукового контролю виробів ПМ на основі лінійних випадкових процесів, що дозволяє обґрунтувати застосування статистичної обробки інформативного параметру, яким є швидкість поширення ультразвуку, та статистичних критеріїв при розробці адаптивного порогу, за яким приймається рішення про дефектність виробу. Класифікація технічного стану виробу ґрунтується на аналізі зміни математичного сподівання та дисперсії вибірок вимірних значень швидкості ультразвуку. На основі розробленої стохастичної моделі планується створення алгоритмічного та програмного забезпечення, що дозволить реалізувати запропонований підхід в реальному зразку засобу ультразвукової структуроскопії виробів ПМ.

Список літератури: 1. Роман О.В. Ультразвуковой и резистометрический контроль в порошковой металлургии / О.В. Роман, В.В. Скороход, Г.Р. Фридман. – Мн.: Вышш. шк., 1989. – 182 с. 2. Федорченко И.М. Основы порошковой металлургии / И.М. Федорченко, Р.А. Андриевский. – К.: АН УССР, 1963. – 420 с. 3. Балдев Р. Применения ультразвука / Р. Балдев, В. Раджендран, П. Паланичами. – М.: Техносфера, 2006. – 576 с. 4. Черемской П.Г. Поры в твердом теле / П.Г. Черемской, В.В. Слезов, В.И. Бетехтин. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 376 с. 5. Беркман А.С. Пористая проницаемая керамика / А.С. Беркман. – М.: Госстройиздат, 1959. – 173 с. 6. Єременко В.С. Шляхи мінімізації сумарної похибки вимірювання швидкості ультразвуку в матеріалах з неоднорідною структурою / В.С. Єременко, Р.М. Галаган // Електротехнічні та комп'ютерні системи. Науково-технічний журнал. – Одеса. – 2012. - № 06 (82). – С. 39-45. 7. Марченко Б.Г. Вибродиа-

гностика подшипниковых узлов электрических машин / Б.Г. Марченко, М.В. Мыслович. – К.: Наукова думка, 1992. – 196 с. **8. Марченко Б.Г.** Метод стохастических интегральных представлений и его приложения в радиотехнике / Б.Г. Марченко. – К.: Наукова думка, 1973. – 191 с. **9. Коваленко И.Н.** Случайные процессы: Справочник / И.Н. Коваленко, Н.Ю. Кузнецов, В.М. Щуренков. – К.: Наукова думка, 1983. – 366 с.

Bibliography (transliterated): 1. Roman, O.V., Skorohod, V.V., Fridman, G.R. *Ul'trazvukovoj i rezistometricheskij kontrol' v poroshkovej metallurgii*. Minsk: Vysshaja shkola, 1989. Print. **2.** Fedorchenko, I.M., Andrievskij, R.A. *Osnovy poroshkovej metallurgii*. Kyiv: AN USSR, 1963. Print. **3.** Baldev R., Radzhendran V., Palanichami P. *Primenenie ul'trazvuka*. Moscow: Tehnosfera, 2006. Print. **4.** Cheremskoj, P.G., Slezov, V.V., Betehtin, V.I. *Pory v tverdom tele*. Moscow: Jenergoatomizdat, 1990. Print. **5.** Berkman, A.S. *Poristaja pronicaemaja keramika*. Moscow: Gosstrojizdat, 1959. Print. **6.** Eremenko, V.S., Galagan, R.M. "Ways to minimize the total error of ultrasonic velocity measurements in materials with heterogeneous structure". *Electrotechnical and Computer Systems* 06 (82) (2012): 39-45. Print. **7.** Marchenko, B.G. Myslovich, M.V. *Vibrodiagnostika podshipnikovyh uzlov jelektricheskikh mashin*. Kyiv: Naukova dumka, 1992. Print. **8.** Marchenko, B.G. *Metod stohasticheskikh integral'nyh predstavlenij i ego prilozhenija v radiotekhnike*. Kyiv: Naukova dumka, 1973. Print. **9.** Kovalenko, I.N., Kuznecov, N.Ju., Shhurenkov, V.M. *Sluchajnye processy: Spravochnik*. Kyiv: Naukova dumka, 1983. Print.

Надійшла (received) 30.04.2014

УДК 504.064.3:66.085

О. М. ГРИГОР'ЄВ, канд. физ. мат. наук, ст. н. с. НДЛ ФВПНТУ «ХП»;

З. В. БЛИК, науч. сот. НДЛ (о РХБ з), ФВП НТУ «ХП»;

Ю. В. ЛИТВИНОВ, доц. Харківського Національного пед.ун-ту;

О. В. САКУН, канд. біол. наук, нач. каф. ХБТХР, ФВП НТУ «ХП»;

В. В. МАРУЩЕНКО, канд. біол. наук, доц., нач. каф. БЗПВРХБз, ФВП НТУ «ХП»

О. Ю. ЧЕРНЯВСЬКИЙ, начальник НДЛ (о РХБ з), ФВП НТУ «ХП».

ЧОТИРИКАНАЛЬНИЙ АНАЛІЗАТОР ІМПУЛЬСІВ ДЛЯ ОДНОЧАСНОЇ РЕЄСТРАЦІЇ АЛЬФА-, БЕТА-, ГАММА- ТА НЕЙТРОННОГО ВИПРОМІНЮВАНЬ

Розроблена апаратура та спосіб для одночасного вимірювання енергетичних спектрів альфа-, бета-, гамма- та нейтронного випромінювання із застосуванням напівпровіднико-

© О. М. Григор'єв, З. В. Білик, Ю. В. Литвинов, О. В. Сакун, В. В. Марущенко,
О. Ю. Чернявський, 2014

вих блоків детектування, аналого-цифрових перетворювачів, персонального комп'ютера та програмного забезпечення. Експериментальні дослідження з використанням джерел альфа-, бета-, гамма-випромінювання довели працездатність приладу з достатньо високими технічними параметрами, такими як: точність та стабільність своїх характеристик.

Ключові слова: альфа-джерела, бета-джерела, гамма-джерела, нейтронне джерело, багатоканальний аналізатор імпульсів, кремній, телурид кадмію.

Вступ. Проведення якісного радіаційного екологічного моніторингу різних об'єктів вимагає застосування приладів з широким діапазоном вимірювань, а також використання методів спектрометрії [1].

У роботі [2] описаний спектрометр-дозиметр для автоматичного вимірювання потоків, доз альфа-, бета-випромінювання та спектрів гамма-випромінювання речовин за допомогою напівпровідникових детекторів. Цей пристрій не визначає наявність нейтронного випромінювання та товщину шару альфа-випромінювання.

Відомий спосіб реєстрації нейтронів [3], який заснований на рахунку миттєвих γ -квантів захоплення, що утворюються при взаємодії нейтронів з ядрами кадмію-113. Для створення гамма-квантів захоплення та їх реєстрації використовують монокристал напівпровідникової сполуки кадмію, зокрема, селенід або телурид кадмію. Даний спосіб менш інформативний внаслідок відсутності спектрів гамма-випромінювання, по якому можна виділити «кадмієві» нейтрони за реакцією $^{113}\text{Cd} (n, \gamma) ^{114}\text{Cd}$, а також не дозволяє визначити нейтронні джерела в присутності потужних γ -джерел.

У роботі [4] проведено визначення основних вимірювальних параметрів широкодіапазонних дозиметрів-радіометрів нейтронів і фотонів МКС-03СМ, блок детектування якого реалізує принцип розміщення декількох лічильників на різній глибині в сповільнювачі. Визначено основні вимірювальні параметри в діапазоні енергій від 25 кеВ до 15 МеВ. Для оперативного індивідуального контролю персоналу по еквівалентній дозі розроблений прямопоказуючий сигнальний дозиметр ДКБН-01, принцип роботи якого заснований на застосуванні детектору нейтронів з кремнієвого напівпровідникового детектору з водородвмісним радіатором. Дані пристрої не дозволяють визначати альфа- і бета-джерела.

В роботі [5] для вимірювання полів гамма-випромінювання та надійної ідентифікації основних ізотопів-продуктів поділу запропонований повністю цифровий гамма-спектрометр з багатоелементних CdZnTe-детектором. Спектрометр містить масив детекторів з CdZnTe, цифровий багатоканальний аналізатор імпульсів, реалізований з використанням швидкодіючих АЦП 32-розрядних сигнальних процесорів. Кожен детектор виготовлений таким чином, що забезпечуються умови переважного збору носіїв одного знака (квазісферична геометрія). Це

дозволяє істотно покращити енергетичну розподільчу здатність. Для детекторів спектрометричної якості розподільча здатність знаходиться в діапазоні 6-9 кеВ для енергії 662 кеВ ^{137}Cs . Даний спектрометр дозволяє проводити вимірювання лише гамма-випромінювання.

Авторам не відомі прилади, наприклад [6,7], для одночасного вимірювання альфа-, бета-, гамма- та нейтронного випромінювання.

Таким чином, аналіз літературних даних показав, що не існує приладу для одночасного вимірювання альфа-, бета-, гамма- та нейтронного випромінювання.

Метою роботи є розробка способу та приладу для одночасного визначення альфа-, бета-, гамма- та нейтронного випромінювання, що зменшує час вимірювання бета- та гамма-випромінювання, а також дає змогу одночасно вимірювати щільність потоку альфа- та нейтронних часток.

Викладення основного матеріалу. Аналіз вищевикладених приладів для детектування ядерних випромінювань та детекторів, що застосовують для їх аналізу, підвів до використання для одночасного вимірювання альфа-, бета-, гамма- та нейтронного випромінювання в чотирьох багатоканальних аналізаторах імпульсів наступних детекторів:

1) спектрометричний телурид-кадмієвий детектор розміром $5 \times 5 \times 3$ міліметра для вимірювання розподілу гамма-квантів за енергією, де ефективність рахунків детектора складала 0,8 % [8];

2) кремнієвий детектор площею 10×10 мм перед яким був розташований поглинач з товщиною алюмінію 30 мкм, що затримував потік α -часток та пропускав β -частки з енергією більше ніж 100 кеВ і використовувався для вимірювання щільності потоку бета-часток;

3) кремнієвий детектор площею 10×10 мм, який вкритий шаром алюмінію товщиною 1 мкм для захисту від зовнішнього світла, що використовувався для вимірювання щільності потоку альфа-часток;

4) кремнієвий детектор площею 10×10 мм, що був загорнутий в поліетиленову плівку для вимірювання щільності потоку швидких нейтронів [4,9].

До переваг Si детекторів, що застосовували для реєстрації альфа-, бета- та нейтронного випромінювання, варто віднести [10]:

розподіл за енергією на лінії плутонія-238 може не перевищувати 10-12 кеВ;

відкрита поверхня р-п-переходу площиною 1 см^2 ;

технологія виготовлення р-п-переходу здійснюється дифузією бором та фосфором, що дозволяє розраховувати на підвищену радіаційну

та механічну стійкість; товщина р-п-переходу може досягати 0,3 мм, що дозволяє міряти енергію β -часток до 300 кеВ, α -часток – до 10 МеВ.

Для одночасного вимірювання альфа-, бета-, гамма- та нейтронного випромінювання було створено діючий макет з чотирьох багатоканальних аналізаторів імпульсів, який зображено на рисунку 1.

Блоки детектування альфа-, бета-, гамма- та нейтронного випромінювання підключені до чотирьох входів аналізатора імпульсів. Блок детектування альфа-випромінювання – без кришки з фольгою. Результати вимірювань виводяться на персональний комп'ютер.

Спосіб, завдяки якому можливо одержувати інформацію з чотирьох датчиків випромінювання, базується на використанні чотирьох шістнадцятирозрядних аналого-цифрових перетворювачів, що керуються одним мікроконтролером. Загальна схема одного каналу аналізатора імпульсів зображена на рисунку 2, в якій мікроконтролер є загальним для чотирьох каналів вимірювання.

В чотирьох багатоканальних аналізаторах імпульсів використовувались передсилювач ОРА 27, шістнадцяти розрядний АЦП ADS 8361, восьми розрядний мікропроцесор 16F877А, малошумлячий з високоомним опором та високою швидкістю наростання сигналу підсилювач AD8033. В аналогово-цифровому перетворювачі використовувалися дванадцять розрядів АЦП з можливістю використання додаткових розрядів для підвищення роздільної здатності.



Рис. 1 – Чотириканальний аналізатор імпульсів для одночасного вимірювання альфа-, бета-, гамма- та нейтронного випромінювання

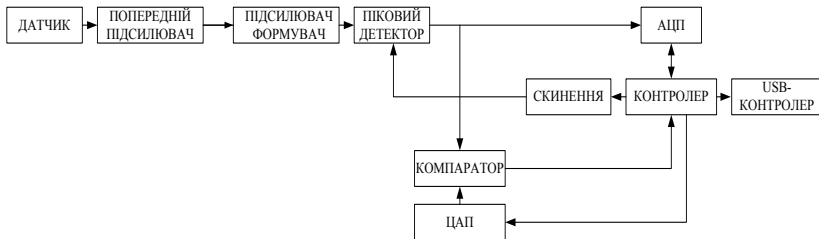


Рис. 2 – Загальна схема одного каналу аналізатора імпульсів

При проведенні експериментальної перевірки чотирьох багатоканальних аналізаторів імпульсів за каналом гамма-випромінювання використовувалось джерело гамма-випромінювання ^{137}Cs активністю $A=1,185 \times 10^{11}$ Бк. Спектр гамма-випромінювання, що отриманий від джерела ^{137}Cs , зображений на рисунку 3 – спектрометр 1.

Відстань до джерела ^{137}Cs складала 3,5 метри, дискримінація встановлювалась на рівні 100-110 кеВ для вимірювання по гамма-каналу, півширина піку складала 15 %. Як видно з рисунку 3 для кожного каналу характерна відповідна кількість рахунків та відповідний енергетичний спектр.

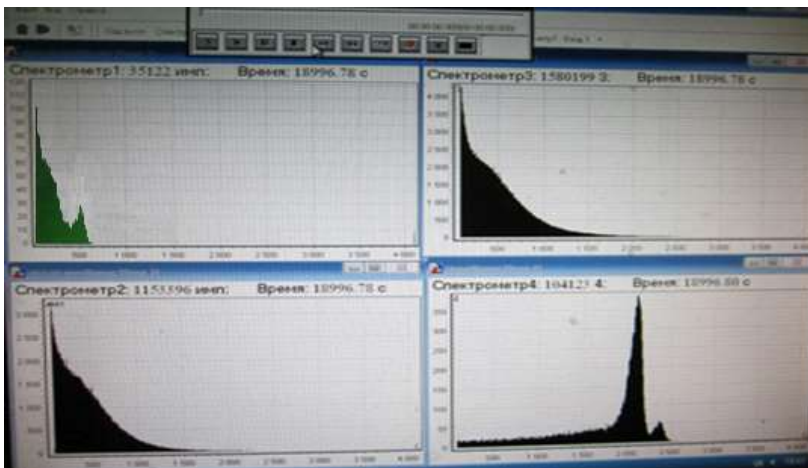


Рис. 3 – Спектр від джерел ^{137}Cs – спектрометр 1, $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ – спектрометр 2 та 3, ^{239}Pu – спектрометр 4.

При проведенні експериментальної перевірки чотириканального аналізатора імпульсів за каналом альфа-випромінювання використовувалось закрите джерело альфа-випромінювання з радіонуклідом ^{239}Pu активністю $A=9,693 \times 10^3$ Бк. Спектр альфа-випромінювання, що отриманий від джерела з активністю A зображений на рисунку 3 – спектрометр 4. Відстань до джерела складала 1 сантиметр, енергія альфа-часток, що реєструвалися, була на рівні 3-4 МеВ, півширина піку складала 9,5 %.

При проведенні експерименту із використанням цього ж детектора [10], що поміщувався у вакуумну камеру з альфа-джерелом з набору ОСАИ плутоній-238 півширина піку складала 16 кеВ (0,35 %), еквівалент товщини джерела дорівнював 8 кеВ, кутова колімація джерела додавала до еквіваленту товщини ще 2 кеВ. Для підсилення сигналу детектору використовувався предпідсилювач з еквівалентом шумів 7 кеВ.

Таким чином, порівняння енергетичних спектрів, що отримані в польових умовах в каналі альфа-вимірювань та у вакуумній камері показує високу якість визначення альфа-джерел при використанні кремнієвих детекторів, а також можливість ідентифікації ізотопів за визначеною енергією та можливістю визначення товщини шару радіонукліду.

При проведенні експериментальної перевірки чотириканального аналізатора імпульсів за каналом бета-випромінювання використовувалось закрите джерело бета-випромінювання з радіонуклідом $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ активністю $A=2,896 \times 10^9$ Бк. Спектр бета-випромінювання, що отриманий від джерела $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ зображений на рисунку 3 – спектрометр 3.

Відстань до джерела $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ складала 10 сантиметрів.

При проведенні експериментальної перевірки чотириканального аналізатора імпульсів за каналом нейтронного випромінювання використовувалось закрите джерело бета-випромінювання з радіонуклідом $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ активністю $A=2,896 \times 10^9$ Бк. Спектр бета-випромінювання, що отриманий від джерела $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ зображений на рисунку 3 – спектрометр 2.

При проведенні експериментальної перевірки чотириканального аналізатора імпульсів одночасно за чотирма каналами використовувались джерела альфа-, бета-, гамма-випромінювання, що були описані вище. Спектри, що отримані від цих джерел зображені на рисунку 3. Похибка вимірювання не перевищувала 1 %, тобто в кожному каналі вимірювання набиралось не менш як 10000 імпульсів. Таким чином, якщо визначаються альфа-, бета-, нейтронне випромінювання в присутності гамма-випромінювання у відповідних каналах вимірювання, при даних порогах дискримінації, пропорційно віднімається кількість імпу-

льсів, що зареєстрована від гамма-джерела телурид кадмієвим детектором.

Висновки. В роботі проведений літературний огляд, який показав актуальність розробки приладу для одночасного вимірювання альфа-, бета-, гамма- та нейтронного випромінювання. Проведений аналіз літератури показав, що для реєстрації альфа-, бета-, гамма- та нейтронного випромінювання найбільш доцільним, за своїми характеристиками, є застосування напівпровідникових детекторів. З напівпровідникових детекторів для розробленого чотириканального аналізатора імпульсів було обрано спектрометричний телурид кадмію та кремній, завдяки можливості їх застосування в польових умовах з високими технічними характеристиками такими як: стабільність роботи; широкий температурний інтервал застосування від -60 С до +60 С; висока точність вимірювання та малі габарити.

Для одночасного вимірювання інформації за чотири каналами розроблено спосіб, що базується на використанні чотирьох шістнадцяти розрядних аналого-цифрових перетворювачів.

Розроблений діючий макет універсального радіометра при експериментальних дослідженнях по вимірюванню альфа-, бета-, гамма-випромінювань засвідчив працездатність, точність та стабільність своїх характеристик.

У подальшому розробці підлягає створення програмного забезпечення для розширення динамічного діапазону та швидкодії приладу.

Список літератури: 1. *Чернявський І.Ю.* Військова дозиметрія. / *І.Ю. Чернявський, В.В. Маруценко, І.М. Мартинюк* Підручник. – Харків : ФВП НТУ “ХПІ”, 2011. – 472 с. 2. *Сафьянников Н.М., Кутуан А.А.* Спектрометр-дозиметр : Пат. 2366977 РФ, G01T1 / 24, G01T1 / 16, G01T1 / 02 – 2008109434 / 28 Заявл. 11.03.2008 ; Опубл. 10.09.2009. 3. *Юровський А.В.* Способ регистрации нейтронов : Пат. 2091814 РФ, G01T3 / 08 – 95100444 / 25 Заявл. 11.01.1995 ; Опубл. 27.09.1997. 4. *Бойко А.В., Киреев В.П., Коваленко В.Г., Петров В.И., Слученков Г.Ф.* Определение основных измерительных параметров широкодиапазонных дозиметров-радиометров нейтронов и фотонов (СНИИП). // Ядер. измерит.-инф. технол. – 2002, № 3, с. 48 – 55. 5. *Олейник С.Г., Маслов О.В., Максимов М.В.* Спектрометрические измерения в полях гамма-излучения высокой интенсивности при обращении с РАО высокой активности. // 8 Российская научная конференция “Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях”, Обнинск, 17-19 сент., 2002 : Тезисы докладов. – изд-во ГНЦ РФФЭИ. 2002, с. 322-324. 6. Company Amptek “Products”. Company Amptek, 1977. Web. 7 April 2014 <<http://www.amptek.com>>. 7. ОАО “Институт физико-технических проблем” “Продукция и услуги”. Открытое акционерное общество “Институт Физико-Технических Проблем Федерального Агентства по атомной энергии”, 1992. Web. 7 April 2014 <<http://iftp.ru/>>. 8. *Беденко Л.Б., Арсеньева О.М., Григор’єв О.М., Стервасдов М.Г.* Спектрометр гамма-випромінювання на базі телурид кадмієвих детекторів // Збірник наукових праць “Системи обробки інформації”. – Х. : ХУПС. – 2005. – Вип. 5 (45). – с. 214-219. 9. *Абрамов А.И., Казанский Ю.А., Матушевич Е.С.* Основы экспериментальных методов ядерной физики. – М. : Атомиздат, 1970, – 560 с. 10. *А.Н. Григорьев, А.Г. Кареев, Д.А. Каракуркчи, Л.Б. Беденко; Т.А. Жадан,*

С.И. Сасько. Применение кремниевых фотодиодов для альфа-спектрометрии и измерения бета- и нейтронных потоков // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск “Колісні та гусеничні машини спеціального призначення.” – Харків : НТУ “ХПІ”. – 2003. – № 28. – с. 72-75.

Bibliography (transliterated): 1. *Chernyavs'kyj, I.Y., V.V. Marushhenko and I.M. Marty nyuk. Vijs' kova dozy metriya. Pidruchny'k. Kharkov: FVP NTU “XPI”, 2011. Print.* 2. *Safjannikov, N.M. and A.A. Kutuan. “Spektrometr-dozimetr”:* Pat. 2366977 RU, G01T1 / 24, G01T1 / 16, G01T1 / 02 – 2008109434 / 28 Zajavl. 11.03.2008 ; Opubl. 10.09.2009. 3. *Jurovskij, A.V. “Sposob registracii nejtronov”:* Pat. 2091814 RU, G01T3 / 08 – 95100444 / 25 Zajavl. 11.01.1995 ; Opubl. 27.09.1997. 4. *Bojko, A.V., et al. “Opredelenie osnovnyh izmeritel'nyh parametrov shirokodiapazonnyh dozimetrov-radiometrov nejtronov i fotonov (SNIP)”.* Jader. izmerit.-inf. tehnol. № 3. 2002. 48 – 55. Print. 5. *Olejnik, S.G., O.V. Maslov and M.V. Maksimov “Spektrometricheskie izmerenija v poljah gamma-izlucheniya vysokoj intensivnosti pri obrashhenii s RAO vysokoj aktivnosti”.* 8 Rossijskaja nauchnaja konferencija “Radiacionnaja zashhita i radiacionnaja bezopasnost' v jadernyh tehnologijah”, Obninsk: GNC RFFJel, 2002. 322-324. Print. 6. Company Amptek “Products”. Company Amptek, 1977. Web. 7 April 2014 <<http://www.amptek.com>>. 7. ОАО “Институт физико-технических проблем” “Производство и услуги”. Открытое акционерное общество “Институт Физико-Технических Проблем Федерального Агентства по атомной энергии”, 1992. Web. 7 April 2014 <<http://iftp.ru/>>. 8. *Bedenko, L.B., et al. “Spektrometr gamma-vy'prominyuvannya na bazi telury' d kadmiyevy' x detektoriv”.* Zbim'y'k naukovy'x prac' “Sy'stemy' obrobky' informaciyi”. Kharkov: XUPS, 2005. 45 vols. 5th. 214-219. Print. 9. *Abramov, A.I., Ju.A. Kazanskij and E.S. Matusevich Osnovy jeksperimental'nyh metodov jadernoj fiziki. Moscow: Atomizdat, 1970. Print.* 10. *Grigor'ev, A.N., et al. “Primenenie kremnievyyh fotodiodov dlja al'fa spektrometrii i izmerenija beta- i nejtronnyh potokov”.* Visny'k NTU “XPI”. Zbim'y'k naukovy'x prac' . Tematy'chny'j vy'pusk “Kolisni ta gusen'y'chni mashy'ny' special'nogo pry'znachennya.” Kharkov: NTU “XPI”, № 28. 2003. 72-75. Print.

