

ВЕСТНИК
НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
«ХПИ»

Сборник научных трудов
«Электроэнергетика и
преобразовательная техника»
12'2010

Издание основано Национальным техническим университетом «Харьковский политехнический институт» в 1999 году

КООРДИНАЦИОННЫЙ СОВЕТ:

Председатель

Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, д-р техн. наук, проф.

Ответственный секретарь

К.А. ГОРБУНОВ, к-т техн. наук, доц.

А.П. МАРЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.;

Е.И. СОКОЛ, д-р техн. наук, проф.;

Е.Е. АЛЕКСАНДРОВ, д-р техн. наук, проф.;

Л.М. БЕСОВ, д-р ист. наук, проф.;

А.В. БОЙКО, д-р техн. наук, проф.;

Ф.Ф. ГЛАДКИЙ, д-р техн. наук, проф.;

М.Д. ГОДЛЕВСКИЙ, д-р техн. наук, проф.;

А.И. ГРАБЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.;

В.Г. ДАНЬКО, д-р техн. наук, проф.;

В.Д. ДМИТРИЕНКО, д-р техн. наук, проф.;

И.Ф. ДОМНИН, д-р техн. наук, проф.;

В.В. ЕПИФАНОВ, к-т техн. наук, проф.;

Ю.И. ЗАЙЦЕВ, к-т техн. наук., проф.;

П.А. КАЧАНОВ, д-р техн. наук, проф.;

В.Б. КЛЕПИКОВ, д-р техн. наук, проф.;

С.И. КОНДРАШОВ, д-р техн. наук, проф.;

В.М. КОШЕЛЬНИК, д-р техн. наук, проф.;

В.И. КРАВЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.;

Г.В. ЛИСАЧУК, д-р техн. наук, проф.;

В.С. ЛУПИКОВ, д-р техн. наук, проф.;

О.К. МОРАЧКОВСКИЙ, д-р техн. наук, проф.;

В.И. НИКОЛАЕНКО, к-т ист. наук, проф.;

П.Г. ПЕРЕРВА, д-р экон. наук, проф.;

В.А. ПУЛЯЕВ, д-р техн. наук, проф.;

М.И. РЫЩЕНКО, д-р техн. наук, проф.;

В.Б. САМОРОДОВ, д-р техн. наук, проф.;

Г.М. СУЧКОВ, д-р техн. наук, проф.;

Ю.В. ТИМОФЕЕВ, д-р техн. наук, проф.;

Н.А. ТКАЧУК, д-р техн. наук, проф.;

Государственное издание

Свидетельство Госкомитета по
информационной политике Украины
КВ № 5256 от 2 июля 2001 года

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Ответственный редактор:

Г.М. СУЧКОВ, д-р техн. наук, проф.

Ответственный секретарь:

Н.Н. ЮДАНОВА;

Е.Л. НОЗДРАЧЕВА;

Е.И. СОКОЛ, д-р техн. наук, проф.;

В.Б. КЛЕПИКОВ, д-р техн. наук, проф.;

Б.В. КЛИМЕНКО, д-р техн. наук, проф.;

В.В. ВОИНОВ, канд. техн. наук, доц.;

Б.М. ГОРКУНОВ, канд. техн. наук, доц.;

В.П. СЕБКО, д-р техн. наук, проф.;

В.С. ЛУПИКОВ, д-р техн. наук, проф.;

А.Г. ГУРИН, д-р техн. наук, проф.;

И.В. ТЮПА, канд. техн. наук, доц.

Адрес редколлегии: 61002, Харьков,
ул. Фрунзе, 21. НТУ «ХПИ».
Каф. ПМНК, тел. (0572) 7076380.

Вісник Національного о технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. "Электроэнергетика и преобразовательная техника". - Харьков: НТУ «ХПИ» - № 12. - 2010. - 208 с.

В збірнику представлено теоретичні та практичні результати наукових досліджень та розробок, що виконані викладачами вищої школи, аспірантами, науковими співробітниками різних організацій та установ.

Для викладачів, наукових співробітників, спеціалістів.

В сборнике представлены теоретические и практические результаты исследований и разработок, выполненных преподавателями высшей школы, аспирантами, научными сотрудниками различных организаций и предприятий. Для преподавателей, научных сотрудников, специалистов.

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ "ХПИ";

Протокол № 5 від 12. 06. 2010 р.

© Національний технічний університет «ХПИ», 2010

Харьков 2010

Й.І. СТЕНЦЕЛЬ, д-р. техн. наук, проф., ТІ СНУ ім. В. Даля,
А.В. РЯБІЧЕНКО, асп., ТІ СНУ ім. В. Даля
В.В. ЄВСЮКОВ, асп., ТІ СНУ ім. В. Даля

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ЗРІВНОВАЖУЮЧОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЗАСОБУ КОНТРОЛЮ РІВНЯ РІДИННИХ СЕРЕДОВИЩ

У роботі наведено результати теоретичних та експериментальних досліджень ультразвукового засобу контролю рівня рідини, побудованого на способі зрівноваження вхідного і вихідного сигналів. Приведені математичні моделі такого засобу контролю, а також результати експериментальних досліджень.

The results of theoretical and experimental researches of ultrasonic device of control of level that is carried out by principle of compensation of input signals and output signals are represented in the work. The mathematical models of this device of control and the results of experimental researches are shown.

Вступ. Відомі ультразвукові засоби контролю (УЗЗК) рівня рідинних середовищ [1], які працюють за принципом вимірювання часу проходження ультразвуковим сигналом (УЗС) подвійної відстані від випромінювача до контролюючої поверхні та визначається рівень за добутом половини вимірюного часу й швидкості ультразвуку в газовому середовищі. Недоліком таких засобів контролю рівня є достатньо велика залежність від зміни параметрів газового середовища, в якому розповсюджується УЗС, і форми сприймаючого сигналу. Як правило, такі УЗС мають максимальний випромінюючий ультразвуковий сигнал, що призводить до появи вторинних ефектів, час дії котрих викликає додаткові похибки вимірювання. У деяких ультразвукових рівнемірах для компенсації зміни параметрів газового середовища використовується реперна пластина, яка встановлена на фіксованій відстані від передавача. За часом проходження УЗС подвійної відстані від передавача до реперної пластини визначається швидкість УЗС. До основних недоліків, які обмежують використання таких рівнемірів, відноситься наявність великої зони нечутливості за рахунок того, що, по-перше, сигнали, які подаються на поверхню рідини та реперну пластину є однаковими, а вплив зміни параметрів газового середовища можна зменшити не більше, ніж на 20-30 % у залежності від фізико-хімічного складу газу. За останній час все більше розповсюдження отримали УЗЗК зі змінним збуджуючим електричним сигналом [2, 3] у залежності від вимірювального рівня рідинного середовища. Такі УЗЗК характеризуються значно меншою зоною нечутливості та незначними вторинними ефектами, але вони мають квадратичну статичну характеристику, що вимагає наявності додаткових блоків обробки вимірювальної інформації.

Постановка задачі. З метою зменшення зони нечутливості та підвищення точності вимірювання УЗЗК за рахунок зменшення впливу зміни фізико-хімічних параметрів газового середовища, через яке розповсюджується УЗС, поставлена задача вирішується за рахунок того, що вимірювання рівня здійснюється за принципом визначення амплітуди збуджуючого сигналу при зрівноваженні УЗС, який сприймається п'єзокерамічним елементом після відбиття від реперної пластини, і такого ж сигналу, який сприймається тим же елементом після відбиття від поверхні контрольованого середовища. На відміну від відомих УЗЗК, в яких амплітуда (а відповідно й енергія) випроміненого УЗС є сталою, в запропонованій моделі амплітуда випроміненого сигналу в залежності від контролюючого рівня змінюється до тих пір, поки різниця між амплітудами прийнятих УЗС від реперної пластини та від вимірюваного рідинного середовища не стане рівною нулю.

Основна частина. Для врахування зміни фізико-хімічних параметрів газового середовища, використовується реперна пластина, яка розташовується в газовому середовищі на фіксованій відстані від п'єзокерамічного випромінювача. Так як відбиті УЗС від реперної пластини та від поверхні вимірювального середовища проходять одне й те ж газове середовище, то при їх зрівноваженні компенсується зміна параметрів цього середовища, що призводить до зменшення похибок вимірювання рівня.

Суть роботи вимірювальної схеми УЗЗК полягає в наступному (див. рис. 1). Вхідний збуджуючий сигнал E_0 , який подається на випромінювач 10, має максимальне значення і відповідає найменшому значенню рівня рідинного середовища в резервуарі. Відбитий від рідинної поверхні 12 вимірювальний УЗС сприймається приймачем 10, внаслідок чого на його виході формується електрорушійна сила E_2 , яка через ключ 9 поступає на запам'ятовуючий пристрій 8. Реперний сигнал (відбитий від реперної пластини) E_1 сприймається тим же приймачем 10, проходить через ключ 9 і запам'ятовується блоком пам'яті 7. Далі цей сигнал подається в аттенюатор 6, в якому зменшується до сигналу E_3 . Сигнали E_2 і E_3 поступають у компаратор 4, в якому порівнюються. Якщо різниця цих сигналів $\Delta E = E_3 - E_2 > 0$, то компаратор видає сигнал на аттенюатор, в якому сигнал E_3 зменшується до тих пір, поки ця різниця не дорівнюватиме нулю. Якщо на виході компаратора різниця сигналів стала рівною нулю, то логічний блок 3 дає дозвіл на проходження сигналів E_1 і E_3 у мікроконтролер 2, в якому розраховується їх відношення $n = E_1 / E_3$, а також значення рівня рідинного середовища. Одночасно мікроконтролер видає сигнал на вхід блоку збудження 5 для формування нового збуджуючого УЗС з амплітудою E_0 .

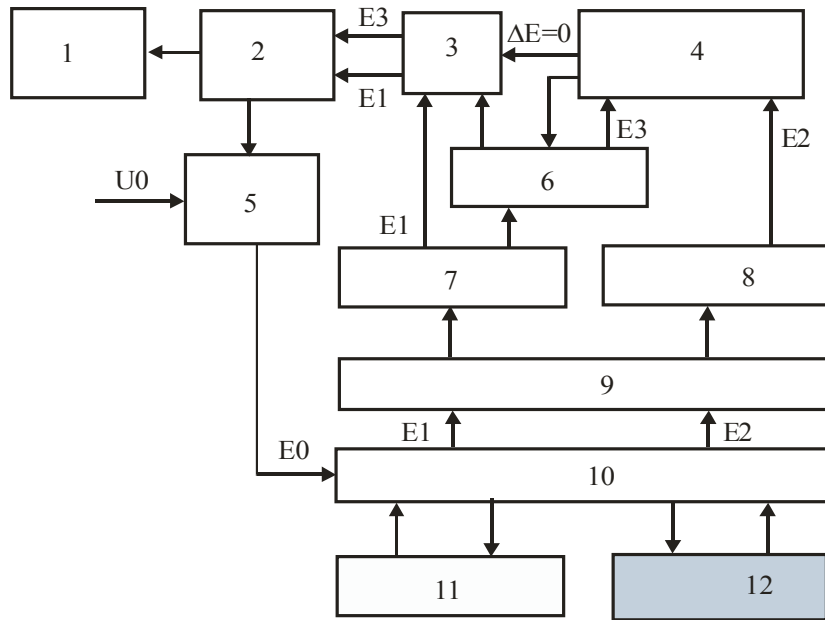


Рис. 1. Структурна схема ультразвукового засобу контролю рівня за нульовим методом

Залежність відбитого УЗС E_1 від відстані R можна описати наступним рівнянням [4, 5]

$$E_1 = N_0 (R_m - R)^2 \left\{ 1 - \exp[-2k_{\Gamma}(R + 2R_p)]^{1/2} + \exp(-2k_{\Gamma}R_p) \right\}^{1/2}, \quad (1)$$

де R_m - максимальна відстань від репера до поверхні рідини, при якій відбитий сигнал ще сприймається приймачем УЗС; $N_0 = \sqrt{\rho_o c \omega E_0 / 2k_0 k_E}$; ρ_o - номінальна густина газу; c - швидкість розповсюдження УЗС в газовому середовищі; ω - кутова частота коливань УЗС; E_0 - збуджуючий сигнал; R, R_p - відстань від джерела УЗС до поверхні рідини і репера відповідно; k_{Γ} - коефіцієнт поглинання УЗС газом.

Для відбитого сигналу від репера можна записати наступне рівняння

$$E_1 = N_0 (R_p)^2 \left\{ 1 - \exp[-2k_{\Gamma}(3R_p)]^{1/2} + \exp(-2k_{\Gamma}R_p) \right\}^{1/2}. \quad (2)$$

У рівнянні (1) і (2) зробимо наступні позначення:

$$\left\{ 1 - \exp[-2k_{\Gamma}(R + 2R_p)]^{1/2} + \exp(-2k_{\Gamma}R_p) \right\} = B_2^2;$$

$$\left\{ -\exp[-4k_{\Gamma}R_p]^{1/2} + \exp(-2k_{\Gamma}R_p) \right\} = B_1^2.$$

Тоді маємо наступну систему рівнянь:

$$E_1 = N_0 B_1^2 R_p^2 \text{ і } E_2 = N_0 B_2^2 R^2. \quad (3)$$

Так як в процесі зрівноваження сигнал E_1 приводиться до сигналу E_2 , то можна записати, що $E_3 = N_0 B_1^2 R_p^2 \cdot n(E_2) = N_0 B_2^2 R^2$ або

$$n(E_2) = \left(\frac{B_2}{B_1} \right)^2 \left(\frac{R}{R_p} \right)^2. \quad (4)$$

Як показано в [6], залежність $n(E_2)$ є квадратичною функцією, тобто $n(E_2) = n^2 E_2$. У стані рівноваги, коли $E_2 = E_3$ маємо $n(E_2) = n^2 E_1$. З врахуванням цього рівняння (4) приймає наступну форму

$$n^2 = \frac{1}{E_1} \left(\frac{B_2}{B_1} \right)^2 \left(\frac{R}{R_p} \right)^2 = \frac{1}{E_1} \left(\frac{B_2}{B_1} \right)^2 \left(\frac{R_m - L_{\delta}}{R_p} \right)^2,$$

де $R_m = R + L_{\delta}$ - максимальна відстань від випромінювача до кінця діапазону вимірювального контролю рівня; L_{δ} - поточне значення вимірювального рівня.

Після вилучення квадратного кореня маємо

$$n = (R_{\max} - L_{\delta}) \left(\frac{B_2}{B_1} \right) \sqrt{\frac{1}{R_p E_1}}$$

або поточне значення рівня рідинного середовища дорівнюватиме

$$L_{\delta} = R_m - n(B_1 / B_2) \sqrt{(R_p E_1)}. \quad (5)$$

Помножимо рівняння (5) на R_p . У результаті маємо, що

$$R_p E_1 = N_0 (R_p)^3 \left\{ 1 - \exp[-2k_{\Gamma}(3R_p)]^{1/2} + \exp(-2k_{\Gamma}R_p) \right\}^{1/2} = N_0 R_p^3 B_1. \quad (6)$$

Підставивши (6) у рівняння (5), отримуємо

$$L_{\delta} = R_m - n \left[R_p \left(B_1^2 / B_2 \right) \sqrt{N_0 R_p} \right]. \quad (7)$$

Рівняння (7) описує статичну характеристику ультразвукового засобу контролю рівня рідинного середовища з зрівноважувочними сигналами. Для сталого газового середовища множник у квадратних дужках є сталою величиною. Тобто для такого випадку позначивши $k_0 = R_p \left(B_1^2 / B_2 \right) \sqrt{N_0 R_p} = const$, отримуємо рівняння лінійної статичної характеристики УЗК у такому вигляді

$$L_{\delta} = R_m - k_0 n, \quad (8)$$

де k_0 - коефіцієнт передачі УЗЗК.

Так як коефіцієнт B_1 при $R_p = const$ залежить тільки від параметрів газового середовища, а параметр B_2 є функцією не тільки параметрів газового середовища, а й відстані R , то статична характеристика має деяке відхилення від лінійної. Нелінійність статичної характеристики особливо сильно збільшується при $R > 5 м$. При $R < 3 м$ нелінійність статичної характеристики незначна, якою можна знехтувати.

Теоретична та статична характеристики УЗК приведені на рис. 2. Відхилення між цими характеристиками незначне і не перевищує 0,15 %, що свідчить про адекватність математичної моделі.

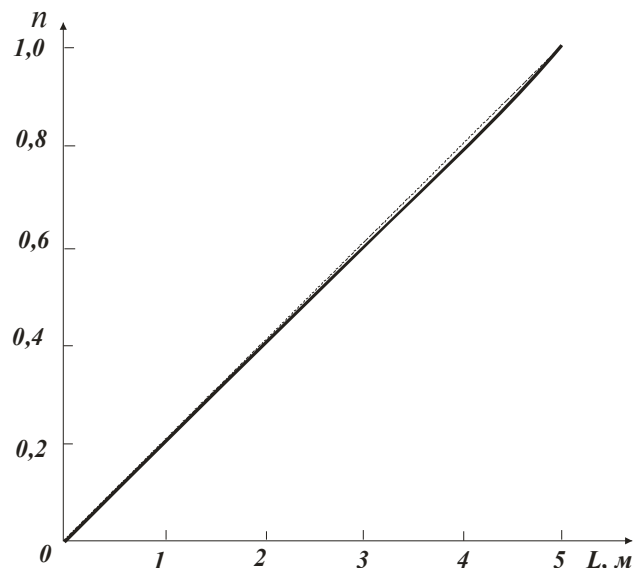


Рис. 2. Статичні характеристики рівнеміра:
пунктирна – теоретична; суцільна- експериментальна

Якщо $L_0 = 0$, тобто коли відбитий від поверхні рідинного середовища сигнал повністю поглинається газовим середовищем і не сприймається випромінювачем 10, то маємо, що $R_m = R_{max} = n \left[R_p \left(\frac{B_2^2}{B_1^2} \right) \sqrt{N_0 R_p} \right]$. Звідки максимальна ступінь зменшення реперного сигналу E_1 дорівнюватиме

$$n_{max} = \left(\frac{R_{max}}{R_p} \right) \left[\left(\frac{B_2}{B_1^2} \right) \sqrt{\left(\frac{1}{N_0 R_p} \right)} \right]. \quad (9)$$

Враховуючи, що множник у квадратних дужках рівняння (9) мало впливає на n_{max} , то для практичних розрахунків можна використовувати

$$\text{наближену формулу, приймаючи, що } \left[\left(\frac{B_2}{B_1^2} \right) \sqrt{\left(\frac{1}{N_0 R_p} \right)} \right] \approx 1.$$

Висновки. Запропонований зрівноважуючий ультразвуковий засіб контролю рівня рідинних середовищ відрізняється від відомих тим, що збуджуючий електричний сигнал є сталим незалежно від контролюючого рівня рідини. УЗЗК має лінійну статичну характеристику й малі похибки контролю, які характерні для нульового методу вимірювання. Так як в основі зрівноважуючого методу лежить порівняння ультразвукових сигналів, які проходять через газове середовище, то такий УЗЗК має значно меншу чутливість до зміни параметрів цього середовища.

Список літератури: 1. В. Жданкин «Ультразвуковые датчики для систем управления». Современные технологии автоматизации, Москва, №1, №4 – 2003. 2. Томсон А.В. Ультразвуковой рівнемір з регульованою амплітудою збуджуючого сигналу // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля: Науковий журнал. – Луганськ, 2007. - №11 (117), Ч.2. – С. 177 – 183. 3. Пат. 24121 Україна, МПК G01F23/28. Ультразвуковой рівнемір /Томсон Андрій Владиславович, Стенцель Йосип Іванович. - № u 2006 12784; заявл. 04.12.06; опубл. 25.06.07; Бюл. №9. 4. Математичні моделі ультразвукових рівнемірів рідин. /Стенцель Й.І., Томсон А.В., Рябіченко А.В. – Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах, 2006, №2, с. 55-58. 5. Математичні моделі ультразвукових п'єзоелектричних перетворювачів рівня речовин. /Стенцель Й.І., Томсон А.В. – Вопросы химии и химической технологии, 2007, №4, с. 182-185. 6. Математичні моделі ультразвукового рівнеміра рідини з компенсуючим вхідним сигналом /Рябіченко А.В., Стенцель Й.І. – Вісник національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Прилади та методи неруйнівного контролю. – Харків: НТУ «ХПІ» - №48. – 2008. – с. 61-65.

Й.І. СТЕНЦЕЛЬ, д-р техн. наук, проф., ТІ СНУ ім. В. Даля,
В.В. ЄВСЮКОВ, асп., ТІ СНУ ім. В. Даля

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО МЕТОДУ КОНТРОЛЮ РІВНЯ РІДИННИХ СЕРЕДОВИЩ З НЕРІВНОМІРНИМИ ПОВЕРХНЯМИ

У роботі наведено результати експериментальних досліджень ультразвукового засобу контролю рівня рідин з нерівномірними поверхнями, обумовленими механічними діями. Показано, що для контролю рівня рідин з такими поверхнями можна використати вторинні ультразвукові ефекти.

This paper sets out experimental results of ultrasonic test for the level of liquid fluids with unequal surfaces caused by any mechanical actions. It is said that to test the level of liquid fluids with such surfaces you may use ultrasonic secondary effects.

Вступ. У хімічній технології є необхідність контролювати рівень в реакторах при наявності рідинного кип'ячого шару, в абсорберах з барботуванням газу через рідину, при механічному чи газовому перемішуванні реагуючих рідинних середовищ тощо. Для таких технологічних процесів контроль рівня є актуальною задачею, так як відомі методи контролю рівня як поплавковий, буйковий, гідростатичний, п'єзометричний та інші є практично непридатними. Найбільш придатними для контролю рівня рідинних середовищ з нерівномірними поверхнями є засоби, в основу роботи яких покладені енергетичні принципи реологічних перетворень, наприклад, енергія ультразвукових коливань (УЗК).

Відомі ультразвукові засоби контролю (УЗЗК) [1, 2], які призначені для вимірювання рівня рідинних середовищ, поверхні котрих є плоскими, наприклад, у стаціонарних резервуарах і ємностях. В основу їх роботи покладений принцип вимірювання часу проходження ультразвуковим сигналом (УЗС) подвійної відстані від випромінювача до контролюючої плоскої поверхні або за принципом вимірювання відбитого від цієї поверхні УЗС. До основних недоліків таких засобів контролю рівня є великі похибки, які можуть складати до 20 мм і більше, а також достатньо велика зона їх нечутливості.

Постановка задачі. Експериментально встановлено, що при вимірюванні рівня рідинних середовищ ультразвуковим методом при сталому випромінюючому сигналу E_0 приймачем сприймається не один відбитий від поверхні УЗС, а два й більше сигналів, розділених в часі як показано на рис. 1. Якщо перший сигнал сприймається через проміжок часу τ_1 , то другий через проміжок часу τ_2 , третій - τ_3 і так далі. Відмічено, що проміжок часу

τ_2 майже в два рази більший від проміжку τ_1 , а проміжок $\tau_2 \approx \tau_3$. При ультразвуковому методі контролю рівня перший сприймаючий сигнал з амплітудою E_1 називають основним, а з амплітудами E_2 і E_3 сигналами вторинних ефектів вимірювання. З метою уникнення накладання основного та вторинних сигналів при повторних вимірюваннях збуджуючі сигнали розділяють в часі таким чином, щоби час розділення $T > \tau_1 + \tau_2 + \tau_3$.

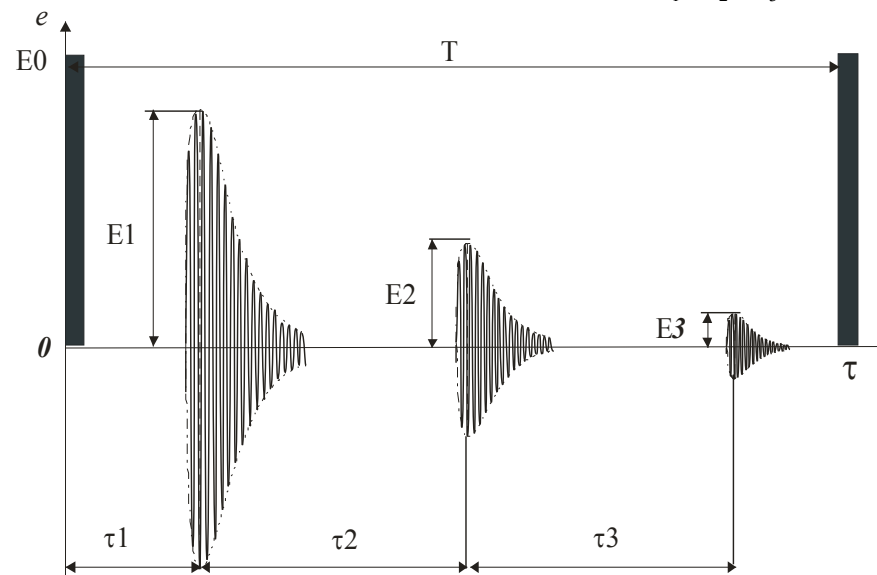


Рис. 1. Послідовність УЗС, які сприймаються приймачем

Відомо [1], що вторинні УЗС виникають внаслідок розсіювання відбитого УЗС від поверхні рідинного середовища. Вторинні УЗС досягають внутрішніх частин резервуара чи ємності, відбиваються від них, повертаються до поверхні рідини, відбиваються від неї і попадають на приймач, створюючи сигнал з амплітудою E_2 . Амплітуда E_2 цього сигналу може складати 10 - 50 % від амплітуди E_1 . Амплітуда вторинних УЗС залежить від характеру поверхні рідинного середовища і є функцією контролюючого рівня. Задачею досліджень є встановлення відповідних закономірностей при дії УЗС на нерівномірні поверхні рідинного середовища і можливість використання ультразвукового методу для контролю рівня таких середовищ.

Основна частина. Експериментальними дослідженнями встановлено, що при наявності нерівномірних поверхонь, обумовлених механічними чи реакційними діями, амплітуда основного сигналу E_1 зменшується при

одному й тому ж значенні збуджуючого сигналу та рівні рідинного середовища, а амплітуди вторинних сигналів E_2, E_3 тощо збільшуються. Цей характерний ефект можна покласти в основу побудови УЗЗК рівня рідин з нерівномірними поверхностями.

Експериментальні дослідження проводилися на установці, схема якої приведена на рис.2.

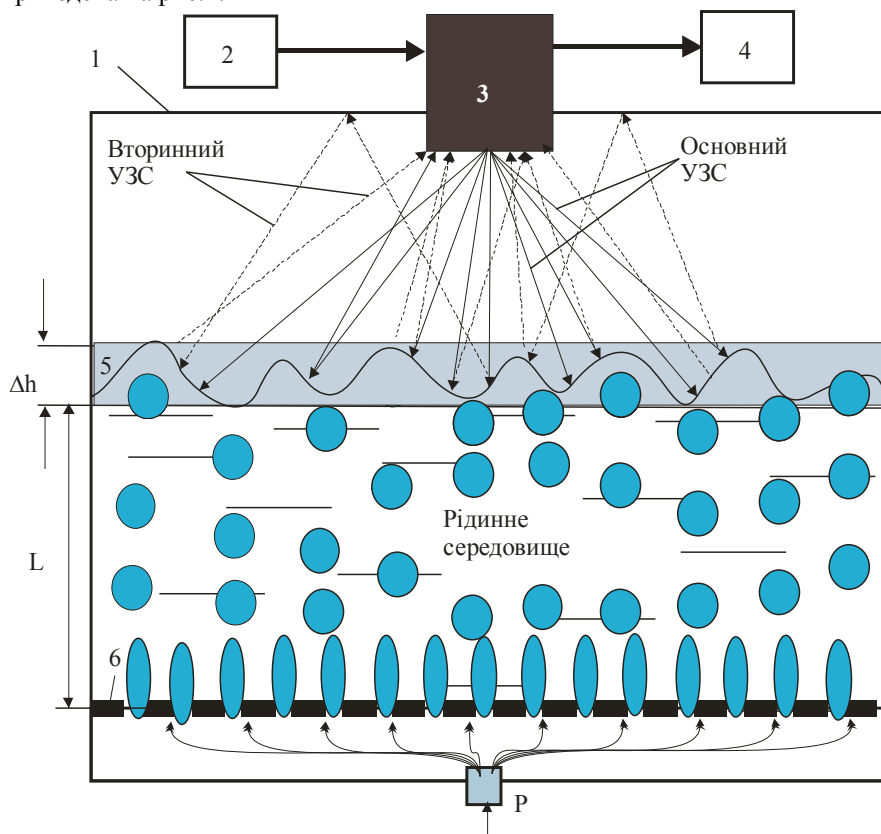


Рис.2. Схема експериментальної установки контролю рівня нерівномірних рідинних середовищ

Установка складається з ємності 1, в яку залито воду до деякого рівня L , пристрою барботування 6, куди направляється повітря під тиском P . Піхурці повітря проходять по висоті рідинного середовища і створюють нерівномірну поверхню 5. Висоту Δh такої поверхні можна регулювати за рахунок зміни тиску P повітря, а також пристроєм 6 з різними прохідними отворами.

Методика виконання експерименту. З блоку 2 електричний імпульс подається на випромінювач 3, який збуджує ультразвукові коливання. УЗС направляється на нерівномірну поверхню рідинного середовища. Після відбиття основна частина УЗС сприймається приймачем 3 у вигляді основного сигналу з амплітудою E_1 , а інша частина, відбившись від нерівномірної поверхні, розсіюється в рідинному та газовому середовищах і після відбиття від внутрішніх частин апарату знову направляються на цю поверхню і у вигляді вторинного сигналу з амплітудою E_2 сприймається приймачем. Так як вторинні сигнали достатньо сильно поглинаються газовим середовищем, то наступними вторинними сигналами з амплітудами E_3, E_4 можна знехтувати. Основний та вторинні сигнали з приймача 3 (одночасно служить випромінювачем) поступають на осцилограф, на екрані якого формується відповідна послідовність як показано на рис. 1. Висота нерівномірної поверхні Δh змінювалася від 0 до 10 мм за рахунок зміни тиску P повітря, яке подавалося в установку на барботування. При заданому значенні висоти Δh нерівномірності рідинного середовища та заданому його рівні за осцилограмою визначалися амплітуди основного та вторинних сигналів і будувалися залежності $E_1 = f(\Delta h)$ і $E_2 = f(\Delta h)$. На рис. 3. приведені залежності $E_1 = f(\Delta h)$, а на рис. 4 залежності $E_2 = f(\Delta h)$ для різних рівнів рідинного середовища.

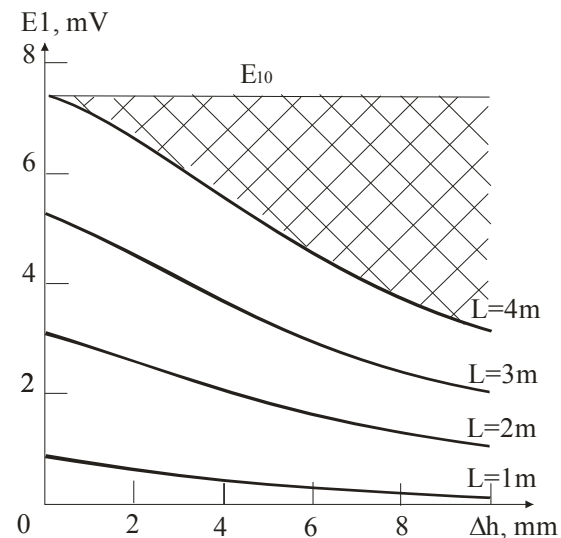


Рис. 3. Залежності амплітуди основного УЗС від зміни висоти нерівномірності поверхні рідинного середовища для різних рівнів

З рис. 3 видно, що зі збільшенням висоти нерівномірності поверхні рідинного середовища абсолютна похибка вимірювання $\Delta E_1(\Delta h, L) = E_{10}(L) - E_1(\Delta h, L)$ (де $E_{10}(L)$ - амплітуда основного сигналу для різних значень рівня L при $\Delta h = 0$; $E_1(\Delta h, L)$ - амплітуда основного сигналу для різних значень рівня L при $\Delta h = \text{var}$) збільшується за нелінійним законом (див. заштрихована область для рівня $L = 4\text{ м}$). Зі зменшенням рівня рідинного середовища (відповідно зі збільшенням товщини газового середовища) похибки вимірювання $\Delta E_1(\Delta h, L)$ зменшуються, що обумовлюється збільшенням поглинання УЗС газовим середовищем.

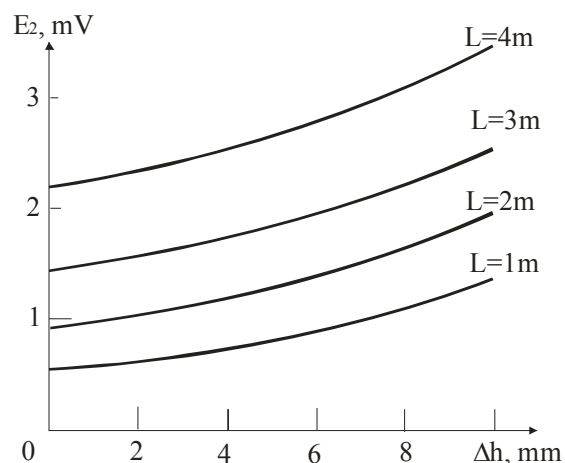


Рис. 4. Залежності амплітуди вторинного УЗС від зміни висоти нерівномірності поверхні рідинного середовища для різних рівнів

З рис. 4 видно, що зі збільшенням висоти нерівномірності поверхні рідинного середовища амплітуда вторинного УЗС плавно зростає незалежно від вимірювального рівня. Така зміна вторинного ефекту може бути використана для підвищення точності вимірювання рівня рідинних середовищ з нерівномірними поверхнями, уводячи відповідку компенсацію в результат вимірювання, зменшення зони нечутливості, а також зменшення впливу зміни газового середовища на контроль рівня.

У деяких ультразвукових рівнемірах для компенсації зміни параметрів газового середовища використовується реперна пластина. При вимірюванні рівня з нерівномірними рідинними середовищами реперна пластина суттєво втрачає свої компенсуючі властивості і практично стає неефективною. Як показали експериментальні дослідження, для таких рідин в якості деякого реперного сигналу доцільно використати УЗС вторинного ефекту, враховуючи той факт, що залежності $E_2 = f(\Delta h, L)$ є плавними і мають

невелику нелінійність. Окрім того, враховуючи, що вторинний сигнал E_2 завжди приходить до приймача з деяким запізненням після основного сигналу E_1 , то це дає можливість зменшити зону нечутливості до допустимого мінімального значення. На рис. 5 приведена номограма залежності вторинного УЗС від висоти нерівномірності Δh і рівня рідини L .

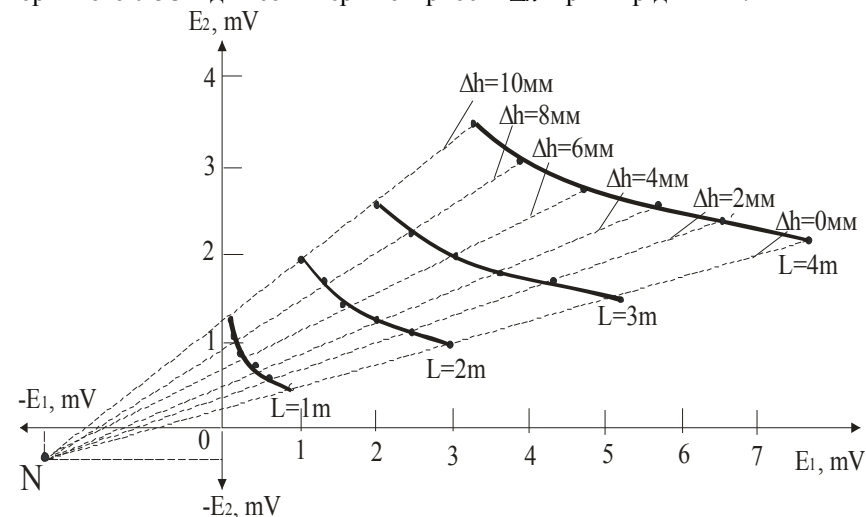


Рис. 5. Номограма залежності вторинного сигналу $E_2 = f(E_1)$ для різних значень рівня та висоти нерівномірності рідинного середовища

З рис. 5 видно, що $E_2 = f(E_1)$ для заданого значення висоти нерівномірності Δh є лінійними (пунктирні лінії). З деяким наближенням ці прями лінії сходяться в точці N з координатами $(E_1 = -0,34, E_2 = -2,35)$.

Висновки. Експериментальні дослідження показали, що ультразвуковий метод може бути використаний для контролю рівня рідинних середовищ з нерівномірною поверхнею. При цьому нерівномірність поверхні рідини може досягати до 10 мм, що дозволяє будувати засоби контролю рівня для помірно кип'ячих рідинних середовищ. Вперше показано, що для побудови засобів контролю рівня рідинних середовищ з нерівномірним поверхностями використовується вторинний ультразвуковий ефект.

Список літератури: 1. В.Жданкин «Ультразвуковые датчики для систем управления». Современные технологии автоматизации, Москва, №1, №4 – 2003. 2. Томсон А.В. Ультразвуковой рівнемір з регульованою амплітудою збуджуючого сигналу // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля: Науковий журнал. – Луганськ, 2007. - №11 (117), Ч.2. – С. 177 – 183.

Й.І. СТЕНЦЕЛЬ, д-р. техн. наук, проф., ТІ СНУ ім. В. Даля,
О.І. ШАПОВАЛОВ, асп., ТІ СНУ ім. В. Даля

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ СИГНАЛІВ МАГНІТОСТРИКЦІЙНОГО ЗАСОБУ КОНТРОЛЮ РІВНЯ РІДИННИХ СЕРЕДОВИЩ

У роботі наведено результати експериментальних досліджень форми ультразвукових сигналів магнітострикційного засобу контролю рівня рідини. Показано, що ультразвукові сигнали, які формуються таким засобом, можуть мати різну частоту й форму, індивідуалізовані, що призводить до появи похибок вимірювання як при налагоджувальних, так і ремонтних роботах.

The results of experimental researches of ultrasonic signals form of magnetostrictive control level of liquid are resulted in the work. It is shown that ultrasonic signals which are formed such mean can have different frequency and form, individualized, that results in appearance of measuring errors both at adjustments and repairs works.

Вступ. Відомі магнітострикційні засоби контролю (МСЗК) рівня рідинних середовищ [1], які працюють за принципом вимірювання часу проходження ультразвуковим сигналом (УЗС) відстані від контролюючої поверхні до приймача УЗС та визначенні рівня за часом проходження ультразвуку. Рекламна точність вимірювання складає 1 мм. Вказується, що магнітострикційні рівнеміри можуть використовуватися при температурах від мінус 40°C до плюс 122°C. Як правило, МСЗК випускаються зарубіжними фірмами для контролю рівня рідин в ємностях, трубах та інших технологічних апаратах при температурі від -4°C до 122°C для вимірювання рівня різноманітних органічних рідинних середовищ і води при температурі від 0°C до 122°C. Теоретичних та експериментальних досліджень магнітострикційного методу контролю у зарубіжній і вітчизняній науковій літературі надзвичайно мало і в основному вони стосуються дослідженню таких магнітострикційних параметрів як коефіцієнт магнітомеханічного зв'язку k , динамічної магнітострикційної сталості α , відносної магнітної проникності μ , магнітострикційного насичення λ_S і деяким іншим.

Враховуючи достатньо високу рекламну точність вимірювання рівня рідинних середовищ і нечутливість до зміни хімічного складу рідинного й газового середовищ, магнітострикційні прилади та системи стали широко використовуватися на відчизнянних підприємствах. Особливо широке використання вони отримали для контролю рівня нафтопродуктів як на нафтопереробних заводах, так і на бензинозаправних станціях.

Постановка задачі. При державних повірках госпрозрахункових систем і приладів, заснованих на магнітострикційних методах вимірювання, встановлено, що МСЗК більшості зарубіжних фірм мають достатньо низьку

точність вимірювання рівня, яка не відповідає вказаній в технічній документації (1 мм) і досягає від 5 до 10 мм, значне середнє квадратичне відхилення серії вимірювань, значну залежність від зміни температури навколишнього середовища тощо.

Задача полягає в теоретичному та експериментальному визначенні факторів, які впливають на метрологічні характеристики МСЗК і розробці методів зменшення їх впливу.

Основна частина. Суть роботи МСЗК полягає в наступному (див. рис. 1). Захисна трубка, в якій знаходиться розміщена по центру і натягнута стрічка зі магнітострикційного матеріалу (нікель, сплави пермендюр, афер, НІКОСІ або інші [2]) розміщується вертикально в резервуар або апарат чи трубу з рідинним середовищем. На трубку у вигляді вільного кільця розміщується поплавок, який плаває на поверхні рідини. Всередині поплавка знаходиться постійний магніт круглої форми, магнітне поле якого охоплює магнітострикційну стрічку. Якщо подати імпульс електричної енергії на магнітострикційну стрічку, то при проходженні його по цій стрічці навколо неї створюється електричне поле. При досягненні цим полем магнітного поплавка електричне поле стрічки взаємодіє з магнітним полем постійного магніту поплавка, в результаті чого в стрічці проходять реологічні переходи доменів, що призводить до появи імпульсу ультразвукових коливань [3]. Останні розповсюджуються по магнітострикційній стрічці, досягають приймача таких коливань і перетворюються в ньому в електричний ультразвуковий сигнал (УЗС).

Експериментальні дослідження виконувалися за наступною методикою. Використовувалися магнітострикційні перетворювачі (МСП) з різними довжинами $H = 0,5; 1; 2; 3 \text{ м}$, з силовими натягами $P = 5, 10, 15, 20, 25 \text{ кгс/см}^2$ і виготовленими з матеріалів: нікель і пермендюр; товщина магнітострикційної стрічки складала 0,1 мм, а ширина складала 1, 2 і 3 мм. В експериментальну установку встановлювався відповідний МСП, підключався блок живлення та сприймання УЗС (БЖС), встановлювався рівень рідини (води), до блоку БЖС підключався швидкодіючий цифровий осцилограф, сигнал якого відображався на моніторі та записувався в пам'ять системи відображення. Для заданої довжини МСП H рівень рідини змінювався в наступних межах: 0, 20, 40, 60, 80, 100%. Задання рівня рідини та його вимірювання здійснювалися з допомогою оптичної лінійки з точністю 0,1 мм. При цьому в першу чергу знімалися осцилограми УЗС придбаних у фірм-виробників магнітострикційних рівнемірів; параметри блоку БЖС не змінювалися й залишалися такими, як при їх випуску. Контроль рівня рідинного середовища здійснювався за проміжком часу t від моменту подачі електричного збуджуючого сигналу до моменту сприйняття УЗС вимірювальною схемою.

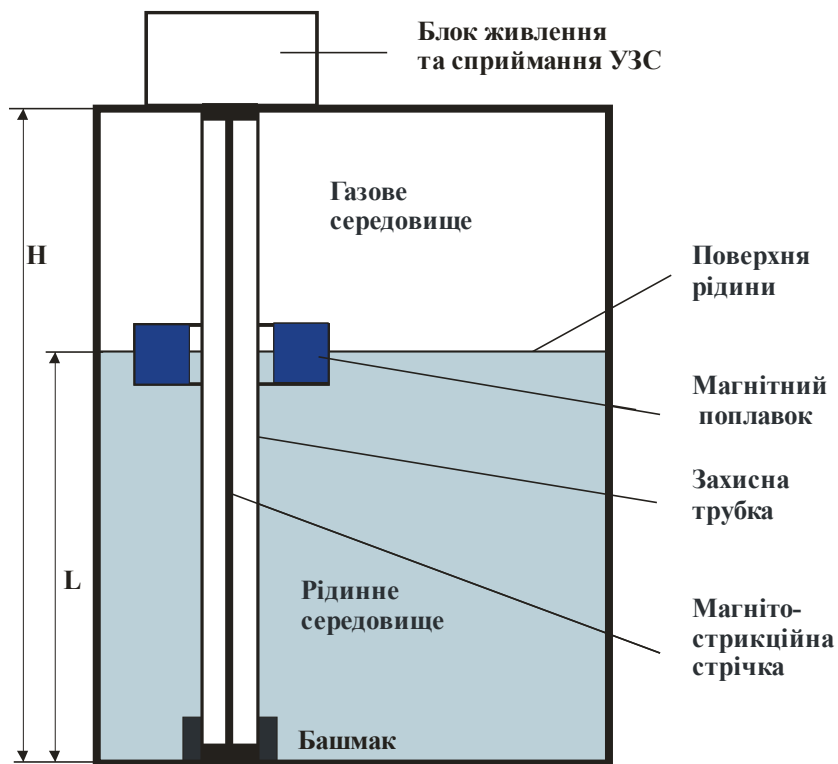


Рис. 1. Схема розміщення магнітострикційного засобу при контролі рівня рідини

У результаті обробки осцилограм установлено, що форми УЗС (за огинаючою пакету ультразвукових коливань) чожна розділити на чотири типи (див. рис. 2): з прямокутним переднім фронтом $\alpha = 90^\circ$ (рис. 2, а); з рівномірно наростаючим переднім фронтом $\alpha > 90^\circ$ (рис. 2, б); з увігнутим переднім фронтом (рис. 2, в) і з S-подібним переднім фронтом (рис. 2, г). Як правило, задній (загасаючий) фронт УЗС суттєво не змінювався не залежно від МСП. У залежності від матеріалу МСП і механічного його натягу частота електромагнітних коливань може змінюватися в достатньо широких межах. Результати експериментальних досліджень МСП показали, що МСЗК, які не використовувалися для вимірювання рівня в промислових умовах (після їх виготовлення та налагодження на фірмі-виробнику), як правило, мають осцилограми, котрі близькі до форми, показаної на рис. 2, а. МСКП, які експлуатувалися у промислових умовах більше 1 року (засоби контролю, які поступали на періодичну повірку в органи Держстандарту), мали осцилограми з наростаючим переднім фронтом сигналу (рис. 2, б). Форми

осцилограм, які показані на рис. 2, в, як правило, є характерними для МСЗК, які підлягали ремонту, при якому змінювалася магнітострикційна стрічка на аналогічну, виготовлену з такого ж матеріалу. Осцилограми, які показані на рис. 2, г, як правило, характерні для МСЗК, які тривалий час використовувалися в експлуатації і магнітострикційна стрічка характеризується механічною втомленістю (природною зміною структури доменів, наприклад при роботі МСЗК у середовищах з високою температурою).

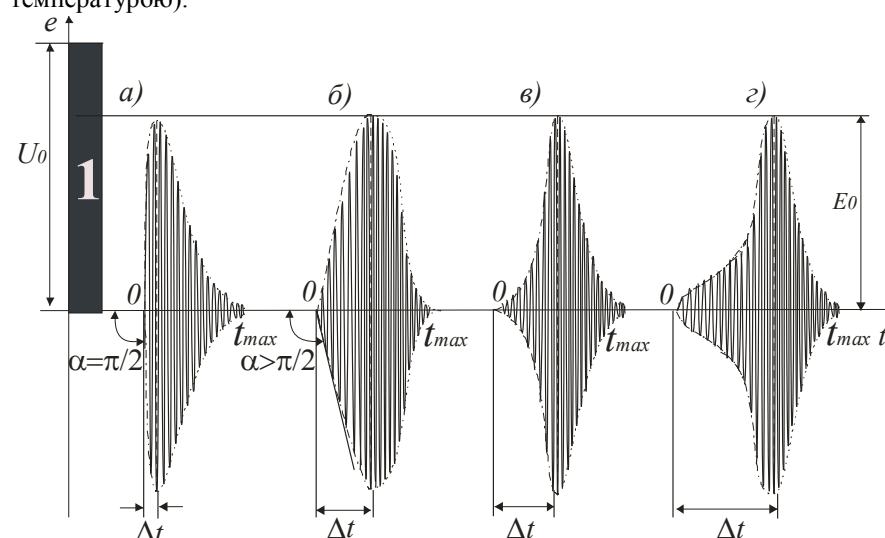


Рис. 2. Форми пакетів УЗС, які можуть формуватися і МСЗК

Експериментальні графіки передніх фронтів огинаючих пакетів ультразвукових коливань МСЗК показані на рис. 3 (крива 1 відповідає пакету рис. 2, а; крива 2 – пакету рис. 2, б; крива 3 – пакету рис. 2, в; крива 4 – пакету рис. 2, г). Аналізуючи криві перехідних процесів МСЗК (огинаючі), можна зробити наступні висновки. Криві 1 і 2 є достатньо близькими до експонент з різними сталими часу T . У першому наближенні такі криві можна описати перехідною функцією аперіодичної динамічної ланки першого порядку

$$T \frac{de}{dt} + e = kU_0, \quad (1)$$

де k - коефіцієнт передачі МСЗК; U_0 - амплітуда збуджуючого електричного сигналу.

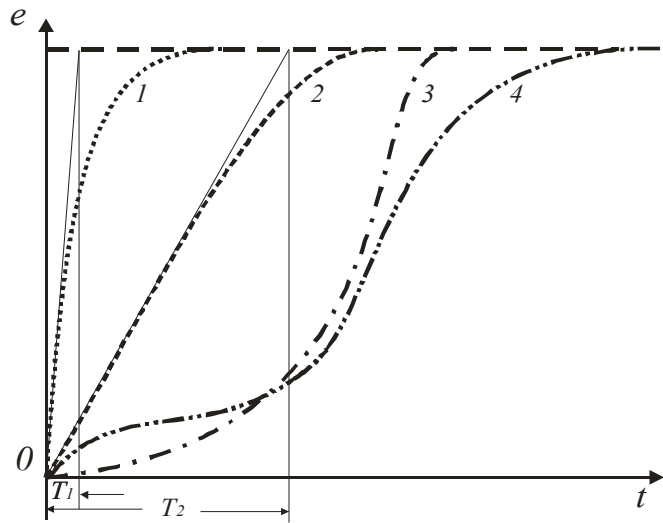


Рис. 3. Форми огинаючі пакетів УЗС

Виходячи з теорії реологічних переходів [4], можна зробити висновок, що в таких перетворювачах має місце одностадійне реологічне перетворення, яке структурно можна подати аперіодичною динамічною ланкою першого порядку (див. рис. 4, а). Крива 3 має S-подібний характер, яка може бути описана диференціальним рівнянням високого порядку вигляду

$$T_n^n \frac{d^n e}{dt^n} + T_{n-1}^{n-1} \frac{d^{n-1} e}{dt^{n-1}} + \dots + T_2^2 \frac{d^2 e}{dt^2} + T_1 \frac{de}{dt} + e = kU_0, \quad (2)$$

де $T_1, T_2, \dots, T_{n-1}^{n-1}, T_n^n$ - сталі часу.

У першому наближенні такий перехідний процес можна апроксимувати методом квадратур [5] диференціальним рівнянням другого порядку з деякими новими сталими часу ξ_1 і ξ_2

$$\xi_2^2 \frac{d^2 e}{dt^2} + \xi_1 \frac{de}{dt} + e = kU_0. \quad (3)$$

Як видно з графіка 3 перехідний процес є усталеним, а значить відношення $\xi_1 / \xi_2 > 2$. Такий процес характеризується двома або більше реологічними переходами, які можуть мати місце в магніострикційному перетворювачі. Формально такий процес являє собою послідовне з'єднання аперіодичних динамічних ланок першого порядку (див. рис. 4, б).

Графік 4 на рис. 3 має складний характер, що свідчить про наявність послідовно-паралельних реологічних переходів (див. рис. 4, в). Такі переходи можуть бути обумовленими змінами структури доменів реологічних переходів, термодформаційними змінами перетворювача, зміною таких

характеристик як коефіцієнт магніто механічного зв'язку k , динамічної магніострикційної сталі α , відносної магнітної проникності μ , магніострикційного насичення λ_s , коерцитивної сили тощо. Такі процеси реологічних перетворень описуються складними нелінійними диференціальними рівняннями.