Надійшло (received) 07.05.2014

УДК 620.179.14

А. Г. ПРОТАСОВ, докт. пед. наук, доц., НТУУ «КПІ»,Київ;

К. М. СЕРИЙ, канд. техн. наук, доц., НТУУ «КПІ»,Київ;

О. Л. ДУГІН, аспірант, НТУУ «КПІ»,Київ;

В. Ф. ПЕТРИК, канд. техн. наук, доц, НТУУ «КПІ»,Київ

ВИХРОСТРУМОВИЙ ДЕФЕКТОСКОП З ТЕЛЕМЕТРИЧНИМ КАНАЛОМ ЗВ'ЯЗКУ

В роботі запропоновано схему дефектоскоп для вихрострумового неруйнівного контролю, який має телеметричний канал зв'язку з пристроєм обробки і відображення інформації. Створений дефектоскоп має малу вагу і розміри, що дозволяє використовувати

© А. Г. Протасов, К. М. Серий, О. Л. Дугін, В. Ф. Петрик, 2014

його для контролю складних конструкцій. Телеметричний канал зв'язку здійснює обмін даними за рахунок бездротової технології **Bluetooth**, що дає можливість залучати для обробки цих даних потужну обчислювану техніку. Іл.: 4. Бібліогр.: 4 наз.

Ключові слова: вихрострумний дефектоскоп, телеметричний канал зв'язку.

Вступ. Вихрострумний неруйнівний контроль є одним з найбільш розповсюджених видів контролю виробів з електропровідних матеріалів. Використання нових матеріалів, а також розширення номенклатури об'єктів контролю вимагають постійного розвитку і удосконалення методів і засобів цього виду контролю.

На сьогодні існуюча проблема - це контроль об'єктів з важкодоступними для оператора ділянками, а також організація автоматизованих систем контролю, які не потребували б присутності оператора безпосередньо біля об'єкту. Вирішення цієї проблеми лежить у площині просторового розділу перетворюючої частини системи і блоку обробки сигналів та індикації результатів контролю, тобто у створенні системи контролю з бездротовим способом передачі даних.

Аналіз останніх досліджень. До існуючих сьогодні технологій бездротової передачі даних відноситься персональна мережа бездротового зв'язку на нижчому рівні ієрархії пристроїв WPAN (Wireless Personal Area Networks), яка є одним із стандартів для організації бездротових мереж передачі даних. Вона уявляє собою систему обміну даних з обмеженим ресурсом дії для невеликої відстані (3-60 м). Мережа використовується як для об'єднання окремих пристроїв, так і для зв'язку з мережами більш високого рівня. Ці пристрої створюють канали передачі даних у діапазоні частот від 400 МГц до 2,4 ГГц. В найбільш розповсюдженому діапазоні 2,4 ГГц широкого розповсюдження получили технології Wifi, Bluetooth и Zigbee. Каждая из этих технологий имеет собственные уникальные характеристики, которые и обуславливают их определенные области использования [1].

Використання бездротових технологій передачі даних в системах неруйнівного контролю дозволяє спростити процес отримання і передачі сигналів, а також отримати високу вірогідність контролю за рахунок передачі інформації від первинного перетворювача до блоку обробки даних у цифровій формі з послідуною цифровою обробкою [2].

Мета статті. Метою статті є спроба продемонструвати можливість використання принципу телеметрії для реалізації приладів вихрострумного неруйнівного контролю.

Постановка проблеми. Вихрострумний дефектоскоп з телеметричним каналом зв'язку повинен представляти собою сукупність пристроїв, що забезпечують збір сигналів з первинного перетворювача, формування телеметричних сигналів, передачу їх по каналу зв'язку,

регістрацію і відображення переданої інформації на приймальній стороні.

Матеріали досліджень. До розгляду пропонується вихрострумний дефектоскоп, який складається з 2 частин – первинного перетворювача та персонального комп'ютера, який виступає у ролі пристрою для обробки і відображення даних. Первинний перетворювач є функціонально завершеним пристроєм зі своїм живленням, алгоритмом роботи і системою контролю. Зв'язок між першою та другою частинами приладу здійснюється за рахунок бездротової технології **Bluetooth**.

Структурна схема дефектоскопа представлена на рис. 1. Пристрій містить вихрострумний перетворювач, який складається з двох котушок [3]. В залежності від режиму роботи дефектоскопу, первинна котушка перетворювача підключається через ключ до синтезатора частоти або до генератора імпульсів. Синтезатор частоти, який уявляє собою цифровий програмований генератор синусоїдальних коливань, використовується для режиму збудження перетворювача сигналом гармонійної форми, а генератор імпульсів формує прямокутні імпульси у імпульсному режимі роботи. Сигнал з вторинної котушки після підсилення подається на аналого-цифровий перетворювач. Оцифровані дані записуються в буфер пам'яті для послідувочої обробки. Синхронізацією роботи вузлів дефектоскопа керує блок керування. Бездротовий обмін даними між дефектоскопом і персональним комп'ютером здійснює блок передачі інформації.

Дефектоскоп має вбудований Li-pol акумулятор, що забезпечує до 10 годин безперебійної роботи дефектоскопа.

Важливою рисою запропонованої схеми є можливість здійснювати контроль виробів не тільки при гармонійному збудженні перетворювача, а і при імпульсному, що значно розширює сферу застосування вихрострумного дефектоскопу [4].

Обробка даних проводиться за допомогою програмного забезпечення, встановленого на комп'ютері, що дозволяє виконувати складний математичний аналіз та цифрову фільтрацію сигналу, а також виведення сигналу на екран в зручній для користувача формі.

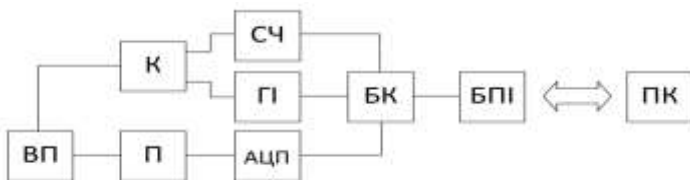


Рис. 1. Структурна схема вихрострумowego дефектоскопа

ВП – вихрострумовой перетворювач, П – підсилювач, АЦП – аналого-цифровий перетворювач, К – ключ, СЧ – синтезатор частоти, ГІ – генератор імпульсів, БК – блок керування, БПІ – блок передачі інформації, ПК - персональний комп'ютер

Загальний вид вихрострумowego дефектоскопу з телеметричним каналом зв'язку показаний на рис. 2.



Рис. 2. Загальний вид вихрострумowego дефектоскопу з телеметричним каналом зв'язку

Можливості дефектоскопу як телеметричної системи. Запропонований вихрострумовой дефектоскоп, як телеметрична система, здатен забезпечити:

- можливість підключення великої кількості первинних перетворювачів (або дефектоскопів) до одного пристрою відображення інформації (персональному комп'ютеру);
- можливість передачі великої кількості параметрів у обох напрямках (осцилограми, амплітуду і фазу отриманого сигналу, рівень заряду акумулятора вимірювальної частини приладу, частоту і амплітуду

збуджуючого сигналу, частоту дискретизації АЦП, поріг спрацювання звукової сигналізації та ін.);

- можливість регулювання характеристик вимірювального приладу в робочому режимі;

- можливість автоматизації процесу контролю з послідуочим збереженням всіх параметрів у пам'яті комп'ютера.

Параметр, що передається дефектоскопом, є швидкозмінною функцією часу зі спектром вхідних та вихідних частот до 5МГц. При гармонійному режимі програмне забезпечення виконує обробку сигналів з частотою 500 кГц, так як більш високі частоти використовуються рідко.

Лінія зв'язку між дефектоскопом і мобільним персональним комп'ютером використовує бездротову технологію Bluetooth, засновану на стандарті IEEE 802.15.1, який визначає функціонування компактної системи зв'язку на невелику відстань. Максимально можливий об'єм інформації, який телеметрична система здатна передавати, приймати і реєструвати в одиницю часу (повна пропускна здатність) – 1 Мб/с.

Дальність дії радіо інтерфейсу при наявності зовнішньої антени знаходиться в межах 300 м. Похибка передачі даних телеметричним способом залежить від затримки оновлення інформації, і не впливає на точність оцифровування сигналів.

Основні характеристики дефектоскопу. Статичні характеристики:

- роздільна здатність – 8 біт;
- мінімальна напруга, що вимірюється – 1мВ;
- коефіцієнт перетворення від 1 до 100 (коефіцієнт підсилення).

Динамічні характеристики:

- інерційність одного вимірювання - <100 нс;
- частота дискретизації АЦП - до 128МГц;
- інерційність передачі параметра, що вимірюється - < 0,02 с.

Максимальний струм перетворювача (дефектоскопу), що споживається – 300 мА. Ємність акумуляторної батареї – 2900 мАг. Час безперервної роботи від акумуляторної батареї – не менше 9 годин у гармонійному режимі і не менше 16 годин у імпульсному режимі. Габарити-

ти дефектоскопу 135x35x20 мм. Вага дефектоскопу - 100 гр. Тип перетворювача – активний, генераторний.

Результати експериментальних досліджень. Для проведення експериментальних досліджень було обрано деталь з листової нержавіючої сталі товщиною 2 мм (рис.3). Штучно було створено дефектну ділянку, яка складалася з групи дефектів типу тріщина. Середні розміри тріщини склали: довжина 1-2 мм, глибина залягання 0,5 мм, розкриття дефекту 0,05 мм. Контроль проводився з використанням диференціального вихрострумового перетворювача. Частота зондуючого сигналу – 600 кГц, підсилення – 18 дБ. Пошук дефекту проводився через декілька шарів паперу загальною товщиною 0,5 мм. Отримані результати контролю, а саме осцилограми сигналів зображені на рис.4 а і б.

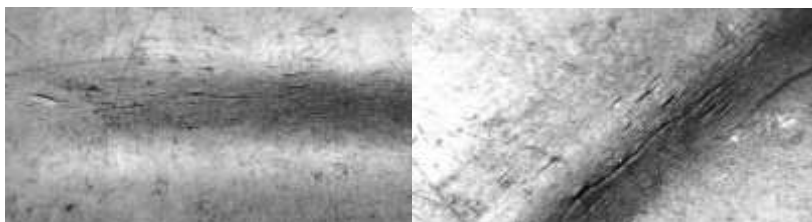


Рис. 3. Фрагменти деталі з дефектами

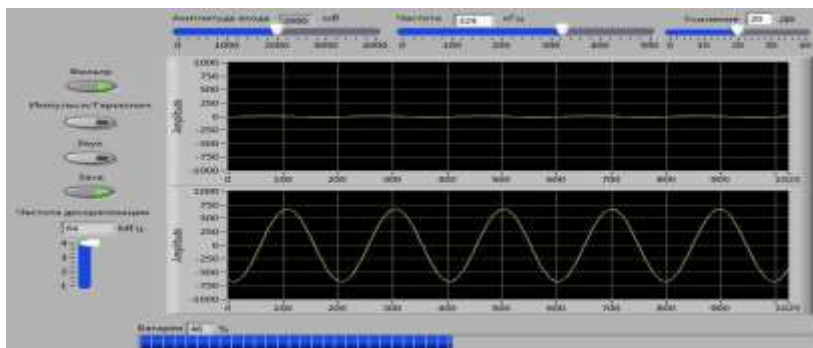


Рис. 4. Осцилограми сигналів дефектоскопа: а) верхня крива – дефект відсутній;

б) нижня крива – дефект присутній

На верхній панелі віртуального приладу маємо зображення сигналу перетворювача для бездефектної ділянки об'єкта контролю, а нижня панель демонструє форму сигналу у випадку наявності дефекту.

Отже, результати експериментальних досліджень продемонстрували, що запропонований вихрострумний дефектоскоп з телеметричним каналом зв'язку здатен фіксує дефекти типу тріщини, раковини, приховані отвори під шаром фарби або іржі.

Завдяки використанню сучасної елементної бази, дефектоскоп має невеликі розміри та споживає мало енергії, що дозволяє йому працювати від вбудованої акумуляторної батареї до 10 годин. Експериментально була встановлена максимальна дальність бездротової передачі даних, яка досягла 100 метрів в зоні прямої видимості.

Висновки. Розроблений вихрострумний дефектоскоп з телеметричним каналом зв'язку може бути застосований для контролю металевих об'єктів з метою виявлення поверхневих та підповерхневих дефектів типу тріщини в томи металу, раковини, неповари і т.п.

Невеликий розмір приладу, його мала вага і компактність, а також відсутність з'єднувальних дротів робить дефектоскоп зручним для використання у місцях, які є важкодоступними для оператора. Запропонована конструкція приладу відкриває широкі можливості для організації автоматизованих систем контролю, які не потребували б присутності оператора у агресивному середовищі.

Телеметричний канал зв'язку дозволяє передавати дані на певну відстань без втрати корисної інформації про стан об'єкту, що дає можливість використовувати для обробки цих даних потужну обчислювану техніку.

Список літератури: 1. Кустовський О.Л. Використання безпроводних технологій передачі даних для вирішення задач у неруйнівному контролі. / О.Л. Кустовський, В.Ф. Петрик, К.М. Серий. // Вісник НТУ «ХП». 2012. - № 40. — С.71-77. 2. Кустовський О.Л. Бездротовий акустичний дефектоскоп. / О.Л. Кустовський, В.Ф. Петрик, Р.С. Савченко. // Матеріали н-п конференції: Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання. – Ів. Франківськ: ІФТУНГ, 2009. – С. 68. 3. Учанин В. Н. Вихретоковые мультидифференциальные преобразователи и их применение. / В.Н. Учанин // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2006. - №3. – С. 34-41. 4. Darko Vasic. Pulsed Eddy-Current Nondestructive Testing of Ferromagnetic Tubes. / Vasic Darko, Bilas Vedran, Ambru's Davorin. // IEEE Transactions on instrumentation and measurement. - Vol. 53. - No. 4. - August 2004. P. 1289-1294.

Bibliography (transliterated): 1. Kustovs'kyj O.L., V.F. Petryk, K.M. Syeryj. "Vy'kory'stannya bezprovodny'x tehnologij peredachi dany'x dlya vy'rishennya zadach u nerujnivnomu kontroli." *Visnyk NTU "KhPI"*. No. 40. 2012. 71-77. Print. 2. Kustovs'kyj O.L., V.F. Petryk, R.S. Savchenko. "Bezdrotovyj akusty'chnyj defektoskop." *Materialy' nauch.-prakt. konf.: Metody' ta zasoby' nerujnivnogo kontrolyu promy'sloвого obladnannya*. – Iv. Frankivs'k: IFTUNG, 2009. 68. Print. 3. Uchany'n V. N. "Vy'xretokovy'e mul'ty'dy'fferency'al'nye preobrazovately' i ix pry'meneny'e." *Texny'cheskaya dy'agnosty'ka i nerazrushayushhyj kontrol'*. No.3. 2006. 34-41. Print. 4. Darko Vasic, Bilas Vedran, Ambru's Davorin. "Pulsed Eddy-Current Nondestructive

УДК 697.34

І.Р. ВАЩИШАК, канд. техн. наук, доц. ІФНТУНГ, Івано-Франківськ

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ МІСЦЬ ТЕПЛОВТРАТ У ПІДЗЕМНИХ ТЕПЛОВИХ МЕРЕЖАХ ПРИ ПРОВЕДЕННІ ЕНЕРГОАУДИТУ

В статті розглянуто причини понаднормативних втрат теплової енергії при її транспортуванні від джерела до споживача підземними тепловими мережами. Запропоновано інформаційно-вимірнювальну систему для контролю підземних теплових мереж безканальної прокладки з трубопроводами в пінополіуретановій тепловій ізоляції, в основу роботи якої покладено комплексне застосування трьох інформативних параметрів (температури приповерхневого шару ґрунту, акустичного тиску на поверхні ґрунту та струму у стінках трубопроводу). Розроблено методику проведення експериментальних досліджень за допомогою інформаційно-вимірнювальної системи, яка пройшла успішну апробацію.

Ключові слова: теплові втрати, підземні теплові мережі, інформаційно-вимірнювальна система, дефект, інформативний параметр, функціональна схема

Вступ. Для оптимізації споживання паливно-енергетичних ресурсів, що використовуються при отриманні теплової енергії для побутових та виробничих потреб, проводять енергоаудит систем теплопостачання. Суттєву роль у зниженні непродуктивних втрат теплової енергії при її транспортуванні від джерела до споживача відіграє стан теплових мереж. Це зумовлено тим, що загальна зношеність тепломереж сягає понад 50% [1], а фактичні втрати тепла сягають 60 % [2, 3], при нормативних 13%. Результати проведених енергоаудитів не раз підтвердили, що найслабшою ланкою комунального теплопостачання є не теплогенеруючі потужності, що, як виявилось, часто піддаються відносно недорогій модернізації, а його транспортна складова, мінімальний наскрізний дефект в якій здатен звести нанівець усі підвищення ККД. Тому професійний енергоаудит є дуже важливим кроком на шляху забезпечення максимально ефективного функціонування тепломережі. Його проведення доцільне як на стадії виконання ремонтних робіт, так і як профілактичний захід для своєчасного виявлення неполадок в системі.

Енергоаудит теплових мереж повинен здійснюватись із застосуванням діагностичного обладнання, що гарантує високу достовірність результатів енергоаудиту та допомагає знизити фінансові витрати на проведення комплексного обстеження теплових мереж.

Аналіз останніх досліджень та літератури. На даний час значною проблемою при виявленні місць теплових втрат у тепломережах є застосування трубопроводів з пінополіуретановою (далі – ППУ) ізоляцією, прокладених безканално. Ці трубопроводи мають потужну звуко- та гідроізоляцію і терміни служби понад 30 років, але, як показали дослідження [4], через порушення вимог до їх прокладання, неякісні матеріали конструкції трубопроводів та агресивну дію теплоносія, значна частина з них вже через 3 – 5 років експлуатації стає аварійно небезпечною.

Дослідженню питання контролю підземних теплових мереж присвячено ряд робіт зарубіжних та вітчизняних вчених, однак, їх увага зосереджувалась, в основному, на розробленні та технічній реалізації теплових і акустичних методів контролю теплових мереж каналного прокладання [5, 6].

Аналіз нормативної документації показав, що для теплових мереж, які перебувають в експлуатації, відсутні описи технологій проведення контролю на основі комплексного використання сучасних безконтактних методів контролю, а застосування описаних технологій має рекомендаційний характер [5].

За рахунок багат шарової структури і специфічних характеристик трубопроводів з ППУ-ізоляцією виявлення дефектів ускладнюється, а значна частина інформативних параметрів потребує прямого доступу до об'єкта контролю. Крім того, у трубопроводах з ППУ-ізоляцією виникають дефекти, які не були властиві тепломережам з мінераловатною ізоляцією. Більшість відомих засобів контролю не дають змоги розрізняти дефекти за видами, що ускладнює планування ремонтних робіт.

Тому актуальність розроблення інформаційно-виміральної системи (ІВС) для виявлення місць теплових втрат у безканалних теплових мережах на фоні значного подорожчання енергоносіїв не викликає сумнівів.

Метою статті є опис функціональної структури розробленої ІВС, яка при проведенні енергоаудиту дає змогу з високим ступенем імовірності знаходити дефекти у підземних теплових мережах безканалної прокладки з трубопроводами в пінополіуретановій ізоляції, що призводять до значних теплових втрат при транспортуванні теплоносія.

Матеріали досліджень. В основу роботи ІВС покладено контактний тепловий і безконтактні акустичний та індукційний неруйнівні методи контролю. При цьому інформативними параметрами для виявлення місць теплових втрат у підземних теплових мережах є температура приповерхневого шару ґрунту, акустичний тиск та струм у стінках трубопроводу, виміряні на поверхні ґрунту над досліджуваним трубопроводом [7].

Застосування в ІВС комплексу інформативних параметрів та розробленого методу ідентифікації виду дефекту [7] дало змогу суттєво підвищити точність виявлення місць теплових втрат і оцінити технічний стан трубопроводу. При цьому, запропонована наступна класифікація видів основних дефектів, які виникають в трубопроводах з ППУ-ізоляцією: „розрив трубопроводу”, „руйнування тепло- та гідроізоляцій”, „руйнування гідроізоляції”, „мігруюча вода”.

Визначення струму у стінках трубопроводу дозволяє знаходити трасу трубопроводу та визначати глибину його залягання. Крім того, за різкою зміною значень цього струму знаходяться місця значної розгретизації та розриви трубопроводу. Оскільки ППУ-ізоляція трубопроводів має значні звукопоглинаючі властивості, то виявити місце дефекту, особливо незначних розмірів, акустичним методом доволі складно. Тому в ІВС застосовано примусове акустичне збудження тіла трубопроводу за допомогою магнітострикторів, що дає змогу використати його як довгий ненаправлений звуковід. Акустичний тиск на поверхні ґрунту вимірюється за допомогою вузьконаправленого мікрофону. Акустичним методом знаходяться всі зазначені вище види дефектів. Теплова картина вздовж трубопроводу знімається шляхом контактного вимірювання температури ґрунту на глибині 2-5 см від поверхні. Даний інформативний параметр застосовується як додатковий при ідентифікації виду дефекту.

ІВС складається з трьох основних вузлів – збудження, навантаження та вимірювального.

Вузол збудження (див. рис. 1, *a*) розміщується в тепловій камері і містить радіоприймальний пристрій 1 з антеною 2, блок вибору режиму роботи 3, підсилювач потужності 4, пристрій збудження акустичних хвиль у трубопроводі 5, перетворювач постійної напруги 6, клему для приєднання до трубопроводу 7 та заземлювач 8.

Вузол навантаження ІВС (див. рис. 1, *б*) розміщується у тепловій камері, у яку заходить досліджуваний трубопровід, і складається з резистора R та котушки індуктивності L , приєднаних до тіла трубопроводу, які за допомогою перемикача S можуть почергово приєднуватись

до заземлювача 8, створюючи різноманітні навантаження при дослідженні струму у стінках трубопроводу.