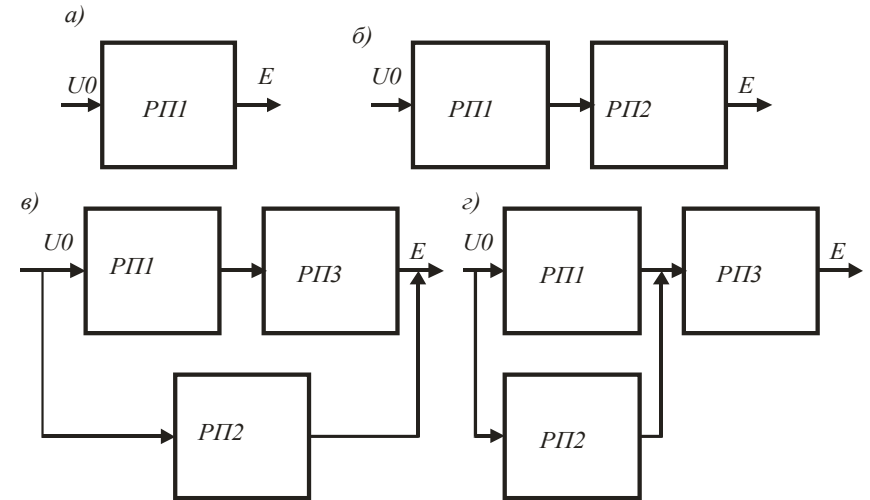


Рис. 4. Структурні схеми реологічних перетворень (PI)

Висновки. Вперше експериментально досліджені форми пакетів УЗС, які створюються магніострикційними перетворювачами рівня рідинних середовищ. У результаті аналізу встановлено, що УЗС за формою їх переднього фронту можна розділити на чотири групи. Приводиться аналіз кожної групи УЗС та можливі форми їх математичного описання і структурного зображення. Указується, що зміна характеру форми УЗС магніострикційних перетворювачів є основними факторами похибок вимірювання.

Список літератури: 1. Ультразвуковые преобразователи /Под ред. Е. Кукучи, пер с англ.. - М.: Наука, 1972. - 386 с. 2. Агейкин Д.И., Костина Е.Н., Кузнецьева Н.Н Датчики контроля и регулирования. Справочные материалы. - М.: «Машиностроение», 1965. 928 с. 3. Гораздовський Т.Я. Наукові основи реології: Монографія. - Луганськ: Вид-во СЛУ ім. В.Даля. 2009. - 699 с. 4. Стенцель Й.І., Томсон А.В., Рябіченко А.В. Математичні моделі ультразвукових рівнемірів рідин. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах, 2006, №2, с. 55-58. 5. Стенцель Й.І. Автоматизація технологічних процесів хімічних виробництв: Навч. посібник - К.: ІСДО, 1995. - 360 с.

О.В. ПОРКУЯН, д-р техн. наук, доц., ТІ СХУ ім. В. Даля,
Й.І. СТЕНЦЕЛЬ, д-р техн. наук, проф., ТІ СХУ ім. В. Даля,
О.І. ПРОКАЗА, ас., ТІ СХУ ім. В. Даля

РЕОЛОГІЧНІ МОДЕЛІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ З ВНУТРІШНІМИ ЗВ'ЯЗКАМИ У ВИРОБНИЦТВІ АМІАЧНОЇ СЕЛІТРИ

У роботі наведені результати досліджень контролю взаємопов'язаних технологічних параметрів на прикладі апарату нейтралізації у виробництві аміачної селітри. Показано, що такий технологічний процес характеризується реологічними перетвореннями, які впливають на перехідні процеси й точність контролю.

The results of researches of control of interrelated technological parameters control are given on the example of neutralization apparatus applied in the ammoniac nitre production. It is shown that such process is characterized by rheological transformations that affect on transitional processes and control exactness.

Вступ. Контроль хіміко-технологічних процесів, як правило, здійснюється без його руйнування за допомогою засобів контролю, які вимірюють значення того чи іншого технологічного параметра контактним методом. У хімічній технології є необхідність контролювати такі технологічні параметри як температуру T , рівень L , тиск P , концентрації Q , витрати F тощо, котрі залежать від тепло- і масообмінних процесів. Як правило, більшість технологічних параметрів є взаємопов'язаними. Наприклад, температура $T = f(F, P, L, Q)$, тиск $P = f(F, T, L)$, рівень $L = f(F, P, T)$, концентрація рідинних середовищ $Q = f(F, T, L)$. Так як зміни технологічних параметрів проходять в часі t , то їх залежності $T = f(t)$, $L = f(t)$, $P = f(t)$, $F = f(t)$ і $Q = f(t)$ є перехідними процесами, які характеризуються тими чи іншими динамічними законами і впливають один на інший. У зв'язку з цим виникають похибки контролю, які чинять відповідну дію на продуктивність технологічного об'єкту і якісні показники готової продукції.

Постановка задачі. Задачею досліджень є виявлення закономірностей між перехідними функціями технологічного апарату нейтралізації у виробництві аміачної селітри, виходячи з теорії реологічних перетворень. Зміна того чи іншого технологічного параметра проходить внаслідок реологічних перетворень, які відбуваються в технологічному апараті. Температура в апараті нейтралізації є наслідком хімічної реакції, яка протікає між азотною кислотою HNO_3 та газоподібним аміаком NH_4 , внаслідок чого виділяється велика кількість теплової енергії. Таким чином, перенесення

кількості маси HNO_3 і NH_4 до зони реологічного перетворення створює аміачну селітру з контролюючою концентрацією Q і температурне поле з контролюючою температурою T_p , які є відповідними стоками. Фізична модель такого хімічного перетворення показана на рис. 1.

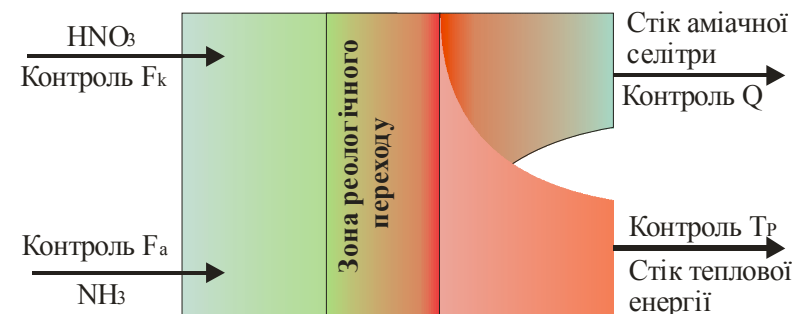


Рис. 1. Фізична модель реологічного перетворення азотної кислоти та аміаку в аміачну селітру

Одночасно перенесення кількості маси цих речовин призводить до створення відповідної кількості теплової енергії, яка в свою чергу є причиною реологічного перетворення кількості маси води в кількість пари (сокової пари), витрата F_{II} якої є контролюючим параметром. Стоком такого реологічного перетворення є кількість створеної сокової пари з витратою F_{II} та її температура T_{II} . Фізична модель такого реологічного перетворення приведена на рис. 2.

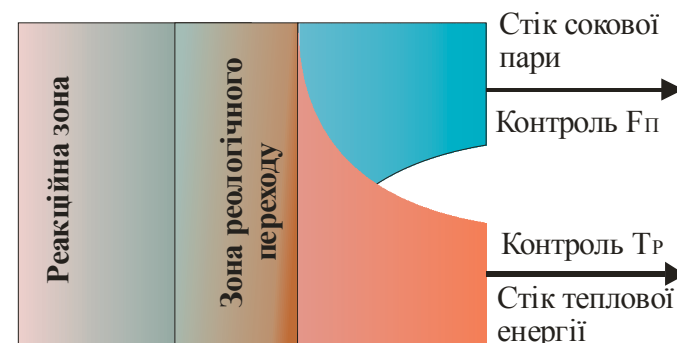


Рис. 2. Фізична модель реологічного перетворення сокової пари в конденсат і теплову енергію

Контролюючими параметрами при такому реологічному перетворенні є витрата сокової пари F_{II} і її температура T_{II} . Якщо хімічне перетворення в апараті нейтралізації проходить при деякому розрідженні, то контролюючим параметром стає вакуумний тиск. Як правило, джерелом реологічного перетворення сокової пари у вакуумний тиск є конденсатор, який охолоджується холодоагентом. Стоком такого перетворення є кількість маси конденсату і кількість теплової енергії. Фізична модель реологічного перетворення приведена на рис. 3. Контролюючими параметрами є витрата конденсату $F_{СК}$ і тиск P сокової пари.

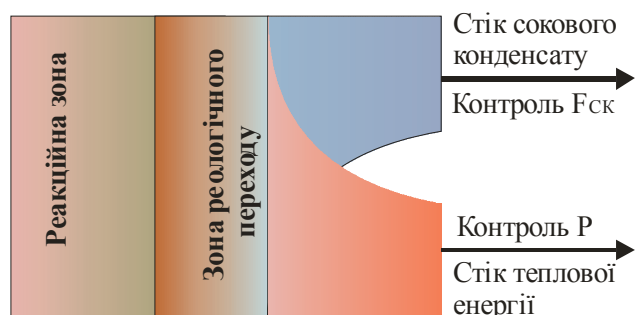


Рис. 3. Фізична модель реологічного перетворення сокової пари в конденсат і механічну енергію

При такому технологічному процесі рівень плаву аміачної селітри теж відноситься до контролюючого параметру, так як він забезпечує загальний матеріальний баланс у технологічному апараті.

Основна частина. Реологічні перетворення, які мають місце в апараті нейтралізації, характеризуються стоками кількості маси та енергії. Як правило, стоки описуються нелінійними диференціальними рівняннями [1–3]. Суть проблеми полягає в тому, що реакції супроводжуються не тільки хімічними перетвореннями, але й дифузійними, тепловими та механічними процесами. Як показано в [2], процес перенесення кількості маси речовини (наприклад, концентрації аміачної селітри в її плаві) можна описати наступним рівнянням

$$\frac{\partial Q}{\partial \theta} + \text{div}(Q, v) = \text{div}(D_m, \nabla Q) + \gamma_Q, \quad (1)$$

де θ - час перенесення кількості маси реагуючих компонентів (азотної кислоти й аміаку); v - швидкість цього перенесення; D_m - коефіцієнт дифузії реагуючих компонентів; ∇ - оператор Лапласа (набла); γ_Q - функція стоку реагуючих компонентів (стік концентрації аміачної селітри в плаві).

Виходячи з рівняння матеріального балансу, зміну концентрації аміачної селітри в плаві можна описати наступним нелінійним диференціальним рівнянням [1]

$$V \frac{dQ}{dt} + [F_C + V\Omega]Q = F_k Q_k + F_A Q_A + V\Omega, \quad (2)$$

де V - об'єм реагуючої маси; t - час стоку концентрації; F_C - витрата стоку плаву аміачної селітри з концентрацією Q ; $\Omega = K_0 \exp(-E / RT_P)$; K_0 - коефіцієнт швидкості хімічного перетворення; E - енергія активації; R - універсальна газова стала; T_P - температура реакції, К; F_k, Q_k - витрата і концентрація азотної кислоти відповідно; F_A, Q_A - витрата і концентрація аміаку відповідно.

Так як стік концентрації плаву аміачної селітри $\gamma_Q = dQ/dt$, то з врахуванням (2) отримуємо

$$\gamma_Q = V \frac{d^2 Q}{dt^2} + [F_C + V\Omega] \frac{dQ}{dt}. \quad (3)$$

Підставивши рівняння (3) в (1) маємо

$$\frac{\partial Q}{\partial \theta} + \text{div}(Q, v) - \text{div}(D_m, \nabla Q) = V \frac{d^2 Q}{dt^2} + (F_C + V\Omega) \frac{dQ}{dt}. \quad (4)$$

Якщо прийняти, що коефіцієнт дифузії мало залежить від масопереносу реагуючих компонентів, то для реакційної зони процес переносу описується наступним рівнянням

$$\frac{\partial Q}{\partial \theta} + v \nabla Q - D_m \nabla^2 Q = V \frac{d^2 Q}{dt^2} + (F_C + V\Omega) \frac{dQ}{dt}. \quad (5)$$

Швидкість v процесу хімічного (реологічного) перетворення визначається об'ємними витратами реагуючих компонентів – азотної кислоти та аміаку. Тому можна записати наступні рівності: $v_k = F_k / S_k$ - для лінійної швидкості азотної кислоти і $v_A = F_A / S_A$ - для лінійної швидкості газоподібного аміаку. Так як між об'ємними витратами F_k і F_A повинно зберігатися відповідне стехіометричне співвідношення, то швидкість реологічного перетворення $v = F_C / S$, де F_C - витрата стоку; S - поверхня стоку. Враховуючи сказане, рівняння (5) приводиться до наступної форми

$$\frac{\partial Q}{\partial \theta} + \frac{F_C}{S} \nabla Q - D_m \nabla^2 Q = V \frac{d^2 Q}{dt^2} + \left(F_C + VK_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_P}\right) \right) \frac{dQ}{dt}. \quad (6)$$

Рівняння (6) запишемо таким чином

$$\frac{\partial Q}{\partial \theta} + \frac{F_C}{S} \nabla Q - D_m \nabla^2 Q = \left(F_C + VK_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_P}\right) \right) \frac{d}{dt} \left[\tau_P \frac{dQ}{dt} + Q \right], \quad (7)$$

де $\tau_p = V / [F_C + VK_0 \exp(-E / RT_p)]$ - стала часу реологічного перетворення хімічних речовин.

Так як рівняння (7) описує матеріальний баланс для концентрації аміачної селітри в плаві, то для його забезпечення необхідно вести контроль за наступними технологічними параметрами: F_k, F_A, F_C, T_p .

Позначивши в рівнянні (7)

$$K(Q) = \frac{\partial Q}{\partial \theta} + \frac{F_C}{S} \nabla Q - D_m \nabla^2 Q, \quad (8)$$

маємо

$$\tau_p \frac{dQ}{dt} + Q = \int_0^{Q_0} \frac{K(Q)}{F_{CM} + \rho_{II}VK_0 \exp(-E / RT_p)} dQ, \quad (9)$$

де Q_0 - максимальне значення концентрації аміачної селітри в плаві при стехіометричному співвідношенні азотної кислоти й аміаку та оптимальній температурі реакції; $F_{CM} = F_{kM} + F_{AM}$ - масова витрата плаву аміачної селітри; F_{kM}, F_{AM} - масові витрати азотної кислоти й аміаку відповідно; ρ_{II} - густина плаву аміачної селітри.

З рівняння (9) видно, що реологічне перетворення при хімічній реакції проходить за аперіодичним законом. Швидкість перехідного процесу, в основному, визначається температурою T_p реакції, масовими витратами F_{kM}, F_{AM} і густиною плаву ρ_{II} . При граничному режимі роботи права частина рівняння (9) повинна дорівнювати Q_0 . Таким чином критичний перехідний процес цього реологічного перетворення описуватиметься наступним рівнянням

$$\tau_p \frac{dQ}{dt} + Q = Q_0. \quad (10)$$

Рішенням рівняння (10) при граничних умовах $t=0$ $Q(0)=0$, а при $t=\infty$ $Q(\infty)=Q_0$ буде $Q(t) = Q_0 [1 - \exp(-t / \tau_p)]$ або

$$Q(t) = Q_0 \left\{ 1 - \exp \left[- \frac{t}{M_{II}} \left[(F_{kM} + F_{AM}) + M_{II}K_0 \exp \left(- \frac{E}{RT_p} \right) \right] \right] \right\}, \quad (11)$$

де $M_{II} = V\rho_{II}$.

Рівняння для швидкості перехідного процесу реологічного перетворення матиме вигляд

$$v_p = \frac{dQ(t)}{dt} = \frac{Q_0}{M_{II}} \left[(F_{kM} + F_{AM}) + M_{II}K_0 \exp \left(- \frac{E}{RT_p} \right) \right] * \exp \left[- \frac{t}{M_{II}} \left[(F_{kM} + F_{AM}) + M_{II}K_0 \exp \left(- \frac{E}{RT_p} \right) \right] \right]. \quad (12)$$

Так як перехідний процес являє собою експоненціальну функцію першого порядку, то характерною для нього є максимальна швидкість v_p при $t=0$. Тоді з (12) маємо

$$v_p^0 = k_1 [(F_{kM} + F_{AM}) + k_2 \exp(-E / RT_p)]. \quad (13)$$

Аналізуючи рівняння (12) і (13) бачимо, що при $M_{II} = const$ швидкість перехідного процесу визначається такими технологічними параметрами, як масові витрати азотної кислоти F_{kM} , аміаку F_{AM} і температура реакції T_p .

Виконаємо аналіз правої частини рівняння (9). Так як процес створення аміачної селітри проходить шляхом барботування газоподібним аміаком шару азотної кислоти висотою L то прийемо з деяким наближенням, що реакційний процес виконується за координатою x . Тоді рівняння (8) спрощується до такого вигляду

$$K(Q) = \frac{\partial Q}{\partial \theta} + \frac{F_C}{S} \frac{dQ}{dx} - D_m \frac{d^2 Q}{dx^2}. \quad (14)$$

Припустимо, що дифузійні процеси незначні, якими можна знехтувати, а розподілення концентрації аміачної селітри за висотою барботування аміаку є лінійним. Тоді рівняння (14) приймає наступну форму

$$K(Q) = \frac{\partial Q}{\partial \theta} + \frac{F_C}{S} \frac{\Delta Q}{L}, \quad (15)$$

де $\Delta Q = Q_0 - Q$; Q_0 - теоретичне значення максимальної концентрації аміачної селітри в плаві; Q - поточне значення концентрації аміачної селітри; L - висота реакційної маси в апараті.

Підставивши (15) у (9) і позначивши $K_C = \tau_p \frac{dQ}{dt} + Q$, маємо

$$K_C = \int_0^{Q_0} \frac{1}{F_{CM} + \rho_{II}VK_0 \exp(-E / RT_p)} \left[\frac{\partial Q}{\partial \theta} + \frac{F_C}{V} \Delta Q \right] dQ. \quad (16)$$

У рівнянні (16) позначимо $\tau_M = V / F_C$. Тоді отримуємо

$$K_C = \int_0^{Q_0} \frac{F_C \rho_A}{[F_{CM} + \rho_{II}VK_0 \exp(-E / RT_p)]} \left[\tau_M \frac{\partial Q}{\partial \theta} + \Delta Q \right] dQ. \quad (17)$$

Продиференціювавши рівняння (17) по dQ , маємо

$$dK_C = \frac{F_C \rho_A}{[F_{CM} + \rho_{II} SLK_0 \exp(-E/RT)]} \left[\tau_M \frac{\partial Q}{\partial \theta} + \Delta Q \right]. \quad (18)$$

Нехай похідна dK_C/dQ є лінійною функцією в деякій робочій області. Тоді з (18) отримуємо

$$\tau_M \frac{\partial Q}{\partial \theta} + \Delta Q = \frac{dK_C [F_{CM} + \rho_{II} VK_0 \exp(-E/RT)]}{F_C \rho_A}. \quad (19)$$

Враховуючи, що $[F_C + VK_0 \exp(-E/RT)] = V/\tau_P$, а

$dK_C = \tau_P \frac{d^2 Q}{dt^2} + \frac{dQ}{dt}$, рівняння (19) приймає наступну форму

$$\tau_M \frac{\partial Q}{\partial \theta} + (Q_0 - Q) = \frac{V}{\tau_P F_C \rho_A} \left(\tau_P \frac{d^2 Q}{dt^2} + \frac{dQ}{dt} \right). \quad (20)$$

Якщо прийняти до уваги, що час перенесення маси реагуючих речовин співпадає з часом реологічного перетворення, то можна вважати, що $\frac{\partial Q}{\partial \theta} \approx \frac{dQ}{dt}$. Позначимо $\tau = \frac{V}{F_C}$ - деяка стала часу. Тоді рівняння (20) приймає таку форму

$$\tau_P \tau \frac{d^2 Q}{dt^2} + \left[1 + \frac{\tau_P \tau_M}{\tau} \right] \frac{dQ}{dt} + Q = Q_0. \quad (21)$$

Позначимо:

$$\tau_2^2 = \tau_P \tau = \frac{V^2}{F_C [F_C + VK_0 \exp(-E/RT)]}; \quad (22)$$

$$\tau_1 = 1 + \frac{\tau_P \tau_M}{\tau} = 1 + \frac{V}{[F_C + VK_0 \exp(-E/RT)]}. \quad (23)$$

З врахуванням рівнянь (22) і (23) отримуємо диференціальне рівняння другого порядку, яке описує процес масопереносу речовин і хімічного перетворення в наступному вигляді

$$\tau_2^2 \frac{d^2 Q}{dt^2} + \tau_1 \frac{dQ}{dt} + Q = Q_0. \quad (24)$$

Сталі часу τ_1 і τ_2 визначають характер процесу нейтралізації азотної кислоти аміаком і є функціями таких контролюючих технологічних параметрів як об'ємна витрата стоку F_C , об'єм реагуючої маси в апараті V і температури реакції T_P . Для того, щоби технологічний процес нейтралізації проходив в оптимальному режимі, при якому вихід плаву аміачної селітри був би максимальним з концентрацією близькою до Q_0 , достатньо стабілізувати й вести контроль за сталими часу τ_1 і τ_2 , які є

взаємопов'язаними. Якщо ведеться контроль за об'ємними витратами, то рівняння сумарного стоку аміачної селітри запишеться в наступній формі $F_C = \rho_C (F_{km}/\rho_k + F_{Am}/\rho_A)$, де $\rho_C, \rho_k, \rho_{Am}$ - густина плаву аміачної селітри, азотної кислоти і аміаку відповідно; F_{km}, F_{Am} - об'ємні витрати азотної кислоти й аміаку відповідно. Тоді сталі часу дорівнюватимуть:

$$\tau_1 = 1 + \frac{LS_P}{[\rho_C (F_{km}/\rho_k + F_{Am}/\rho_A) + LS_P K_0 \exp(-E/RT)]}; \quad (25)$$

$$\tau_2^2 = \frac{L^2 S_P^2}{[\rho_C (F_{km}/\rho_k + F_{Am}/\rho_A)]^2 \left[1 + \frac{LS_P K_0 \exp(-E/RT)}{\rho_C (F_{km}/\rho_k + F_{Am}/\rho_A)} \right]}. \quad (26)$$

де S_P - реакційна поверхня.

Рівняння (25) і (26) дозволяють визначити вплив того чи іншого контролюючого технологічного параметра на динамічний процес отримання аміачної селітри, а також вибрати такі значення цих параметрів, котрі б забезпечували його оптимальний режим роботи.

Висновки. Теоретичні дослідження показали, що процеси, які проходять при нейтралізації азотної кислоти аміаком, терплять реологічні перетворення. Вперше показано вплив масопереносу реагуючих речовин на їх хімічне перетворення. Розроблені фізичні моделі технологічного контролю і приведено їх аналітичне описання. Показано, що процес нейтралізації повністю визначається сталими часу, які є функціями контролюючих технологічних параметрів.

Список літератури: 1. Стенцель Й.І. Математичне моделювання технологічних об'єктів керування: Навч. Посібник. - К.: ІСДО, 1993. - 328 с. 2. Стенцель Й.І. Математичне моделювання хімічних процесів на основі теорії реологічних переходів. // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля: Науковий журнал. - Луганськ, 2007. - №5 (111), Ч.2. - С. 91 - 96. 3. Таганов И.Н. Моделирование процессов массо- и энергопереноса. - Л.: Химия, 1979. - 203 с.

О.В. ПОРКУЯН, д-р техн. наук, доц., ТИ ВНУ им. В. Даля,
Т.Г. СОТНИКОВА, асп., ТИ ВНУ им. В. Даля

КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОГО СОДЕРЖАНИЯ МАГНЕТИТА В ТВЕРДОЙ ФАЗЕ ЖЕЛЕЗОРУДНОЙ ПУЛЬПЫ

У даній статті розглянутий спосіб визначення вмісту феромагнітного компонента в потоці залізорудної пульпи на базі методу, заснованого на комбінованому використанні поверхневих ультразвукових хвиль.

The method of determination the contents of ferromagnetic component in the stream of iron-ore medium on the grounds of the method, based on combined use of superficial ultrasonic waves is considered.

Введение. Повышение качества железорудной продукции в соответствии с требованиями рынка - является одной из важнейших задач. На современных горно-обогатительных комбинатах процесс обогащения это весьма сложный процесс, который происходит в несколько стадий. Качество полезных ископаемых и продуктов обогащения определяется содержанием ценного компонента, элемента, для получения которого и добывается руда. Показателем качества для железорудной продукции является чаще всего магнетит - минерал, обладающий сильными магнитными свойствами.

Уменьшить эксплуатационные затраты и повысить качественные показатели последующего технологического передела позволяет качественный контроль показателей перерабатываемого сырья на каждой стадии обогатительного комплекса. Поэтому разработка методов и способов контроля содержания ферромагнитного компонента в потоке пульпы является актуальной научной и практической задачей.

Анализ и классификация методов измерения вещественного состава показал, что при построении измерительно - информационных систем на обогатительных фабриках желательнее использовать инструментальные методы контроля [1,2].

В настоящее время практически используются три метода определения степени раскрытия минералов: оптический, гравитационно-оптический и основанный на использовании результатов магнитного анализа [1,2]. Последний метод вследствие своей невысокой точности может быть использован только для экспрессного определения степени раскрытия минералов, обладающих магнитными свойствами.

В основе двух первых методов лежит подсчет под микроскопом количества свободных зерен рудных и нерудных минералов в измельченных продуктах. Результаты исследований показывают, что они имеют высокую точность, но требуют определенного времени для получения результата. Это

возможно для научных исследований, но мало пригодно для оперативного контроля в ходе технологического процесса.

Одними из перспективных, с точки зрения разработки измерительных комплексов, являются ультразвуковые методы [3]. Ультразвуковой контроль нашел широкое применение для определения основных характеристик пульпы – плотности и гранулометрического состава. Для этих целей используются объемные и поверхностные волны. Методы контроля, основанные только на объемном ультразвуке имеют недостатки: необходимость дегазации, необходимость настройки приборов, невысокая точность измерения контролируемых параметров. Исключить некоторые проблемы позволило использование поверхностных ультразвуковых волн. В основе методов контроля свойств технологической среды при использовании поверхностного ультразвука лежит изменение интенсивности волны. Характер зависимости определяется как свойствами среды, в которую излучается волна, так и видом волны [4].