Вимірювальний вузол ІВС виконано у виді переносної штанги (див. рис. 1, в), до складу якого входять канал керування генератором, три вимірювальних канали (по одному на кожен інформативний параметр) та блок запису даних. Канал керування генератором складається з блоку вибору режиму вимірювань 9, блоку керування генератором 10, генератора фіксованих частот 11 та радіопередавального пристрою 12 з антеною 13. Канал вимірювання акустичного тиску складається з вимірювального мікрофону 14, розміщеного в звукоізольованій камері 15, та компенсаційного мікрофону 16, виходи яких приєднані до мікрофонних підсилювачів 17 і 18, диференційного підсилювача 19, розгалужувача сигналу 20, фільтра 21, амплітудного випростовувача 22 та аналогового індикатора 23.

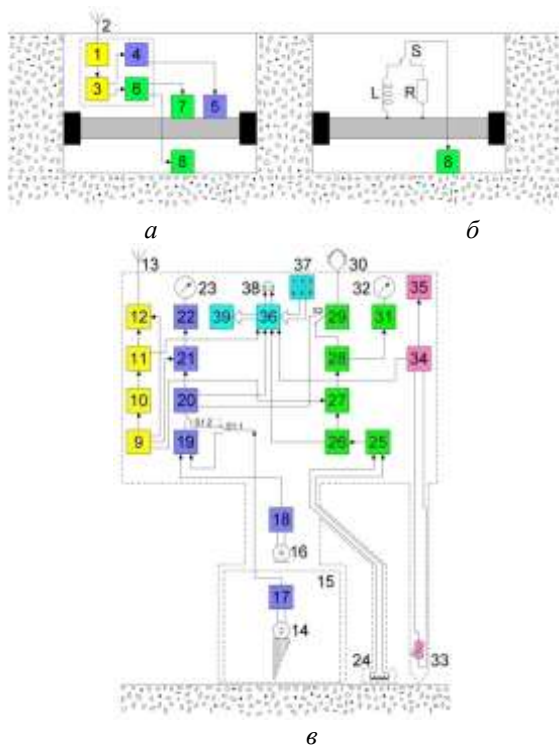


Рис. 1 – Функціональна схема ІВС: *а* – вузол збудження; *б* – вузол навантаження; *в* – вимірювальний вузол

Канал вимірювання струму у стінках трубопроводу містить екрановану вимірювальну котушку 24, розміщену на поворотній штанзі, підсилювач змінної напруги 25, розгалужувачі сигналу 26 та 28, фільтр 27, підсилювач потужності 29 з навушниками 30, амплітудний випростовувач 31 і аналоговий індикатор 32.

До складу каналу вимірювання температури входить термоопір 33, розміщений у мідній голці, який за допомогою гнучкого кабеля приєднаний до розгалужувача сигналу 34 та цифрового термометра 35.

Блок запису даних складається з мікропроцесорного модуля 36, клавіатури управління 37, зумера 38 та блоку пам'яті 39.

Для керування роботою вузла збудження в ІВС використовується радіоканал з частотною модуляцією, який працює в симплексному режимі. Він реалізований за допомогою цифрового передавального пристрою 12 (Kensington 80640A) у вимірювальному вузлі та цифрового приймального пристрою 1 (Thomson RT 212) у вузлі збудження. Для роботи радіоканалу вибирається частота з діапазону FM (88 – 108 МГц), вільна від радіозавад. Підсилювач потужності 4 реалізовано на мікросхемі TDA1516Q, а перетворювач постійної напруги 6 зібрано за мостовою схемою на потужних польових транзисторах. Як пристрій збудження акустичних хвиль 5 застосовано чотири магнітостриктори з максимальною інтенсивністю в діапазоні робочих частот (0,5; 1; 2; 4 кГц) 96 дБ, які розміщені на металізованому ремені, що кріпиться до тіла трубопроводу.

Для реєстрації акустичного тиску на поверхні ґрунту використано вузьконаправлений трубчастий мікрофон 14. Для компенсації потужних зовнішніх шумів та підвищення відношення сигнал/шум застосовано другий аналогічний мікрофон 16, розвернутий відносно мікрофона 14 на 180 і співвісний з ним, який приймає тільки шуми зовнішнього середовища. Сигнали з виходів мікрофонних підсилювачів 17, 18 надходять на диференційний підсилювач 19, який подавляє синфазні шуми мікрофонів 14 і 16 та виділяє корисний сигнал. За допомогою перемикача S1 можна виключати зі схеми вимірювань компенсаційний мікрофон 16, мікрофонний підсилювач 18 та диференційний підсилювач 19, при відсутності зовнішніх шумів. Перемикач S2 використовується для прослуховування через навушники сигналу з каналу вимірювання акустичного тиску, або з каналу вимірювання струму у трубопроводі (на частотах 2,5 і 5 кГц). Як фільтри 21 і 27 застосовано Т-подібні смугопропускаючі активні фільтри з можливістю дискретного переналаштування смуги частот.

Як цифровий термометр 35 в ІВС застосовано термометр типу РМТЕМР1 з діапазоном вимірюваних температур від -50 С до +70 С з роздільною здатністю 0,1 С, в якому як давач використано виносний терморезистор 33.

Мікропроцесорний модуль 36 блока запису даних виконано на мікропроцесорі PIC18LF4620. Цей мікропроцесор має 13 каналів 10-ти бітних АЦП і тактову частоту 20 МГц. Клавіатура управління 37 має шість кнопок. Чотири кнопки відповідають за фіксацію даних по кожному вимірюваному інформативному параметру (для запису струму у трубопроводі використано дві кнопки – для резистивного та індуктивного навантаження), одна – за запис циклу вимірювань, одна – за скидання. Процес фіксації даних супроводжується коротким звуковим сигналом зумера 37. Якщо дані записано помилково, потрібно натиснути на кнопку скидання. Після цього останні внесені у пам'ять дані будуть видалені і замість них можна записати нові. Як блок пам'яті 39 застосовується SD-card-mod адаптер, в якому використовується SD карта пам'яті типу Compact Flash, об'ємом 1 гігабайт. Обмін інформацією між мікропроцесором і блоком пам'яті здійснюється по SPI-інтерфейсу. Дані з мікропроцесорного модуля 36 записуються в карту пам'яті у форматі файла з розширенням .txt, які для обробки імпортуються в програмне середовище Exell ноутбука чи ПЕОМ.

Загальний вигляд розробленої ІВС зображено на рис. 2.

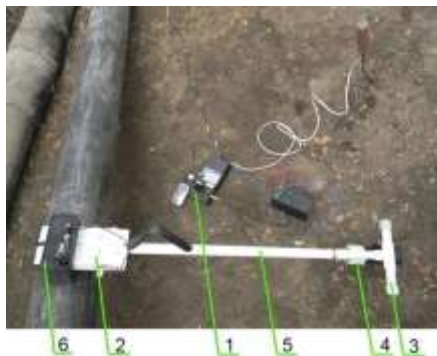


Рис. 2 – Загальний вигляд ІВС: 1 – вузол збудження, 2 – вимірювальний вузол, 3 – магнітна антена, 4 – звукоізольована камера вимірювального мікрофону, 5 – штанга, 6 – блок запису даних

Методика проведення експериментальних досліджень за допомогою ІВС наведена на рис. 3.

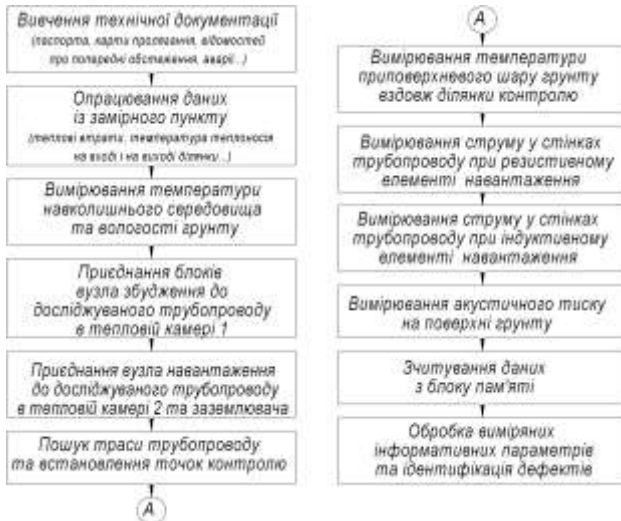


Рис. 3 – Методика проведення експериментальних досліджень за допомогою ІВС

Результати досліджень. Протягом 2012 – 2013 років проводилась промислова апробація розробленої ІВС та методики виявлення теплових втрат у підземних теплових мережах на об'єктах ДМП "Івано-Франківськтепло-комуненерго", КП "Водотеплосервіс" на території міста Калуш та нафтоперекачувальної станції "Куровичі" філії "Магістральні нафтопроводи "Дружба" ВАТ "Укртранснафта". За результатами досліджень було виявлено 37 аномальних ділянок. З них за допомогою методу ідентифікації виду дефекту було встановлено 9 місць дефектів тепломережі, що мали теплові втрати різної інтенсивності. Після проведеного шурфування було підтверджено існування 8 дефектів.

Висновки. Описана ІВС за допомогою вимірювання трьох інформативних параметрів дозволяє з високим ступенем імовірності знаходити дефекти у підземних теплових мережах безканальної прокладки з трубопроводами в ППУ-ізоляції, які спричинюють теплові втрати. Це дає змогу комунальним службам оперативного реагувати на ситуацію та економити кошти на проведення ремонтних робіт, а також зменшувати час відключення споживачів від теплопостачання. Під час проведення енергоаудиту теплових мереж результати контролю дозволяють надати рекомендації щодо усунення теплових втрат із зазначенням їх першочерговості та розміру необхідних капіталовкладень.

Список літератури: 1. *Київенерго*. Річний звіт 2012. [електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://kyivenergo.com>. 2. *Малярєнко О.Є.* Наукові основи формування та оптимізація паливно-енергетичних балансів / О.Є. Малярєнко, Т.О. Євтухова // Проблеми загальної енергетики. – 2013. – №2(33). – С. 5-14. 3. *Дорошенко О.В.* Оцінка стану, обґрунтування актуальності оптимізації систем теплопостачання / О.В. Дорошенко // Комунальне господарство міст. – 2013. – №110. – С. 159-167. 4. *Кулик М.М.* Аналіз стану розвитку систем теплопостачання в Україні / М.М. Кулик, Г.О. Куц, В.Д. Білодід // Проблеми загальної енергетики. – 2006. – №14. – С. 13-24. 5. *Ващишак І.Р.* Аналіз методів контролю технічного стану підземних теплових мереж / І.Р. Ващишак, С.П. Ващишак, О.М. Карпаш // Нафтогазова енергетика. – 2010. – № 2 (13). – С. 64-69. 6. *Ващишак С.П.* Застосування інтелектуальних приладів для визначення місць теплових втрат у мережах теплопостачання / С.П. Ващишак, І.Р. Ващишак, С.І. Мельничук // Наукові вісті ПВНЧ „Галицька академія”. – 2010. – №1(17). – С. 83-88. 7. *Ващишак І.Р.* Метод ідентифікації видів дефектів трубопроводів підземних теплових мереж / І.Р. Ващишак, С.П. Ващишак, Л.А. Витвицька, П.М. Райтер // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2013. – №1/34. – С. 162-171.

Bibliography (transliterated): 1. PAT Kyivenerho. "Richnyy zvit 2012." *Ofitsynnyy sayt PAT Kyivenerho*, 2014. Web. 30 March 2014 <<http://kyivenergo.com>>. 2. Malyarenko, O.Ye., and T.O. Yevtukhova. "Naukovi osnovy formuvannya ta optymizatsiya palyvno-enerhetychnykh balansiv." *Problemy zahal'noyi enerhetyky*. No.2.33. 2013. 5-14. Print. 3. Doroshenko, O.V. "Otsinka stanu, obruntuvannya aktual'nosti optymizatsiyi system teplopstachannya." *Komunal'ne hospodarstvo mist*. No.110. 2013. 159-167. Print. 4. Kulyk M.M., H.O. Kuts and V.D. Bilodid. "Analiz stanu rozvytku system teplopstachannya v Ukrayini." *Problemy zahal'noyi enerhetyky*. No.14. 2006. 13-24. Print. 5. Vashchysyak, I.R., S.P. Vashchysyak and O.M. Karpash. "Analiz metodiv kontrolyu tekhnichnoho stanu pidzemnykh teplovykh merezh." *Naftohazova enerhetyka*. No.2.13. 2010. 64-69. Print. 6. Vashchysyak, S.P., I.R. Vashchysyak and S.I. Mel'nychuk. "Zastosuvannya intelektual'nykh pryladiv dlya vyznachennya mist's' teplovykh vtrat u merezhakh teplopstachannya." *Naukovi visti PVNCh "Halys'ka akademiya"*. No.1.17. 2010. 83-88. Print. 7. Vashchysyak, I.R., et al. "Metod identyfikatsiyi vydiv defektiv truboprovodiv pidzemnykh teplovykh merezh." *Naukovyy visnyk Ivano-Frankivs'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu*. No.1.34. 2013. 162-171. Print.

Надійшла (received) 12.05.2014

Р. П. МИГУЩЕНКО, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПІ»

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СИСТЕМАТИЧНИХ ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ НА РИЗИКИ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ДІАГ- НОСТИКИ

У даній статті розглянуті і проаналізовані ймовірнісні моделі вимірювальних перетворень та визначені умови багатомірної корекції зміщень в оцінках коефіцієнтів лінійної вирішувальної функції за рахунок планування багатомірного метрологічного експеримента при первинних вимірюваннях складових вхідного вектора вимірювальних величин в робочому режимі функціонування ІВС функціональної діагностики та доведено, що корекція ймовірностей помилок діагностики реалізується правильним вибором складових похибок

Ключові слова: ймовірність помилки, дисперсія, вірогідність, похибка, контроль

Вступ. В будь-яких інформаційно-вимірювальних системах (ІВС) контролю, діагностики та ідентифікації, які здійснюють перетворення первинної вимірювальної багатомірної інформації в інформацію вторинну одномірну, що представлена логічними рішеннями, ефективність останніх залежить від ступеню адекватності математичних моделей інформаційних перетворень змінам фізичних властивостей об'єкта вібродіагностики. Ступінь такої адекватності залежить від забезпечення заданої точності оцінювання коефіцієнтів математичної моделі інформаційно-логічного перетворення результатів первинних вимірювань у вторинні статистичні рішення.

Відомо, що певна неадекватність математичної моделі параметричного контролю, включаючи зміщення коефіцієнтів цієї моделі, може бути скомпенсована за рахунок вибору співвідношення між адитивними і мультиплікативними складовими похибок первинних засобів вимірювального контролю [1]. Проте така компенсація можлива в одновимірному варіанті, при лінійних вимірювальних перетвореннях.

Аналіз літератури. Відомо багато математичних моделей прийняття рішень у ході функціональної діагностики, особливо у випадках неповної інформації про коефіцієнти вирішувальної функції [2, 3]. Проте у всіх випадках використовуються моделі коефіцієнтів у формі інтервальних оцінок з використанням лише рівня значущості. Такий підхід не вирішує повністю задачу зниження невизначеності через параметричну неадекватність вирішувальної функції реальним фізичним властивостям технічної діагностики.

Мета статті полягає у визначенні метрологічних умов повної компенсації складових ймовірності ризиків діагностики як першого так і другого роду, зумовлених параметричною неадекватністю моделі діагностики.

Дослідження впливу систематичних похибок вимірювання на ризики функціональної діагностики. Відомо [4], що для лінійної параметричної моделі функціональної діагностики ймовірності похибок (ризиків) діагностики, які визначаються за рівнянням

$$\alpha = \beta = 1 - \Phi\left(\frac{\delta}{2}\right), \quad (1)$$

де $\Phi(\bullet)$ – інтеграл ймовірності;

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{m_i^{(0)} - m_i^{(1)}}{\sigma_i}\right)^2}; \quad (2)$$

$m_i^{(0)}$, $m_i^{(1)}$ – оцінки умовних середніх для i -тої складової x_i вектора

\bar{X} вхідних сигналів ІВС, $i = \overline{1, n}$;

σ_i^2 – оцінка дисперсії x_i

відповідають умовам:

а) незміщеності коефіцієнтів $m_i^{(0)}$, $m_i^{(1)}$, σ_i ($i = \overline{1, n}$);

б) відсутності адитивних і мультиплікативних систематичних похибок вимірювання складових x_1, \dots, x_n вектора \bar{X} вхідних сигналів ІВС функціональної діагностики.

Будемо розглядати вирішувальну функцію [5]

$$g(x) = \sum_{i=1}^n \frac{(m_i^{(0)} - m_i^{(1)})}{\sigma_i^2} \left[x_i - \frac{(m_i^{(0)} + m_i^{(1)})}{2} \right] \quad (3)$$

як композицію лінійних вимірювальних перетворень

$$\xi = \sum_{i=1}^n (A_i + B_i \cdot x_i), \quad (4)$$

де $A_i = -\left[(m_i^{(0)})^2 - (m_i^{(1)})^2 \right] (2\sigma_i^2)^{-1}$;

$$B_i = (m_i^{(0)} - m_i^{(1)}) \sigma_i^2.$$

Якщо $f(\xi|S_0)$, $f(\xi|S_1)$ – умовні щільності розподілення вимірювальних, по моделі (4), значень ξ вирішувальної функції (3), то ризики діагностики α і β визначаються, у загальному випадку, рівняннями:

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha = \int_{-\infty}^0 f(\xi|S_0) d\xi; \\ \beta = \int_0^{\infty} f(\xi|S_1) d\xi. \end{array} \right.$$

При виконанні умов а) та б) і нормальному законі розподілення вектора \bar{X} , номінальні ризики α_0 і β_0 – однакові і розраховуються з використанням інтеграла ймовірності (вираз (2)), оскільки однакові дисперсії величини ξ для станів S_0 і S_1 , а умовні щільності $f(\xi|S_0)$, $f(\xi|S_1)$ – нормальні і зміщені відносно нуля (див. рис. 1).

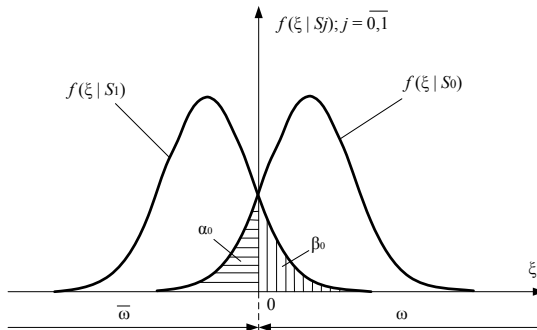


Рис. 1 – Графічна модель визначення ризиків діагностики (лінійна вирішувальна функція)

Використовуємо допустиму ω і критичну $\bar{\omega}$ області для визначення якісних змін ризиків α і β при невиконанні умов а) та б).

Введемо поняття номінального ξ_0 і фактичного ξ вимірювальних лінійних перетворень на основі моделі (4), причому перетворення ξ_0 відповідає виконанню умов а) і б). Тоді порушення перерахованих умов визначає перетворення ξ як функцію:

$$\xi = \xi_0 + \sum_{i=1}^n (\Delta A_i) + \sum_{i=1}^n (\Delta B_i)(x_i + \Delta x_i) + \sum_{i=1}^n B_i(\Delta x_i),$$

де ΔA_i , ΔB_i – зміщення коефіцієнтів моделі (4);

$\Delta x_i, i = \overline{1, n}$ – абсолютні похибки складових x_1, \dots, x_n .

Так як коефіцієнти моделі (4) – це параметри зсуву (коефіцієнти A_i) і масштабу (коефіцієнти B_i), то є сенс пронормувати модель (4) задавши:

$$\begin{cases} A_1 = A_2 = \dots = A_n = 0; \\ B_1 = B_2 = \dots = B_n = 1. \end{cases} \quad (5)$$

Позначимо формально нижню ξ_H і верхню ξ_B границі області ω_0 . Тоді рішення γ_0 та γ_1 відповідають правилам:

$$\begin{cases} \gamma_0 : \text{якщо } \xi \in (\xi_H, \xi_B]; \\ \gamma_1 : \text{якщо } \xi \notin (\xi_H, \xi_B] \end{cases}$$

З умов (5) слідує, що

$$\xi_0 = \sum_{i=1}^n x_i; \quad (6)$$

$$\xi = \sum_{i=1}^n x_i + \sum_{i=1}^n (\Delta A_i) + \sum_{i=1}^n \Delta B_i x_i + \sum_{i=1}^n \Delta B_i \Delta x_i. \quad (7)$$

З останнього виразу слідує, що

$$\xi = \xi_0 + \Delta \xi, \quad (8)$$

де
$$\Delta \xi = \sum_{i=1}^n (\Delta A_i) + \sum_{i=1}^n \Delta B_i x_i + \sum_{i=1}^n \Delta B_i \Delta x_i. \quad (9)$$

Зміщення $\Delta \xi$ вирішувальної функції (1) максимальне коли всі окремі зміщення $\Delta A_i, \Delta B_i, \Delta x_i$ мають однакові знаки і дорівнюють осередненим (по n) зміщенням:

$$\begin{cases} \Delta A_1 = \dots = \Delta A_n = \Delta A; \\ \Delta B_1 = \dots = \Delta B_n = \Delta B; \\ \Delta x_1 = \dots = \Delta x_n = \Delta x. \end{cases} \quad (10)$$

З врахуванням виразів (8) – (10) реальна (фактична) вирішувальна функція (7) має вигляд:

$$\xi = n \cdot \Delta A + \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) (1 + \Delta B) + n \cdot \Delta B \cdot \Delta x. \quad (11)$$

Рішення γ_0 будемо приймати, коли

$$\xi_H < \xi < \xi_B. \quad (12)$$

Підставимо з (11) значення ξ в нерівність (12) і перетворимо останню відносно суми результатів вимірювальних значень складових вектора \bar{X} :

$$\xi_H - \xi_H \frac{\Delta B}{(1 + \Delta B)} - \frac{n(\Delta A + \Delta B \cdot \Delta x)}{(1 + \Delta B)} < \sum_{i=1}^n x_i < \xi_B - \xi_B \frac{\Delta B}{(1 + \Delta B)} - \frac{n(\Delta A + \Delta B \cdot \Delta x)}{(1 + \Delta B)}$$

Цю нерівність можна представити в більш простому вигляді, якщо ввести позначення $\Delta \xi_H$, $\Delta \xi_B$ для зміщень границь інтервала допуску ω_0 :

$$\xi_H - \Delta \xi_H < \sum_{i=1}^n x_i < \xi_B - \Delta \xi_B,$$

де
$$\begin{cases} \Delta \xi_H = \xi_H \frac{\Delta B}{(1 + \Delta B)} - \frac{n(\Delta A + \Delta B \cdot \Delta x)}{(1 + \Delta B)}; \\ \Delta \xi_B = \xi_B \frac{\Delta B}{(1 + \Delta B)} - \frac{n(\Delta A + \Delta B \cdot \Delta x)}{(1 + \Delta B)}. \end{cases}$$

Оскільки $\xi_H = 0$, $\xi_B = \infty$, а $\sum_{i=1}^n x_i$ – це модель (з (6)) номінального перетворення ξ_0 вимірювальних значень x_1, \dots, x_n (без врахування фактичних зміщень $\Delta \xi_H$, $\Delta \xi_B$, які визначаються неточністю виміру як вектора \bar{X} , так і коефіцієнтів вирішувальної функції (1)), то рішення γ_0 і γ_1 будуть відповідати фактичним результатам діагностики:

$$\begin{cases} \gamma_0 : \text{якщо } \xi_0 > -\frac{n(\Delta A + \Delta B \cdot \Delta x)}{(1 + \Delta B)}; \\ \gamma_1 : \text{якщо } \xi_0 \leq -\frac{n(\Delta A + \Delta B \cdot \Delta x)}{(1 + \Delta B)} \end{cases} \quad (13)$$

Права частина нерівностей (13) це $\Delta \xi_H$ при $\xi_H = 0$. На рис.2, а-б, графічно показано появу різнознакових прирощень $\Delta \alpha$ і $\Delta \beta$ у ризиків діагностики α і β при $\Delta \xi_H \neq 0$, де (α_0 і β_0 – номінальні ризики).

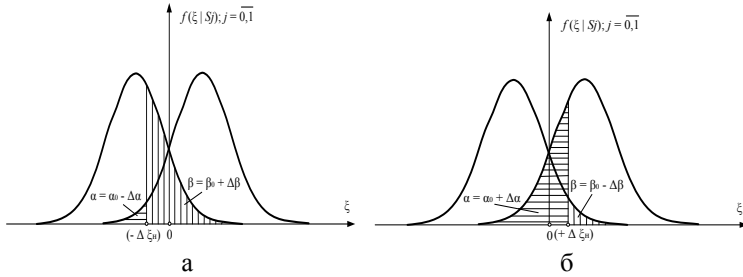


Рис. 2 – Графічні моделі появи додаткових ризиків діагностики.
 а – умова $\Delta\xi_H > 0$; б – $\Delta\xi_H < 0$

З рис. 2, а, б слідує, що при будь-яких знаках прирощень $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$
 $\alpha + \beta > \alpha_0 + \beta_0$,

що вказує на обов'язкове зниження вірогідності діагностики, якщо $\Delta\xi_H \neq 0$.

Якщо розглядати границі $\xi_H = \infty$ і $\xi_B = 0$ критичної області $\bar{\omega}$, то отриманий висновок можна розповсюдити і на випадок коли $\Delta\xi_B \neq 0$.

В табл. 1 представлені варіанти впливу на ризики α і β систематичних похибок оцінювання коефіцієнтів лінійної вирішувальної функції на етапі навчання системи діагностики і систематичних похибок вимірювання вхідних сигналів ІВС діагностики (порушення правила б)).

Таблиця 1 – Вплив фактора «Метрологічні порушення» на ризики діагностики ($\gamma = \left| \frac{\Delta A}{\Delta B} \right|$)

Δx	ΔA	ΔB	Знак $\Delta\xi_H$	Знак $\Delta\alpha$	Знак $\Delta\beta$	Вірогідність діагностики
$\Delta x = 0$	$\Delta A > 0$	$\Delta B > 0$	-	-	+	зменшується
	$\Delta A < 0$	$\Delta B < 0$	+	+	-	
	$\Delta A > 0$	$\Delta B < 0$	-	-	+	
	$\Delta A < 0$	$\Delta B > 0$	+	+	-	
$\Delta x > \gamma$	$\Delta A > 0$	$\Delta B > 0$	-	-	+	зменшується
	$\Delta A < 0$	$\Delta B < 0$	+	+	-	
	$\Delta A > 0$	$\Delta B < 0$	+	+	-	
	$\Delta A < 0$	$\Delta B > 0$	-	-	+	

Продовження таблиці 1

$\Delta x = \gamma$	$\Delta A > 0$	$\Delta B > 0$	-	-	+	зменшується
	$\Delta A < 0$	$\Delta B < 0$	+	+	-	
	$\Delta A > 0$	$\Delta B < 0$	$\Delta \xi_H = 0$	$\Delta \alpha = 0$	$\Delta \beta = 0$	не змінюється
	$\Delta A < 0$	$\Delta B > 0$	$\Delta \xi_H = 0$	$\Delta \alpha = 0$	$\Delta \beta = 0$	
$\Delta x < \gamma$	$\Delta A > 0$	$\Delta B > 0$	-	-	+	зменшується
	$\Delta A < 0$	$\Delta B < 0$	+	+	-	
	$\Delta A > 0$	$\Delta B < 0$	-	-	+	
	$\Delta A < 0$	$\Delta B > 0$	+	+	-	

З табл. 1 видно, що при наявності зміщень в оцінках коефіцієнтів вирішувальної функції (1) вірогідність діагностики знижується, навіть якщо вимірювання складових x_1, \dots, x_n вхідного вектора \bar{X} виконані без систематичних і випадкових похибок ($\Delta X = 0$, $\Delta A \neq 0$, $\Delta B \neq 0$). Вірогідність не зменшується тільки в одному випадку, якщо систематична похибка вимірювання значень вектора \bar{X} дорівнює γ ($\gamma = \left| \frac{\Delta A}{\Delta B} \right|$). Це означає, що в принципі можлива компенсація зміщень ΔA і ΔB в оцінках коефіцієнтів вирішувальної функції $g(x)$ за рахунок перерозподілу співвідношень між адитивною і мультиплікативною похибками засобів первинного вимірювального перетворення в ІВС діагностики. Цей висновок добре узгоджується з результатами аналізу сумісного впливу адитивних і мультиплікативних похибок на вірогідність контролю якості неперервного потоку промислової продукції по одній інформативній ознаці (одномірний модель прийняття статистичних рішень).

Висновки. 1. Визначені умови багатомірної корекції зміщень в оцінках коефіцієнтів лінійної вирішувальної функції за рахунок планування багатомірного метрологічного експерименту при первинних вимірюваннях складових вхідного вектора \bar{X} в робочому режимі функціонування ІВС функціональної діагностики. 2. Доведено, що корекція ймовірностей помилок діагностики як першого так і другого роду може бути виконана за рахунок правильного вибору співвідношення між адитивними і мультиплікативними систематичними похибками первинних перетворень в багатомірній функціональній діагностиці.

Список літератури: 1. Володарський С.Т. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю: навч. посіб. / С. Т. Володарський, В. В. Кухарчук, В. О. Поджаренко та ін. // – Вінниця: Велес, 2001. – 219 с. 2. Уткин Л.В. Модель класифікації на основі неповної інформації о признаках в виде их средних значений / Л.В. Уткин, Ю.А. Жук, И.А. Селиховкин // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2012. – №3. С. 71 – 81. 3. Волченко Е.В. О трудоемкости построения обучающих выборок и решающих правил в открытых системах распознавания // Международная конференция ИАИ-2010., КПИ, Киев, 2010. С.145 – 153. 4. Раудис Ш. Табулирование зависимости ожидаемой ошибки классификации линейной дискриминантной функции от объема обучающей выборки // Сборник «Статистические проблемы управления» – Вильнюс, 1975. – Вып. 11. – С. 81 – 120. 5. Раудис Ш. Ограниченность выборки в задачах классификации / Ш. Раудис // Сборник «Статистические проблемы управления» – Вильнюс, 1976. – Вып. 18. – С. 1 – 185.

Bibliography (transliterated): 1. Volodars'kyu Ye.T., Kukharchuk V.V., Podzharenko V.O. ta in. *Metrolohichne zabezpechennya vymiryuvan' i kontrolyu: navch. posib.* – Vinnytsya: Veles, 2001. – 219.Print 2. Utkin L.V., Zhuk Ju.A., Selihovkin I.A. *Model' klassifikacii na osnove nepolnoj informacii o priznakah v vide ih srednih znachenij.* Iskusstvennyj intellekt i prinjatie reshenij. – 2012. – №3. 71 – 81.Print 3. Volchenko E.V. *O trudoemkosti postroenija obuchajushhijh vyborok i reshajushhijh pravil v otkrytyh sistemah raspoznavanija.* Mezhdunarodnaja konferencija IAI-2010., KPI, Kiev, 2010. 145 – 153.Print 4. Raudis Sh. *Tabulirovanie zavisimosti ozhidaemoj oshibki klassifikacii linejnoj diskriminantnoj funkcii ot ob#ema obuchajushhej vyborki.* Sbornik "Statisticheskie problemy upravlenija"– Vil'njus, 1975. – Vyp. 11. – 81 – 120. 5. Raudis Sh. *Ogranichennost' vyborki v zadachah klassifikacii.* Sbornik "Statisticheskie problemy upravlenija" – Vil'njus, 1976. – Vyp. 18. S. 1– 185.Print

Надійшла (received) 05.06.2014

УДК 535.345.1, 622.23.05

Р. І. СОЛОМІЧЕВ, аспірант ДВНЗ ДонНТУ, Донецьк;
О. В. ВОВНА, канд. техн. наук, доц. ДВНЗ ДонНТУ, Донецьк;
А. А. ЗОПІ, д-р. техн. наук, проф. ДВНЗ ДонНТУ, Донецьк

РОЗРОБКА ТА ОБГРУНТУВАННЯ СТРУКТУРИ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ПИЛО-ГАЗОВИХ СУМІШЕЙ В ШАХТНОМУ ВИРОБІТКУ

На основі проведених досліджень отримано багатопараметричний функціонал, який визначає імовірнісні характеристики критичних меж вибуховості пило-газової суміші в шахтному повітрі. Завдяки даному функціоналу розроблено структуру комп'ютеризованої ІВС контролю концентрацій вибухонебезпечних компонент рудничної атмосфери, що включає автоматичний канал вимірювання концентрації $(0\pm 3) \text{ г/м}^3$ та

© Р. І. Соломічев, О. В. Вовна, А. А. Зопі, 2014

дисперсності ($1 \div 10$) мкм вугільного пилу, концентрації метану ($0 \div 4$) 06 %, температури (від +5 до +34) $^{\circ}\text{C}$ та вологості повітря ($0 \div 10$) г/м 3 .

Ключові слова: вимірювач, вугільний пил, оптико-абсорбційний, концентрація, алгоритм, вибуховість.

Вступ. Безпечний видобуток вугілля в шахті зазвичай залежить від оперативності контролю концентрації пило-газових компонент рудничної атмосфери. Відсутність автоматичних швидкодіючих вимірювачів заповнення рудничної атмосфери для системи аерогазового захисту вугільних шахт УТАС, що випускається Державним підприємством «Петровським заводом вугільного машинобудування» (м. Донецьк), визначає її недоліки при експлуатації та визначенні імовірнісних характеристик вибуховості метано-пилоповітряних сумішей рудничної атмосфери. Проте, розроблений двопробеневий оптико-абсорбційний вимірювач концентрації пилу [1] позбавлений вказаних недоліків, має високу швидкодію, точність та роздільну здатність, які дозволяють вести безперервний автоматичний контроль концентрації та дисперсності зваженого вугільного пилу в системі аерогазового захисту.

Постановка цілі та задач дослідження. Метою роботи є розробка, дослідження структури та алгоритму роботи інформаційно-вимірювальної системи (ІВС) контролю концентрації, визначити її імовірнісні характеристики критичних меж вибухонебезпечних компонент пило-газової суміші в рудничній атмосфері вугільних шахт. Для досягнення мети необхідно вирішити наступні задачі:– встановити взаємозв'язок концентраційних параметрів окремих компонент на вибуховість пило-газової суміші вибуховості ;

– виконати структурний синтез ІВС контролю вибухонебезпечних концентрацій компонент пило-газової суміші в шахтному видобутку, з урахуванням основних дестабілізуючих факторів рудничної атмосфери;

– скласти алгоритм роботи ІВС, який на основі вимірюваних даних та визначених імовірнісних характеристик буде оцінювати поточну ситуацію у шахтному виробленні та прогнозуватиме настання вибухонебезпечних ситуацій.

Вирішення задач та результати дослідження. Проведений аналіз параметрів рудничної атмосфери дає основу вважати, що на вибуховість пило-газової суміші в умовах вугільних шахт впливає така невід'ємна складова як вугільний пил, який в суміші з метаном, що у відповідній кількості істотно знижує поріг вибуховості всієї суміші, з певною концентрацією ($C_{\text{п}}$, г/м 3), дисперсністю (D , мкм), зольністю (A^s , %), виходом летючих (V_c^{daf} , %) становить суттєву загрозу вибуху. Крім

цього, на вибух впливає вологість повітря ($\gamma_{\text{пов.}}$, г/м³), його швидкість та температура.

З проведених досліджень Макіївським науково-дослідним інститутом, встановлено що найбільш вибухова дисперсність пилу лежить у межах від 1 до 10 мкм – це пил, який практично не осідає за всю довжиною шахтного виробітку. На основі існуючої моделі [2] отримано характеристики розподілення відносних концентрацій рудничного пилу від довжини виробки l , м для різної дисперсності та швидкості повітря, які зображено на рис. 1, де позначено: 1 – концентрація вугільного пилу з радіусом частинок $r=0.5$ мкм при швидкості повітря $u=0,7$ м/с; 2 – $r=0.5$ мкм, $u=1,3$ м/с; 3 – $r=2.5$ мкм, $u=1,3$ м/с; 4 – $r=2.5$ мкм, $u=6$ м/с.

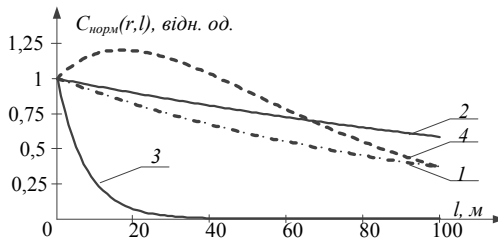


Рис. 1 – Характеристика розподілення концентрації пилу за довжиною вироблення

При швидкості повітря від 0,7 до 1,3 м/с (менш ніж критична) концентрація пилу з дисперсністю часток до 3 мкм залишається практично незмінною від джерела пилоутворення та по всій довжині виробки (залежності 1, 2). Крупні фракції пилу (більш ніж 3 мкм) осідають на відстані близько 20 метрів від початкового перетину при швидкості повітря менш ніж критична (залежність 3). Зі збільшенням швидкості вище критичної (більше 5 м/с) спостерігається ефект вторинного пилоутворення за рахунок пилу, який здимається з ґрунту та поверхонь виробки, що фактично підвищує її концентрацію в повітрі та відстань розповсюдження (залежність 4).

Отримала подальший розвиток математична модель [2, 3], яка дає змогу встановити вибухонебезпечну концентрацію зваженого у повітрі вугільного пилу в залежності від зольності, виходу летючих, вологості повітря та концентрації метану при дисперсності часток (1÷10) мкм, на основі наступного рівняння:

$$C_n(V_c^{daf}, A^d, \gamma_{нов}, C_{CH_4}) = (\delta_{зе}(V_c^{daf}, A^d) + \zeta \cdot \gamma_{нов}^\beta) \cdot \left(1 - \left(\frac{C_{CH_4}}{C_{CH_4,НПВ} + \mathcal{G} \cdot \gamma_{нов}^\alpha} \right)^m \right)^{1/m}, \quad (1)$$

де $C_{CH_4,НПВ}$ – нижня межа вибуховості (НМВ) метану в сухому повітрі, %;

\mathcal{G} – коефіцієнт підвищення НМВ метану, рівний $\mathcal{G} = 0,009$, %/(г/м³);

$\alpha = 2,34$ – показник степені, підбирається експериментальним шляхом;

$\delta_{зе}(V_c^{daf}, A^d)$ – НМВ зваженого вугільного пилу в сухому повітрі, г/м³;

ζ – коефіцієнт підвищення НМВ, в залежності від властивостей вугілля змінюється в діапазоні від 0,357 до 0,755;

$\beta = 1,65$ – показник степені, підбирається експериментальним шляхом;

$m = 0,66512 - 0,12818(C_{CH_4}/(C_{CH_4,НПВ} + \mathcal{G} \cdot \gamma_{нов}^\alpha))$.

Графік поверхні вибухової концентрації пилу $C_{П}$ г/м³, побудований за вираженням (1) від концентрації метану C_{CH_4} (0÷4) 06,0% та вологості повітря $\gamma_{нов}$ від 0 до 3 г/м³ має вигляд, як показано на рис. 2, при середніх параметрах зольності вугілля марки $I_l A^S = 6,3$ % та виході летючих $V_c^{daf} = 41$ %. Отримана теоретична модель на основі емпіричних даних погоджується з експериментальними дослідями МакНДІ [4] для багатьох пластів шахт і марок вугілля.

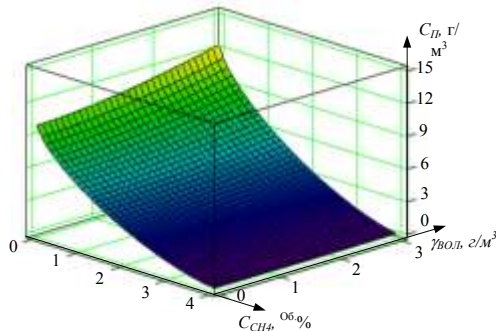


Рис. 2 – Графік зміння вибухової концентрації вугільного пилу від концентрації метану та вологості повітря

З аналізу рис. 2 випливає, що при сухому повітрі та відсутності метану – вугільний пил вибухає при концентрації 12 г/м³, а при концентрації

метану $1^{об.}\%$ – вибухова концентрація пилу знижується у два рази. Вибухова концентрація пилу знов збільшується при підвищенні вологості в шахтному вироблені, яка виступає в ролі природного флегматизатора.

Для визначення імовірності створення вибухонебезпечної ситуації в умовах шахтного виробітку потрібно мати необхідну експериментальну інформацію про стан атмосферного повітря, а саме – кількісне співвідношення концентрації окремих компонентів пило-газоповітряної суміші за якими можна знайти її НМВ. Наприклад, маючи дані про концентрацію метану і вологість повітря, можна розрахувати теоретичну НМВ вугільного пилу з концентрацією $C_{нНМВ}$. При порівнянні її з експериментально виміряною концентрацією $C_{п}$ легко визначити імовірність настання вибухонебезпечної ситуації. Отже, на основі запропонованої математичної моделі, що базується на багато параметричному функціоналі (1) та розробленого автоматичного вимірювача концентрації вугільного пилу, синтезовано структуру ІВС контролю концентрації вибухонебезпечних пило-газових компонент (див. рис. 3).

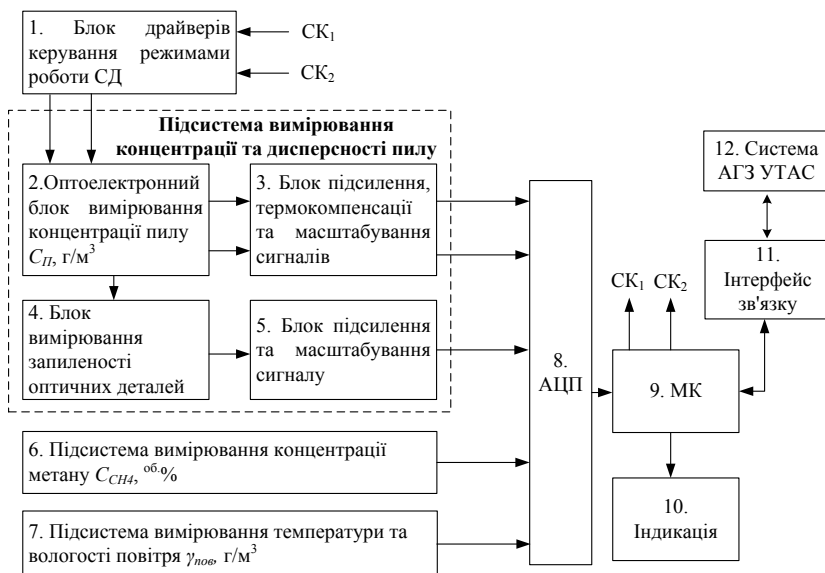


Рис. 3 – Структурна схема комп'ютеризованої ІВС контролю концентрації вибухонебезпечних пило-газових компонент

Підсистема вимірювання концентрації та дисперсності вугільного пилу [5] складається з драйверів керування (1) світлодіодами оптоелектронного блоку (2) та блоку підсилення, термостабілізації і масштабування інформативних сигналів (3), блоку вимірювання запиленості оптичних деталей (4) з відповідним блоком перетворення сигналу (5). Оптоелектронний блок вимірювача складається з відкритого оптичного каналу (ВОК), де відбувається часткове поглинання частками пилу з концентрацією C_{II} зонduючих випромінювань, та закритого оптичного каналу (ЗОК) термокомпенсації світлових потоків випромінювань від світлодіодів (CD_1 та CD_2) з різними довжинами хвиль $\lambda_1=470$ нм (C503-BAN) та $\lambda_2=624$ нм (C503-RAN) [5]. Відношення коефіцієнтів спектральної прозорості двох довжин хвиль дає експериментальну інформацію про дисперсність пилового аерозолу, – на основі цього, завдяки розробленому алгоритму програми [5], знаходяться коефіцієнти функції розподілення часток за розмірами та корегуються значення вимірюваної концентрації пилу. На виходах ВОК та ЗОК розміщуються однакові високочутливі фотодіоди (FD_1 та FD_2) BPW21R [5], які працюють у фотогальванічному режимі. Вони узгоджені із спектром випромінювання світлодіодів, режими роботи яких забезпечуються відповідними драйверами керування (1) та сигналами керування $СК_1$, $СК_2$ від мікроконтролера (МК) (9). Сигнал струму з виходу FD_1 ЗОК містить інформацію тільки про змінення інтенсивності випромінювання внаслідок температурного дрейфу CD , а вихідний сигнал з FD_2 – інформацію про концентрацію вугільного пилу у ВОК в діапазоні від 0 до 3 г/м³ та температурний зсув. Інформаційні сигнали струму з виходів FD_1 та FD_2 перетворюються в напругу, підсилюються (3), та за диференційною схемою віднімаються, у результаті чого усувається похибка від температурного дрейфу в діапазоні температур від +5 до +35 °С. Скомпенсований вихідний сигнал масштабується для подальшого перетворення в цифровий формат аналого-цифровим перетворювачем (8).

Підсистема вимірювання концентрації та дисперсності пилу оснащена блоком вимірювання запиленості оглядових стекол (4) [7] та відповідним блоком перетворення інформативного сигналу (5) до уніфікованого виду для подальшої обробки в цифровому форматі в МК.

Підсистема вимірювання концентрації метану C_{CH_4} (6) в діапазоні від 0 до 4⁰⁶% [6] складається з оптоелектронного блоку з ВОК, де відбувається часткове поглинання молекулами метану зонduючого випромінювання від CD_3 з довжиною хвилі $\lambda_1=3,6$ мкм. Вихідний потік випромінювання від CD_3 надходить до FD_3 , спектральна чутливість якого узгоджена зі спектром випромінювання CD_3 , перетворюється в сигнал

напруги та масштабується до уніфікованого виду для подальшої цифрової обробки.

Визначення температури і вологості повітря $\gamma_{\text{нов}}$ рудничної атмосфери відбувається в підсистемі (7), діапазон вимірювання вологості – (0÷10) г/м³; температури – від +5 до +35 °С.

На основі вимірюних концентрації метану і вологості повітря за виразом (1) визначається теоретична НМВ вугільного пилу $C_{\text{нМВ}}$ в МК, яка порівнюється з експериментальним значенням поточної концентрації вугільного пилу $C_{\text{П}}$ за певним алгоритмом та визначається імовірність настання вибухонебезпечної ситуації в шахтному виробітку. За допомогою МК також відбувається накопичення та передача інформації через інтерфейс зв'язку (11) до диспетчерської системи аерогазового (АГЗ) захисту УТАС (12). Алгоритм роботи комп'ютеризованої ІВС контролю концентрації вугільного пилу в шахтній атмосфері приведений на рис. 4.