Так как магнетит обладает сильно выраженными магнитными свойствами, то для контроля содержания этого компонента целесообразно использовать комбинированные магнитно-ультразвуковые методы. Один из наиболее эффективных таких методов рассматривался в работе [5]. Однако, метод не учитывает зависимость плотности твердой фазы железорудной пульпы от содержания полезного компонента. Поэтому для повышения эффективности контроля на основе таких подходов в предлагаемой работе рассматривается усовершенствованный метод.

Постановка задачи. Целью данной работы является разработка метода, который дает возможность определить долю магнитного компонента в твердой фазе железорудной пульпы. Пульпа рассматривается как проводящая ферромагнитная гетерофазная среда, в которую излучается волна Лэмба, распространяющаяся по стенке сосуда. В работе анализируются процессы, которые происходят при распространении волны Лэмба в исследуемой системе, в том числе при ее намагничивании.

Основная часть. Для определения доли магнитного компонента в твердой фазе пульпы предлагается комбинированный способ, в основе которого находится устройство контроля содержания магнитного компонента в пульпе, состоящее из двух измерительных блоков, аналогичное предложенному в [5]. В измерительном блоке 1 реализуется ультразвуковой контроль объемной доли твердой фазы пульпы. В измерительном блоке 2 осуществляется намагничивание пульпы и измеряется ее магнитная проницаемость. В соответствии с этим на рис.1 представлена схема контроля содержания магнитного компонента.

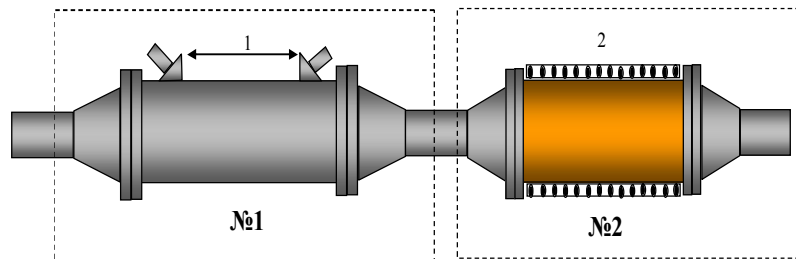


Рис. 1. Схема контроля содержания магнитного компонента в пульпе

Рассмотрим измерительный блок 1. Через измерительный сосуд течет контролируемая среда (пульпа) с постоянной скоростью. Для оценки объемной доли твердой фазы пульпы используются волны Лэмба. Одна из стенок измерительного сосуда представляет измерительную пластину, по которой распространяются волны Лэмба. Эта волна формируется посредством формирующей призмы и излучающего пьезопреобразователя. Волны Лэмба, пройдя фиксированное расстояние l по стенке измерительного блока 1, поступают через формирующую призму на приемный пьезопреобразователь, который осуществляет преобразование упругих ультразвуковых колебаний в электрический сигнал. Пройдя расстояние l , волны будут затухать, излучая энергию в жидкость. Коэффициент затухания волн Лэмба на единице длины k_2 определяется по формуле [6]:

$k_2 = -i \frac{\rho_n}{\rho_{nl}} k_l A_s$, где ρ_n - плотность пульпы; ρ_{nl} - плотность материала пластины; k_l - волновое число продольных ультразвуковых волн в пластине; A_s - коэффициент, определяемый механическими свойствами материала пластины.

Так как газовая фаза пульпы практически не влияет на ее плотность, то газовые пузырьки не будут оказывать влияние на ослабление волн Лэмба [7]. В этом случае плотность пульпы ρ_n будет определяться объемной долей частиц твердого в пульпе W , их средней плотностью ρ_{me} и плотностью воды ρ_e : $\rho_n = (1-W)\rho_e + W\rho_{me}$. Поэтому коэффициент затухания k_2 для волны можно представить в виде:

$$k_2 = \left[(1-W) \frac{\rho_e}{\rho_{nl}} + W \frac{\rho_{me}}{\rho_{nl}} \right] C_v,$$

где C_v - величина, практически не зависящая от плотности жидкости.

Таким образом, интенсивность волн Лэмба на расстоянии l от источника волн можно определить по формуле:

$$I_v = I_{ov} \exp(-k_2 l) = I_{ov} \exp \left\{ - \left[(1-W) \frac{\rho_e}{\rho_{nl}} + W \frac{\rho_{me}}{\rho_{nl}} \right] C_v l \right\}$$

или после математических преобразований

$$\ln \left(\frac{I_{ov}}{I_v} \right) = W \frac{(\rho_{me} - \rho_e)}{\rho_{me}} C_v l, \quad (1)$$

где I_{ov}, I_v - интенсивности волны Лэмба на входе и выходе измерительного модуля; ρ_{me} - плотность твердой фазы; ρ_e - плотность воды; ρ_{nl} - плотность материала пластины; C_v - постоянная величина, не зависящая от плотности жидкости; l - расстояние между источником и приемником волн.

Таким образом, выражение (1) определяет величину затухания волн Лэмба, которая определяется концентрацией и плотностью твердой фазы контролируемой суспензии, протекающей в измерительном сосуде.

Измерительный блок 2 представляет собой соленоид, содержащий n витков на единицу длины. При пропускании через соленоид постоянного тока величины J_o внутри создается однородное магнитное поле напряженности H .

Количественным критерием намагничивания вещества будем считать вектор намагничивания \vec{I} .

Выделим в намагниченной пульпе объем ΔV и определим его намагниченность \vec{I} : $\vec{I} = \Delta \vec{p}_m / \Delta V$, где $\Delta \vec{p}_m$ - суммарный магнитный момент объема ΔV магнетика.

Обозначим через I_M величину намагниченности чистого (100%) магнетита при насыщении. На рис. 2 приведена зависимость I от напряженности магнитного поля H_n .

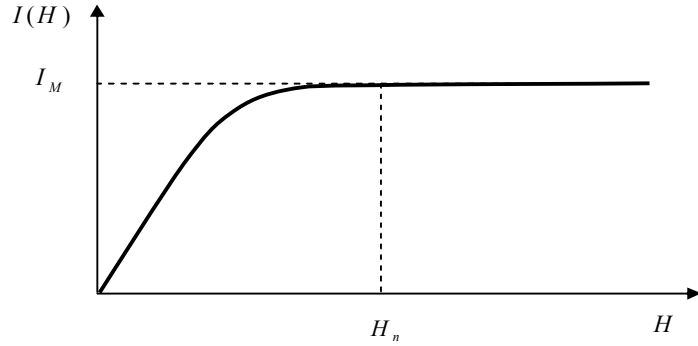


Рис.2. Зависимость намагниченности пульпы от напряженности магнитного поля

Определим магнитный момент объема ΔV пульпы, если она находится в магнитном поле $H > H_n$: $\Delta p_m = W \eta \Delta V I_M$, где η - доля магнитного компонента в твердой фазе пульпы; W - объемная доля твердого компонента в пульпе. Тогда намагниченность пульпы (как магнитного момента единицы объема вещества) будет определяться выражением:

$$I_{\text{пульп}} = \frac{W \eta \Delta V I_M}{\Delta V} = W \eta I_M. \quad (2)$$

С другой стороны известно, что намагниченность вещества (в том числе и пульпы) определяется через напряженность магнитного поля H :

$$I_{\text{пульп}} = \chi H, \quad (3)$$

где χ - магнитная восприимчивость вещества.

Приравняв левую и правую части выражений (2) и (3), получим

$$\chi H = W \eta I_M. \quad (4)$$

Поделив, левые и правые части выражений (1) и (4), получим

$$\frac{\chi H}{\ln\left(\frac{I_{ov}}{I_v}\right)} = \frac{W \eta I_M}{W \frac{(\rho_{ms} - \rho_s)}{\rho_{nl}} C_v l} = \frac{\eta I_M}{\frac{(\rho_{ms} - \rho_s)}{\rho_{nl}} C_v l}. \quad (5)$$

Из выражения (5) следует, что

$$\eta = \left[\frac{(\rho_{ms} - \rho_s)}{\rho_{nl} I_M} C_v l \right] \frac{\chi H}{\ln\left(\frac{I_{ov}}{I_v}\right)}, \quad (6)$$

где $\chi = \mu - 1$ - магнитная восприимчивость пульпы, находящейся в магнитном поле; H - напряженность магнитного поля.

Данная формула и является основанием для определения доли магнитного компонента в твердой фазе пульпы. В статье [5] предполагалось, что плотность твердой фазы ρ_{ms} является постоянной величиной. Вместе с тем ρ_{ms} зависит от состава твердой фазы, следовательно, и от η . С учетом этого можно записать:

$$\begin{cases} \rho_{ms} = (1 - \eta) \rho_{nm} + \eta \rho_m \\ \eta = \frac{(1 - \eta) \rho_{nm} + \eta \rho_m - \rho_s}{\rho_{nl} I_M} C_v l \frac{(\mu - 1) H}{\ln\left(\frac{I_{ov}}{I_v}\right)}. \end{cases}$$

Отсюда получим:

$$\eta = \frac{(\rho_{nm} - \rho_s) \cdot (\mu - 1) H C_v l}{\ln\left(\frac{I_{ov}}{I_v}\right) \rho_{nl} I_M - (\rho_m - \rho_{nm}) (\mu - 1) H C_v l}. \quad (7)$$

Задача сводится к определению напряженности магнитного поля H и магнитной проницаемости μ .

Для определения магнитной проницаемости μ используем известное соотношение:

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}, \quad (8)$$

где B - индукция магнитного поля в пульпе; μ_0 - магнитная постоянная.

Соответственно для нахождения B и H исследуем процессы, происходящие в измерительном блоке 2. При пропускании через блок

(соленоид) постоянного тока величины J_0 внутри создается однородное магнитное поле напряженности H :

$$H = nJ_0. \quad (9)$$

Если H однозначно определяется только токами проводимости J_0 согласно формуле (9), то для нахождения B можно использовать баллистический метод измерения. Здесь необходимо учитывать то, из какого материала сделаны стенки сосуда измерительного модуля. Это может быть как немагнитный материал (медь, латунь и т.п.), так и магнитный (сталь). От этого будет зависеть размещение дополнительной измерительной катушки. Если сосуд из немагнитного материала, то дополнительная измерительная катушка размещается снаружи [5], если из магнитного – внутри (рис.3). При изменении магнитного поля, меняется поток магнитной индукции через поперечное сечение соленоида. Под действием изменяющегося магнитного потока в измерительной катушке возникает электродвижущая сила $\varepsilon = -N(dBS/dt)$. В результате, в цепи гальванометра протечет кратковременный ток, при этом величина заряда q будет пропорциональна магнитной индукции B : $\frac{dq}{dt}R = -N\frac{dBS}{dt}$, $q = \frac{NSB}{R}$, где N - число витков дополнительной катушки; S - площадь поперечного сечения (определяется внутренним диаметром трубы); R - полное сопротивление измерительной цепи (сопротивление обмотки дополнительной катушки и входное сопротивление гальванометра, измеряющего величину заряда q).

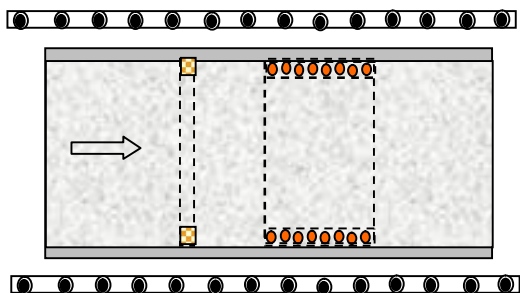


Рис.3. Измерительный модуль 2 для определения магнитных характеристик пульпы с альтернативным расположением дополнительного витка или катушки

Таким образом, измеряя полный заряд кратковременного тока в дополнительной катушке, можно определить B :

$$B = \frac{qR}{NS}. \quad (10)$$

В результате, с учетом выражений (9) и (10), формула для определения μ примет вид: $\mu = \frac{qR}{\mu_0 NSnJ_0}$, где $\frac{R}{\mu_0 NSnJ_0}$ - постоянная величина, которую обозначим C_1 .

$$\mu = qC_1. \quad (11)$$

Постоянная C_1 определяется в лабораторных условиях. Подставляя (9) и (11) в формулу (7), получим окончательное выражение для нахождения доли магнитного компонента η в пульпе

$$\eta = \frac{(\rho_{nm} - \rho_g) \cdot (qC_1 - 1)nJ_0C_v l}{\ln\left(\frac{I_{ov}}{I_v}\right)\rho_{nl}I_M - (\rho_m - \rho_{nm})(qC_1 - 1)nJ_0C_v l}. \quad (12)$$

Заключение. В результате исследований получено выражение для определения доли магнитного компонента в железорудной пульпе. На основе справочных данных ($\rho_g, \rho_{nl}, \rho_m, \rho_{nm}, C_v$), а также по результатам измерений $\left(q, C_1, J_0, l, n, \frac{I_{ov}}{I_v}\right)$ определяется один из основных показателей технологического процесса обогащения железной руды.

Таким образом, предложенный метод определения η , основанный на анализе физических процессов в измерительных блоках, учитывает зависимость твердой фазы от измеряемой величины и позволяет организовать контроль содержания полезной компоненты в пульпе в ходе обогащения.

Список литературы: 1. Козин В.З., Тихонов О.Н. Опробование, контроль и автоматизация обогатительных процессов. - М.: Недра, 1990. - 343 с. 2. Хан Г.А. Опробование и контроль технологических процессов обогащения. - М.: Недра, 1979. - 253 с. 3. Моркун В.С., Потапов В.Н. Ультразвуковой контроль параметров случайно неоднородных гетерогенных сред//Горн. журн. - Изв. вузов. - 1992. - № 8. - С. 126-128. 4. Моркун В.С., Поркуян О.В. Контроль гранулометрического состава железорудной пульпы на базе комбинированного использования объемных ультразвуковых волн и волн Лява//Вісник КТУ.- 2007. - №17 – с.224-230 5. Моркун В.С., Поркуян О.В., Сотникова Т.Г., Барский С.Н. Измерение содержания ферромагнитного компонента в потоке пульпы//Вісник КТУ.-2004.- №5-с.7-11 6. Викторов И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэля и Лэмба в технике.- М.: Наука, 1966.- 87с. 7. Моркун В.С., Потапов В.Н. Ультразвуковой контроль характеристик твердой фазы пульпы//Обогащение руд.-1992.-№2.-с.41-45.

О.М.БЕЗВЕСІЛЬНА, д-т. техн. наук, проф., НТУУ “КПІ”;
Ю.О.ПОДЧАШИНСЬКИЙ, к-т. техн. наук, доц., ЖДТУ

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ РУХУ ЧУТЛИВОГО ЕЛЕМЕНТА У ВИМІРЮВАЧІ ЛІНІЙНИХ ПРИСКОРЕНЬ

В статті розглянуто алгоритмічний метод підвищення точності вимірювачів лінійних прискорень. Основою даного методу є ідентифікація параметрів руху чутливого елемента цих вимірювачів. Розглянуто похибки ідентифікації за методом максимальної правдоподібності та похибки, обумовлені лінеаризацією математичної моделі руху чутливого елемента.

In the article the algorithmic method of increase of accuracy of accelerometers of linear accelerations is considered. The basis of the given method is the identification of parameters of motion of a sensing element of these accelerometers. The errors of identification because of method of a maximum probability and errors stipulated by a linearization of mathematical model of motion of a sensing element are considered.

Вступ. Розвиток сучасних високоточних гравіметричних і навігаційних систем вимагає удосконалення всіх складових елементів цих систем та широкого застосування алгоритмічних методів обробки вимірювальних сигналів. Можливості удосконалення конструкції та підвищення точності виготовлення складових елементів на теперішній час практично вичерпані. Тому дуже перспективним і актуальним шляхом є застосування алгоритмічних методів підвищення точності гравіметричних і навігаційних систем.

Все це вимагає створення високоточних і ефективних алгоритмічних методів обробки вихідного сигналу вимірювачів лінійних прискорень, як важливої складової частини гравіметричних і навігаційних систем [1, 2]. Вихідний сигнал цих вимірювачів формується за допомогою гіроскопічного чутливого елемента (ЧЕ), що відхиляється на кут, пропорційний діючому прискоренню. Кут відхилення ЧЕ вимірюється датчиком кута (ДК).

Існує багато наукових праць, присвячених теоретичним основам і дослідженню оптимальних алгоритмів фільтрації дискретних сигналів засобів вимірювань, що містять завади [3, 4, 5]. Завдання оптимальної фільтрації є завданням оцінки стану ЧЕ та ідентифікації його параметрів руху, що сформульоване в стохастичних термінах. Тому в подальшому будемо використовувати термін “ідентифікація параметрів руху ЧЕ”.

Робота вимірювачів лінійних прискорень в несприятливих та нестационарних умовах вимірювань супроводжується виникненням ряду завад, що додаються до вихідного сигналу ЧЕ цих вимірювачів. Наприклад, гармонійна завада може бути обумовлена нестационарним тепловим станом гіроскопічного ЧЕ та впливом періодичних рухів на частоті маятникових коливань ЧЕ [6]. Тому необхідно враховувати всі ці особливості при розробці

алгоритмів ідентифікації для вимірювачів лінійних прискорень з підвищеними метрологічними характеристиками.

Метою даної статті є розробка алгоритмічного методу ідентифікації параметрів руху ЧЕ вимірювачів лінійних прискорень. Цей метод забезпечує підвищення точності вимірювачів лінійних прискорень в несприятливих і нестационарних умовах проведення вимірювань.

Викладення основного матеріалу дослідження.

Ідентифікацію параметрів руху ЧЕ у вимірювачі лінійних прискорень будемо виконувати на основі обробки даних α_i^* , $i = \overline{1, K}$, що надходять від ДК цього ЧЕ. При цьому

$$\alpha_i^* = \alpha(t_i) + \delta_\alpha(t_i), \quad i = \overline{1, K}, \quad t_i = i \cdot \delta_\delta, \quad T_c = K \cdot \delta_\delta,$$

де $\alpha(t_i)$ – значення, що відповідають ідеальній траєкторії руху ЧЕ, $\delta_\alpha(t_i)$ – похибки вимірної траєкторії руху ЧЕ, обумовлені дією завад на ЧЕ та похибками ДК, K – кількість відліків, що надходять від ДК, δ_δ – інтервалу часу між відліками, T_c – час спостереження за ЧЕ.

Рух ЧЕ, що спостерігається за допомогою ДК, можна представити сумою корисної складової α_{II} , яку вважаємо постійною на інтервалі спостереження та яка пропорційна прискоренню, що вимірюється, і змінної складової $\alpha_{3M}(t)$, яка визначається розв’язком диференційного рівняння [2, 6]

$$\ddot{\alpha}_{3M} + 2\xi_{3M}\dot{\alpha}_{3M} + \omega_0^2 \sin \alpha_{3M} = 0, \quad (1)$$

де ω_0 - колова частота прецесійних коливань ЧЕ, ξ_1 - параметр затухання.

У разі малих коливань ЧЕ $\sin(\alpha_{3M}) \approx \alpha_{3M}$, а розв’язок рівняння (1) має

вигляд $\alpha_{3M}(t) = A_{3M} e^{-\xi_{3M} t} \sin(\omega_{3M} t + \varphi_{3M})$, де $\omega_{3M} = \sqrt{\omega_0^2 - \xi_{3M}^2}$, A_{3M}, φ_{3M} – амплітуда і початкова фаза прецесійних коливань ЧЕ. Якщо $\xi_1 \rightarrow 0$, то математична модель ідеальної траєкторії руху ЧЕ має вигляд:

$$\alpha(t) = \alpha_{II} + \alpha_{3M}(t); \quad \alpha_{II} = const; \quad \alpha_{3M}(t) = \alpha_C \sin \omega_{3M} t + \alpha_S \cos \omega_{3M} t, \quad (2)$$

де $\alpha_C = A \cos \varphi$, $\alpha_S = A \sin \varphi$. Вектор стану ЧЕ, який потрібно ідентифікувати, дорівнює: $Z_\alpha = (\alpha_{II}, \alpha_C, \alpha_S)^T$.

В загальному випадку похибки $\delta_\alpha(t_i)$ вимірної траєкторії руху ЧЕ можуть бути корельованими, зважаючи на наявність завад детермінованого характеру (гармонійні, експоненційні) та кінематичних нелінійностей ЧЕ. Розподіл амплітуди похибки будемо вважати нормальним, зважаючи на вплив багатьох чинників, що призводять до цих викривлень. Все це обумовлює застосування методу максимальної правдоподібності для оцінки стану ЧЕ.

Оцінка максимальної правдоподібності \hat{Z}_α для вектора стану Z_α визначається з рівняння [3, 7]

$$\frac{d(\ln J(\hat{Z}_\alpha))}{d\hat{Z}_\alpha} = A^T \cdot R_\alpha^{-1}(\alpha^* - \alpha(\hat{Z}_\alpha, T)) = 0, \quad (3)$$

де

$$A^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial \alpha(\hat{Z}_\alpha, t_1)}{\partial \hat{\alpha}_\Pi} & \frac{\partial \alpha(\hat{Z}_\alpha, t_2)}{\partial \hat{\alpha}_\Pi} & \dots & \frac{\partial \alpha(\hat{Z}_\alpha, t_K)}{\partial \hat{\alpha}_\Pi} \\ \frac{\partial \alpha(\hat{Z}_\alpha, t_1)}{\partial \hat{\alpha}_C} & \frac{\partial \alpha(\hat{Z}_\alpha, t_2)}{\partial \hat{\alpha}_C} & \dots & \frac{\partial \alpha(\hat{Z}_\alpha, t_K)}{\partial \hat{\alpha}_C} \\ \frac{\partial \alpha(\hat{Z}_\alpha, t_1)}{\partial \hat{\alpha}_S} & \frac{\partial \alpha(\hat{Z}_\alpha, t_2)}{\partial \hat{\alpha}_S} & \dots & \frac{\partial \alpha(\hat{Z}_\alpha, t_K)}{\partial \hat{\alpha}_S} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$\alpha^* = (\alpha_1^*, \dots, \alpha_K^*)^T$ – вектор результатів вимірювань траєкторії руху ЧЕ,
 $\alpha(\hat{Z}_\alpha, T) = (\alpha(\hat{Z}_\alpha, t_1), \dots, \alpha(\hat{Z}_\alpha, t_K))^T$ – вектор значень кута відхилення ЧЕ, що обчислений для математичної моделі (2) ідеальної траєкторії руху ЧЕ на основі оцінки \hat{Z}_α вектора стану, $T = (t_1, \dots, t_K)^T$ – вектор моментів часу, в які отримано відліки вимірної траєкторії руху ЧЕ,

$$R_\alpha = \sigma_{ДК}^2 \cdot I_K + R_{ЧЕ}; \quad R_\alpha^{-1} = [w_{ji}], \quad i, j = \overline{1, K} \quad (5)$$

– кореляційна матриця похибок вимірної траєкторії руху ЧЕ, $\sigma_{ДК}^2$ – дисперсія похибки ДК, I_K – одинична матриця розміром $K \times K$, $R_{ЧЕ}$ – кореляційна матриця похибок, обумовлених дією корельованих завод на ЧЕ.

Тоді

$$\alpha(\hat{Z}_\alpha, t_i) = \hat{\alpha}_\Pi + \hat{\alpha}_C \sin(\omega_{3M} t_i) + \hat{\alpha}_S \cos(\omega_{3M} t_i), \quad (6)$$

$$A^T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ \sin(\omega_{3M} \delta_\delta) & \sin(2\omega_{3M} \delta_\delta) & \dots & \sin(K\omega_{3M} \delta_\delta) \\ \cos(\omega_{3M} \delta_\delta) & \cos(2\omega_{3M} \delta_\delta) & \dots & \cos(K\omega_{3M} \delta_\delta) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Обчислимо оцінку максимальної правдоподібності для вектора стану ЧЕ на основі (3) з урахуванням (5), (6) і (7):

$$B_\alpha \cdot \hat{Z}_\alpha = C_\alpha, \quad (8)$$

де

$$B_\alpha = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^K w_i & \sum_{i=1}^K w_i \sin(i\omega_{3M} \delta_\delta) & \sum_{i=1}^K w_i \cos(i\omega_{3M} \delta_\delta) \\ \sum_{i=1}^K w_i \sin(i\omega_{3M} \delta_\delta) & \sum_{i=1}^K w_i \sin^2(i\omega_{3M} \delta_\delta) & \sum_{i=1}^K w_i \sin(i\omega_{3M} \delta_\delta) \cos(i\omega_{3M} \delta_\delta) \\ \sum_{i=1}^K w_i \cos(i\omega_{3M} \delta_\delta) & \sum_{i=1}^K w_i \sin(i\omega_{3M} \delta_\delta) \cos(i\omega_{3M} \delta_\delta) & \sum_{i=1}^K w_i \cos^2(i\omega_{3M} \delta_\delta) \end{bmatrix}$$

;

$$C_\alpha = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^K w_i \alpha_i^* & \sum_{i=1}^K w_i \alpha_i^* \sin(i\omega_{3M} \delta_\delta) & \sum_{i=1}^K w_i \alpha_i^* \cos(i\omega_{3M} \delta_\delta) \end{bmatrix}^T; \quad w_i = \sum_{j=1}^K w_{ji}.$$

Рішення системи (8) відносно оцінки вектора стану \hat{Z}_α і є результатом ідентифікації параметрів руху ЧЕ у вимірювачі лінійних прискорень. Це рішення може бути знайдено за відомими методами рішення систем лінійних алгебраїчних рівнянь і є лінійною функцією відносно вимірних відліків α_i^* :

$$\hat{\alpha}_\Pi = \sum_{i=1}^K \alpha_i^* \iota_{\alpha\Pi,i}, \quad \hat{\alpha}_C = \sum_{i=1}^K \alpha_i^* \iota_{\alpha C,i}, \quad \hat{\alpha}_S = \sum_{i=1}^K \alpha_i^* \iota_{\alpha S,i}. \quad (9)$$

Точність оцінок стану та ідентифікації параметрів руху ЧЕ, що обчислюються згідно (9), визначається такими похибками:

- методична похибка оцінки вектора стану ЧЕ за методом максимальної правдоподібності;
- похибка оцінки вектора стану ЧЕ, обумовлена переходом від нелінійного диференційного рівняння (1) до лінійної математичної моделі руху ЧЕ (2).