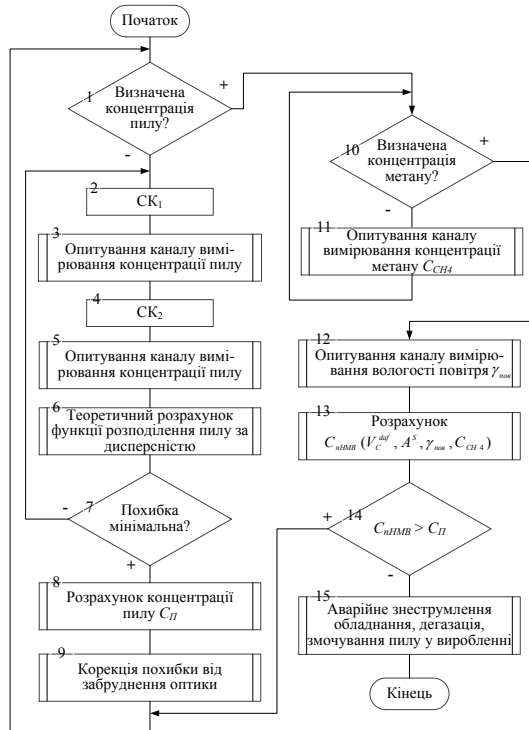


Рис. 4 – Блок-схема алгоритму роботи комп'ютеризованої ІВС контролю концентрації вибухонебезпечних пило-газових компонент

Згідно алгоритму роботи ІВС спочатку визначається в режимі реального часу поточна масова концентрація зваженого вугільного пилу $C_{П}$ у виробітку за допомогою розробленого [5] двопробеневого оптико-абсорбційного вимірювача з урахуванням дестабілізуючих факторів рудничної атмосфери (змінення температури повітря, дисперсності часток пилу та запиленості оптики). Далі визначаються об'ємна концентрація метану, температура та вологість повітря, за результатами яких оцінюється теоретична концентраційна НМВ пилу $C_{нНМВ}$ на основі запропонованої моделі (1). При порівнянні теоретичного значення концентрації з експериментальним, враховуючи динаміку їх зміни на основі попередніх даних, встановлюється імовірність настання вибухової ситуації або запас часу роботи гірничих машин і комплексів та приймається рішення про подальші дії.

Таким чином, на основі функціоналу (1), запропонованої структури та алгоритму роботи комп'ютеризованої ІВС можна зробити прогноз щодо настання вибухонебезпечної ситуації у виробітку, передчасно вжити відповідні заходи, такі як знеструмлення, дегазація та змочування пилу шахтної виробки.

Висновки.

1. Отримала подальший розвиток математична модель на основі емпіричних даних МакНДІ, що дала змогу провести дослідження і встановити вибухонебезпечні концентраційні межі складових пило-газової суміші: зваженого вугільного пилу (діапазон контролю від 0 до 3 г/м³) в залежності від зольності (до 15 %), виходу летючих (40÷47 %), вологості повітря (від 0 до 10 г/м³) та концентрації метану (0÷4 °о.%) при дисперсності часток (1÷10) мкм. В моделі на основі комплексного показника-функціоналу визначено імовірнісні характеристики вибуховості пило-газової суміші: при наявності 1 °о.% метану концентраційна нижня межа вибуховості вугільного пилу знижується в два рази, а при 2 °о.% – в чотири.

2. Розроблено структуру комп'ютеризованої інформаційно-виміральної системи контролю вибухонебезпечних пило-газових сумішей на основі запропонованого багато параметричного функціоналу, яка в своєму складі передбачає наявність оптико-абсорбційних каналів вимірювання концентрації (від 0 до 3 г/м³) та дисперсності вугільного пилу (1÷10 мкм) на основі двопробеневого методу, концентрації метану (від 0 до 4 °о.%) та канал вимірювання температури (від +5 до +35 °С) і вологості повітря (0÷10 г/м³).

3. Розроблений вимірювач концентрації зваженого вугільного пилу на основі двопробеневого оптико-абсорбційного методу працює в авто-

матичному безперервному режимі з урахуванням таких основних дестабілізуючих факторів рудничної атмосфери, як змінення температури повітря, дисперсності часток вимірюного пилового аерозолі, запиленості оптичних деталей вимірювача.

4. Розроблено алгоритм роботи комп'ютеризованої ІВС, в якому закладено принцип вимірювання параметрів пило-газових компонент з урахуванням дестабілізуючих факторів рудничної атмосфери, оцінювання поточної ситуації у шахтному виробленні та з урахуванням динаміки змінення цих параметрів передбачено прогнозування настання вибухонебезпечної ситуації в шахті.

Список літератури: 1. Соломічев Р.І. Разработка математической модели измерителя концентрации угольной пыли в шахте / Р.І. Соломічев // Сборник научных трудов технологического института южного федерального университета. – Таганрог – 2013. Выпуск № 5. – с. 75 – 80. 2. Соломічев Р.І. Дослідження впливу зміни концентрації компоненту пило газовой суміші на поріг вибуховості в умовах вугільних шахт / А.В. Вовна, А.А. Зорі, Р.І. Соломічев // Наукові праці донецького національного технічного університету. Серія: "Обчислювальна техніка та автоматизація". Донецьк – 2012. – Выпуск № 23(201)2012. – с. 145 – 152. 3. Соломічев Р.І. Комплексне врахування впливу компоненту рудничної атмосфери при розрахунку нижньої концентраційної межі вибуховості вугільного пилу. / О.В. Вовна, А.А. Зорі, Р.І. Соломічев // Сборник тезисов докладов первой всеукраинской научно-технической конференции «Современные тенденции развития приборостроения», 19-20 ноября 2012 г., г. Луганск, кафедра «Приборы», ВНУ им. В.Далы. – 2012. – с. 272 – 273. 4. Збірник інструкцій до правил безпеки у вугільних шахтах / [відп. за випуск Г.М. Суслов, С.О. Крутенко]. – К.: Мінпаливенерго, 2003. – 480 с. 5. Соломічев Р.І. Двопроменевий спосіб вимірювання концентрації і дисперсності пилового аерозолі у вугільних шахтах / Р.І. Соломічев // Збірник тез доповідей другої наукової міжнародної конференції «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах» (ВКДТС–2013). Вінниця: ПП «Едельвейс і К», 2013. – с. 111–113. 6. Вовна О.В. Розробка та дослідження швидкодіючого вимірювача концентрації метану інваріантного до запилення рудничної атмосфери / О.В. Вовна, А.А. Зорі // Наукові праці ДонНТУ. Серія : "Обчислювальна техніка та автоматизація". Донецьк – 2012. – Выпуск № 22 (200). – с. 143–150. 7. Вовна А.В. Методы и средства аналитического измерения концентрации газовых компонент и пыли в рудничной атмосфере угольных шахт / А.В. Вовна, А.А. Зорі, В.Д. Корнев, М.Г. Хламов // Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2012. – 260 с.

Bibliography (transliterated): 1. Solomichev, R.I. "Razrabotka matematicheskoy modeli izmeritelja koncentracii ugol'noj pyli v shahte." *Sbornik nauchnykh trudov tehnologicheskogo instituta juzhnogo federal'nogo universiteta*. Taganrog. № 5. 2013. 75–80. Print. 2. Solomichev, R.I., Vovna, A.V. and Zori, A.A. "Doslidzhennya vplyvu zminy kontsentratsiyi komponentu pylo hazovoyi sumishi na porih vybukhovosti v umovakh vuhil'nykh shakht". *Naukovi pratsi donetskoho natsional'nogo tekhnichnogo universytetu*. Seriya: "Obchyslyval'na tekhnika ta avtomatyzatsiya". № 23(201). Donetsk, 2012. 145–152. Print. 3. Solomichev, R.I., Vovna, A.V. and Zori A.A. "Kompleksne vrakhuvannya vplyvu komponent rudnychnoyi atmosfery pry rozrakhunku nyzhn'oyi kontsentratsiyanoi mezhi vybukhovosti vuhil'noho pylu". *Sbornyk tezysov dokladov pervoy vseukraynskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsyy «Sovremennye tendentsyy razvuytuя pyborostroenyя»*. Luhansk, kafedra «Prybori», VNU ym. V.Dalya. 2013. 273–273. Print. 4. Suslov, G.M. and Krutenko, S.O. Zbirnyk instruktсий do

pravyl bezpeky u vuhil'nykh shakhtakh. Kyiv, Minpalivenergo, 2003. 480 pp. Print. 5. Solomichev, R.I. "Dvopromenennyy sposib vymiryuvannya kontsentratsiyi i dyspersnosti pylovoho aerozolyu u vuhil'nykh shakhtakh". *Zbirnyk tez dopovidey druhoi naukovoji mizhnarodnoyi konferentsiyi «Vymiryuvannya, kontrol' ta diahnozyka v tekhnichnykh systemakh» (VKDT:S–2013)*. Vinnytsya: PP «Edel'veys i K», 2013.111–113. Print. 6. Vovna, A.V. and Zori A.A. "Rozrobka ta doslidzhenna shvydkodiyuchoho vymiryuvacha kontsentratsiyi metanu invariantnoho do zapylennya rudnychnoyi atmosfery". *Naukovi pratsi DonNTU. Seriya : "Obchyslyval'na tekhnika ta avtomatyzatsiya"*. № 22(200). Donetsk, 2012. 143–150. Print. 7. Vovna, A.V., Zori, A.A., Korenev, V.D. and Hlamov, M.G. "Metody i sredstva analiticheskogo izmernenija koncentracii gazovyh komponent i pyli v rudnichnoji atmosferi ugol'nyh shaht". Doneck: GVUZ «DonNTU», 2012. 260 pp. Print

Надійшла (received) 05.05.2014

УДК 534.232.082.72; 620.179.16; 620.179.17

О. Н. ПЕТРИЩЕВ, д-р техн. наук, проф., НТУУ «КПІ», Київ;
Г. М. СУЧКОВ, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ»;
Е. Л. НОЗДРАЧЕВА, канд. техн. наук, доцент НТУ «ХПІ»;
М. И. РОМАНЮК, аспирант, НТУУ «КПІ», Київ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЕМКОСТНОГО ТИПА В РЕЖИМЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН В МЕТАЛЛАХ. ЧАСТЬ 1

Предложена математическая модель емкостного преобразователя для излучения ультразвуковых колебаний в металлическое изделие. Получено выражение для расчета поверхностной плотности статического электрического заряда на поверхности металлического образца. Выявлены основные влияющие факторы, определяющие плотность зарядов на поверхности изделия и, соответственно, мощность и диаграмму направленности излучаемого ультразвукового поля.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль, емкостной преобразователь, плотность электрического заряда, электрическое поле, емкость, ультразвуковые колебания.

Введение. Внедрение энерго- и ресурсосберегающих технологий необходимо не только при производстве, но и при проведении неразрушающего контроля [1]. Разработка новых методов и средств контроля ведется практически во всех ведущих странах мира [2]. Одним из интенсивно развивающихся и внедряемых методов, позволяющий экономить энергию и материалы, является электромагнитно-акустический [3]. Однако, он имеет ряд ограничений в некоторых областях при-

© О. Н. Петрищев, Г. М. Сучков, Е. Л. Ноздрачева, М. И. Романюк, 2014

менения, в частности при контроле ферромагнитных материалов, из-за сильного притяжения преобразователя к изделию, при контроле сплавов из меди и титановых сплавов. Принципиально улучшить ситуацию возможно за счет применения емкостного метода возбуждения и приема ультразвуковых колебаний. Однако, практически реализуемая чувствительность этого метода сравнительно небольшая [4]. Поэтому перспективными для практики являются теоретические и экспериментальные разработки, направленные на увеличение чувствительности емкостного метода возбуждения и приема ультразвуковых волн в металлах. Требуется исследовать и определить влияние факторов, определяющих работу емкостных преобразователей, и показать возможные пути повышения их чувствительности.

1. Общая схема построения математической модели емкостного преобразователя в режиме возбуждения ультразвуковых волн

Рассмотрим преобразователь емкостного типа (рис. 1), в виде металлического круглого диска (позиция 1 на рис. 1), который располагается на расстоянии δ над поверхностью электропроводного образца (позиция 2). На металлический диск подается постоянный во времени электрический потенциал U_0 , который формирует на поверхности ме-

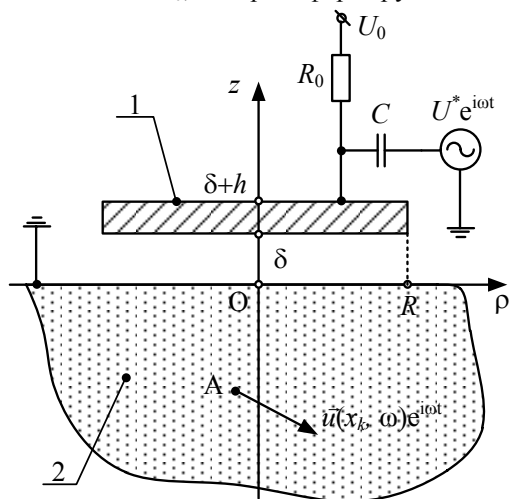


Рис. 1 – Расчетная схема электроакустического преобразователя емкостного типа в режиме возбуждения ультразвуковых волн в металлическом образце

таллического образца электрический заряд с поверхностной плотностью $\sigma^0(\rho)$, где ρ, φ, z - координатные линии цилиндрической системы координат, начало которой располагается на поверхности металлического образца (в точке O), а ось z совмещена с осью симметрии диска (рис. 1). Очевидно, что электрические поля и поверхностная плотность $\sigma^0(\rho)$ наведенного электрического заряда не зависят от круговой координаты φ .

Одновременно с постоянным потенциалом U_0 на металлический диск подается изменяющейся во времени по гармоническому закону $e^{i\omega t}$ ($i = \sqrt{-1}$; ω - циклическая частота; t - время) электрический потенциал с амплитудным значением U^* . Этот потенциал создает переменное электрическое поле с напряженностью $\vec{E}^- e^{i\omega t}$ (\vec{E}^- - амплитуда вектора напряженности переменного электрического поля).

Пусть выполняется неравенство $U^* \ll U_0$. Тогда поверхностные заряды, которые создаются переменным электрическим полем, можно не принимать в расчет. В таком случае переменное электрическое поле линейно взаимодействует со статическим электрическим зарядом, в результате чего на поверхности $z = 0$ металлического образца возникают силы Кулона с поверхностной плотностью $\sigma_{z\rho}^*(\rho, t)$ и $\sigma_{zz}^*(\rho, t)$.
Причем

$$\sigma_{z\rho}^*(\rho, t) = \sigma^0(\rho) E_\rho^*(\rho, 0) e^{i\omega t}, \quad \sigma_{zz}^*(\rho, t) = \sigma^0(\rho) E_z^*(\rho, 0) e^{i\omega t}, \quad (1)$$

где $E_\rho^*(\rho, 0)$ и $E_z^*(\rho, 0)$ - амплитудные значения радиального и аксиального компонентов вектора напряженности переменного электрического поля на поверхности $z = 0$ металлического образца.

Силы Кулона $\sigma_{z\rho}^*(\rho, t)$ и $\sigma_{zz}^*(\rho, t)$ или, используя терминологию механики деформируемого твердого тела, касательные и нормальные поверхностные нагрузки, создают в области существования постоянно-го и переменного электрических полей динамические деформации поверхности металлического объекта. Из области динамических деформаций избыток энергии выносится упругими волнами в объем металлического образца. Учитывая линейность физической системы и существующих в ней процессов, определим вектор смещения материальных частиц металла как гармонически изменяющуюся во времени величину с амплитудным значением $\vec{u}(x_k, \omega)$, где x_k - координаты точки наблюдения за волновым полем (произвольно выбранная точка A на рис. 1).

Амплитудные значения волнового поля смещений $\vec{u}(x_k, \omega)e^{i\omega t}$ в любой точке внутри металлического образца удовлетворяют уравнению установившихся гармонических колебаний. В инвариантной относительно выбора системы координат форме это уравнение записывается следующим образом [5]

$$(\lambda + 2G)\text{grad div } \vec{u}(x_k, \omega) - \text{grad div } \vec{u}(x_k, \omega) + \rho_0 \omega \vec{u}(x_k, \omega) = \nu, \quad (2)$$

где λ и G – константы Ламе для изотропного по упругим свойствам металла; ρ_0 – плотность металла.

Смещения $\vec{u}(x_k, \omega)e^{i\omega t}$ материальных частиц металла, решения уравнения (2), создают в объеме металла деформации, которым противостоят силы упругости, т. е. механические напряжения $\sigma_{\beta\lambda}(x_k, \omega)e^{i\omega t}$ ($\beta, \lambda = \rho, z$). На поверхности $z = 0$ металла должен выполняться третий закон Ньютона в дифференциальной форме, согласно которому должны выполняться следующие граничные условия

$$\sigma_{z\rho}(\rho, 0) = \sigma_{z\rho}^*(\rho), \quad \sigma_{zz}(\rho, 0) = \sigma_{zz}^*(\rho), \quad (3)$$

где $\sigma_{z\rho}^*(\rho)$ и $\sigma_{zz}^*(\rho)$ – амплитудные значения поверхностной плотности сил Кулона (см. выражение (1)). Выполнение граничных условий (3) обеспечивает единственность решения уравнения (2).

Таким образом, электрическое воздействие $U^*e^{i\omega t}$ на входе преобразователя емкостного типа (рис. 1) формирует вектор смещения материальных частиц $\vec{u}(x_k, \omega)e^{i\omega t}$ в произвольной точке A (рис. 1), т. е. гармонически изменяющееся во времени по закону $e^{i\omega t}$ воздействие порождает изменяющийся по тому же закону отклик. При этом становится справедливой следующая запись

$$\vec{u}(x_k, \omega) = U^* \vec{W}^u(x_k, \omega, \Pi), \quad (4)$$

где $\vec{W}^u(x_k, \omega, \Pi)$ – векторная функция, зависящая от координат точки A наблюдения за волновым полем, т. е. от набора чисел $x_k \equiv \rho, \phi, z$, круговой частоты ω смены знака воздействия и набора физико-механических параметров (символ Π в списке аргументов векторной

функции) описываемой физической системы, т. е. преобразователя емкостного типа. Векторную функцию $\vec{W}^u(x_k, \omega, \Pi)$ будем называть передаточной характеристикой емкостного преобразователя в режиме излучения ультразвуковых волн.

В соответствии с определениями академика А. Н. Тихонова [6] векторная функция $\vec{W}^u(x_k, \omega, \Pi)$ имеет смысл математической модели реального объекта, т. е. в данном случае электроакустического преобразователя емкостного типа в режиме излучения ультразвуковых волн.

Из сказанного выше следует, что построение математической модели емкостного преобразователя в режиме излучения ультразвуковых волн естественным образом распадается на две, последовательно решаемые, задачи.

Первая задача – это задача электродинамики об определении сил Кулона на поверхности металлического образца.

Вторая задача – это граничная задача (2), (3) динамической теории упругости о возбуждении гармонических волн системой поверхностных нагрузок. Решение этой задачи позволит записать в явном виде выражение для расчета компонентов векторной функции $\vec{W}^u(x_k, \omega, \Pi)$, т. е. завершает построение математической модели преобразователя емкостного типа в режиме возбуждения.

2. Определение поверхностной плотности $\sigma^0(\rho)$ статического электрического заряда на поверхности металлического образца

Электростатическое поле, которое создается электрически заряженным диском в окружающем его воздушном пространстве, можно описать с помощью скалярного осесимметричного электрического потенциала $\Phi^0(\rho, z)$, где ρ и z - радиальная и аксиальная координаты цилиндрической системы координат ρ, φ, z (рис. 1). Скалярный потенциал $\Phi^0(\rho, z)$ удовлетворяет уравнению Пуассона [7]

$$\nabla^2 \Phi^0(\rho, z) = -\rho_e / \chi_0, \quad (5)$$

где ρ_e - объемная плотность статического электрического заряда в металлическом диске; $\chi_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ - диэлектрическая проницаемость окружающего диск пространства.

Будем считать, что статический электрический заряд в объеме диска $V = \pi R^2 h$ (R - радиус диска, h - его толщина) распределен равномерно и поэтому

$$\rho_e = \frac{C_0 U_0}{\pi R^2 h} f(\rho) f(z), \quad (6)$$

где $C_0 \approx \pi R^2 \chi_0 / \delta$ - статическая электрическая емкость диска над поверхностью металлического изделия. Металлический образец для упрощения последующих выкладок заменим полупространством $z \leq 0$ с изотропной удельной электрической проводимостью r с размерностью См/м и магнитной проницаемостью μ (размерность – Гн/м). Функции $f(\rho)$ и $f(z)$ задаются следующим образом

$$f(\rho) = \begin{cases} 1 \forall \rho \in [0, R], \\ 0 \forall \rho \notin [0, R], \end{cases} \quad f(z) = \begin{cases} 1 \forall z \in [\delta, \delta+h], \\ 0 \forall z \notin [\delta, \delta+h]. \end{cases} \quad (7)$$

Так как в статической ситуации электрический ток по поверхности $z = 0$ не протекает, то радиальный компонент $E_\rho^0(\rho, z) = -\partial \Phi^0(\rho, z) / \partial \rho$ вектора напряженности статического электрического поля на поверхности металла должен быть равен нулю. В противном случае по поверхности металла протекал бы электрический ток с поверхностной плотностью $j_\rho^0(\rho) = r E_\rho^0(\rho, 0)$ и статический заряд в этом случае был бы равен нулю. Таким образом, решение уравнения (5) на границе $z = 0$ должно удовлетворять следующему условию

$$\left. \frac{\partial \Phi^0(\rho, z)}{\partial \rho} \right|_{z=0} = 0. \quad (8)$$

Помимо этого, скалярный потенциал $\Phi^0(\rho, z)$ и его первые производные $\partial \Phi^0(\rho, z) / \partial \rho$ и $\partial \Phi^0(\rho, z) / \partial z$ должны удовлетворять условию физической реализуемости источника поля, т. е. удовлетворять следующим предельным условиям

$$\lim_{L \rightarrow \infty} \left\{ \Phi^0(\rho, z), \frac{\partial \Phi^0(\rho, z)}{\partial \rho}, \frac{\partial \Phi^0(\rho, z)}{\partial z} \right\} = 0, \quad (9)$$

где $L = \sqrt{\rho^2 + z^2}$ - расстояние от металлического диска.

Физический смысл условия (9) очевиден – источник конечной мощности создает электрическое поле, потенциал которого и компоненты вектора напряженности обращаются в нуль при бесконечном удалении от него.

Развернутая форма записи уравнения (5) имеет следующий вид

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left[\rho \frac{\partial \Phi^0(\rho, z)}{\partial \rho} \right] + \frac{\partial^2 \Phi^0(\rho, z)}{\partial z^2} = -\frac{\rho_e}{\chi_0}. \quad (10)$$

Предельное условие (9) позволяет применить для решения уравнения (10) интегральное преобразование Ханкеля [3] с ядром $J_0(\gamma\rho)$ ($J_0(x)$ - функция Бесселя нулевого порядка; γ - параметр интегрального преобразования – действительное число).

Прямое преобразование Ханкеля определяется следующим соотношением [8]

$$\Phi^0(\gamma, z) = \int_0^{\infty} \rho \Phi^0(\rho, z) J_0(\gamma\rho) d\rho, \quad (11)$$

где $\Phi^0(\gamma, z)$ - интегральный образ по Ханкелю или просто образ функции (оригинала) $\Phi^0(\rho, z)$. Прямому преобразованию Ханкеля (11) соответствует обратное преобразование, которое определяется следующим выражением

$$\Phi^0(\rho, z) = \int_0^{\infty} \gamma \Phi^0(\gamma, z) J_0(\gamma\rho) d\gamma, \quad (12)$$

Интегрируя дважды по частям и принимая при этом во внимание предельное условие (9), можно показать, что

$$\int_0^{\infty} \rho \left\{ \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left[\rho \frac{\partial \Phi^0(\rho, z)}{\partial \rho} \right] \right\} J_0(\gamma\rho) d\rho = -\gamma^2 \Phi^0(\gamma, z). \quad (13)$$

Воздействуя на левую и правую части уравнения (10) интегральным преобразованием (11) получаем, с учетом соотношения (13), следующее уравнение для интегрального образа $\Phi^0(\gamma, z)$ скалярного по-

тенциала

$$\frac{d^2\Phi^0(\gamma, z)}{dz^2} - \gamma^2\Phi^0(\gamma, z) = -\frac{\rho_e(\gamma)}{\chi_0}f(z), \quad (14)$$

где $\rho_e = \frac{C_0 U_0}{\pi h} \frac{J_1(\gamma R)}{\gamma R}$ - интегральный образ объемной плотности электрического заряда металлического диска ($J_1(x)$ - функция Бесселя первого порядка). Общее решение обыкновенного дифференциального уравнения (14) известно

$$\Phi^0(\gamma, z) = [A + A(z)]e^{\gamma z} + [B + B(z)]e^{-\gamma z}, \quad (15)$$

где A, B - константы; $A(z)$ и $B(z)$ - варьируемые константы, которые удовлетворяют условию минимума вычислений, т. е.

$$A'(z)e^{\gamma z} + B'(z)e^{-\gamma z} = 0, \quad (16)$$

где штрих означает первую производную по переменной z .

Подстановка общего решения (15) в уравнение (14) после вычисления производных с учетом условия (16), дает следующий результат

$$\gamma A'(z)e^{\gamma z} - \gamma B'(z)e^{-\gamma z} = -\frac{\rho_e(\gamma)}{\chi_0}f(z). \quad (17)$$

Условие (16) и уравнение (17) образуют алгебраическую систему уравнений, которая единственным образом разрешается относительно производных варьируемых констант $A(z)$ и $B(z)$. Интегрируя найденные производные по переменной z , получаем

$$A(z) = -\frac{1}{2\gamma\chi_0} \int_0^{z \leq \delta+h} \rho_e(\gamma)f(x)e^{\gamma x} dx = -\frac{C_0 U_0}{2\pi\gamma h\chi_0} \frac{J_1(\gamma R)}{\gamma R} \int_{\delta}^{z \leq \delta+h} e^{\gamma x} dx,$$

$$B(z) = \frac{1}{2\gamma\chi_0} \int_0^{z \leq \delta+h} \rho_e(\gamma)f(x)e^{\gamma x} dx = \frac{C_0 U_0}{2\pi\gamma h\chi_0} \frac{J_1(\gamma R)}{\gamma R} \int_{\delta}^{z \leq \delta+h} e^{\gamma x} dx. \quad (18)$$

При неограниченном возрастании аксиальной координаты z пер-

вое слагаемое в общем решении (15) стремится к бесконечности и тем самым нарушается предельное условие (9). Во избежание противоречий, необходимо и достаточно положить, что

$$A = -A(\delta + h) = \frac{C_0 U_0}{2\pi\gamma\chi_0} W(\gamma), \quad (19)$$

где $W(\gamma) = e^{-\gamma\delta} \frac{(1 - e^{-\gamma h}) J_1(\gamma R)}{\gamma h \gamma R}$ - функция, которая учитывает влияние геометрических параметров емкостного преобразователя на характер распределения электрического поля в окружающем пространстве. Таким образом

$$\Phi^0(\gamma, z) = \left[\frac{C_0 U_0}{2\pi\gamma\chi_0} W(\gamma) + A(z) \right] e^{\gamma z} + [B + V(z)] e^{-\gamma z}. \quad (20)$$

Из определений (18) следует, что при $z < \delta$, т. е. в области под металлическим диском варьируемые коэффициенты $A(z) = B(z) = 0$ и выражение (20) принимает следующий вид

$$\Phi^0(\gamma, z) = \frac{C_0 U_0}{2\pi\gamma\chi_0} W(\gamma) e^{\gamma z} + B e^{-\gamma z}, \quad 0 \leq z \leq \delta. \quad (21)$$

Определим интегральный образ радиального компонента $E_\rho^0(\rho, z)$ вектора напряженности статического электрического поля следующим образом

$$E_\rho^0(\gamma, z) = \int_0^\infty \rho E_\rho^0(\rho, z) J_1(\gamma\rho) d\rho. \quad (22)$$

Подставляя в определение (22) вместо символа $E_\rho^0(\rho, z)$ первую производную от электрического потенциала ($E_\rho^0(\rho, z) = -\partial\Phi^0(\rho, z)/\partial\rho$), после интегрирования по частям получаем следующий результат

$$E_p^0(\gamma, z) = \gamma \int_0^\infty \rho \Phi^0(\rho, z) J_0(\gamma \rho) d\rho = \gamma \Phi^0(\gamma, z). \quad (23)$$

Из граничных условий (8) следует, что константа $B = -C_0 U_0 W(\gamma)/(2\pi\gamma\chi_0)$. После этого выражение для расчета интегрального образа скалярного потенциала в области $0 \leq z \leq \delta$ принимает следующий вид

$$\Phi^0(\gamma, z) = \frac{C_0 U_0}{\pi\gamma\chi_0} W(\gamma) sh(\gamma z), \quad 0 \leq z \leq \delta. \quad (24)$$

Аксиальный компонент $E_z^0(\rho, z) = -\partial\Phi^0(\rho, z)/\partial z$ вектора напряженности электростатического поля имеет интегральный образ $E_z^0(\gamma, z) = -\partial\Phi^0(\gamma, z)/\partial z$, т. е.

$$E_z^0(\gamma, z) = -\frac{C_0 U_0}{\pi\chi_0} W(\gamma) ch(\gamma z), \quad 0 \leq z \leq \delta. \quad (25)$$

Из теории электрических явлений известно [8], что поверхностная плотность электрического заряда на поверхности $z = 0$, разделяющей металл и вакуум, определяется следующим образом

$$\sigma^0(\rho) = \chi_0 E_z^0(\rho, 0). \quad (26)$$

Воздействуя на левую и правую части соотношения (26) интегральным преобразованием (11), получаем

$$\sigma^0(\gamma) = \chi_0 E_z^0(\gamma, 0) = -\frac{C_0 U_0}{\pi} W(\gamma). \quad (27)$$

Подвергая соотношение (27) обратному преобразованию Ханкеля (12), получаем выражение для расчета поверхностной плотности статического электрического заряда на поверхности металлического образца

$$\sigma^0(\rho) = -\frac{C_0 U_0}{\pi} \int_0^\infty \gamma W(\gamma) J_0(\gamma \rho) d\gamma. \quad (28)$$

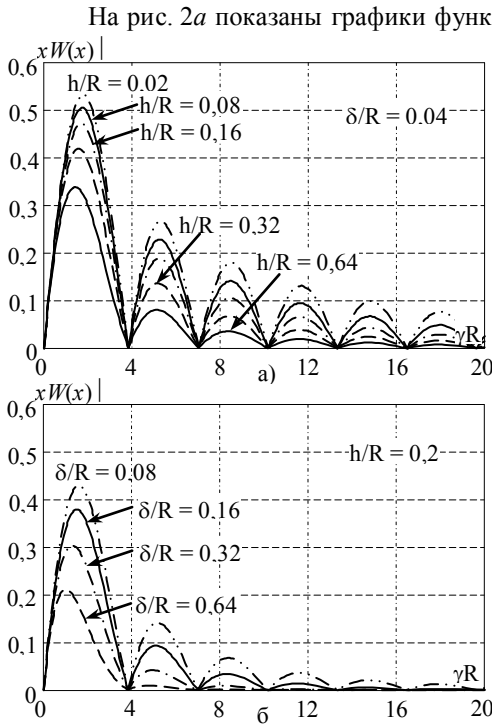
Интеграл (28) определяется численно. Особенностью вычисления интеграла (28) является то, что верхний предел интегрирования является бесконечно большим. В реальном машинном счете верхний предел интегрирования должен быть конечной величиной. Очевидно, что, в первом приближении, такой величиной должно быть действительное число γ_{\max} , начиная с которого выполняется неравенство $\gamma W(\gamma) < \varepsilon \forall \gamma > \gamma_{\max}$, где ε - наперед заданное малое число. Поскольку

сомножитель $|J_0(\gamma\rho)| \leq 1$, то в записанном выше неравенстве было использовано максимальное значение функции Бесселя нулевого порядка, т. е. единица.

На рис. 2 показано изменение фрагмента подынтегрального выражения $xW(x)$ в зависимости от безразмерного параметра интегрального преобразования $x = \gamma R$, где R - радиус металлического диска. При этом функция $W(x)$ рассчитывается по формуле

$$W(x) = e^{-x\delta/R} \frac{(1 - e^{-xh/R}) J_1(x)}{(xh/R) x}$$

По оси ординат на рис. 2 отложены значения модуля функции $xW(x)$, по оси абсцисс – безразмерный параметр интегрального преобразования x .



На рис. 2а показаны графики функции $xW(x)$ для фиксированного значения $\delta / R = 0,04$ и варьируемых значений безразмерной толщины диска h / R . Значения h / R проставлены в поле рисунка возле соответствующих кривых. На рис. 2б показаны значения модуля функции $xW(x)$ для фиксированного значения $h / R = 0,2$ и варьируемых значений относительного неконтакта δ / R , которые проставлены в поле рисунка возле соответствующих кривых.

Из представленных на рис. 2 результатов следует, что при $x > 20$ произведение $xW(x) < 0,02$ для произвольных (не нулевых) значений δ / R и h / R . Если учесть то, что при $\rho / R > 0$ функция Бесселя $J_0(x\rho/R) < 1$, то можно утверждать, что основной вклад в интеграл (28) осу-

Рис. 2 – Изменение модуля фрагмента подынтегрального выражения (28)

щественно значения подинтегральной функции на интервале интегрирования $0 \leq x \leq 20$.

Таким образом, при выполнении вычислений значения интеграла (28) вместо бесконечного предела интегрирования можно подставить любое безразмерное число $x_{\max} > 20$.

На рис. 3 показаны результаты вычисления поверхностной плотности $\sigma^0(\rho)$ статического электрического заряда по формуле (28), которая в терминах безразмерного параметра x записывается следующим образом

$$\sigma^0(\rho/R) = -\frac{C_0 U_0}{\pi R^2} \int_0^{x_{\max}} x W(x) J_0(x\rho/R) dx.$$

При выполнении расчетов статическая электрическая емкость C_0 рассчитывалась по приближенной формуле $C_0 = \pi R^2 \chi_0 / \delta$, которая дает несколько заниженную оценку реального значения этой величины.

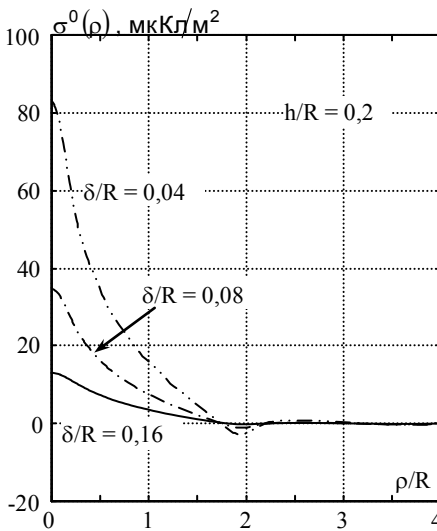


Рис. 3 – Распределение электростатического заряда на поверхности металлического полупространства

Для отображения результатов счета в абсолютных величинах были приняты следующие значения параметров: $U_0 = 100$ В и $R = 5$ мм. При вычислении интеграла верхний предел интегрирования был принят равным $x_{\max} > 40$. Интервал интегрирования был разделен на 400 отрезков. По оси ординат на рис. 3 отложены значения $\sigma^0(\rho)$ в микрокулонах, деленных на метр квадратный, взятые с обратным знаком. По оси абсцисс отсчитываются безразмерные расстояния ρ/R от центра металлического диска. Варьируемым параметром семейства кривых, которые показаны на рис. 3, является величина безразмерного неконтакта δ/R , числовые значения которого представлены в поле рисунка возле соответствующих кривых.

Выводы. 1. Предложена математическая модель преобразователя емкостного типа в режиме возбуждения ультразвуковых волн в метал-

лах.

2. Построено замкнутое решение задачи электростатики для кучно-однородной среды, в которой полупространство $z < 0$ заполнено металлом с конечными значениями электрической проводимости и магнитной проницаемости. Получено выражение для расчета поверхностной плотности статического электрического заряда на поверхности металлического образца.

3. Показано, что основными влияющими факторами определяющими плотность зарядов в поверхностном слое металла (а, следовательно, мощность и диаграмму направленности возбуждаемого ультразвукового поля) являются: поляризующее напряжение; емкость преобразователя (диэлектрическая проницаемость); размер преобразователя; величина зазора между преобразователем и изделием; форма преобразователя.

Во второй части работы будут определены характеристики переменного электрического поля емкостного преобразователя и сформулированы количественные оценки поверхностной плотности сил Кулона, что позволит экспериментально проверить полученные теоретические результаты.

Список литературы: 1. *Судакова К.В.* О повышении эффективности контроля качества металлургической продукции / *К.В. Судакова, И.Л. Казюкевич* // В мире неразрушающего контроля. – 2004. – № 3. – С. 8-10. 2. *Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т.* Под общ. ред. В.В. Клюева. Т.3: Ультразвуковой контроль / *И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге.* – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с. 3. *Сучков Г.М.* Современные возможности ЭМА дефектоскопии / *Г.М. Сучков* // Дефектоскопия. 2005. – № 12. – С. 24-39. 4. *Ермолов И. Н.* Теория и практика ультразвукового контроля. – М: Машиностроение. 1981. – 240 с. 5. *Новацкий В.* Теория упругости. – М: Мир, 1975. – 873 с. 6. *Тихонов А.Н.* Математическая модель. – В кн. Математическая энциклопедия. Т. 3. Кoo – Од. Стб. 574 – 575. М.: Советская энциклопедия, 1982. – 1184 с. 7. *Морс Ф.М., Фешбах Г.* Методы теоретической физики. Т.2. М.: Москва, ИЛ. 1960. — 886 с. 8. *Тамм И. Е.* Основы теории электричества. – М.: Наука, 1976. – 616 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Sudakova K.V., Kazjuevich I.L.* O povyshenii jeffektivnosti kontrolja kachestva metallurgicheskoj produkcii . V mire nerazrusha-jushhego kontrolja. – 2004. – № 3. – Print. 8-10. 2. "Nerazrushajushhij kontrol'": Spravochnik: V 7 t. Pod obshh. red. V.V. Kljueva. T.3: Ul'trazvukovoj kontrol' / I.N. Ermolov, Ju.V. Lange. – Moscow : Mashinostroenie, 2004. – 864 Print. 3. Suchkov G.M. Sovremennye vozmozhnosti JeMA defektoskopii . Defektoskopija. 2005. – № 12. – Print. 24-39. 4. Ermolov I. N. Teorija i praktika ul'trazvukovogo kontrolja. - Moscow: Mashinostroenie. 1981. - 240 Print. 5. Novackij V. Teorija uprugosti. – Moscow: Mir, 1975. – 873 Print. 6. Tihonov A.N. "Matematicheskaja model". – V kn. Matematicheskaja jenciklopedija. T. 3. Koo – Od. Print. 574 – 575. Moscow: Sovetskaja jenciklopedija, 1982. – 1184 Print. 7. Mors F.M., Feshbah G. Metody teoreticheskoj fiziki. T.2. M.: Moscow, IL. 1960. — 886 Print. 8. Tamm I. E. Osnovy teorii jelektrichstva. – Moscow: Nauka, 1976. – 616 Print.

Надійшло (received) 05.05.2014

РЕФЕРАТИ

УДК 620.179.16

Методика оцінки похибки вимірювання швидкості поширення пружної хвилі при поетапному контролі зразків з порошкових матеріалів/ Ю. Г. Безимяний, І. Г. Євко, К. А. Комаров, О. В. Талько// Вісник НТУ «ХП». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 19 (1062). – С. 3–14. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-4525

В статті розроблена методика та оцінені похибки при вимірюванні швидкості поширення пружної хвилі імпульсним методом на різних етапах формування порошкового матеріалу. Особливості вимірювань пов'язані із зміною форми зразків на кожному етапі формування при відсутності площинно-паралельних поверхонь. Наведено результати вимірювання та оцінка похибки у реальних зразках. Показано, що зміна інформативних значень швидкості поширення пружної хвилі суттєво перевищує похибку їх вимірювань.

Ключові слова: похибка вимірювань, швидкість поширення пружної хвилі, ультрарозвуковий імпульсний метод, порошковий матеріал.

УДК 620.179

Сравнение динамических методов при определении упругих характеристик разных материалов / Ю. Г. Безимяний, Е. А. Козирацкий, А. Н. Колесников, Л. О. Тесленко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 19 (1062). – С. 15–22. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-4525.

В роботі наведені результати розрахунків, а також експериментального визначення імпульсним та резонансним методами характеристик пружності різних матеріалів, як тих що широко використовуються, так і тих що мають спеціальні властивості. Відмічено, що різниця між отриманими цими методами величинами модуля пружності змінюється в залежності від властивостей матеріалу і може досягати 15 %. Для зменшення розбіжностей рекомендується адаптація методу вимірювань до досліджуваного матеріалу.

Ключові слова: модуль пружності, швидкість розповсюдження пружної хвилі, резонанс, резонансний метод, імпульсний метод.

УДК 681.586.773

Математичні моделі термодинамічних процесів біологічного організму / Й. І. Стенцель, С. В. Павлов, К. А. Літвінов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 19 (1062). – С. 23-35. – Бібліогр.: 14 назв. - ISSN 2079-4525.

На основі результатів клінічних досліджень температурних змін здорової та хворої людини, принципів реологічних переходів кількості теплової енергії та методу нульового градієнта розроблені математичні моделі термодинамічних процесів біологічного організму. Показані причини зміни термодинамічного поля здорової та хворої людини. На амплітуду зміни температури чинить вплив температура організму та час кровообігу, а також витрата крові.

Ключові слова: температура, градієнт, амплітуда, швидкість, інфекція, захворювання, кровеносна система, біологічний організм, витрата, реологічний перехід, тепла енергія.

УДК 681.586.773

Математичні моделі теплообмінних процесів людини при зовнішньому стоку теплової енергії / Й. І. Стенцель, С. М. Злепко, А. В. Рябіченко // Вісник НТУ «ХП».

Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Харків: НТУ «ХП», 2014. - № 19 (1062). – С. 36- 48. – Бібліогр.: 16 назв. - ISSN 2079-4525.

Виконані дослідження термодинамічних явищ в людському організмі, котрі обумовлені біохімічними та теплообмінними процесами. Показано, що процес перенесення теплової енергії за рахунок роботи серцево-судинної системи є коливальним, амплітуда яких визначається температурою біохімічних перетворень, а власна частота - роботою серця, станом судинної системи, а також процесом теплоперенесення в навколишнє середовище.

Ключові слова: термодинаміка, явище, організм, людина, серце, судини, коливання, частота, теплоперенесення, тепла енергія, захворювання.

УДК 681.586.773

Фізичні моделі перетворень електричного імпульсу в магнітострикційному перетворювачі / О. І. Шаповалов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 19 (1062). – С. 48-58. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-4525.

Показано, що вимірювання рівня рідин магнітострикційним методом засновано на реологічних переходах збуджуючого імпульсу хвилеводу в ультразвукові коливання. Досліджено процеси перетворення струмового імпульсу в енергію електромагнітного поля та вплив на магнітне поле перетворювача. Показано, що зміна електромагнітного поля за довжиною хвилеводу є нелінійною, що впливає на діапазон вимірювального контролю рівня таким методом.

Ключові слова: вимірювання, перетворення, магнітострикція, метод, струм, імпульс, хвилевід, ультразвук, магнітне, поле.

УДК 539.124.18.08

Метод измерения поглощенной дозы при обработке продукции на линейном ускорителе электронов / Д. В. Титов, Е. Л. Ноздрачёва, В. А. Шевченко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – №19(1062). – С. 58 –64. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-4525.

Розглянуто схему проведення опромінення продукції медичного та іншого призначення з метою стерилізації, а також контролю стерилізаційної дози на прискорювачі електронів ЛУ - 10 ННЦ «ХФТІ» з енергією 10МеВ. Наведено приклад дозиметричного супроводу технології з використанням дозиметрів Harwell RedPerspex 4034 і дозиметричної плівки RISO В - 3. Показаний приклад ефективності роботи даного методу дозиметрії та його приладового забезпечення.

Ключові слова: Технологічна дозиметрія, доза, поглинається, лінійний прискорювач електронів, дозиметр, дозиметрична плівка

УДК 621.318

Классификация полиградиентных магнитных сепараторов / И. А. Шведчикова, Ю. А. Романченко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – №19(1062). – С. 64–76. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-4525.

Проаналізовані функціональні і конструктивні особливості існуючих різновидів поліградиентних магнітних сепараторів. На основі аналізу інформаційних джерел встановлено, що в магнітних сепараторах даного класу знайшли переважне вживання стержневі, пластинчасті, кулясті і ґратчасті поліградиентні (гетерогенні) середовища. Побудована класифікація магнітних сепараторів, що враховує структурні властивості поліградиентних середовищ.

Ключові слова: магнітний сепаратор, поліградієнтне середовище, магнітне поле, класифікація.

УДК 616 – 073.65

Використання моделей прогнозування при багатовимірному контролі процесів забруднення / Н.О.Любимова // Вісник НТУ «ХП». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 19 (1062). – С. 76–83. – Бібліогр.: 98 назв. – ISSN 2079-4525.

Запропоновані результати порівняльного аналізу дисперсії помилок прогнозування (екстраполяції другого порядку) для двох варіантів обробки первинної інформації при проведенні контролю багатовимірних (багатокомпонентних) процесів промислового забруднення навколишнього середовища. Особливістю моделі прогнозування, що досліджується, є корекція умовного математичного очікування випадкового вектору сигналів на вході на величину параметру нестационарності, що враховує асиметрію закону розподілу процесу, що контролюється. Модель, що пропонується, може бути використана в екологічному моніторингу енергоємних виробництв.

Ключові слова: модель, прогнозування, багатокомпонентне, забруднення, екологія.