Розглянемо методичну похибку оцінки вектора стану ЧЕ за методом максимальної правдоподібності. В рівняння максимальної правдоподібності (3) входять вектор результатів вимірювань траєкторії руху ЧЕ α^* і вектор значень кута відхилення ЧЕ $\alpha(\hat{Z}_\alpha, T)$, що обчислений для математичної моделі (2) ідеальної траєкторії руху ЧЕ на основі оцінки \hat{Z}_α вектора стану.

Якщо, згідно [7]

$$\alpha^* = \alpha(Z_\alpha, T) + \Delta_\alpha,$$

$$\alpha(\hat{Z}_\alpha, T) \approx \alpha(Z_\alpha, T) + \frac{\partial \alpha(Z_\alpha, T)}{\partial Z_\alpha} \cdot \Delta_{Z_\alpha},$$

де $\Delta_{Z_\alpha} = \hat{Z}_\alpha - Z_\alpha$ – похибка оцінки вектора стану ЧЕ, то на основі (3) отримуємо:

$$A_\alpha^T R_\alpha^{-1} (A_\alpha \Delta_{Z_\alpha} - \Delta_\alpha) = 0,$$

звідки

$$\Delta_{Z_\alpha} = (A_\alpha^T R_\alpha^{-1} A_\alpha)^{-1} \cdot A_\alpha^T R_\alpha^{-1} \Delta_\alpha,$$

а кореляційна матриця похибок оцінки вектора стану ЧЕ

$$\Psi_{\Delta Z_\alpha} = E[\Delta_{Z_\alpha} \cdot \Delta_{Z_\alpha}^T] = (A_\alpha^T R_\alpha^{-1} A_\alpha)^{-1}. \quad (10)$$

Обчислимо похибку оцінки стану ЧЕ за формулою (10) з урахуванням формул (4), (5) і (7):

$$\Psi_{\Delta Z\alpha} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^K w_{ji} & \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^K (w_{ji} \sin(\omega_{3M} \delta_d)) & \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^K (w_{ji} \cos(\omega_{3M} \delta_d)) \\ \sum_{j=1}^K \left(\sum_{i=1}^K w_{ji} \right) \sin(j\omega_{3M} \delta_d) & \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^K (w_{ji} \sin(\omega_{3M} \delta_d)) \sin(j\omega_{3M} \delta_d) & \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^K (w_{ji} \cos(\omega_{3M} \delta_d)) \sin(j\omega_{3M} \delta_d) \\ \sum_{j=1}^K \left(\sum_{i=1}^K w_{ji} \right) \cos(j\omega_{3M} \delta_d) & \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^K (w_{ji} \sin(\omega_{3M} \delta_d)) \cos(j\omega_{3M} \delta_d) & \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^K (w_{ji} \cos(\omega_{3M} \delta_d)) \cos(j\omega_{3M} \delta_d) \end{bmatrix}^{-1}$$

Розглянемо похибку оцінки вектора стану ЧЕ, обумовлену переходом від нелінійного диференційного рівняння (1) до лінійної математичної моделі (2), для випадку корельованих похибок вимірної траєкторії руху ЧЕ.

Для визначення цієї похибки необхідно мати уточнену математичну модель руху ЧЕ. Така модель може бути отримана на основі диференційного рівняння (1) шляхом заміни $\sin(\alpha_{3M}) \approx \alpha_{3M} - \alpha_{3M}^3 / 3!$ [2, 6]. В цьому випадку уточнена математична модель руху ЧЕ має вигляд:

$$\begin{aligned} \alpha_0(t) &= \alpha_{0П} + \alpha_{03M}(t), \quad \alpha_{0П} = const, \\ \alpha_{03M}(t) &= A_{03M} e^{-\xi_{3M} t} \sin(\omega_{03M} t + \varphi_{03M}) + \frac{A_{03M}^3}{192} e^{-\xi_{3M} t} \sin 3(\omega_{03M} t + \varphi_{03M}) \approx \\ &\approx \alpha_{0C} \sin \omega_0 t + \alpha_{0S} \cos \omega_0 t + \frac{A_{03M}^3}{192} \sin 3(\omega_{03M} t + \varphi_{03M}) - \\ &- \omega_{03M} t \frac{A_{03M}^3}{16} \cos(\omega_{03M} t + \varphi_{03M}) - \xi_{3M} t A_{03M} \sin(\omega_{03M} t + \varphi_{03M}). \end{aligned} \quad (11)$$

де A_{03M}, φ_{03M} – амплітуда і початкова фаза прецесійних коливань ЧЕ в уточненій математичній моделі, $\omega_{03M} = \omega_0 (1 - A_{03M}^2 / 16)$, $\alpha_{0C} = A_{03M} \cos \varphi_{03M}$, $\alpha_{0S} = A_{03M} \sin \varphi_{03M}$, $\xi_{3M} \ll \omega_0$, а також враховано тільки два доданки у розкладі $\alpha_{03M}(t)$ в ряд Тейлора за параметрами ω_{03M} і ξ_{3M} в околі точки $(\omega_0, 0)$.

Для визначення похибки оцінки вектора стану ЧЕ, обумовленої переходом від нелінійного диференційного рівняння (1) до лінійної математичної моделі (2), скористаємося методом максимальної правдоподібності. Оцінимо вектор похибок

$$\Delta_{Z\alpha 2} = \hat{Z}_\alpha - \hat{Z}_{0\alpha} = (\Delta_{\alpha П}, \Delta_{\alpha C}, \Delta_{\alpha S})^T,$$

де $\hat{Z}_{0\alpha} = (\hat{\alpha}_{0П}, \hat{\alpha}_{0C}, \hat{\alpha}_{0S})^T$ – оцінка вектора стану ЧЕ, що відповідає уточненій математичній моделі (11).

При цьому будемо використовувати рівняння правдоподібності

$$A_0^T R_\alpha^{-1} (\alpha(\hat{Z}_\alpha, T) - \alpha_0(\hat{Z}_{0\alpha}, T)) = 0, \quad (12)$$

де $\alpha_0(\hat{Z}_{0\alpha}, T) = (\alpha_0(\hat{Z}_{0\alpha}, t_1), \dots, \alpha_0(\hat{Z}_{0\alpha}, t_K))^T$ – вектор значень кута відхилення ЧЕ, що обчислений для моделі (11) на основі оцінки $\hat{Z}_{0\alpha}$ вектора стану,

$A_0^T = \frac{\partial}{\partial \hat{Z}_{0\alpha}} (\alpha_0(\hat{Z}_{0\alpha}, T))^T$ – матриця часткових похідних для (11).

Враховуючи, що в реальних умовах роботи вимірника лінійних прискорень $A_{03M} \leq 2^\circ \approx 0,033 \text{ рад}$, $A_{03M}^3 / 192 \ll A_{03M}$, матриця

$$A_0^T \approx \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ \sin(\omega_{03M} \delta_d) & \sin(2\omega_{03M} \delta_d) & \dots & \sin(K\omega_{03M} \delta_d) \\ \cos(\omega_{03M} \delta_d) & \cos(2\omega_{03M} \delta_d) & \dots & \cos(K\omega_{03M} \delta_d) \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Крім того, рівняння правдоподібності (12) є нелінійним відносно похибки визначення частоти прецесійних коливань $\Delta_\omega = \omega_{3M} - \omega_{03M}$. Тому виконаємо його лінеаризацію шляхом розкладання в ряд Тейлора виразу для $\alpha(\hat{Z}_\alpha, T)$ з виключенням доданків другого та більш високих порядків:

$$\alpha(\hat{Z}_\alpha, T) \approx \alpha_0(\hat{Z}_{0\alpha}, \omega_0, T) + \frac{\partial \alpha_0(\hat{Z}_{0\alpha}, \omega_0, T)}{\partial \hat{Z}_{0\alpha}} \cdot \Delta_{Z\alpha 2} + \frac{\partial \alpha_0(\hat{Z}_{0\alpha}, \omega_0, T)}{\partial \omega_0} \cdot \Delta_\omega.$$

В результаті для математичної моделі (2) отримуємо:

$$\alpha(\hat{Z}_\alpha, t_i) = \hat{\alpha}_{0П} + \hat{\alpha}_{0C} \sin(\omega_{03M} t_i) + \hat{\alpha}_{0S} \cos(\omega_{03M} t_i) + \Delta_{\alpha П} + \Delta_{\alpha C} \sin(\omega_{03M} t_i) + \Delta_{\alpha S} \cos(\omega_{03M} t_i) + \Delta_\omega t_i (\hat{\alpha}_{0C} \cos(\omega_{03M} t_i) + \hat{\alpha}_{0S} \sin(\omega_{03M} t_i)). \quad (14)$$

Підставляючи (11), (13) і (14) в (12), отримуємо:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ \sin(\omega_{03M} \delta_d) & \sin(2\omega_{03M} \delta_d) & \dots & \sin(K\omega_{03M} \delta_d) \\ \cos(\omega_{03M} \delta_d) & \cos(2\omega_{03M} \delta_d) & \dots & \cos(K\omega_{03M} \delta_d) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \dots & w_{1K} \\ w_{21} & w_{22} & \dots & w_{2K} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_{K1} & w_{K2} & \dots & w_{KK} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \hat{\Delta}_{\alpha,1} \\ \hat{\Delta}_{\alpha,2} \\ \dots \\ \hat{\Delta}_{\alpha,K} \end{bmatrix} = 0, \quad (15)$$

де

$$\begin{aligned} \hat{\Delta}_{\alpha,i} &= \alpha(\hat{Z}_\alpha, t_i) - \alpha_0(\hat{Z}_{0\alpha}, t_i) = \Delta_{\alpha П} + \Delta_{\alpha C} \sin(\omega_{03M} i \delta_d) + \Delta_{\alpha S} \cos(\omega_{03M} i \delta_d) - \\ &- \frac{A_{03M}^3}{192} \sin 3(\omega_{03M} i \delta_d + \hat{\varphi}_{03M}) + \frac{A_{03M}^3}{16} \omega_{03M} i \delta_d \cos(\omega_{03M} i \delta_d + \hat{\varphi}_{03M}) + \\ &+ A_{03M} \xi_{3M} i \delta_d \sin(\omega_{03M} t + \hat{\varphi}_{03M}) + A_{03M} \Delta_\omega i \delta_d \cos(\omega_{03M} i \delta_d + \hat{\varphi}_{03M}). \end{aligned}$$

Отримане рівняння правдоподібності (15) може бути перетворено в систему трьох лінійних рівнянь відносно вектора похибок оцінки стану ЧЕ $\Delta_{Z\alpha 2} = (\Delta_{\alpha П}, \Delta_{\alpha C}, \Delta_{\alpha S})^T$ і ця система може бути записана в матричній формі:

$$B_\Delta \cdot \Delta_{Z\alpha 2} = C_\Delta, \quad (16)$$

де

$$B_{\Delta} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^K w_i & \sum_{i=1}^K w_i \sin(\omega_{03M} \delta_{\Delta}) & \sum_{i=1}^K w_i \cos(\omega_{03M} \delta_{\Delta}) \\ \sum_{i=1}^K w_i \sin(\omega_{03M} \delta_{\Delta}) & \sum_{i=1}^K w_i \sin^2(\omega_{03M} \delta_{\Delta}) & \sum_{i=1}^K w_i \sin(\omega_{03M} \delta_{\Delta}) \cos(\omega_{03M} \delta_{\Delta}) \\ \sum_{i=1}^K w_i \cos(\omega_{03M} \delta_{\Delta}) & \sum_{i=1}^K w_i \sin(\omega_{03M} \delta_{\Delta}) \cos(\omega_{03M} \delta_{\Delta}) & \sum_{i=1}^K w_i \cos^2(\omega_{03M} \delta_{\Delta}) \end{bmatrix}$$

$$C_{\Delta} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^K w_i \Delta_{n,i} & \sum_{i=1}^K w_i \Delta_{n,i} \sin(i \omega_{03M} \delta_{\Delta}) & \sum_{i=1}^K w_i \Delta_{n,i} \cos(i \omega_{03M} \delta_{\Delta}) \end{bmatrix}^T ;$$

$$w_i = \sum_{j=1}^K w_{ji} ;$$

$$\Delta_{n,i} = \frac{\hat{A}_{03M}^3}{192} \sin 3(\omega_{03M} i \delta_{\Delta} + \hat{\phi}_{03M}) + \frac{\hat{A}_{03M}^3}{16} \omega_{03M} i \delta_{\Delta} \cos(\omega_{03M} i \delta_{\Delta} + \hat{\phi}_{03M}) + \hat{A}_{03M} \xi_{3M} i \delta_{\Delta} \sin(\omega_{03M} t + \hat{\phi}_{03M}) + \hat{A}_{03M} \Delta_{\omega} i \delta_{\Delta} \cos(\omega_{03M} i \delta_{\Delta} + \hat{\phi}_{03M}). \quad (17)$$

Вираз (17) містить складові частини похибки оцінки вектора стану ЧЕ, обумовленої переходом від нелінійного диференційного рівняння (1) до лінійної математичної моделі (2) та похибкою визначення частоти Δ_{ω} .

Рішення системи (16) відносно $\Delta_{\alpha\Pi}$ дозволяє визначити похибку оцінки постійної складової руху ЧЕ, що обумовлена переходом від нелінійного диференційного рівняння (1) до лінійної математичної моделі (2). Це рішення знайдено з урахуванням корельованості похибок вимірюваної траєкторії руху ЧЕ і є більш точним у порівнянні з іншими відомими рішеннями. Вказане рішення є комбінацією елементів матриці B_{Δ} та вектора C_{Δ} :

$$\Delta_{\alpha\Pi} = \frac{B_{\Delta 11} c_{\Delta 1} + B_{\Delta 21} c_{\Delta 2} + B_{\Delta 31} c_{\Delta 3}}{\det(B_{\Delta})}, \quad (18)$$

де $B_{\Delta ji}$ – алгебраїчні доданки елементів $b_{\Delta ji}$ матриці B_{Δ} , $c_{\Delta j}$ – елементи вектора C_{Δ} .

Враховуючи співвідношення (17) і (18), вираз для обчислення похибки $\Delta_{\alpha i}$ в цілому є нелінійною функцією, яка залежить від параметрів руху ЧЕ, похибок вимірювання кутового положення ЧЕ та параметрів алгоритму оцінки стану цього ЧЕ:

$$\Delta_{\alpha\Pi} = f(\hat{A}_{03M}, \hat{\phi}_{03M}, R_{\alpha}^{-1}, \omega_{03M}, \Delta_{\omega}, \delta_{\Delta}, K).$$

Для підвищення точності оцінки стану ЧЕ і точності вимірювань лінійних прискорень пропонується алгоритмічна компенсація похибки $\Delta_{\alpha i}$ (патент України на винахід UA 86005 C2 [8]). Для цього необхідно виконати послідовність таких дій:

1. Попередньо визначити початкові значення параметрів $R_{\alpha}^{-1}, \omega_{03M}, \Delta_{\omega}, \delta_{\Delta}, K$ на основі апріорних відомостей про конструктивні властивості вимірювача лінійних прискорень та властивості алгоритму оцінки.

2. Отримати результати вимірювань траєкторії руху ЧЕ α_i^* , $i = \overline{1, K}$.

3. Обчислити оцінку вектора стану ЧЕ $\hat{Z}_{\alpha} = (\hat{\alpha}_{\Pi}, \hat{\alpha}_C, \hat{\alpha}_S)^T$ на основі системи рівнянь (8) та співвідношення (9).

4. Обчислити похибку $\Delta_{\alpha\Pi}$ оцінки вектора стану ЧЕ на основі системи рівнянь (16) та співвідношення (18). При цьому для отримання оцінок $\hat{A}_{03M}, \hat{\phi}_{03M}$ можна використовувати значення $\hat{\alpha}_C, \hat{\alpha}_S$, обраховані в п.3:

$$\hat{A}_{03M} \approx \sqrt{\hat{\alpha}_C^2 + \hat{\alpha}_S^2}, \quad \hat{\phi}_{03M} \approx \begin{cases} \arcsin(\hat{\alpha}_S / \hat{A}_{03M}), & \hat{\alpha}_C \geq 0, \\ \pi - \arcsin(\hat{\alpha}_S / \hat{A}_{03M}), & \hat{\alpha}_C \leq 0. \end{cases}$$

5. Обчислити уточнене значення постійної складової руху ЧЕ $\hat{\alpha}_{\Pi}$ та відповідне йому значення лінійного прискорення \hat{a} :

$$\hat{\alpha}_{\Pi} = \hat{\alpha}_{\Pi} - \Delta_{\alpha\Pi}; \quad \hat{a} = k_{\Pi} \cdot \hat{\alpha}_{\Pi},$$

де \hat{a}_i визначається за формулою (8) або (9), $\Delta_{\alpha\Pi}$ – за формулою (18), k_{Π} – коефіцієнт пропорційності, що визначається на основі даних про конструкцію вимірювача лінійних прискорень.

Висновки. Ефективним шляхом підвищення точності вимірювачів лінійних прискорень є ідентифікація параметрів руху ЧЕ цих вимірювачів на основі алгоритмічних методів. В статті розв'язано задачу ідентифікації на основі методу максимальної правдоподібності, отримано теоретичні оцінки похибок ідентифікації. Це дозволяє оцінити вектор стану і параметри руху ЧЕ при наявності корельованих завад детермінованого та випадкового характеру.

Напрямок подальших досліджень може бути використання отриманих результатів для побудови високоточних навігаційних та гравіметричних систем.

Список літератури: 1. Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий / под ред. М. Н. Красильщикова, Г. Г. Себрякова. – М.: Физматлит, 2003. – 280 с. 2. Безвесільна О. М. Авіаційні гравіметричні системи та гравіметри: монографія / О. М. Безвесільна. – Житомир: ЖДТУ, 2007. – 604 с. 3. Статистическая обработка результатов экспериментов на микро-ЭВМ и программируемых калькуляторах / А. А. Костылев, П. В. Миляев, Ю. Д. Дорский и др. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 304 с. 4. Грановский В. А. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях / В. А. Грановский, Т. Н. Сирая. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 288 с. 5. Синуцын И. Н. Фильтры Калмана и Пугачева: учебное пособие / И. Н. Синуцын. – М.: Университетская книга; Логос, 2006. – 640 с. 6. Безвесільна О. М. Вимірювання прискорень: підручник / О. М. Безвесільна. – К.: Либідь, 2001. – 264 с. 7. Кузьмин С. З. Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации / С. З. Кузьмин. – М.: Советское радио, 1974. – 432 с. 8. Пат. 86005 C2 Україна, МПК (2009) G01V 7/00, G01C 19/00. Гравіметр / Безвесільна О. М., Коробійчук І. В., Подчашиньський Ю. О.; заявник і власник патенту Житомирський державний технологічний університет. – № а2005 04762; заявл. 20.05.05; опубл. 25.03.09, Бюл. № 6.

В.А. ПАНЧЕНКО, ст. препод., ПНТУ им. Юрия Кондратюка.

МОНИТОРИНГ КОРРОЗИОННОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА И КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ ПОСРЕДСТВОМ АНАЛИЗА ПЕРЕХОДНОЙ ФУНКЦИИ СПАДА ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА

У роботі приведені результати експериментальних досліджень в діагностиці катодного захисту залізобетону. Запропоновані параметри і методи моніторингу. Публікація розкриває можливості простого аналізу функції спаду поляризаційного потенціалу для додаткової оцінки стану об'єкту і протікання процесу.

In the work the results of experimental researches in diagnostics of cathode protection of reinforced concrete are carried out. The parameters and methods of monitoring are offered. The publication opens opportunities of the simple analysis of function of recession of polarizing potential for an additional estimation of a condition of object and course of process.

Введение. Одна из основных причин разрушения многих железобетонных конструкций - коррозия стальной арматуры железобетона. Существенно приостановить уже начавшийся процесс коррозии способен лишь катодный метод защиты. Применение этого метода в странах Западной Европы и США показало его высокую экономическую эффективность [1]. Однако в технологии катодной защиты существует целый спектр инженерных и научных задач, которые и обуславливают проведение дальнейших исследовательских работ. Развитие технологии электрохимической защиты железобетона, повышение её качества, уровня автоматизации и соответственно степени эффективности зависит в первую очередь от информативных возможностей системы мониторинга самого устройства катодной защиты.

Постановка задачи. Классическим параметром, по которому делают выводы об эффективности защиты и достаточности интенсивности тока катодной поляризации, является поляризационный потенциал, значение которого получается через специальный электрод сравнения. Однако величина потенциала при поляризации металла не может быть измерена прямым путём и даёт лишь частичную информацию о состоянии объекта и обеспечении качества процесса катодной защиты. Использование же мощных вычислительных диагностических устройств, разнообразных методов коррозионного мониторинга и увеличение количества применяемых датчиков кардинально усложняет систему, вызывает проблему её технической реализации, а также проблему поддержания работоспособности устройства на удалённом от оператора объекте и бывает попросту невозможно при реализации вне лабораторных условий на реальных инженерных сооружениях. При этом актуальной является задача повышения

информативных возможностей системы мониторинга на удалённом инженерном сооружении вне лабораторных условий и без существенного её усложнения. Решение этой задачи может быть найдено при получении дополнительной информации в классической системе мониторинга с электродом сравнения. При этом дополнительная информация относительно коррозионного состояния металла в бетоне и необходимой интенсивности поляризации, для обеспечения требований по качеству защиты, может быть получена в коммутационной системе контроля потенциала. После прерывания цепи необходимо обеспечить проведение анализа характера спада потенциала. В мониторинге электрохимических процессов уже нашли широкое применение методы, которые основаны на получении и анализе амплитудно-частотных характеристик объекта в электрической цепи. Так, например, в [2] сообщается об успешном применении метода импедансной спектроскопии при оценке типа и степени коррозии металла. В [3] сообщается о хорошей информационной возможности и перспективности развития методов, основанных на анализе переходных функций поляризационного потенциала.

Как известно анализ переходной функции диагностического параметра может быть использован для определения неизвестных и недоступных для измерения параметров объекта, которые способны характеризовать его техническое состояние. В мониторинге процесса катодной защиты это открывает дополнительные возможности при оценке качества и эффективности процесса, коррозионного состояния металла без существенных технических усложнений диагностической системы.

Основная часть. В результате проведённых нами исследований была построена математическая модель, которая может быть представлена в виде структурной схемы, изображена на рис. 1.

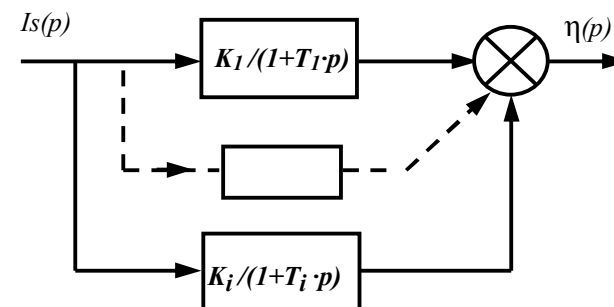


Рис. 1. Структурная схема объекта диагностики катодной защиты для периода времени после разрыва электрической цепи поляризации

Модель описывает состояние объекта диагностики – металла в железобетоне, в электрической цепи катодной поляризации при коммутационном методе проведения измерений, т.е. в системе, когда измерение потенциала производится после обрыва цепи поляризации. Здесь I_s – плотность тока поляризации, задаётся в виде шаговой функции; $\eta(p)$ – изображение функции спада перенапряжения – величины смещения потенциала относительно начального его значения. Модель представляет собой параллельный ряд звеньев с аperiодическими передаточными функциями первого порядка, что характеризуются серией параметров $T_i - K_i$. По самим этим параметрам и можно получать информацию относительно коррозионного состояния металла и обеспечения качества катодной защиты. Однако для получения серии параметров $T_i - K_i$ устройство катодной защиты должно быть снабжено вычислительной системой аппроксимации переходной функции с оценкой степени погрешности. Также результаты проведенных нами исследований приводят к выводу о технических трудностях в реализации самого коммутационного метода получения переходного процесса потенциала и наличия дополнительной погрешности при получении самой этой функции [4], что неизменно приводит и к дополнительным погрешностям в определении величин $T_i - K_i$. В качестве решения проблемы была предложена упрощённая операция идентификации состояния объекта, минуя определение параметров $T_i - K_i$.

Переходной процесс спада потенциала представляется экспоненциальным рядом.

$$\eta(t) = I_{sk} \sum_{i=1}^n K_i \cdot e^{-t/T_i} \quad (1)$$

Скорость спада на начальном этапе экспоненты приближена к величине отношения характеризующих её параметров K_i/T_i (когда величина T_{i+1} намного больше T_i) Таким образом, достаточно оценить величину спада потенциала $\Delta\phi$ за некоторый промежуток времени Δt , чтобы оперировать с величинами практически пропорциональными отношению K_i/T_i . Результаты исследований показали, что измеряемая величина спада $\Delta\phi$, с некоторым допущением пропорциональна отношению недоступных для измерения величин K_i/T_i , способна указать на важный агрессивный коррозионный показатель среды – наличие хлоридов в железобетоне, а также определить стохастически изменяющийся в эксплуатационных условиях показатель обеспечения качества катодной защиты - перенапряжение η .

Для количественного анализа было построено пространство признаков. По оси X строилась шкала статических диагностических параметров, таких как поляризационный потенциал ϕ и величина перенапряжения - η . По оси Y строилась шкала динамических

диагностических параметров, в качестве которых была предложена величина падения потенциала на переходной функции за некоторый промежуток времени Δt . Были выделены три зоны – три временных интервала для оценки величины падения потенциала. Первый интервал: $\phi(0 \text{ мкс}) - \phi(100 \text{ мкс})$; второй интервал: $\phi(100 \text{ мкс}) - \phi(1 \text{ мс})$; третий интервал: $\phi(1 \text{ мс}) - \phi(10 \text{ мс})$. Для осуществления дальнейшего проведения идентификации объектов методом распознавания образов на полученных кривых пространства признаков отмечались координаты недоступных для диагностики на удалённом объекте параметров, таких как плотность тока защиты и результирующий ток коррозии. Качественный анализ разделил области кривых при распознавании загрязнения хлоридами и указал на приоритетность использования на пространстве признаков именно перенапряжения η , а не величины поляризационного потенциала - ϕ .