УДК 699.8+69.5; УДК 620.179.14

Стан методів і засобів контролю товщини покриттів (огляд) / С. М. Глоба, Ле Чи Хиеу, Г. М. Сучков, О. А. Хлибов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 19 (1062). – С. 84–112. – Бібліогр.: 98 назв. – ISSN 2079-4525.

У роботі проаналізовано сучасні методи та засоби контролю товщини неелектропровідних захисних покриттів на електропровідній основі. Описано переваги, недоліки, можливості та умови застосування основних методів контролю товщини покриттів. Встановлено перспективність застосування вихорструмового методу. Описано принцип роботи вихорструмового методу контролю. Виділено три основні методи, які доцільно використовувати для контролю товщини покриттів. Розглянуто вихорструмові перетворювачі та способи їх підключення. Показано необхідність застосування трансформаторних конденсованих перетворювачів і дослідження їх можливостей.

Ключові слова: контроль товщини покриттів, неелектропровідне покриття, електропровідна основа, вихорструмовий метод, вихорструмовий перетворювач, збуджувальна котушка, ресструюча котушка

УДК 620.179.14

Вихретоковий контроль глибини упрочненого слоя изделий в режиме реального времени / Б. М. Горкунов, Н. Н. Сиренко, А. А. Авраменко, А. А. Тищенко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 19 (1062). – С. 112–117. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-4525.

У роботі розглянуто алгоритм функціонування вихорструмового пристрою для контролю глибини зміцненого шару металевих виробів, який реалізує вимірювальні, розрахункові та керуючі операції. Даний алгоритм дозволяє здійснювати ряд процедур з визначення контрольованого параметра і проводити статистичну обробку результатів контролю. На основі наведеного алгоритму розроблена блок-схема і розглянуто принцип дії автоматизованого вихорструмового пристрою. Зроблено висновок про те, що даний пристрій дозволяє проводити контроль об'єктів в режимі реального часу, що значно зменшує часові витрати і підвищує ефективність виробництва.

Ключові слова: вихорострумний контроль, глибина зміцненого шару, амплітуда, фаза, автоматизований пристрій.

УДК 620.179.16

Розробка стохастичної моделі ультразвукового неруйнівного контролю виробів порошкової металургії / Р. М. Галаган // Вісник НТУ «ХП». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – №19(1062). – С. 117–125. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-4525.

Обґрунтовано розробку стохастичної моделі ультразвукового неруйнівного контролю виробів порошкової металургії у вигляді лінійної системи, яка має породжуючий процес, власну імпульсну реакцію та відгук при наявності дефекту. В результаті виділено інформаційні параметри, за якими можна проводити класифікацію технічного стану виробу – зміна математичного сподівання та дисперсії вибірок вимірних значень швидкості ультразвуку.

Ключові слова: вироби порошкової металургії, фізико-механічні властивості, стохастична модель, ультразвуковий контроль, швидкість ультразвуку.

УДК 504.064.3:66.085

Чотириканальний аналізатор імпульсів для одночасної ресстрації альфа-, бета-, гамма- та нейтронного випромінювань / О.М. Григор'єв, З.В. Білик, Ю.В. Литвинов, О.В. Сакун, В.В. Марущенко, О.Ю. Чернявський // Вісник НТУ «ХП». Серія: Електроенергетика і перетворювальна техніка. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 19 (1062). – С. 125–132. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-4525.

Розроблена апаратура та спосіб для одночасного вимірювання енергетичних спектрів альфа-, бета-, гамма- та нейтронного випромінювання із застосуванням напівпровідникових блоків детектування, аналого-цифрових перетворювачів, персонального комп'ютера та програмного забезпечення. Експериментальні дослідження з використанням джерел альфа-, бета-, гамма-випромінювання довели працездатність приладу з достатньо високими технічними параметрами, такими як: точність та стабільність своїх характеристик.

Ключові слова: альфа-джерела, бета-джерела, гамма-джерела, нейтронне джерело, багатоканальний аналізатор імпульсів, кремній, телурид кадмію.

УДК 620.179.14

Вихорострумний дефектоскоп з телеметричним каналом зв'язку / А. Г. Протасов, К. М. Серий, О.Л. Дугін, В. Ф. Петрик // Вісник НТУ «ХП». Серія: Електроенергетика і перетворювальна техніка. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 19 (1062). – С. 132–139. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2079-4525.

В роботі запропоновано схему дефектоскоп для вихорострумного неруйнівного контролю, який має телеметричний канал зв'язку з пристроєм обробки і відображення інформації. Створений дефектоскоп має малу вагу і розміри, що дозволяє використовувати його для контролю складних конструкцій. Телеметричний канал зв'язку здійснює обмін даними за рахунок бездротової технології **Bluetooth**, що дає можливість залучати для обробки цих даних потужну обчислювану техніку. Бібліогр.: 4 наз.

Ключові слова: вихорострумний дефектоскоп, телеметричний канал зв'язку.

УДК 697.34

Інформаційно-вимірювальна система для виявлення місць тепловтрат у підземних теплових мережах при проведенні енергоаудиту / І.Р. Ващишак // Вісник

НТУ «ХП». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 19(1062). – С. 139–146. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-4525.

В статті розглянуто причини понаднормативних втрат теплової енергії при її транспортуванні від джерела до споживача підземними тепловими мережами. Запропоновано інформаційно-вимірвальну систему для контролю підземних теплових мереж безканалльної прокладки з трубопроводами в пінополіуретановій тепловій ізоляції, в основу роботи якої покладено комплексне застосування трьох інформативних параметрів (температури приповерхневого шару ґрунту, акустичного тиску на поверхні ґрунту та струму у стінках трубопроводу). Розроблено методику проведення експериментальних досліджень за допомогою інформаційно-вимірвальної системи, яка пройшла успішну апробацію.

Ключові слова: теплові втрати, підземні теплові мережі, інформаційно-вимірвальна система, дефект, інформативний параметр, функціональна схема

УДК 681.518.54

Дослідження впливу систематичних похибок вимірювання на ризики функціональної діагностики / Мигущенко Р.П // Вісник НТУ «ХП». Серія: Електроенергетика і перетворювальна техніка. – Х.: НТУ «ХП», 2014. . – № 19 (1062). – С.147–154. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-4525.

У даній статті розглянуті і проаналізовані ймовірнісні моделі вимірвальних перетворень та визначені умови багатомірної корекції зміщень в оцінках коефіцієнтів лінійної вирішувальної функції за рахунок планування багатомірного метрологічного експерименту при первинних вимірюваннях складових вхідного вектора вимірвальних величин в робочому режимі функціонування ІВС функціональної діагностики та доведено, що корекція ймовірностей помилок діагностики реалізується правильним вибором складових похибок

Ключові слова: ймовірність помилки, дисперсія, вірогідність, похибка, контроль

УДК 535.345.1, 622.23.05

Розробка та обґрунтування структури вимірвальної системи контролю вибухонебезпечних пило-газових сумішей в шахтному виробітку / Р.І. Соломічев, О.В. Вовна, А.А. Зорі // Вісник НТУ «ХП». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 19 (1062). – С. 154–163. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-4525.

На основі проведених досліджень отримано багатопараметричний функціонал, який визначає ймовірнісні характеристики критичних меж вибуховості пило-газової суміші в шахтному повітрі. Завдяки даному функціоналу розроблено структуру комп'ютеризованої ІВС контролю концентрацій вибухонебезпечних компонент рудничної атмосфери, що включає автоматичний канал вимірювання концентрації ($0\div 3 \text{ г/м}^3$) та дисперсності ($1\div 10 \text{ мкм}$) вугільного пилу, концентрації метану ($0\div 4 \text{ }^{06}\%$), температури та вологості повітря ($0\div 10 \text{ г/м}^3$).

Ключові слова: вимірвач, вугільний пил, оптико-абсорбційний, концентрація, алгоритм, вибуховість

УДК 534.232.082.72; 620.179.16; 620.179.17

Математическое моделирование преобразователя емкостного типа в режиме возбуждения ультразвуковых волн в металлах. Часть I / О. Н. Петрищев, Г. М. Сучков, Е. Л. Ноздрачева, М. И. Романюк // Вісник НТУ «ХП». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 19 (1062). – С.163-175. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-4525

Запропоновано математичну модель смісного перетворювача для випромінювання ультразвукових коливань в металевий виріб. Отримано вираз для розрахунку поверхневої щільності статичного електричного заряду на поверхні металевого зразка. Виявле-

но основні фактори, що визначають щільність зарядів на поверхні виробу і, відповідно, потужність і діаграму спрямованості ультразвукового поля, що випромінюється.

Ключові слова: ультразвуковий контроль, ємнісний перетворювач, щільність електричного заряду, електричне поле, ємність, ультразвукові коливання.

РЕФЕРАТЫ

УДК 620.179.16

Методика оценки погрешности измерения скорости распространения упругой волны при поэтапном контроле образцов из порошковых материалов / Ю. Г. Безымянный, И. Г. Евко, К. А. Комаров, О. В. Талько // Вісник НТУ «ХП». Серія : Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Харків : НТУ «ХП», 2014. – № 19 (1062). – С. 3–14. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-2545

В статье разработана методика и оценены погрешности при измерении скорости распространения упругой волны импульсным методом на разных этапах формирования порошкового материала. Особенности измерений связаны с изменением формы образцов на каждом этапе их формирования при плоскопараллельных поверхностях. Приведены результаты измерений и оценка погрешности в реальных образцах. Показано, что изменение информативных значений скорости распространения упругой волны существенно превышает погрешность их измерения.

Ключевые слова: ошибка измерений, скорость распространения упругой волны, акустический импульсный метод, порошковый материал.

УДК 620.179

Сравнение динамических методов при определении упругих характеристик разных материалов / Ю. Г. Безымянный, Е. А. Козирацкий, А. Н. Колесников, Л. О. Тесленко // Вісник НТУ «ХП». Серія : Електроенергетика та перетворювальна техніка – Харків : НТУ «ХП», 2014. – № 19 (1062). – С. 15–22. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-4525.

В работе приведены результаты расчётов, а так же экспериментального определения импульсным и резонансным методами характеристик упругости различных материалов, как широко используемых, так и обладающих специальными свойствами. Отмечено, что разница между получаемыми по этим методам величинами модуля упругости изменяется в зависимости от свойств материала и может достигать 15 %. Для уменьшения расходов рекомендуется адаптация метода измерений к исследуемому материалу.

Ключевые слова: модуль упругости, скорость распространения упругой волны, резонанс, резонансный метод, импульсный метод.

УДК 681.586.773

Математические модели термодинамических процессов биологического организма / И. И. Стенцель, С. В. Павлов, К. А. Литвинов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Харків: НТУ «ХП», 2014. – №19(1062). – С. 23-25. – Бібліогр.: 14 назв. - ISSN 2079-4525.

На основании результатов клинических исследований температурных изменений здорового и больного человека, принципов реологических переходов количества тепловой энергии и метода нулевого градиента разработаны математические модели термодинамических процессов биологического организма. Показаны причины изменений термодинамического поля здорового и больного человека. На амплитуду изменения температуры

оказывают влияние температура организма и время кровообращения, а также расход крови

Ключевые слова: температура, градиент, амплитуда, скорость, инфекция, заболевание, кровеносная система, биологический организм, расход, реологический переход, тепловая энергия

УДК 681.586.773

Математические модели теплообменных процессов человека при внешнем стоке тепловой энергии / И. И. Стенцель, С. М. Злепко, А. В. Рябиченко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Харків: НТУ «ХП», 2014. – № 19 (1062). – С. 36-48. – Бібліогр.: 16 назв. - ISSN 2079-4525.

Выполнены исследования термодинамических явлений в человеческом организме, которые обусловлены биохимическими и теплообменными процессами. Показано, что процесс переноса тепловой энергии за счет работы сердечно-сосудистой системы есть колебательным, амплитуда которых определяется температурой биохимических преобразований, а собственная частота - работой сердца, состоянием сосудистой системы, а также процессом теплопереноса в окружающую среду.

Ключевые слова: термодинамика, явление, организм, человек, сердце, сосуды, колебания, частота, теплоперенос, тепловая энергия, заболевание.

УДК 681.586.773

Физические модели преобразований электрического импульса в магнито-стрикционном преобразователе / А. И. Шаповалов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Харків: НТУ «ХП», 2014. – № 19 (1062). – С. 48-58. – Бібліогр.: 8 назв. - ISSN 2079-4525.

Показано, что измерение уровня жидкости магнито-стрикционным методом основано на реологических переходах возбуждающего импульса волновода в ультразвуковые колебания. Исследованы процессы преобразования токового импульса в энергию электромагнитного поля и влияние на его магнитное поле. Показано, что измерение электромагнитного поля по длине волновода есть нелинейной, что влияет на диапазон измерительного контроля уровня таким методом.

Ключевые слова: измерение, преобразование, магнито-стрикция, метод, ток, импульс, волновод, ультразвук, магнит, поле.

УДК 539.124.18.08

Метод измерения поглощенной дозы при обработке продукции на линейном ускорителе электронов / Д. В. Титов, Е. Л. Ноздрачёва, В. А. Шевченко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Харків : НТУ «ХП», 2014. – № 19 (1062). – С. 58–64. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-4525.

Рассмотрена схема проведения облучения продукции медицинского и иного назначения с целью стерилизации, а также контроля стерилизационной дозы на ускорителе электронов ЛУ-10 ННЦ «ХФТИ» с энергией 10МэВ. Приведен пример дозиметрического сопровождения технологии с использованием дозиметров Harwell RedPerspex 4034 и дозиметрической плёнки RISO В-3. Показан пример эффективности работы данного метода дозиметрии и его приборного обеспечения.

Ключевые слова: Технологическая дозиметрия, поглощенная доза, линейный ускоритель электронов, дозиметр, дозиметрическая пленка

. УДК 621.318

Классификация полиградиентных магнитных сепараторов / А. Шведчикова, Ю. А. Романченко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Харків : НТУ «ХП», 2014. – № 19 (1062). – С. 64–76. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-4525.

Проанализированы функциональные и конструктивные особенности существующих разновидностей полиградиентных магнитных сепараторов. На основе анализа информационных источников установлено, что в магнитных сепараторах данного класса нашли преимущественное применение стержневые, пластинчатые, шарообразные и решетчатые полиградиентные (гетерогенные) среды. Построена классификация магнитных сепараторов, учитывающая структурные свойства полиградиентных сред.

Ключевые слова: магнитный сепаратор, полиградиентная среда, магнитное поле, классификация.

УДК 616 – 073.65

Применение моделей прогнозирования при многомерном контроле процессов загрязнения / Н. А. Любимова // Вісник НТУ «ХП», Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Харків : НТУ «ХП», 2014. – № 19 (1062). – С. 76–83. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-4525.

Представлены результаты сравнительного анализа дисперсии ошибок прогнозирования (экстраполяции второго порядка) для двух вариантов обработки первичной информации при контроле многомерных (многокомпонентных) процессов промышленного загрязнения окружающей среды. Особенность исследуемой модели прогнозирования – коррекция условного математического ожидания случайного вектора входных сигналов на величину параметра нестационарности, учитывающего асимметрию закона распределения контролируемого процесса. Предложенная модель контроля может быть использована в экологическом мониторинге энергоемких предприятий.

Ключевые слова: модель, прогнозирование, многокомпонентное, загрязнение, экология.

УДК 699.8+69.5; УДК 620.179.14

Состояние методов и средств контроля толщины покрытий (обзор) / С. Н. Глоба, Ле Чи Хиеу, Г. М. Сучков, А. А. Хлыбов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Харків : НТУ «ХП», 2014. – № 19 (1062). – С. 84–112. – Бібліогр.: 98 назв. – ISSN 2079-4525.

В работе проанализированы современные методы и средства контроля толщины неэлектропроводящих защитных покрытий на электропроводящем основании. Описаны достоинства, недостатки, возможности и условия применения основных методов контроля толщины покрытий. Установлена перспективность применения вихретокового метода. Описан принцип работы вихретокового метода контроля. Выделены три основных метода, которые целесообразно использовать для контроля толщины покрытий. Рассмотрены вихретоковые преобразователи и способы их подключения. Показана необходимость применения трансформаторных компенсированных преобразователей и исследования их возможностей.

Ключевые слова: контроль толщины покрытий, неэлектропроводящее покрытие, электропроводящее основание, вихретоковый метод, вихретоковый преобразователь, возбуждающая катушка, регистрирующая катушка.

УДК 620.179.14

Вихретоковый контроль глубины упрочненного слоя изделий в режиме реального времени / Б. М. Горкунов, Н. Н. Сиренко, А. А. Авраменко, А. А. Тищенко //

Вісник НТУ «ХП». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Харків : НТУ «ХП», 2014. – № 19 (1062). – С. 112–117. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-4525

В работе рассмотрен алгоритм функционирования вихретокового устройства для контроля глубины упрочненного слоя металлических изделий, реализующий измерительные, расчетные и управляющие операции. Данный алгоритм позволяет осуществлять ряд процедур по определению контролируемого параметра и проводить статистическую обработку результатов контроля. На основе приведенного алгоритма разработана блок-схема и рассмотрен принцип действия автоматизированного вихретокового устройства. Сделан вывод о том, что данное устройство позволяет проводить контроль объектов в режиме реального времени, что значительно уменьшает временные затраты и повышает эффективность производства.

Ключевые слова: вихретоковый контроль, глубина упрочненного слоя, амплитуда, фаза, автоматизированное устройство.

УДК 620.179.16

Разработка стохастической модели ультразвукового неразрушающего контроля изделий порошковой металлургии / Р. М. Галаган // Вісник НТУ «ХП». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Харків: НТУ «ХП», 2014. – № 19 (1062). – С. 117–125. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-4525.

Обосновано разработку стохастической модели ультразвукового неразрушающего контроля изделий порошковой металлургии в виде линейной системы, которая имеет порождающий процесс, собственную импульсную реакцию и отклик при наличии дефекта. В результате выделены информационные параметры, по которым можно проводить классификацию технического состояния изделия – изменение математического ожидания и дисперсии выборки измеренных значений скорости ультразвука.

Ключевые слова: изделия порошковой металлургии, физико-механические свойства, стохастическая модель, ультразвуковой контроль, скорость ультразвука.

УДК 504.064.3:66.085

Четырехканальный анализатор импульсов для одновременной регистрации альфа-, бета-, гамма- и нейтронного излучений / А. Н. Григорьев, З. В. Билык, Ю. В. Литвинов, А. В. Сақун, В. В. Марущенко, О. Ю. Чернявский // Вісник НТУ «ХП». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Харків: НТУ «ХП», 2014. – № 19 (1062). – С. 125–132. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-4525.

Разработана аппаратура и способ для одновременного измерения энергетических спектров альфа-, бета-, гамма- и нейтронного излучения с применением полупроводниковых блоков детектирования, аналого-цифровых преобразователей, персонального компьютера и программного обеспечения. Экспериментальные исследования с использованием источников альфа-, бета-, гамма-излучения доказали работоспособность прибора с достаточно высокими техническими параметрами, такими как: точность и стабильность своих характеристик.

Ключевые слова: альфа-источник, бета-источник, гамма-источник, нейтронный источник, многоканальный анализатор импульсов, кремний, теллурид кадмия.

УДК 620.179.14

Вихретоковый дефектоскоп с телеметрическим каналом связи. / А. Г. Протасов, К. Н. Серий, А. Л. Дугин, В. Ф. Петрик // Вісник НТУ «ХП». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Харків: НТУ «ХП», 2014. – № 19 (1062). – С. 132–139. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2079-4525.

Предложено схему дефектоскопа для вихретокового неразрушающего контроля, который имеет телеметрический канал связи с устройством обработки и отображения

информации. Созданный дефектоскоп имеет малый вес и размеры, что позволяет использовать его для контроля сложных конструкций. Телеметрический канал связи осуществляет обмен данными за счет беспроводной технологии **Bluetooth**, что даёт возможность привлекать к обработке этих данных мощную вычислительную технику. Библиогр.: 4.

Ключевые слова: вихретоковый дефектоскоп, телеметрический канал связи.

УДК 697.34

Информационно-измерительная система для выявления мест теплопотерь в подземных тепловых сетях при проведении энергоаудита / И.Р. Ващишак // Вісник НТУ «ХП». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Харків: НТУ «ХП», 2014. – №19(1062). – С. 139-146. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-4525.

В статье рассмотрены причины сверхнормативных потерь тепловой энергии при ее транспортировке от источника к потребителю подземными тепловыми сетями. Предложено информационно-измерительную систему для контроля подземных тепловых сетей бесканальной прокладки с трубопроводами в пенополиуретановой тепловой изоляции, в основу работы которой положено комплексное применение трех информативных параметров (температуры приповерхностного слоя почвы, акустического давления на поверхности почвы и тока в стенках трубопровода). Разработана методика проведения экспериментальных исследований с помощью информационно-измерительной системы, которая прошла успешную апробацию.

Ключевые слова: тепловые потери, подземные тепловые сети, информационно-измерительная система, дефект, информативный параметр, функциональная схема.

УДК 681.518.54

Исследование влияния систематических погрешностей измерения на риски функциональной диагностики / Мигушенко Р.П. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Харків: НТУ «ХП», 2014. – № 19 (1062). – С. 147–154. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-4525.

В данной статье рассмотрены и проанализированы вероятностные модели измерительных преобразований и определены условия многомерной коррекции смещений в оценках коэффициентов линейной решающей функции за счет планирования многомерного метрологического эксперимента при первичных измерительных составляющих входного вектора измерительных величин в рабочем режиме функционирования ИИС функциональной диагностики, а также доказано, что коррекция вероятностей ошибок диагностики реализуется правильным выбором составляющих погрешностей

Ключевые слова: вероятность ошибки, дисперсия, достоверность, погрешность, контроль

УДК 535.345.1, 622.23.05

Разработка и обоснование структуры измерительной системы контроля взрывоопасных пылегазовых смесей в шахтной выработке / Р. И. Соломичев, А. В. Вовна, А. А. Зори // Вісник НТУ «ХП». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Харків : НТУ «ХП», 2014. – № 19 (1062). – С. 154-163. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-4525.

На основе проведенных исследований получено многопараметрический функционал, который определяет вероятностные характеристики критических пределов взрывчато-пылегазовой смеси в шахтном воздухе. Благодаря данному функционалу разработано структуру компьютеризированной ИИС контроля концентраций взрывоопасных компонент рудничной атмосферы, которая включает автоматический канал измерения концентрации $(0 \div 3) \text{ г/м}^3$ и дисперсности $(1 \div 10) \text{ мкм}$ угольной пыли, концентрации метана $(0 \div 4) \text{ \%}$, температуры и влажности воздуха $(0 \div 10) \text{ г/м}^3$.

Ключевые слова: измеритель, угольная пыль, оптико-абсорбционный, концентрация, алгоритм, взрывчатость.

УДК 534.232.082.72; 620.179.16; 620.179.17

Математическое моделирование преобразователя емкостного типа в режиме возбуждения ультразвуковых волн в металлах. Часть 1 / О. Н. Петрищев, Г. М. Сучков, Е. Л. Ноздрачева, М. И. Романюк // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Харків : НТУ «ХПІ», 2014. – № 19 (1062). – С. 163-175. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-4525

Предложена математическая модель емкостного преобразователя для излучения ультразвуковых колебаний в металлическое изделие. Получено выражение для расчета поверхностной плотности статического электрического заряда на поверхности металлического образца. Выявлены основные влияющие факторы, определяющие плотность зарядов на поверхности изделия и, соответственно, мощность и диаграмму направленности излучаемого ультразвукового поля.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль, емкостной преобразователь, плотность электрического заряда, электрическое поле, емкость, ультразвуковые колебания.