Один из примеров расположения семейства зависимостей диагностических параметров на пространстве признаков представлен на рис.2.

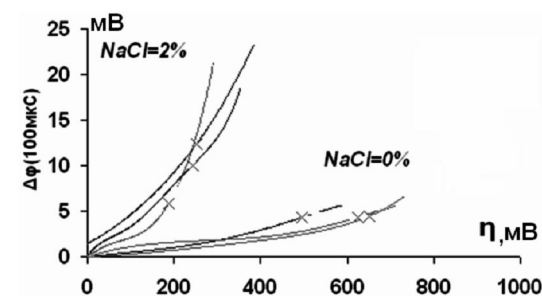


Рис. 2. Зависимость величины падения потенциала за интервал в 100 мкс от величины перенапряжения, при котором происходило измерение для образцов с различной степенью загрязнения хлоридами

Разделение областей кривых указало на возможность оценки явления загрязнения бетона хлоридами.

Для количественного анализа был предложен параметр тангенса угла наклона линии - $\text{tg}\alpha$, построенной к точкам исследуемой зависимости. При этом для оценки усреднённой величины $\text{tg}\alpha$ было обоснована приоритетность использования секущей перед использованием касательной.

На следующем этапе была проведена статистическая обработка результатов, согласно усреднённым значениям $\text{tg}\alpha$ исследуемых зависимостей на пространстве признаков, а также произведено уменьшение диапазона измерений для улучшения качества идентификации посредством исключения зоны значений с малыми величинами, где присутствует

наибольшая относительная погрешность измерений. Это позволило кардинально уменьшить стандартное отклонение тангенсов углов - $tg\alpha$. Результаты обработки приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты статистической обработки величин тангенсов наклона секущих к точкам на исследуемых диагностических зависимостях

Зона	NaCl	Хср.арифм.	Sоткл	Sоткл %	$tg\alpha(2\%)/tg\alpha(0\%)$
1 интервал	NaCl=0%	0,0062	0,0017	28,13	6,97
1 интервал	NaCl=2%	0,0430	0,0109	25,29	
2 интервал	NaCl=0%	0,0156	0,0029	18,26	4,21
2 интервал	NaCl=2%	0,0657	0,0225	34,30	
3 интервал	NaCl=0%	0,0279	0,0060	21,60	2,04
3 интервал	NaCl=2%	0,0570	0,0053	9,36	

Хср.арифм. – среднее арифметическое значение тангенсов углов наклона секущей к точкам на экспериментальной зависимости. Sоткл – стандартное отклонение. Sоткл % - значение стандартного отклонения, что приведено к среднему значению тангенса угла наклона. $tg\alpha(2\%)/tg\alpha(0\%)$ – отношение усредненных значений тангенсов углов для образцов с различным уровнем загрязнения.

Были сделаны выводы, согласно которым значения отношения углов $tg\alpha(2\%)/tg\alpha(0\%)$ сохраняются относительно высокими, а зоны координатной плоскости, определяемые стандартными отклонениями, вообще не имеют пересечения. С увеличением же промежутка временного интервала отношение $tg\alpha(2\%)/tg\alpha(0\%)$ уменьшается, что указывает на постепенную потерю информативности параметра $tg\alpha$ при идентификации объекта.

На следующем этапе было предложено исключить из пространства признаков инерционный, при проведении измерений, диагностический параметр – перенапряжение η , который к тому же зависит от стохастических изменений на объекте, что в свою очередь и необходимо отслеживать системой мониторинга. При этом были использованы исключительно динамические параметры, которые способны оперативно получаться коммутационной системой контроля поляризационного потенциала, значительно сокращая время измерений. Пространство признаков формировалось по величинам спада потенциала согласно второй и третьей временных зон. Была построена зависимость величины падения на третьем временном интервале от величины падения на интервале втором:

$\varphi(1мС) - \varphi(10мС) = f[\varphi(100мС) - \varphi(1мС)]$. При этом были получены позитивные результаты. Аналогично улучшение результатов было достигнуто посредством исключения диапазона измерений малых величин с высокой

относительной погрешностью. Результаты статистической обработки представлены в табл. 2.

Таблица 2

Статистическая обработка величин наклона секущих при использовании лишь динамических показателей переходной функции поляризационного потенциала

Зона	NaCl	Хср.арифм.	Sоткл	Sоткл %	$tg\alpha(2\%)/tg\alpha(0\%)$
3/2	NaCl=0%	1,7555	0,1660	9,4572	2,06
3/2	NaCl=2%	0,8525	0,0475	5,5681	

Заключение. Таким образом, результат анализа функции спада поляризационного потенциала открывает возможность: а) оценки загрязнения бетона хлоридами и коррозионной активности металла в железобетоне, что необходимо для обеспечения эффективности катодной защиты; б) проведение ускоренной экспресс-диагностики, а также отслеживание изменений в условиях эксплуатации конструкции. Так, двукратное уменьшение спада будет свидетельствовать о двукратном уменьшении перенапряжения, что в свою очередь способно давать системе управления информацию относительно смещения стационарного потенциала арматуры, о наличии возмущающих воздействиях и переходе объекта в иное коррозионное состояние. Это же в свою очередь даёт информацию о необходимости изменения оптимальной плотности тока защиты. Перспективными представляются дальнейшие исследования в данной области, в особенности по количественной оценке загрязнения железобетона хлоридами, которые являются главным фактором агрессивности среды на многих железобетонных сооружениях. При этом диагностическая система устройства катодной защиты не требует технического усложнения, что актуально в эксплуатационных условиях на удалённом от оператора объекте.

Список литературы: 1. Опыт применения и перспективы развития катодной защиты железобетонных транспортных сооружений / В.А. Панченко. – Автомобільні дороги та дорожнє будівництво. – 2000. – №59. – с. 174 – 177. 2. Inspection and monitoring of reinforced concrete structures-electrochemical methods to detect corrosion / B. Elsener, H. Wojtas, H. Bohni H. – Insight: Non-destruct. test. And Cond. Monit. – 1994. – 36, №7, – с. 502-506. 3. Применение метода спада потенциала после размыкания поляризующей цепи в электрохимических исследованиях. Аналитические возможности метода / В.И. Лукьянчева, М.Г. Фомичева, В.М. Ево, В.Е. Казаринов. – Практика противокоррозионной защиты. – 2003. – №1. – с. 31–39. 4. Динамічна похибка при одержанні перехідного процесу спаду поляризаційного потенціалу в системі діагностики та катодного захисту залізобетону / В.О. Панченко. - Вестник Национального технического университета «ХПИ». Сборник научных трудов. Тематический выпуск «Автоматика и приборостроение», №56, 2008 р. – с. 136-140.

А.А. ЗОРИ, д-т. техн. наук, проф. ДонНТУ,
Р.И. СОЛОМИЧЕВ, студ. ДонНТУ,
В.П. ТАРАСЮК, к-т. техн. наук, доц. ДонНТУ

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАТУХАНИЯ УЛЬТРАЗВУКА В ВОЗДУХЕ И СТРУКТУРЕ МЕТАЛЛА ВАЛКОВ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ ИЗ СТАЛИ 150ХНМ

Предложен расчет коэффициентов затухания ультразвука в металле банджа валков из конкретного типа стали при изменении геометрических размеров зерен металла под действием температуры, а также определены коэффициенты затухания звуковой волны в воздухе при изменении расстояния от объекта контроля до преобразователя. Произведен подбор наиболее оптимальных параметров функционирования разрабатываемой электронной системы.

In the work was taken the calculation results of the ultrasonic attenuation coefficients in the metal bandage rolls of a steel when the geometrical the grains dimensions of the metal under the temperature influence, as well as the damping coefficients of the sound wave in the air when changing the distance from the object to control the converter. Made to select the most optimal functioning parameters developed an electronic system.

Введение. Остановка производства стального проката на металлургическом комбинате в связи с внезапным выходом из строя прокатных роликов влечет за собой значительные экономические последствия для предприятия. Поэтому, на данный момент перспективным направлением в металлургическом производстве является осуществление непрерывной оценки износа оборудования с помощью неразрушающего контроля (НК).

В приповерхностном слое металла банджа сталепрокатных валков в процессе многоразовой горячей прокатки возникают усталостные трещины под значительными нагрузками и перепадами температур, которые необходимо своевременно отследить на ранних стадиях их развития. Данная проблема решается бесконтактным электромагнитно-акустическим (ЭМА) методом неразрушающего контроля.

Постановка задачи. Для разработки электронной системы диагностического контроля состояния валков, необходимо исследовать затухание ультразвуковых колебаний (УЗК), как в структуре металла, при изменении размеров зерен под действием температуры, так и в воздушной прослойке между датчиком и поверхностью валков.

Решение задачи и результаты исследований. Коэффициент затухания УЗК δ складывается из коэффициентов поглощения δ_{Π} и рассеяния δ_{ρ} : $\delta = \delta_{\Pi} + \delta_{\rho}$. При поглощении звуковая энергия переходит в тепловую, а при рассеянии энергия остается звуковой, но уходит из направленно распространяющейся волны. Большое влияние на величину коэффициента

рассеяния δ_{ρ} в металле оказывает соотношение среднего размера кристаллов (зерен) - \bar{D} с длиной волны ультразвука - λ . При $\bar{D} \ll \lambda$ коэффициент δ_{ρ} пропорционален f^4 , где f – частота колебаний (рис.1). Общее затухание в этом случае определяется формулой [1]:

$$\delta = A \cdot f + B \cdot f^4 \cdot \bar{D}^3, \quad (1)$$

где A и B – постоянные, $A = 0,096 \cdot 10^{-6}$, $B = 0,4977 \cdot 10^{-24}$.

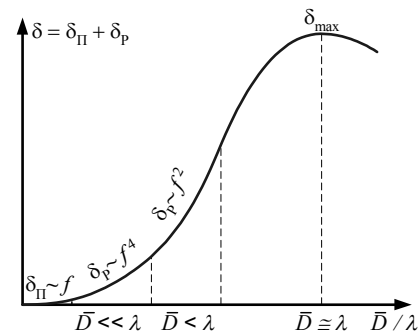


Рис.1. Схематическая зависимость коэффициента затухания от среднего диаметра зерна и длины волны

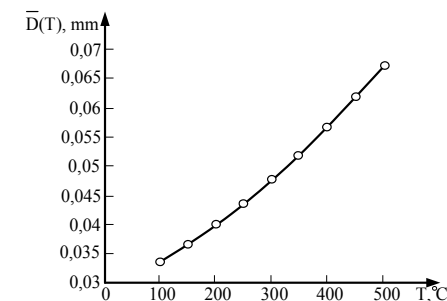


Рис.2. Изменение средней величины зерна в зависимости от температуры нагрева

Расчет коэффициентов затухания производится при частоте колебаний $f = 2,0$ МГц. Зная скорость распространения волны в углеродистых сталях $c_1 = 5900$ м/с, определим длину волны λ из соотношения:

$$\lambda = \frac{c_1}{f} = \frac{5900 \text{ м/с}}{2 \cdot 10^6 \text{ Гц}} = 2,95 \text{ мм}. \quad (2)$$

При теоретическом расчете затухания УЗК в металле воспользуемся справочными данными [2] – характеристикой изменения средней величины зерна стали 150ХНМ от рабочей температуры валков (рис.2). При минимальной рабочей температуре $T \approx 150$ °C средний диаметр зерна составляет $\bar{D} = 0,0365$ мм. Тогда, согласно выражению (1) получим затухание:

$$\delta = 0,0195 \text{ мм}^{-1}.$$

Или выразим в отрицательных децибелах, используя формулу:

$$N = 20 \lg(e^{-\delta \cdot X}), \quad (3)$$

где X – удаление от источника УЗК, на котором вычисляется затухание.

В таблице 1 представлены значения приведенных коэффициентов затухания наклонных поперечных ультразвуковых волн, определенные по формуле (1) при X : 16, 24 и 30 мм, а также значения, рассчитанные по формуле (3), где ΔN – разность показаний аттенюатора затухания ультразвука

в дБ в объекте контроля (ОК) при прохождении расстояния $X=X_1+X_2$ и изменении температуры на $\Delta T=50^\circ$ (рис.3).

Таблица 1.

Значения коэффициентов затухания УЗК в зависимости от размеров зерен металла

$\bar{D}, \text{мм}$	$\delta, \text{мм}^{-1}$	$X = 16 \text{ мм}$		$X = 24 \text{ мм}$		$X = 30 \text{ мм}$	
		$N, \text{дБ}$	$\Delta N, \text{дБ}$	$N, \text{дБ}$	$\Delta N, \text{дБ}$	$N, \text{дБ}$	$\Delta N, \text{дБ}$
0,033	0,0194	-2,7099	0	-4,0648	0	-5,081	0
0,037	0,0195	-2,7224	0,012	-4,0836	0,019	-5,1044	0,023
0,04	0,0197	-2,7386	0,029	-4,1079	0,043	-5,1349	0,054
0,044	0,0198	-2,7597	0,05	-4,1395	0,075	-5,1744	0,093
0,048	0,0200	-2,7871	0,077	-4,1807	0,116	-5,2259	0,145
0,052	0,0203	-2,8228	0,113	-4,2342	0,169	-5,2927	0,212
0,057	0,0206	-2,8692	0,159	-4,3038	0,239	-5,3797	0,299
0,062	0,0210	-2,9295	0,22	-4,3942	0,329	-5,4927	0,412
0,067	0,0216	-3,0079	0,298	-4,5118	0,447	-5,6397	0,559

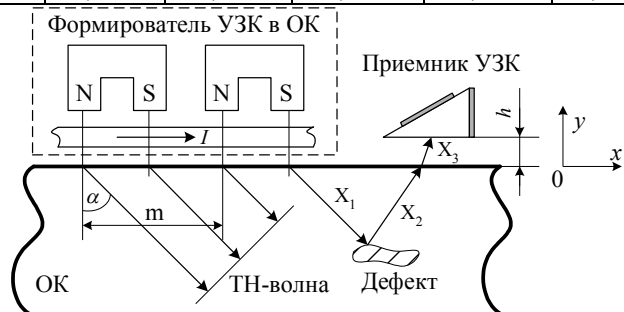


Рис.3. Схема проведения диагностического контроля

На рис. 4 приведена зависимость ΔN от среднего диаметра зерна \bar{D} стали 150ХНМ на частоте 2,0 МГц при $X=16$ мм (кривая 1), $X=24$ мм (кривая 2) и $X=30$ мм (кривая 3).

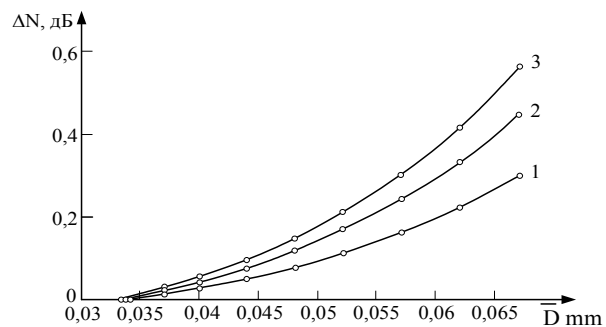


Рис. 4. Зависимость ΔN от среднего диаметра зерна стали 150ХНМ

Из полученных результатов следует, что затухание волны в металлической структуре валков не превышает 1 дБ. В контексте проектируемой электронной системы диагностического контроля это показывает, что снижение амплитуды УЗК будет не существенным при изменении среднего диаметра зерен от 0,033 мм до 0,067 мм, вызванное изменением температуры валков от 150°C до 500°C .

Расчитаем коэффициент затухания акустической волны в воздушном слое, толщиной h (рис.3), который имеет место между ОК и приемником УЗК. Для этого составим волновое уравнение для вязкой теплопроводящей среды, используя уравнение непрерывности:

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} + \rho_0 \cdot \text{div} v = 0 \quad (4)$$

и уравнение Навье-Стокса:

$$\rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} + c_0^2 \nabla \rho' - \left(\frac{4}{3} \eta + \xi \right) \Delta v = 0, \quad (5)$$

где $\eta=1,9 \cdot 10^{-5}$ (Па·с) и $\xi=17,2 \cdot 10^{-6}$ (Па·с) – коэффициенты сдвиговой и объемной вязкости; c_0 – скорость звука.

Из выражений (4) и (5), которые являются линеаризованными уравнениями гидродинамики для возмущений плотности ρ' и колебательной скорости v , находим уравнение для колебательной скорости, предполагая, что волна распространяется по оси y :

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} - c_0^2 \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} - \frac{b}{\rho_0} \cdot \frac{\partial^3 v}{\partial y^2 \partial t} = 0, \quad (6)$$

где $b=(4/3)\eta+\xi$.

С учетом эффективного коэффициента вязкости получим:

$$b = \frac{4}{3} \eta + \xi + k \left(\frac{1}{c_v} - \frac{1}{c_p} \right), \quad (7)$$

где k -коэффициент теплопроводности, его зависимость от температуры приведена на рис.5 [3]; $c_p=1,006 \cdot 10^3$ (Дж/кг·К) и $c_v=0,717 \cdot 10^3$ (Дж/кг·К) – удельные теплоемкости при постоянном давлении и объеме.

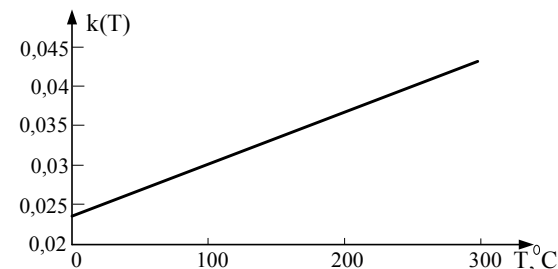


Рис. 5. Зависимость коэффициента теплопроводности воздуха от температуры

Ищем решение волнового уравнения (6) в виде:

$$v = v_0 \exp(ikx - i\omega t). \quad (8)$$

После подстановки в волновое уравнение получаем закон дисперсии:

$$\omega^2 + c_0^2 k^2 - \frac{b}{\rho_0} i \omega k^2 = 0. \quad (9)$$

Отсюда находим, что если $b\omega/(c_0^2 \rho_0) \ll 1$ (это соответствует малому затуханию звука на расстояниях порядка длины волны), то

$$k^2 = \frac{\omega^2}{c_0^2 - ib\omega/\rho_0} = \frac{\omega^2}{c_0^2} \left(1 + i \frac{b\omega}{\rho_0 c_0^2} \right) \equiv (k_0 + i\beta)^2. \quad (10)$$

Используя выражение (8) при $k_0 = \omega/c_0$, имеем коэффициент затухания звука с учетом изменения температуры воздуха:

$$\beta(T) = \frac{\omega^2}{2\rho_0(c(T))^3} \left[\left(\frac{4}{3}\eta + \xi \right) + k(T) \left(\frac{1}{c_v} - \frac{1}{c_p} \right) \right], \quad (11)$$

где $c(T) = 331,3 + 1,21 \cdot T$ - зависимость скорости звука от температуры воздуха [4] (рис.6), $\rho_0 = 1,293 \cdot 10^{-3}$ кг/м³ - плотность воздуха, $\omega = 2\pi f$ - круговая частота в рад/с.

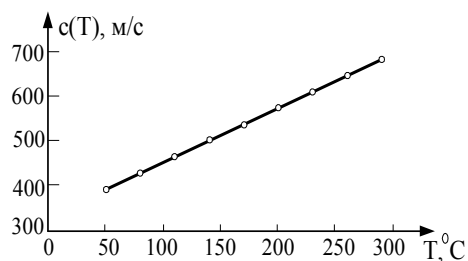


Рис. 6. Зависимость скорости звука в воздухе от температуры

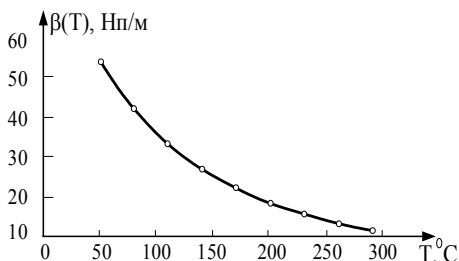


Рис. 7. Зависимость коэффициента затухания УЗК в воздухе от температуры

Согласно формуле (11), имеем зависимость коэффициента затухания УЗК в воздухе от изменения температуры воздуха от 50°C до 300°C (рис.7).

Используем выражение (3), для выражения затухание в отрицательных дБ при вариации расстояния h от ОК до приемника УЗК. Результаты исследования приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Значения коэффициентов затухания УЗК в воздухе при изменении температуры

$T, ^\circ\text{C}$	$\beta, \text{мм}^{-1}$	$X_3 = 3 \text{ мм}$	$X_3 = 5 \text{ мм}$	$X_3 = 7 \text{ мм}$
		$N, \text{дБ}$	$N, \text{дБ}$	$N, \text{дБ}$
1	2	3	4	5
50	54,22	-1,413	-2,355	-3,297
80	42,20	-1,100	-1,833	-2,566

1	2	3	5	7
110	33,52	-0,874	-1,456	-2,038
140	27,12	-0,707	-1,178	-1,649
170	22,28	-0,581	-0,968	-1,355
200	18,56	-0,484	-0,806	-1,128
230	15,64	-0,408	-0,679	-0,951
260	13,32	-0,347	-0,579	-0,810
290	11,45	-0,298	-0,497	-0,696

В таблице 2 представлены значения приведенных коэффициентов затухания наклонных поперечных ультразвуковых волн в воздушном слое, где N – затухания ультразвука в дБ между объектом контроля (ОК) и приемником при прохождении расстояния X_3 (рис.3). На рис. 8 приведена зависимость N от температуры на частоте УЗК 2,0 МГц при $X_3=3$ мм (кривая 1), при $X_3=5$ мм (кривая 2) и при $X_3=7$ мм (кривая 3).

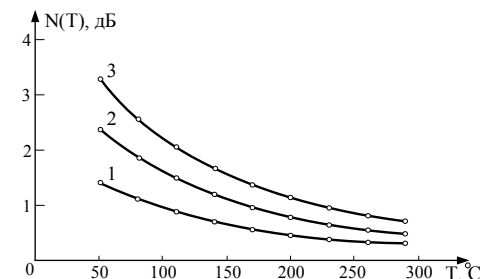


Рис. 8. Зависимость ΔN от температуры воздуха и расстояния h

Заключение. Из результатов исследования следует, что затухание волны в воздухе велико, существенно зависит от расстояния h и превышает затухание волны в металле больше чем в $2 \cdot 10^3$ раза (по шкале в неперах, $1 \text{ Нп} = 1 \text{ мм}^{-1}$). Общий коэффициент затухания определяется как алгебраическая сумма коэффициентов затухания волны в двух средах. Основное снижение амплитуды УЗК в основном происходит из-за наявности воздушного слоя, который является неизбежным и необходимым условием безконтактного способа контроля валков и, следовательно, затуханием в металле можно пренебречь. Повышение амплитуды УЗК у приемника, не увеличивая мощности излучения, возможно лишь при уменьшении воздушного зазора, который является оптимальным в пределах $X_3=5$ мм.

Список литературы: 1. Сухоруков В.В. Неразрушающий контроль. – М: Высшая школа, 1991. – 283 с. 2. Геращенко О.А, Гордов А.Н, Лах В.И. Справочник: температурные измерения. – К: Наукова думка, 1984. – 495 с. 3. Лепендин Л.Ф. Акустика. – М: Высшая школа, 1978. – 445с. 4. Гурбатов С.Н, Руденко О.В. Акустика в задачах. – М: Наука, 1996. – 335 с. 5. Иванов А.И. Поведение металлов при повышенных нестационарных температурах и нагрузках. – М: Металлургия, 1982. – 351 с.

В.П. ТАРАСЮК, к-т. техн. наук, доц. ДВНЗ «ДонНТУ»
О.В. ШИНКАРЕВА, студ., ДВНЗ «ДонНТУ»

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ СМЕСИ В ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ РЕЦЕПТУРНОЙ СТАНЦИЕЙ

В статье рассматривается общее понятие задачи и ее связь с важными практическими аспектами при изучении пралиновой массы высшей степени однородности. Определены индексы качества готовой продукции, а также индексы качества начальных компонентов, входящих в рецептуру смеси. Предложена структура автоматизированной системы контроля.

The general raising of task and its communication with the important practical tasks of receipt of pralynovoy mass of high degree of homogeneity is considered in the article. The indexes of quality of the prepared products, and also indexes of quality of the initial components included in compounding of mixture, are certain. The structure of the automated control system is offered.

Общая постановка задачи и ее связь с важными практическими заданиями. Получение пралиновых смесей заданной степени однородности является сложным динамическим процессом, протекающим под влиянием многих возмущающих воздействий.

К таким воздействиям прежде всего следует отнести неоднородность исходного сырья, погрешность дозирования, повышение влажности и снижение температуры окружающей среды, налипание компонентов в дозаторах, взаимодействие расплавленного жира и др. [1]. Эти воздействия имеют случайный характер. Диапазон возможных отклонений параметров качества пралиновой смеси может превосходить диапазон допустимых, в связи с чем возникает необходимость контроля и управления процессом дозирования и перемешивания компонентов пралиновой смеси.

Создание системы автоматизированного управления рецептурной станцией включает несколько этапов: расчет и выбор оптимальной рабочей рецептуры пралиновой смеси; автоматизированную подачу компонентов исходного сырья, дозирование в соответствующий дозатор; автоматизированный анализ качества исходного сырья и готовой смеси по ходу технологического процесса.

Анализ публикаций и разработок по теме. Выполняемые повсеместно в производственных условиях упрощенные расчеты весовых соотношений компонентов пралиновых масс, которые являются входными параметрами настройки системы дозирования и перемешивания, сводятся к решению системы линейных алгебраических уравнений аналитическими либо графическими методами. Иногда используют для этих целей метод подбора,

закрывающийся в том, что на основании практики работы кондитерского цеха с близкими по реологическим и вкусовым характеристиками сырьем, ориентировочно подбирают состав из исходного сырья. Методы последовательного подбора наиболее дешевых компонентов также не всегда эффективны с точки зрения сокращения общих затрат на производство конфет, так как они не дают оптимального решения для каждого данного момента производства.