ABSTRACTS

Procedure of measurement uncertainty estimate for elastic wave velocity at stage-by-stage control over specimens from powder materials / Bezimyanniy Y. G., Evko I.G., Komarov K. A., Talko O. V. // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tekhnika.–Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. – № 19 (1062). – P. 3–14. – Bibliogr.: 9. –ISSN 2079-4525.

The paper gives the procedure of error estimate for measuring elastic wave velocity by the pulse method at different stages of powder material formation using current technologies. Peculiarities of measurements are associated with the changing form of specimens at every stage of their formation in the absence of plane-parallel surfaces traditional for ultrasonic measurements. The paper gives error budget, formulas to calculate correlation coefficients for the components of net inaccuracy and correlation factors, and the results of measurements and error estimate for real specimens. The error budget is considered on the basis of Ishikawa diagram plotted for the pulse acoustic method. The error for the measured elastic wave velocity is given in the separate tables for two different technological impacts on different specimens from powder iron. The specimens are of a cylindrical form with the symmetric cones that have truncated apexes and depressed from above and from below. Also, the values of elastic wave velocity with error are given as diagrams. It has been shown that the change in the informative values of elastic wave velocity exceeds appreciably the error of their measurement.

Key words: measurement error, elastic wave velocity, ultrasonic pulse method, powder material.

Comparison of dynamic methods for evaluating elastic characteristics of different materials / Y. G. Bezimyanniy, E. A. Kozyratskyi, A. N. Kolesnykov, L. O. Teslenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tekhnika. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 19 (1062). – P. 15–22. – Bibliogr.: 12. – ISSN 2079-4525.

The paper gives calculation results and experimental evaluation of elastic characteristics for different materials using pulse and resonant methods. Widely used materials and materials of specific properties have been selected for investigations. It has been established that the difference between the values of modulus of elasticity obtained by the methods changes depending on

the material properties and can amount to 15 %. As the measurement method must not influence the objective values of material elastic properties, one should search for the ways of improving these methods. One of such ways may be related to adapting the measurement method to the material under investigation. The increase in discrepancy between the values of modulus of elasticity evaluated by the pulse and resonant methods is conditioned by increasing Poisson coefficient and/or heterogeneity in the material. The latter results in unequal conditions for interaction between an elastic wave and material structural elements for different methods. The dissimilarity may be associated with different mechanisms, for example, the stress distribution inside the material or higher attenuation on the frequencies of the pulse method as a result of elastic wave scattering and absorption at the structural elements in the material.

Keywords: modulus of elasticity, elastic wave velocity, resonance, resonant method, pulse method.

Mathematical models of thermodynamic processes of the biological organism /I. I. Stentsel, S. V. Pavlov, K. A. Litvinov// Bulletin of NTU "KhPI". Series: Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tekhnika. – Kharkiv: NTU "KhPI" 2014. – № 19 (1062). – P. 23-35. – Bibliogr.: 14. – ISSN 2079-4525.

Based on the results of clinical studies of temperature changes healthy and sick man of principles rheological transitions of the heat energy and zero-gradient method the mathematical model of the thermodynamic processes of a biological organism. The following reasons for the change of the thermodynamic fields of healthy and sick person. The amplitude of temperature changes influencing factors such as the size of a normal body temperature and blood circulation time, and mass flow of blood in the circulatory system, as well as natural options. Theoretical foundations of heat transfer in a biological organism, provided that the latter is in a certain environment with ideal insulating properties. The heat that is emitted as a result of biochemical reactions in some part of the body, distributed by rheological transitions through the walls of blood vessels to blood flow and evenly spread throughout its volume. In this case assumed that the heat from its source (shocked region of the body) is stored in the volume of the circulatory system and is transmitted uniformly in time muscular and other parts of the body. The amplitude of daily temperature for a healthy body is practically constant and is determined by the degree of attenuation of the temperature field, which depends on the gradient of change of thermal energy, the volume flow of blood in the circulatory system, the current amount of thermal energy and volume of the circulatory system.

Keywords: temperature gradient, amplitude, speed, infection, disease, circulatory system, biological organism, flow, flow switch, thermal energy.

Mathematical models of human heat exchange processes with external flow of heat / I. I. Stentsel, S. M. Zlepko, A. W. Ryabichenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tekhnika.–Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. – № 19 (1062). – P. 36–48. – Bibliogr.: 16. – ISSN 2079-4525.

The investigation of thermodynamic phenomena in the human body that are caused by biochemical and heat exchange processes. It is shown that the process of heat transfer through the cardiovascular system is oscillating, amplitude is determined by the temperature of the biochemical changes and natural frequency - the heart, state circulatory system and process heat transfer to the environment. It is shown that the natural frequencies of heat and mass transfer in the normal state of the organism are synchronized both temperature and time. If you violate synchronization diseases arise due to the frequency of the beating, leading to drastic temperature changes. Theoretical study of thermodynamic processes which take place in the human body show that current changes its temperature can be assessed health status, or perform diagnosis of many diseases. It is shown that temperature control rights is oscillating. The critical frequency temperature fluctuations cause convulsive condition of the body, accompanied as

small and large amplitude, which is determined by changes in temperature and biochemical process of the cardiovascular system, and accordingly, the muscular system. The critical frequency of temperature fluctuations is individual for each person.

Keywords: Thermodynamics, phenomenon, body, human, heart, blood vessels, oscillation frequency, heat transfer, heat, disease.

Physical model transformations electrical pulse in magnetostrictive transducers / A.I. Shapovalov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tehnika.–Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. – № 19 (1062). – P. 48–58 - Bibliogr.: 8. - ISSN 2079-4525.

Measurement of liquid mediums magnetostrictive method based on the transformation of the electric pulse excitation of the waveguide of ultrasonic vibrations during the passage of the scope of the magnetic field of permanent magnet located on the surface of a floating liquid medium float. The processes of transformation of the current pulse to the energy of the electromagnetic field and the influence of the magnetic field transducer. It is shown that the change in the electromagnetic field along the length of the waveguide is nonlinear, which affects the measuring range of this control method. Theoretical and experimental study of magnetostrictive controls the level of liquid media shows that the magnetic flux created at the elementary element waveguide defined amplitude current pulse and magnetic penetration magnetostrictive material and its cross section. Problem is to determine how the electromagnetic field changes in the interaction with the magnetic field of a permanent magnet, resulting in a ultrasonic electrical signal.

Keywords: measurement, transformation, magnetostriction method, current, impulse, waveguide, ultrasound, magnetic field. measurement, transformation, magnetostriction method, current, impulse, waveguide, ultrasound, magnetic field.

Method of measurement of absorbed dose in the processing of products on the linear electron accelerator / D. V. Titov, K. L. Nozdrachova, V. A. Shevchenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tehnika. - Kharkiv : NTU "KhPI" 2014. – № 19(1062). – P. 58–64. – Bibliogr. : 5. – ISSN 2079-4525.

A scheme of the irradiation of medical products and other purposes to sterilize and control of sterilization dose for electron accelerator LU- 10 National Science Center " Kharkov Institute of Physics and Technology " with energy 10 MeV. The description and characteristics of the linear accelerator. An example of dosimetric support technology using dosimeters Harwell Red Perspex 4034 and dosimetric film RISO B- 3, as well as the characteristics of these two types of dosimeters, and calibration curve for dosimetric film. Discussed and compared with each other, indicating positive and negative qualities. Shows an example of the efficiency of the method and its dosimetry instrumentation, which is also present description spectrophotometers with which determined the absorbed dose.

Keywords: Technological dosimetry, electron beam, absorbed dose, linear electron accelerator, dosimeter, dosimetry film

Klassifikacija poligradientnyh magnitnyh separatorov / I. A. Shvedchikova, Ju. A. Romanchenko // Bulletin of NTU "KhPI." Series: Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tehnika. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 19 (1062). – P. 64–76. – Bibliogr.: 14 – ISSN 2079-4525.

The use of polygradient magnetic separators in various technological processes is considered in the article. Found that magnetic separators are widely used in practice for the extraction of weakly magnetic or fine ferromagnetic inclusions with sizes about 0.05 mm or less from non-magnetic media. Functional and structural features of existing varieties of polygradient

magnetic separators are analyzed. Based on the analysis of information sources identified that in magnetic separators of this class are most commonly used core, lamellar, spherical and lattice polygradient (heterogeneous) media. Determined that the processes taking place in the working body of the separator - polygradient media, from theoretical and practical aspects are most important. Classification of magnetic separators in which taking into account the structural properties of polygradient media determined four major types of magnetically separating devices is presented.

Keywords: magnetic separator, polygradient media, magnetic field, classification.

Application forecasting model of multivariate process control pollution / N. A. Lyubimova // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tekhnika. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. – № 19 (1062). – P. 76–83. – Bibliogr.: 12. – ISSN 2079-4525

The results of comparative analysis of variance of prediction errors (second-order extrapolation) for two variants of processing of information under the control of multidimensional (multi-components) processes of industrial pollution. The peculiarity of the studied model prediction - correction of the conditional expectation of the random vector of input signals on the value of unsteadiness parameter that takes into account the asymmetry of the distribution law of the controlled process. A model of two-stage computational procedures predict. We can distinguish two ways to use computational procedures in a multivariate forecasting processes in multicomponent emission pollution. The comparative analysis of the options calculated conversion conversion procedures primary information in the test results shows that: Using extrapolation (predictive filters) should take into account the sequence of conversion steps; more effective in the control of random processes forecasting short-term procedures. The proposed control model can be used in environmental monitoring intensive enterprises.

Keywords: model, prediction, multi-component, pollution, ecology.

The state of methods and devices of testing of coating thickness (review) / S. N. Hloba, Le Chi Hieu, G. M. Suchkov, A. A. Hlybov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tekhnika. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 19 (1062). – P. 84–112. – Bibliogr.: 98. – ISSN 2079-4525.

This paper analyzes the modern methods and devices of testing the thickness of non-conductive coatings on conductive base. Describes the strengths, weaknesses, opportunities and conditions for application of the basic methods of testing of coating thickness. Installed application prospects of the eddy-current method. Describes the theoretical basis of the principle of eddy-current method of testing of coating thickness. The operational principle of eddy-current inspection method. The eddy-current method allows of testing as a non-ferromagnetic and so ferromagnetic products. Three main methods that should be used to testing the thickness of the coatings. Eddy-current converters and considered ways to connect them. This paper describes the classification eddy-current transducers and connection method of eddy-current transducers. Shows the need for a transformer compensated converters and research their options.

Keywords: testing of coating thickness, non-conductive coating, conductive base, eddy-current method, eddy-current transducer, exciting coil, recording coil.

Eddy current testing of the depth of the hardened layer of products in real time / B. M. Gorkunov, N. N. Sirenko, A. A. Avramenko, A. A. Tyshchenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tekhnika. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 19 (1062). – P. 112–117. – Bibliogr.: 3. – ISSN 2079-4525.

In this paper, the algorithm of functioning of the eddy current device for control of the depth of the hardened layer of metal products, which realizes measurement, calculation and control operations has been given. This algorithm allows carrying out the series of procedures, by definition of the controlled parameter and conducting statistical analysis of control results.

The choice of structure of algorithm of functioning of eddy current device depends on the specific problem. On the basis of the resulted algorithm a block diagram is developed and principle of operation of the automated eddy current device is considered. The conclusion that this device allows conducting control of objects in real time, which significantly diminishes temporal expenses and improves the efficiency of production have been made.

Keywords: eddy current testing, the depth of the hardened layer, amplitude, phase, automated device.

Development of statistical model for ultrasonic nondestructive testing of products of powder metallurgy / R. M. Galagan // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tekhnika. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 19 (1062). – P. 117 – 125. – Bibliogr.: 9. – ISSN 2079-4525.

Described the problems of development of stochastic model of ultrasonic nondestructive testing of powder metallurgy products. Performed the analysis of influence of porosity (as main characteristics, causes physicomechanical properties) on the ultrasonic velocity in powder metallurgy products. It is shown that the result of ultrasonic testing of such products affect a significant amount of independent factors, which are divided into two groups: measuring and technological. Justified the development of a stochastic model of NDT as a linear system that has a parent process, its own impulse response and the response in the presence of a defect. As a result, allocated information parameters, which can classify the state of product - changing the expectation and variance of samples of the measured values of ultrasonic velocity. Proposed for analysis of inspection results use the dispersion analysis. Classification of technical condition of product is based on an analysis of the changes of mathematical expectation and variance for samples of measured values of ultrasonic velocity.

Keywords: powder metallurgy products, physicomechanical properties, stochastic model, ultrasonic testing, ultrasound velocity.

Four-channel analyzer of pulse for simultaneous registration alpha-, beta-, gamma- and neutron radiation / A. N. Grigoryev, Z. V. Bilyk, Yu. V. Litvinov, A. V. Sakun, V. V. Marushchenko, O. Yu. Chernyavsky // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tekhnika. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 19 (1062). – P. 125 – 132. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-4525.

The apparatus and the method for simultaneous measurement of energy spectrum alpha-, beta-, gamma- and neutron radiation by means of semiconductors detection units, analog-to-digital converters, personal computer and software has been developed. The next in quality semiconductor detectors for dimension of energy spectrum have been used: alpha-radiation – Si detector size 10×10 mm, that was covered course of aluminum thickness 1 micrometer; beta-radiation – Si detector, before that was distributed absorber made of aluminum thickness 30 micrometer; neutron radiation – Si detector, that was placed inside converter made of polyethylene; gamma-radiation – CdTe detector size 5×5×3 mm. Finding spectrums make it possible for to discriminate alpha-, beta-, gamma-sources. The experimental investigations with the using of the sources of alpha-, beta-, gamma-radiation have been proved device functionality with sufficient high engineering data, such as: accuracy and stability of their characteristics.

Keywords: alpha-source, beta-source, gamma-source, neutron source, multichannel analyzer of pulse, silicon, cadmium telluride.

The eddy current defectoscope with telemetric communications channel / A. G. Protasov, K. M. Seriy, O. L. Dugin, V. F. Petrik. // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tekhnika. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 19 (1062). – P. 132– 139. – Bibliogr.: 4. – ISSN 2079-4525.

It is proposed the diagram of an eddy current defectoscope for nondestructive testing which has telemetric connection with the information processing and view device. The introduced defectoscope has possibility to connect some of transducers or defectoscopes to a singular view device (computer). The telemetric channel uses **Bluetooth** wireless technology and can provide communication in two directions for large quantity of parameters. They are oscillograms, a received signal's amplitude and phase, a frequency and amplitude of the excitation signal, an operation threshold of the audio alarm and others. The defectoscope engineering solution gives resources to adjust features of the measuring instrument during operating modes and automation of testing processes with following data storage in the computer memory. The created defectoscope has small size and weight. It can be used for testing of the complex construction. The telemetric communication channel makes it possible for using high-powered computer to signal processing. The results of experimental investigation confirm of possibility to test metallic samples by proposed defectoscope. Bibliogr.: 4.

Keywords: eddy current defectoscope, telemetric communications channel.

Information and measuring system for detection of heat losses of underground heat networks during energy audit / I. Vashchysyak // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tekhnika. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. – № 19(1062). – P. 139-146. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2079-4525.

The causes of excessive heat losses during transportation from the source to the consumer by the buried heating systems are described in the article. The developed information and measuring system for the duct-free buried heating systems with pipeline in polyurethane foam thermal insulation, based on a complex usage of three information-bearing parameters (the temperature of the near-surface soil, the acoustic pressure afloat the soil and the current in the pipelines wall) is proposed. The technique of experimental investigations by dint of information and measuring system that has been successfully tested is developed.

Keywords: heat losses, buried heating systems, information and measuring system, defect, information-bearing parameters, function chart.

Investigation of the influence of systematic measurement errors on the risks of functional diagnostics/ Mygushchenko R.P. // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tekhnika. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 19 (1062). – P. 147 – 154. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-4525.

In this article the considered and analysed probabilistic models of measuring transformations and certain terms of multidimensional correction of displacements are in the estimations of coefficients of linear determine function due to planning of multidimensional metrology experiment at the primary measuring of constituents of entrance vector of measuring sizes in the operating condition of functioning of IMS of functional diagnostics and it is well-proven that the correction of probabilities of errors of diagnostics as the first so second family can be executed due to the correct choice of betweenness additive and multiplicative systematic error primary transducing to multidimensional functional diagnostics. In the article the built and analysed informative model of procedure of diagnostics, that takes into account the requirements of plan of diagnostic experiment and probabilistic properties of mathematical model of this procedure and realizable comparative analysis of indexes of efficiency of diagnostics and choice of indexes that characterize objectively

Keywords: probability of error, variance, probability, uncertainty, control

Development and justification of the measuring system structure of explosive mixtures control of dust and gas in mine workings / R. I. Solomichev, A. V. Vovna, A. A. Zori

// Bulletin of NTU "KhPI". Series: \cdot Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tekhnika. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 19 (1062). – P. 154–163. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2079-4525.

Were further developed a mathematical model based on empirical data MakNII, which allowed us to perform research and set explosive concentration limits of components dust-gas mixture. The structure of the explosive dust-gas mixtures control measuring system from proposed parametric functional which incorporates implies optical absorption measurement channels of concentrations (from 0 to 3 g/m³) and the dispersion of coal dust (1 ÷ 10 μ m) on the basis of two-beam method, the concentration of methane (from 0 to 4 vol%), feed temperature (+5 to +35 °C) and humidity (0 ÷ 10 g/m³). Designed meter of coal dust weighted concentration on the basis of two-beam optical absorption method which can work in automatic continuous mode with the following main mine atmosphere destabilizing factors as changing temperature, dispersion of dust particles measured aerosol optical components dust meter. A computerized algorithm of the measuring meter which shows the parameters measuring principle of dust-gas component with mine atmosphere destabilizing factors, assessment of the current situation in the mine development and taking into account the dynamics of the change of these parameters provides prediction of occurrence of explosive situation in the mine.

Keywords: meter, coal dust, optical absorption, concentration, algorithm, explosiveness.

Mathematical modeling of capacitive transducer mode excitation of ultrasonic waves in metals. Part 1 / O. N. Petrishchev, G. M. Suchkov, E. L. Nozdrachova, M. I. Romanyuk // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tekhnika. - Kharkiv : NTU "KhPI" 2014 . - №19 (1062). – P 163-175 . - Bibliogr. : 8 titles . - ISSN 2079-4525.

In this article, the mathematical model of the capacitive ultrasonic transducer for emitting ultrasonic vibrations into a conductive product is developed.

The first step to evaluate the effect of polarizing the electrostatic field on the formation of Coulomb forces in the surface layer of the metal sample is considered. An electrode is located at a predetermined distance from the metal surface.

A closed solution electrostatics problem for a piecewise-homogeneous environment in which the half-filled metal with finite values of electrical conductivity and magnetic permeability is obtained. An expression for the calculation of the surface density of a static electric charge on the surface of the metal sample is obtained.

Identified the main influencing factors determining the spatial distribution of the charge density on the surface of products that will form the radiation pattern and the power output of the ultrasonic field.

Keywords: ultrasonic testing, the capacitive transducer, the electric charge density, electric field, capacitance, ultrasonic vibrations.

ЗМІСТ

<i>Безмянний Ю. Г., Євко І. Г., Комаров К. А., Талько О. В.</i> Методика оцінки похибки вимірювання швидкості поширення пружної хвилі при поетапному контролі зразків з порошкових матеріалів.....	3
<i>Безмянний Ю. Г., Козирацький Е. А., Колесников А.Н., Тесленко Л.О.</i> Сравнение динамических методов при определении упругих характеристик разных материалов	15
<i>Стенцель Й. І., Павлов С. В., Літвінов К. А.</i> Математичні моделі термодинамічних процесів біологічного організму.....	23
<i>Стенцель Й. І., Зленко С. М., Рябіченко А. В.</i> Математичні моделі теплообмінних процесів людини при зовнішньому стоку теплової енергії	36
<i>Шаповалов О. І.</i> Фізичні моделі перетворень електричного імпульсу в магнітострикційному перетворювачі.....	48
<i>Титов Д. В., Ноздрачєва Е. Л., Шевченко В. А.</i> Метод измерения поглощенной дозы при обработке продукции на линейном ускорителе электронов.....	58
<i>Шведчикова И. А., Романченко Ю. А.</i> Классификация полиградиентных магнитных сепараторов.....	64
<i>Любимова Н. А.</i> Применение моделей прогнозирования при многомерном контроле процессов загрязнения.....	76
<i>Глоба С. Н., Ле Чи Хиеу, Сучков Г. М., Хлыбов А. А.</i> Состояние методов и средств контроля толщины покрытий (обзор).....	84
<i>Горкунов Б. М., Сиренко Н. Н., Авраменко А. А., Тищенко А. А.</i> Вихретоковий контроль глибини упрочненого слоя изделий в режиме реального времени.....	112
<i>Галаган Р. М.</i> Розробка стохастичної моделі ультразвукового неруйнівного контролю виробів порошкової металургії.....	117
<i>Григор'єв О.М., Білик З.В., Литвинов Ю.В., Сакун О.В., Марущенко В.В., Чернявський О.Ю.</i> Чотириканальний аналізатор імпульсів для одночасної реєстрації альфа-, бета-, гамма- та нейтронного випромінювань.....	125

Протасов А. Г., Серий К. М., Дугін О. Л., Петрик В. Ф. Вихрострумовий дефектоскоп з телеметричним каналом зв'язку.....	132
Ващишак І. Р. Інформаційно-вимірювальна система для виявлення місць тепловтрат у підземних теплових мережах при проведенні енергоаудиту.....	139
Мигущенко Р. П. Дослідження впливу систематичних похибок вимірювання на ризики функціональної діагностики.....	147
Соломічев Р. І., Вовна О. В., Зорі А. А. Розробка та обґрунтування структури вимірювальної системи контролю вибухонебезпечних пило-газових сумішей в шахтному виробітку.....	154
Петрищев О. Н., Ноздрачєва Е. Л., Сучков Г. М., Романюк М. И. Математическое моделирование преобразователя емкостного типа в режиме возбуждения ультразвуковых волн в металлах. Часть 1.....	163

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
«ХПІ»**

Збірник наукових праць

Серія:

Електроенергетика та перетворювальна техніка

№ 19 (1062)

Науковий редактор, д-р техн. наук, проф. Г.М. Сучков
Технічний редактор інж. І. Г. Хорошайло

Відповідальний за випуск канд. техн. наук І. Б. Обухова

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21, НТУ «ХПІ».
Кафедра приладів і методів неруйнівного контролю
Тел.: (057) 707-63-08, (057) 707-69-27; e-mail: vestnik-hpi@mail.ru

Обл.-вид. №16-13

Підп. до друку 00.06.2014р. Формат 60x84/16. Папір офсетний.
Друк. офсетний. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 8,0. Облік.-вид.
арк. 10.
Тираж 300 пр. Зам. № 23. Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХПІ». Свідоцтво про державну реєстрацію
суб'єкта видавничої справи ДК №3657 від 24.12.2009
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21