Постановка задачи исследований. До настоящего времени не решены вопросы идентификации и учета сбоев технологического процесса дозирования компонентов, обусловленных реологическими свойствами исходного сырья и приводящих к нарушению качества выходной продукции, а также простоям оборудования. Получение конкурентно способной продукции предусматривает улучшение ее качества, повышение производительности и удешевление производства за счет оптимизации системы управления. Достижение указанных показателей возможно с помощью интеллектуальных систем управления

Цель исследований: Решение задачи управления рецептурной станцией для получения пралиновой смеси заданного качества при заданной производительности имеет своей целью построение такой методики оценки параметров качества готовой смеси, на базе которой можно построить систему управления, принимающую решения на базе экспертных оценок.

Основной материал и результаты работы.

Одними из определяемых физических характеристик, позволяющих установить оптимальные показатели сырья и готовых изделий, являются их структурно-механические (реологические) характеристики, которые наиболее показательны как по диапазону возможных изменений, так и по исключительной их чувствительности к механическим воздействиям [1].

Классическая реология из методологического изучения превратилась в управляющую, главная задача которой состоит в обосновании получения материала с заданными свойствами и структурой. Для решения этой задачи необходима разработка методов и средств контроля параметров качества.

К числу основных реологических характеристик пралиновых масс относятся предельное напряжение сдвига, при котором начинается разрушение структуры, эффективная вязкость, пластическая прочность [2].

Пралиновые конфетные массы, представляют собой вязкопластичные структурированные дисперсные системы с характерной аномалией вязкости [3]. Экспериментально было установлено, что реологические характеристики пралиновых масс зависят от содержания жира, температуры массы, влияния механических воздействий [1, 2, 3]. Пралиновые массы относятся к смешанным коагуляционно-кристаллизационным структурам: при температурах выше температуры плавления дисперсионной среды рассматриваемые системы имеют коагуляционную структуру, с понижением

температуры происходит упрочнение структуры, связанное с кристаллизацией жира.

Анализируя рассматриваемый технологический процесс, видно, что задачу можно представить в виде некоторой целевой функции

$$Z = f(K, \eta, \varphi_1, \gamma, T, \lambda, \varphi_2, \vartheta, t), \quad (1)$$

где η – вязкость готовой смеси, Па·с; φ_1 – влажность пралиновой смеси, %; γ – дисперсность (степень кристаллизации) пралиновой смеси; T – температура смеси, °С; λ – жирность смеси, %; φ_2 – влажность исходного «сухого» сырья;

ϑ – градиент скорости перемешивания, с⁻¹. t – длительность одного цикла приготовления пралиновой смеси. K – целевая функция оптимального состава пралиновой смеси.

Степень достижения цели зависит от вышеуказанных переменных, которые позволяют минимизировать (например, длительность технологического цикла) либо максимизировать (например, качество смеси) функцию Z при соблюдении всех требований технологического процесса, т. е.

$$Z(K, \eta, \varphi_1, \gamma, T, \lambda, \varphi_2, \vartheta, t) \rightarrow \max. \quad (2)$$

Если принять, что значения масс компонентов, определенные в режиме реального времени будут соответствовать заданной точности, то качество получения высокооднородной смеси K будет определяться качеством контроля массы доз каждого компонента. Задачу получения однородной смеси можно представить в виде целевой функции

$$K = g(P_1, P_2, P_3, \dots, P_n), \quad (3)$$

где $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$ – массовые доли отдельных компонентов, входящих в рецептуру пралиновой смеси, по отношению к соответствующему дозатору.

Степень достижения этой цели зависит от переменных P_i , которые позволяют максимизировать функцию K , как обобщенного показателя качества при соблюдении всех требований технологического процесса, т. е.

$$K(P_1, P_2, P_3, \dots, P_n) \rightarrow \min, \quad (4)$$

При получении некоторого количества пралиновой смеси A из исходного сырья P_i ($i=1, 2, \dots, n$) справедливо следующее равенство:

$$A = \sum_{i=1}^n P_i = 1. \quad (5)$$

В свою очередь некоторые составляющие A , состоят из отдельных компонентов сырья (добавки, жир, орехи), подготовленного заранее, x_j ($j=1, 2, \dots, m$), определяющих состав рецептуры, т. е.

$$P_i = \sum_{j=1}^m a_{ij} \cdot x_j. \quad (6)$$

где a_{ij} – процентное содержание j -го компонента в i -й составляющей смеси (жир, орехи, добавки).

Независимые переменные x_j , как известно, неотрицательны и для каждого отдельного сплава ограничены пределами

$$0 \leq x_j \leq b_j, \quad (7)$$

Таким образом, задача дозирования компонентов смеси сводится к определению x_j , обращающих в минимум линейную форму (3), которую с учетом условий (5) и (6) можно представить в виде

$$K(P_1, P_2, \dots, P_n) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m a_{ij} x_j. \quad (8)$$

Схема приготовления пралиновой смеси показана на рис. 1. На рисунке обозначено: СК – смеситель компонентов; ДСП – дозатор сахарной пудры; ДД – дозатор добавок; СД – смеситель добавок; ДО – дозатор орехов; ДЖ – дозатор жира; $\pm \xi$ – внешние возмущения; М – порция готовой пралиновой массы

В данном случае в процессе дозирования, учитывая динамические характеристики исполнительных механизмов, K_i представляет собой некоторое множество значений показателя качества i .

Среди них есть те, которые содержат допустимые значения, т. е. $K_{1\delta}$ с K_1 ; \dots ; $K_{m\delta}$ с K_m . Следовательно $K_{i\delta}$ образует пространство допустимых решений, среди которых есть те, которые приводят к оптимальному значению

$$K_{opt} = K(K_{1opt}, \dots, K_{mopt}). \quad (9)$$

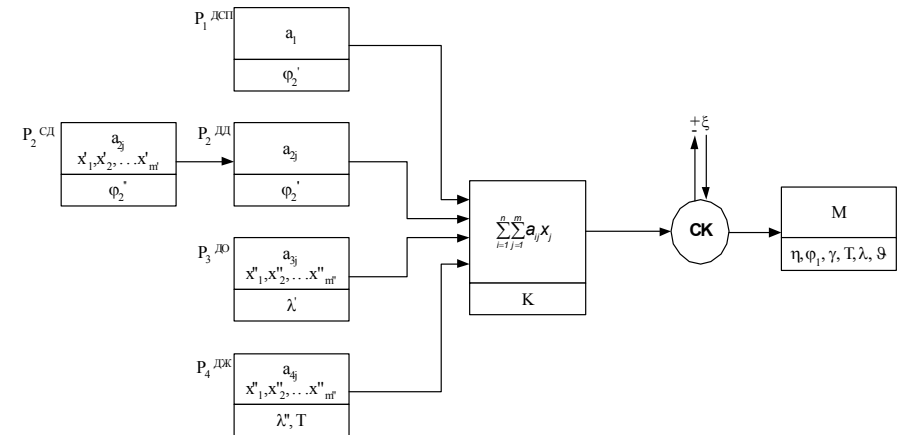


Рис. 1. Схема приготовления пралиновой смеси автоматизированной рецептурной станцией

В данном случае K_{1opt} с $K_{1\delta}$; \dots ; K_{mopt} с $K_{m\delta}$. Поскольку подобрать управляющее воздействие, в соответствии с точно заданными показателями качества K_o практически очень трудно, всегда имеется некоторое рассогласование ΔK_n в значениях показателей качества, т. е. $K_o = K_n + \Delta K_n$. Дальнейшее совершенствование процесса дозирования составляет задачу оптимизации управления на базе экспертных оценок показателей качества

пращиновой смеси. К этим показателям относятся вязкость η , дисперсность γ , температура смеси T .

Качество готовой смеси обеспечивается за счет контроля параметров: t – время приготовления одной порции; \mathcal{G} – градиент скорости перемешивания; λ – % содержание жира, является составной величиной, определяется суммой параметров λ' и λ'' . φ_2 – влажность исходного «сухого» сырья, которая представлена отдельными составляющими φ_2' (сахарной пудры) и φ_2'' (сухих добавок).

Структура подключения измерительных средств к отдельным структурным единицам рецептурной станции представлена на рис. 2.

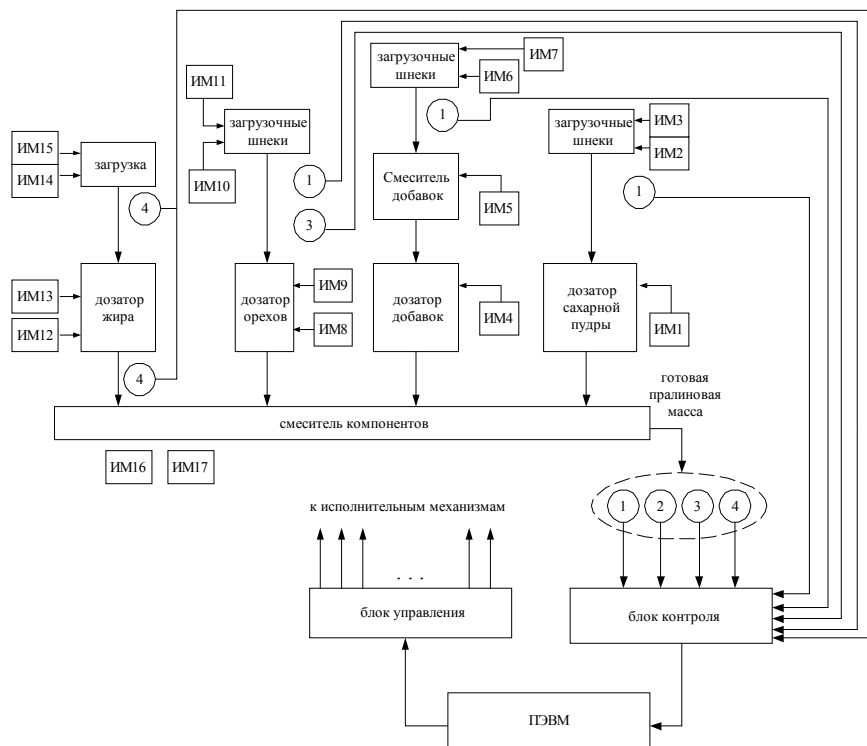


Рис. 2 Структура подключения средств определения качества в рецептурной станции: 1- датчики влажности (сухих и вязких веществ); 2- лабораторный анализ дисперсности; 3- датчики жирности; 4- датчики температуры

Анализ существующих измерительных средств [4] показывает, что для использования их в разрабатываемой системе они должны обладать минимальной погрешностью измерения.

Точность является одним из основных свойств качества. Количественно она оценивается погрешностью или величиной отклонения параметров от их номинальных значений. Возможные отклонения параметров определяются допуском, то есть заранее установленным опытом или расчетом, границами изменения параметров изделия, при которых оно способно выполнять свои функции в соответствии с назначением.

Рассмотрим причины, вызывающие отклонения процентного содержания компонентов в пралиновой смеси от установленных рецептурой. Это: несовершенство конструкции, приводящее к налипанию сырья на стенки дозаторов, изменение параметров окружающей среды (влажность, температура), разрыв гибких соединительных рукавов и так далее. Вопросы допусков наиболее полно разработаны в приборостроении для механизмов и механических устройств [5]. Можно показать, что отклонение по каждому компоненту пралиновой смеси определяется суммой, состоящей из трех погрешностей

$$\Delta S_{n1} = \Delta S_1 + \Delta S_2 + \Delta S_3, \quad (10)$$

$$\Delta S_1 = \frac{[x_i + \chi_i(\alpha_i + \beta_i + \alpha_i \beta_i)] \sum_{j=1}^n a_j P_j}{\sum_{i=1}^n P_i(1 + q_i)}$$

$$\Delta S_2 = \frac{[\alpha_i + \chi_i(\alpha_i + \beta_i + \alpha_i \beta_i)] \sum_{j=1}^n a_j P_j q_i}{\sum_{i=1}^n P_i(1 + q_i)} \quad \Delta S_3 = \frac{[1 + \chi_i] \sum_{i=1}^n (S_i - S_p) P_i q_i}{\sum_{i=1}^n P_i(1 + q_i)}$$

где ΔS_{n1} - процентное отклонение элемента S от расчетного S_p в готовой пралиновой смеси, приготавливаемой из n компонентов за один цикл, P_i - заданная доза i -го компонента; q_i - относительная погрешность дозирования i -го компонента; a_i - процентное содержание j -го элемента в i -й составляющей пралиновой смеси (для ореха и добавок); α_i - точность определения содержания элемента в i -й составляющей; χ_i - процент расхода «сухого вещества»; β_i - точность определения.

Из формулы (10) следует, что с ростом значений α и β повышаются требования к точности дозирования компонентов.

При условии $\alpha = \beta = 0$ получаем погрешность $\Delta S_{n1} = \Delta S_3$, зависящую только от погрешности дозирования каждого компонента. Погрешность $\Delta S_3 = 0$ в случаях, когда $q_1 = q_2 = q_3 = \dots = q_n$ и $q_1 = q_2 = q_3 = \dots = 0$.

Из этого следует, что наилучшей системой управления была бы та, которая обеспечивала дозирование компонентов с нулевыми либо равными погрешностями. Эти условия практически невыполнимы по трем основным причинам: подготовка исходного сырья неодинакова, т. е. компоненты

представляют собой мелкодисперсные вещества с различной степенью кристаллизации и жирностью; подача сырья производится неравномерно; элементы любой системы дозирования обладают инерционностью, которой нельзя пренебречь.

В связи с этим допустимые погрешности дозирования следует определять для конкретных случаев. Пользуясь приведенной формулой (10), можно для любого кондитерского изделия по составу рецептуры определить предельную допустимую погрешность дозирования каждого компонента. Для этого необходимо определить дисперсный состав компонентов смеси, допустимые отклонения процентного содержания жира заданных орехов и кондитерского жира от расчетных, точность определения температуры, вязкости смеси и влажности «сухого вещества», чувствительность весовых элементов дозатора и процентное содержание каждого компонента в смеси.

Будем предполагать, что функциональная связь между первичными параметрами рассматриваемыми x_i и выходным параметром y известна: $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$.

Сделаем допущение, что величины возможных отклонений первичных параметров значительно меньше их номинальных значений.

Предполагается также, что функция, устанавливающая связь между первичными и выходными параметрами, дифференцируема.

Первичные параметры имеют погрешности, обусловленные производственными факторами и изменяющимися условиями окружающей среды. Следовательно, выходной параметр тоже будет иметь отклонение от своего номинального значения, т. е. $y = y_n + \Delta y$.

Связь между отклонениями выходного параметра и отклонениями первичных параметров находится при помощи разложения функции y в окрестности номинальных значений в ряд Тейлора:

$$y_i + \Delta y = \phi(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ni}) + \frac{\partial \phi}{\partial x_{1i}} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial \phi}{\partial x_{ni}} \Delta x_n + R, \quad (11)$$

где $\phi(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ni})$ - номинальное значение выходного параметра; R - высшие составляющие разложения; $d\phi/dx_i = A_i$ - коэффициенты влияния или чувствительности.

Вычтем из левой и правой частей уравнения (11) y_n , ограничиваясь линейными членами, получим основное уравнение точности в абсолютных отклонениях

$$\Delta y = A_1 \Delta x_1 + A_2 \Delta x_2 + \dots + A_n \Delta x_n, \quad (12)$$

где Δx_i - отклонения i -го первичного параметра; Δy - абсолютная погрешность выходного параметра.

Умножим левую и правую части уравнения на $1/y_n$, а затем умножим каждый член правой части на x_{in}/x_{in0} , получим

$$\frac{\Delta y}{y_n} = A_1 \frac{x_{in} \Delta x_1}{y_n x_{in}} + A_2 \frac{x_{in} \Delta x_2}{y_n x_{in}} + \dots + A_n \frac{x_{in} \Delta x_n}{y_n x_{in}} \quad (13)$$

Обозначим $A_{0i} = A_i \frac{x_{in}}{y_n}$ - относительный коэффициент влияния i -го

параметра на результирующее отклонение; $\alpha_{ix} = \Delta x_i/x_{in}$ - относительное отклонение i -го первичного параметра; $\alpha_y = \Delta y/y_n$ - относительное отклонение выходного параметра.

Следовательно, с учетом принятых обозначений будем иметь $\alpha_y = A_{01} \alpha_{1x} + \dots + A_{0n} \alpha_{nx}$ или

$$\alpha_y = \sum_{i=1}^n A_{0i} \alpha_{ix} \quad (14)$$

Таким образом, температура, процентное содержание жира, градиент скорости перемешивания являются управляемыми однозначными факторами, влияющими на качество приготовляемой смеси. Требуется установить и оценить зависимость вязкости пралиновой массы от перечисленных факторов. Задача идентификации зависимости сводится к построению оптимальной её модели [6].

Выводы. Предложенная методика оценки показателей качества дает возможность решить задачу структурно-функционального синтеза системы, функционирующей на основе экспертных оценок хода технологического процесса. Основное внимание уделено синтезу структур технического и математического обеспечения.

В связи с повышением роли процесса приготовления пралиновой массы в управлении качеством конечной продукции, методика входит в комплексную автоматизацию рассматриваемого технологического процесса, базируясь на исследовании моделей протекающих физических процессов и эффективного управления этими процессами.

Список литературы: 1. Новая технология производства пралиновых конфет /Р.Г. Зобова, М.А. Талейник, Л.П. Игнатьева, В.И. Демидов.- М.: Легкая и пищевая промышленность, 1983. – 72с. 2. Зобова Р.Г., Ходак А.П. Исследование процессов структурообразования пралиновых масс. - Труды ВНИИКП, 1969, с. 17. 3. Волярович М.П., Гуткин А.М. К вопросу теории течения вязкопластичной среды. - Коллоидн. ж., т. 15, вып. 2, 1953, с. 155. 4. Е.С. Полищук Измерительные преобразователи К.: Вища школа Головное издательство, 1981. - 293с. 5. Фролов В.А. Математические модели и методы оптимального управления. 6. Молчанов А.А. Моделирование и проектирование сложных систем. – К.: Выща.шк. Головное изд-во, 1988. – 359 с.

О.В. ВОВНА, к-т. техн. наук, доц. ДВНЗ «ДонНТУ»,
А.А. ЗОРИ, д-р. техн. наук, проф. ДВНЗ «ДонНТУ»,
М.Г. ХЛАМОВ, к-т. техн. наук, проф. ДВНЗ «ДонНТУ»

СПОСІБ КОМПЕНСАЦІЇ ДИНАМІЧНОЇ ПОХИБКИ ІНФРАЧЕРВОНОГО ВИМІРЮВАЧА КОНЦЕНТРАЦІЇ МЕТАНУ ДЛЯ ВУГІЛЬНИХ ШАХТ

Розроблений спосіб компенсації динамічної похибки інфрачервоного вимірювача концентрації метану для вугільних шахт. Використання даного способу у стаціонарних вимірювачах концентрації метану дозволяє збільшити вірогідність виявлення та контролю вибухонебезпечних концентрацій при раптових викидах метану у вугільних шахтах.

The method of compensation of dynamic error of infra-red methane concentration measuring device for coal mines is developed. Usage of this method in the stationary methane concentration measuring devices allows increasing of probability of detection and control of highly explosive concentrations at the sudden methane ejection in coal mines.

Вступ. Останніми роками у вугільній промисловості України спостерігається стійка тенденція – збільшення глибини розробки вугілля, зростання частоти та інтенсивності газодинамічних проявів, раптові викиди метану, що призводить до підвищення вірогідності виникнення вибухонебезпечної ситуації та погіршення умов праці гірників [1]. Значною мірою цю проблему можна вирішити із використанням новітніх систем контролю концентрації метану у гірничих виробленнях вугільних шахт, які засновані на сучасній інформаційно-вимірювальній техніці. Розробки авторів відповідають напряму Програми науково-технічного розвитку Донецької області до 2020 р., дослідження проводилися у рамках «Програми наукових досліджень та розробок Міністерства освіти і науки України із пріоритетних напрямків розвитку науки і техніки». Метою роботи є підвищення швидкодії вимірювача концентрації метану при необхідній точності на основі оптико-абсорбційного методу із квазівідкритим оптичним каналом, при обліку та компенсації впливу дестабілізуючих факторів рудничної атмосфери.

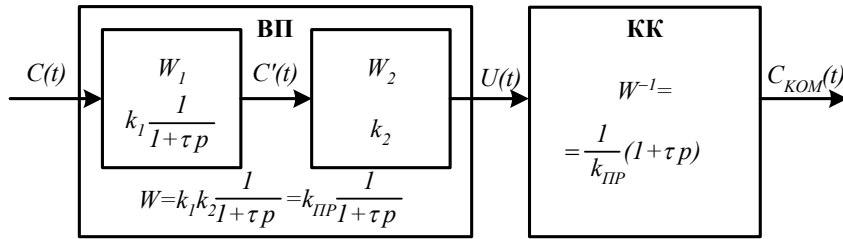
Постановка задачі. При роботі вимірювача концентрації метану в умовах запиленості рудничної атмосфери вугільних шахт та за наявності інших домішок, збільшується похибка вимірювання концентрації метану. Для отримання необхідних показників точності вимірювача аналізовану газову суміш прокачують через фільтри очищення, що призводить до погіршення динамічних властивостей вимірювача. В якості фільтру очищення використовується металева сітка, усередині якої знаходиться вимірювальний оптичний канал. При товщині металевого дроту 0,1 мм та площі отворів фільтру 0,01 мм² постійна часу фільтру складає порядку 1 с, при цьому необхідна швидкодія вимірювача концентрації метану повинна бути не більш

0,8 с [1]. Вимірювання концентрації метану здійснюється не у реальному масштабі часу, а із затримкою пропорційної постійної часу фільтру та технологічних операцій.

Для зниження динамічної похибки вимірювача концентрації метану необхідно зменшити постійну часу фільтру, що призводить до запилення оптичної системи, зниження її надійності та довготривалої стабільності. При цьому, використання різних фільтрів призводить до появи статичної мультиплікативної похибки вимірювання концентрації метану. За основу у запропонованому способі узятя задача удосконалення способу вимірювання концентрації метану [2] в умовах вугільних шахт, в якому за рахунок використання фільтрів очищення досягаються необхідні статичні показники точності вимірювання концентрації газу, а для компенсації динамічної похибки використовуються програмні методи цифрової обробки результатів вимірювань. Цей спосіб забезпечує швидкодню вимірювача при необхідній точності контролю концентрації аналізованого газу, що призводить до збільшення вірогідності виявлення та контролю вибухонебезпечних концентрацій при раптових викидах метану.

Основна частина. Динамічна похибка вимірювань залежить від постійної часу вимірювального перетворювача концентрації метану, а також швидкості його зміни, і може бути скоректована із використанням апаратних та програмних методів. Використання апаратних методів пов'язано з цілим рядом труднощів. При зниженні динамічної похибки шляхом зменшення постійної часу вимірювача концентрації метану, як правило, знижується його надійність та довготривала стабільність. Крім того, використання різних фільтрів призводить до появи статичної мультиплікативної похибки вимірювань. Тому запропоновано виконувати компенсацію динамічної похибки з використанням програмних методів.

Компенсація динамічної похибки є зворотною задачею по відновленню вхідного сигналу за відомою інформацією про апаратну функцію (W) вимірювального перетворювача [3]. Розглянемо задачу зміни миттєвих значень концентрації метану $C(t)$, яка перетворюється вимірювальним перетворювачем у сигнал $U(t)$ на його виході (рис. 1). При динамічних вимірюваннях інтерес представляє не вихідний сигнал напруги або струму вимірювального перетворювача $U(t)$, а концентрація метану $C(t)$. Тому задачею обробки результатів є визначення значень концентрації метану $C(t)$ за вихідним сигналом $U(t)$ та оператором W , який описує динамічні властивості вимірювального перетворювача, що є рішенням задачі корекції його апаратної функції. Найпростіше така задача вирішується реалізацією оператора W^{-1} , який є зворотнім оператору W , з використанням корегуючого кола KK (рис. 1) в апаратному або програмному вигляді, який обробляє сигнал $U(t)$. Проте за своєю суттю така задача є некоректною, оскільки зворотний оператор повинен реалізувати функцію прогнозу сигналу, що фізично реалізувати неможливо.



ВП – вимірювальний перетворювач ; КК – коректує коло

Рис. 1. Структура інфрачервоного вимірювача метану з динамічною корекцією

У зв'язку з цим коректне вирішення зворотної задачі при вимірюванні динамічних параметрів може бути виконано, якщо передбачити певне запізнювання у формуванні значень сигналу $C_{КОМ}(t)$ на виході коректуючого кола, що не вимагає реалізації функції прогнозу. Як правило, у найпоширенішому випадку інерційний вимірювальний перетворювач має передавальну функцію, яка відповідає передавальній функції аперіодичного кола першого порядку [3]:

$$W(p) = \frac{U(p)}{C(p)} = \frac{k_{ПП}}{1 + \tau \cdot p}, \quad (1)$$

де $k_{ПП}$, В/об% – коефіцієнт перетворення вимірювача із значення електричного сигналу, наприклад напруги, у значення концентрації метану; τ , с – постійна часу вимірювального перетворювача з фільтром очищення аналізованої газової суміші від пилу; p – оператор Лапласа.

Диференціальне рівняння, яке описує цей вимірювальний перетворювач, має наступний вигляд:

$$\tau \cdot \frac{dU(t)}{dt} + U(t) = k_{ПП} \cdot C(t). \quad (2)$$

Передавальна функція (1) встановлює залежність між вихідним та вхідним сигналами, які довільно змінюються у часі. Відповідно до перетворення Лапласа:

$$L\{U(t)\} = W(p) \cdot L\{C(t)\}. \quad (3)$$

Співвідношення (3) справедливе і стосовно цифрових систем. Перетворена передавальна функція (1) дозволяє спростити формулу для числових послідовностей, тому має місце наступне перетворення:

$$z\{U(t_k)\} = \tilde{W}(z) \cdot z\{C(t_k)\},$$

де z – перетворення вхідної послідовності, яке визначається співвідношенням

$$z\{C(t_k)\} = C(z) = \sum_{k=0}^{\infty} C(t_k) \cdot z^{-k}. \text{ Вихідна послідовність одержана шляхом}$$

відповідного зворотного перетворення Лапласа:

$$U(z) = k_{ПП} \cdot C(z) - \tau \cdot z^{-1} \cdot U(z).$$

Використовуючи опис кола затримки z^{-1} у дискретній області $U_k = U_{k-1}$ [4], одержана рекурентна формула для розрахунку вихідної послідовності сигналу вимірювача концентрації метану у дискретні моменти часу:

$$U_{k+1} = k_{ПП} \cdot C_{k+1} - \tau \cdot \frac{U_k}{\Delta t}, \quad (4)$$

де Δt , с – шаг дискретизації у часі вихідних електричних сигналів.

Рекурентна формула (4) є аналогом диференціального рівняння безперервної системи (2). За заданими початковими умовами $U(t_0) = 0$ та $C(t_N) = 0$, співвідношення (4) можна використовувати як рекурентну формулу для розрахунку вихідної послідовності вимірювального перетворювача. Передавальна функція коректуючого кола приймає наступний вигляд:

$$W^{-1}(p) = \frac{C_{КОМ}(p)}{U(p)} = \frac{1}{k_{ПП}} \cdot (1 + \tau \cdot p). \quad (5)$$

Таким чином, коректує коло повинно реалізовувати функцію диференціювання вихідного сигналу вимірювача концентрації метану $U(t)$ та складання його похідної із самим вихідним сигналом (рис. 2).

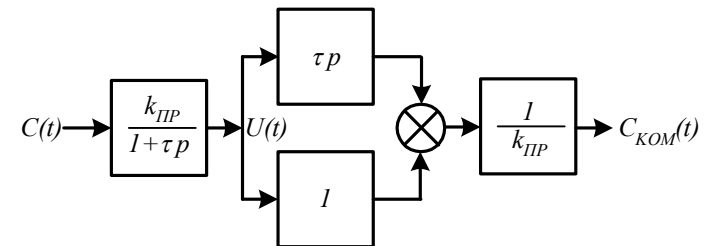


Рис. 2. Структурна схема коректуючого кола вимірювача концентрації метану

Різницеве рівняння коректуючого кола у дискретні моменти часу має наступний вигляд:

$$C_{k+1} = \frac{1}{k_{ПП}} \cdot \left(U_{k+1} + \tau \cdot \frac{U_k}{\Delta t} \right). \quad (6)$$

Для перевірки коректності розробленого способу компенсації динамічної похибки проведено імітаційне моделювання вимірювача концентрації метану із коректуючим колом. На вхід імітаційної моделі подано випадковий стаціонарний сигнал, який має нормальний закон розподілу із наступними параметрами: математичне очікування зміни

концентрації метану $m_c=2,0^{об.}\%$; середньоквадратичне відхилення $\sigma_c=0,4^{об.}\%$; кількість точок вибірки $N=50$ (рис. 3). На рис. 3 наведено графіки зміни концентрації метану без компенсації динамічної похибки $C,^{об.}\%$ – 1 та зміни вихідного сигналу вимірювального перетворювача $U_{k+1} \cdot \frac{1}{k_{ПП}}^{об.}\%$ – 2 при постійній часу фільтру очищення $\tau=0,8$ с, шагу дискретизації за часом $\Delta t=1$ с та коефіцієнту передачі вимірювача концентрації метану $k_{ПП}=0,1$ В/ $^{об.}\%$. Графіки зміни концентрації метану $C,^{об.}\%$ – 1 та зміни концентрації метану $C_{КОМ},^{об.}\%$ – 2 із компенсацією динамічної похибки при використанні програмних методів цифрової обробки результатів вимірювань наведено на рис. 4.

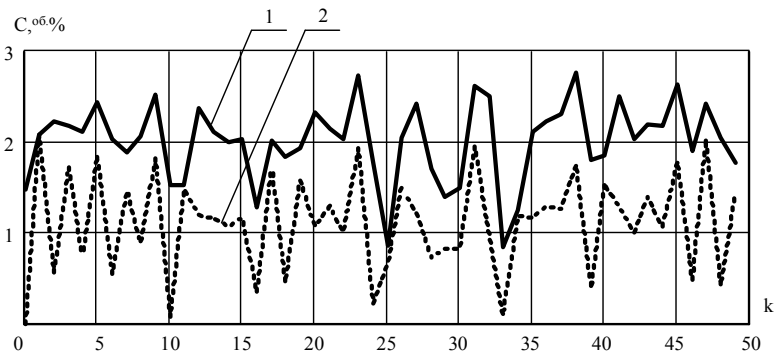


Рис. 3. Сигнали концентрації метану на вході та виході вимірювального перетворювача

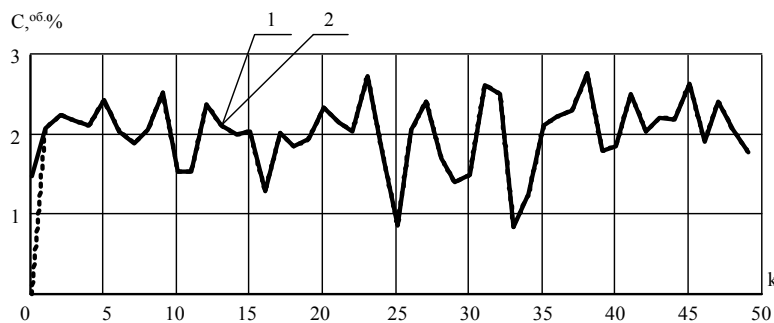


Рис. 4. Сигнали концентрації метану на вході вимірювального перетворювача до та після компенсації динамічної похибки

При використанні розробленого способу компенсації, як видно з рис. 4, практично повністю усувається динамічна похибка інфрачервоного вимірювача концентрації метану з фільтрами очищення аналізованої рудничної атмосфери від пилу.

Реалізація розробленого способу компенсації. Досліджувана газова суміш очищається від пилу шляхом проходження через квазівідкритий фільтр до отримання у вимірювальному каналі аналізованої газової суміші із (3–5) % пилу. Одночасно пропускають потоки інфрачервоного випромінювання від одного або двох джерел через одну або дві вимірювальні кювети. Потоки інфрачервоного випромінювання, які несуть інформацію про зміну концентрації метану у газовій суміші з урахуванням часу запізнення фільтру очищення, поступають на приймачі, які перетворюють інтенсивність потоків випромінювання в електричні сигнали. Одержані електричні сигнали перетворюють у цифровий код для реалізації програмного методу цифрової обробки результатів вимірювання. Виконується збереження дискретного значення вихідної напруги U_k або відношення, або різниці вихідних напруг вимірювальних каналів у момент часу k , далі у наступний момент часу $k+1$ через інтервал часу Δt процедура вимірювання повторюється. Після чого виконується розрахунок концентрації аналізованого газу у момент часу $k+1$. Описана процедура повторюється циклічно протягом всього часу роботи вимірювача концентрації метану. Дані про концентрацію метану у рудничній атмосфері вугільних шахт з урахуванням корекції динамічної похибки вимірювання виводять на індикатор та за цифровим каналом зв'язку передають до системи аерогазового захисту вугільної шахти або промислового підприємства.

Висновок. Використання компенсації динамічної похибки за допомогою програмних методів цифрової обробки результатів дозволяє виконувати вимірювання концентрації метану у квазіреальному масштабі часу. Запропонований спосіб дозволяє підвищити швидкість вимірювачів концентрації метану при необхідній точності вимірювання. За рахунок використання фільтрів очищення досягаються необхідні статичні показники точності вимірювання концентрації метану, а для компенсації динамічної похибки використовуються програмні методи цифрової обробки результатів вимірювання. Використання розробленого способу у стаціонарних вимірювачах концентрації метану дозволяє збільшити вірогідність виявлення та контролю вибухонебезпечних концентрацій при раптових викидах метану у вугільних шахтах.

Список літератури: 1. Волошин Н.Е. Внезапные выбросы и способы борьбы с ними в угольных шахтах / Н.Е. Волошин. – К.: Техника, 1985. – 127 с. 2. Пат. 46197. Україна, МПК G 01 N 21 / 31. Спосіб вимірювання концентрації метану у рудничній атмосфері / О.В. Вовна, А.А. Зорі, В.Д. Коренев, М.Г. Хламов; Донец. нац. техн. ун-т (Україна). – № u200906578; заявл. 23.06.2009; опубл. 10.12.2009. 3. Таланчук М.П. Засоби вимірювання в автоматичних інформаційних та керуючих системах: [підручник] / П.М. Таланчук, Ю.О. Скрипник, В.О. Дібровний. – К.: Райдуга, 1994. – 672 с. 4. Титце У. Полупроводниковая схемотехника: в 2 т.: пер. с нем. – Т.2. / У. Титце, К. Шенк. – М.: Додэжа – XXI, 2008. – 942 с.

Д.О. ДАШИН, студ., ДонНТУ,
В.П. ТАРАСЮК, к-т. техн. наук, доц., ДонНТУ

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТОЛЩИНОМЕР ПОКРЫТИЙ РАБОЧИХ ВАЛКОВ НА ПРОКАТНЫХ СТАНАХ

В данной работе разработана структура и изучены возможности ультразвукового толщиномера, который специализируется на измерении толщины поверхностного покрытия рабочих валков на прокатных станах. Осуществлён выбор и расчёт раздельно-совмещённого пьезоэлектрического ультразвукового преобразователя применяемого в качестве излучателя и приёмника акустических сигналов.

In this work the structure and studied the possibility of an ultrasonic thickness gauge, which specializes in measuring the thickness of the surface coating of work rolls in rolling mills. Carried out the selection and calculation of separate-combined piezoelectric transducer used as a transmitter and receiver of acoustic signals.

Введение. На сегодняшний день рабочие валки, являясь инструментом, от которого зависит производительность прокатного стана, оказывают большое влияние на качество поверхности и профиль проката. Валки в процессе работы изнашиваются, на их поверхности появляются микродефекты, она постепенно стирается. Развиваясь, дефекты могут приводить к сколам или к полному разрушению вала.

В условиях холодной прокатки металлов (трение со скольжением) многочисленные переменные факторы внешнего воздействия сильно влияют на рабочую поверхность валков – давление металла на валки, скорость прокатки, коэффициент трения скольжения, температурный режим валков, условия смазки полосы и охлаждения валков, условия натяжения полосы при прокатке и так далее [1]. Аварийный выход валков из строя приводит к очень большим затратам (простой стана на многие часы, бракованный прокат, повреждение оборудования). Стоимость высокохромистых валков составляет 30 - 40, а быстрорежущих - 40 - 70 тыс. долларов.

Проблема быстрого износа рабочих валков вызвала необходимость контроля прочности их поверхностного слоя в связи с тем, что они испытывают термический удар и большие знакопеременные нагрузки в процессе проката.

Анализ разработок по теме. На сегодняшний момент ведутся активные разработки в области толщинометрии (магнитной, радиационной, ультразвуковой, оптической). Этим вопросом занимаются как отечественные, так и зарубежные компании и фирмы. Среди них можно выделить: фирму «Акустические Контрольные Системы» (Москва, Россия), которая занимается проведением научных исследований и разработкой толщиномеров и дефектоскопов; предприятие «Фирма С-Комп» (Никополь, Украина), которая

занимается производственно-торговой деятельностью и выпускает приборы и преобразователи для неразрушающего контроля; компанию «Тек Инжиниринг» (Киев, Украина), выпускающая производственное и лабораторное оборудование; научно-промышленную компанию «Луч» (Балашиха, Россия). Основным недостатком толщиномеров, которые выпускаются данными фирмами, является недостаточная точность из-за большого диапазона измерения приборов.

Постановка задачи исследования. Целью данной статьи является разработка структуры и изучение возможностей ультразвукового толщиномера для использования в измерениях толщины поверхностного покрытия рабочих валков на прокатных станах с большей точностью, надёжностью, в более тяжёлых условиях, чем многие его аналоги.

Решение задачи и результаты исследования. Первоначально для увеличения прочности верхнего слоя рабочих валков производилось поверхностное упрочнение с применением различных технологий. Однако с увеличением скорости прокатки, ужесточением норм по качеству поверхности проката такие валки перестали удовлетворять все возрастающим требованиям. Для изготовления высококачественных рабочих валков стали применять двухслойное литье. Внутреннее ядро бочки отливается из чугуна (серого или шаровидного), а рабочий слой - из легированных или высоколегированных (хромистых) сталей. В последние годы в качестве металла для внешнего слоя начали применять полу- и даже быстрорежущие стали [2].

В толщиномере предлагается использовать метод ультразвуковой эхолокации. Принцип работы толщиномера изображён на рис. 1. Раздельно-совмещённый пьезоэлектрический ультразвуковой преобразователь применяется в качестве излучателя и приёмника акустических сигналов.

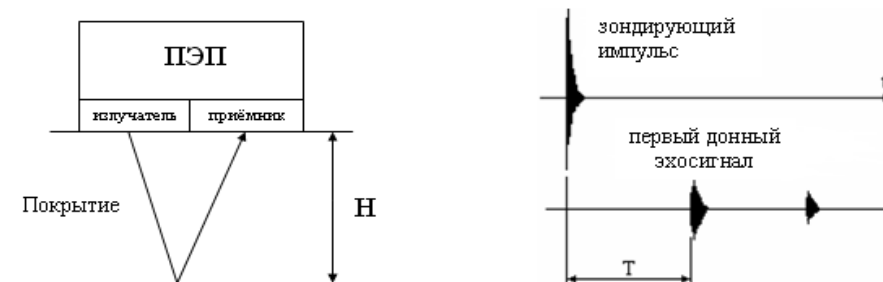


Рис. 1. Принцип работы ультразвукового толщиномера

Ультразвуковой преобразователь устанавливается на поверхности изделия. Поверхность под ним смазывается контактной жидкостью для обеспечения акустического контакта. Ультразвуковой толщиномер формирует мощный короткий электрический сигнал, который поступает на излучающую пьезопластину, которая возбуждает акустический зондирующий

импульс. Этот импульс распространяется вглубь покрытия, отражается от границы соприкосновения покрытия с валком и возвращается обратно к преобразователю. Приёмная пьезопластина датчика преобразует отражённый акустический импульс в электрические колебания (донный эхосигнал). Донный эхосигнал поступает в толщиномер, усиливается приёмником до амплитуды необходимой для обнаружения сигнала.

Измерение задержки донного эхосигнала осуществляется методом перехода через ноль. Прибор снабжён пороговым дискриминатором для обнаружения эхосигнала. Метод перехода через ноль изображён на рис. 2. Если эхосигнал превышает порог дискриминатора, то прибор начинает ждать перехода сигнала через ноль. В этот момент фиксируется задержка эхосигнала необходимая для прохождения эхосигнала через покрытие и назад [3]. Достоинство такого метода: обеспечивается высокая стабильность показаний толщиномера, так как момент перехода сигнала через ноль не зависит от амплитуды сигнала.

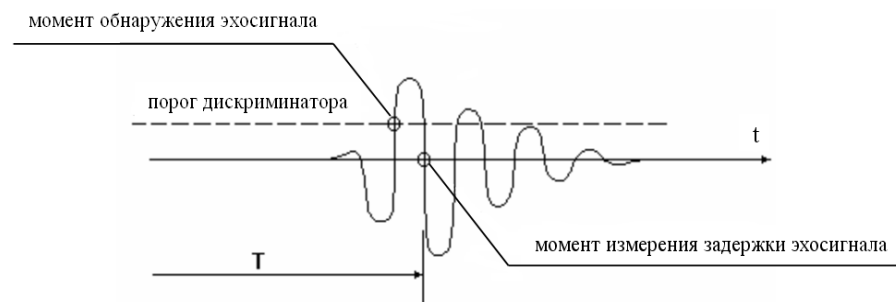


Рис. 2. Определение задержки эхосигнала методом перехода через ноль

Прибор измеряет время задержки первого донного эхосигнала относительно момента излучения зондирующего импульса. Обозначим это время – T . В измеряемое время T входит определённое время пробега волн в самом преобразователе – T_p . Следовательно, время, характеризующее толщину изделия, определяется выражением $(T - T_p)$. Путь пробега волн в изделии равен произведению скорости продольных волн на время – $C \cdot (T - T_p)$. Учитывая, что волны пробегают толщину изделия два раза, получим

$$H = C \frac{T - T_p}{2}. \quad (1)$$

Вышеуказанная формула является приближённой поскольку на самом деле ультразвуковые волны имеют V – образный путь в покрытии и длина такого пути всегда больше, чем удвоенная толщина изделия. Именно ошибка измерения толщины, связанная с приближённым расчётом, является основной погрешностью толщиномера. Она зависит от размера пьезоэлементов, длины

волны и от формы ультразвукового пучка. Основная погрешность представляет собой систематическую ошибку, которую можно исключить.

В толщиномере используется раздельно-совмещенный преобразователь типа П112-5-10/2-А-003-М, диапазон измерения которого от 1 до 300 мм. Данный преобразователь является прямым преобразователем, осуществляющим ввод и прием УЗ колебаний по нормали к поверхности в точке ввода. По способу осуществления акустического контакта преобразователь относится к контактным преобразователям, таким, рабочая поверхность которых при работе соприкасается с поверхностью объекта контроля или имеет расстояние до нее меньше половины длины волны в контактной жидкости. В преобразователе в одном корпусе размещены два пьезоэлемента на соответствующих акустических линиях задержки (призмах); один из них работает в режиме излучения, другой – в режиме приема упругих колебаний. Рабочая поверхность преобразователя имеет диаметр 10мм. Габаритные размеры преобразователя – 18 x 50 мм. В качестве материала линий задержки в ультразвуковых преобразователях раздельно - совмещенного типа П112 используется полиимид, композитные материалы, оргстекло, кварцевое стекло, что обеспечивает повышенную износоустойчивость преобразователей и возможность работы на изделиях с Rz до 200 мкм. Излучающая поверхность преобразователя плоская, круглой формы.

Измерение толщины покрытия пьезопреобразователем в режиме излучения сводится к нахождению распределения механических напряжений (деформаций) на его поверхности, обращённой к изделию, либо на поверхности изделия, примыкающей к преобразователю, при известном электрическом напряжении (силе тока), приложенном к преобразователю. В режиме приёма решается обратная задача – нахождение электрического отклика преобразователя, присоединённого к электрическому регистрирующему устройству, при создании на его поверхности известного распределения механических напряжений (деформаций). Система уравнений, описывающая работу пьезопреобразователя, должна содержать уравнение движения упругой среды, уравнения, связывающие механические напряжения и деформации, а также уравнения, учитывающие прямое и обратное взаимодействие электрических и акустических полей при излучении и приёме УЗ сигналов [4].

Уравнение движения упругой среды можно получить из 2-го закона Ньютона, если приравнять силу внутренних напряжений произведению ускорения на массу единицы объёма тела [5]:

$$\rho \frac{\partial^2 \xi_i}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k}, \quad (2)$$

где ρ - плотность упругой среды; ξ_i - механическое смещение в упругой волне.

Если в качестве независимых переменных использовать деформацию тела и напряжённость электрического поля, то при подстановке в уравнение (2) уравнения прямого пьезоэффекта пренебрегая тепловыми эффектами получаем

$$\rho \frac{\partial^2 \xi_i}{\partial t^2} - c_{ijkl}^E \frac{\partial^2 \xi_i}{\partial x_j \partial x_k} = - \frac{\partial}{\partial x_j} (e_{ijk} E_k), \quad (3)$$

где c_{ijkl}^E - коэффициенты упругости; e_{ijk} - пьезоконстанты.

Если продифференцировать левую и правую части уравнения (2) по координате и в получившееся выражение вместо u_{ik} подставить уравнение обратного пьезоэффекта, то получим

$$\rho s_{ijkl}^E \frac{\partial^2 \sigma_{kl}}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 \sigma_{ik}}{\partial x_k \partial x_j} = \rho d_{ijk} \frac{\partial^2 E_k}{\partial t^2}, \quad (4)$$

где s_{ijkl}^E - податливости; d_{ijk} - пьезомодули.

Уравнения (3) и (4) позволяют выразить изменяющиеся во времени и пространстве механические величины (смещение, механические напряжения) через электрические (напряжённость и индукция электрического поля), и наоборот. Однако эти уравнения должны быть дополнены уравнениями, связывающими напряжённость и индукцию электрического поля внутри пьезоэлектрика с такими величинами, как напряжение, приложенное к пьезопреобразователю, или сила тока, вырабатываемого генератором электрических сигналов.

Электрическое поле E_i в пьезоэлектрике является потенциальным и может быть охарактеризовано с помощью скалярного потенциала φ . Используя вместо E_i одно из уравнений прямого пьезоэффекта и выполняя интегрирование, получаем

$$\int_0^d E_i dx_i = \varphi_n = \int_0^d \beta_{ij}^u D_j dx_i - \int_0^d h_{ijk} \frac{\partial \xi_i}{\partial x_k} dx_1, \quad (5)$$

где d - толщина пьезоэлемента; φ_n - разность потенциалов между металлическими электродами, расположенными на противоположных гранях пьезоэлемента; D_j - электрическая индукция; h_{ijk} - пьезоконстанты.

Что касается силы тока, протекающего через пьезоэлемент, то её нетрудно связать с электрической индукцией, так как последняя непосредственно определяется поверхностной плотностью свободных зарядов на проводящих электродах:

$$i = A \frac{\partial \sigma_{свб}}{\partial t} = A \frac{\partial D_n}{\partial t}, \quad (6)$$

где A - площадь электрода; D_n - составляющая вектора электрической индукции, нормальная к поверхности электродов. Подчёркнём, что вне электродов, внутри пьезоэлектрика, являющегося диэлектриком, выполняется уравнение [6]:

$$\frac{\partial D_i}{\partial x_i} = 0. \quad (7)$$

В результате получаем систему уравнений - одно из уравнений (3) или (4), уравнения (5), (6) и (7). Если упростить данную систему, то мы получим одномерное неоднородное волновое уравнение

$$c_{33}^E \frac{\partial^2 \xi_1}{\partial x_3^2} - \rho \frac{\partial^2 \xi_2}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x_3} (e_{33} E_3), \quad (8)$$

из которого следует, что при приложении внешнего поля вдоль оси x_3 в пьезоэлементе возбуждается чисто продольная волна, распространяющаяся в том же направлении x_3 . На данном принципе работает выбранный раздельно-совмещенный преобразователь типа П112-5-10/2-А-003-М.



Рис. 3. Структурная схема ультразвукового толщиномера для измерения толщины поверхностного покрытия валков прокатных станов

Рассмотрим структурную схему прибора (см. рис. 3). Центральным звеном прибора является микропроцессор, на который возложены большинство функций управления другими устройствами и проведение вычислений. Режим работы микропроцессора задаётся оператором с кнопочной клавиатуры. Состояние микропроцессора, результаты вычислений выводятся на индикатор.

Микропроцессор даёт команду на формирование запускающего импульса в генератор зондирующих импульсов (ГЗИ) и одновременно запускается измеритель временных интервалов (ИВИ). ГЗИ в свою очередь формирует зондирующий импульс, который поступает на излучающую пьезопластину первичного измерительного преобразователя. Донный

эхосигнал от приёмного пьезоэлемента поступает на вход усилителя. Принятый измерительным преобразователем эхо-импульс усиливается, и после амплитудной и временной селекции нормализованный эхо-импульс поступает на измеритель временных интервалов.

Амплитудная селекция и формирование нормализованного импульса, «привязанного» к характерной точке принятого сигнала, осуществляется с помощью компаратора и ЦАП, управляемого микропроцессором. Временная селекция эхо-импульса выполняется на временном селекторе с использованием схемы задержки, управляемой также от микропроцессора. Закон управления схемой задержки и ЦАП определяется микропроцессором в соответствии с введенными с панели управления параметрами ВРЧ (временная регулировка чувствительности) – максимальное значение и скорость спада уровня амплитудного ограничения. Измерение временных интервалов и формирование управляемой задержки осуществляется с помощью генератора опорной частоты (ГОЧ). Измеренный в ИВИ временной интервал считывается микропроцессором для выполнения обработки результатов измерения и формирования выходной информации.

Значение скорости распространения продольных волн в материале контролируемого изделия, необходимое для вычисления толщины, либо устанавливается вручную, либо измеряется по значению известной толщины. Настройка толщиномера на используемый преобразователь производится на эталоне с известной скоростью распространения УЗК и известной толщиной. При этом в микропроцессоре сохраняются данные о задержках в призме преобразователя. Электропитание толщиномера осуществляется от встроенных элементов питания (батареи, аккумуляторы), обеспечивающих его автономную работу.

Вывод. Предложенный в данной статье ультразвуковой толщиномер может быть адаптирован для измерения различных толщин покрытий рабочих валков разного материала на прокатных станах. В толщиномере используется метод ультразвуковой эхолокации. Прибор использует пьезоэлектрический преобразователь раздельно-совмещенного типа. Благодаря измерению задержки донного эхосигнала методом перехода через ноль обеспечивается высокая стабильность показаний толщиномера. Основная погрешность толщиномера представляет собой систематическую ошибку, которую можно исключить. Центральным звеном прибора является микропроцессор, на который возложены практически все функции управления другими устройствами.

Список литературы: 1. Валки прокатных станов / Под ред. В.П.Полухина. – М.: Машиностроение, 1989. – 451 с. 2. 6. А.Ф.Белов. Прокатное и волочильное производство. – М.: Машиностроение, 1990. – 515 с. 3. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. Под общ. ред. В.В.Клюева. Т. 3: Ультразвуковой контроль / И.Н.Ермолов, Ю.В.Ланге. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с. 4. И.Н.Ермолов. Ультразвуковые пьезопреобразователи для неразрушающего контроля. – М.: Машиностроение, 1986. – 274 с. 5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. – М.: Наука, 1982. – 624 с. 6. Тамм И.Е. Основы теории электричества. – М.: Наука, 1966. – 620 с.

С. В. АВРАМЕНКО, студ. ДВНЗ «ДонНТУ»,
В. П. ТАРАСЮК, к-т. техн. наук, доц. ДВНЗ «ДонНТУ»,
В. І. БУРКІВЧЕНКО, к-т. техн. наук, доц. ДВНЗ «ДонНТУ»

ПРИЛАД КОНТРОЛЮ СТУПЕНЯ ІОНІЗАЦІЇ В ПРИМІЩЕННІ

У роботі аргументовано необхідність контролю іонізації в приміщенні, наведено санітарні норми, яких треба дотримуватися. Запропоновано розробити прилад, принцип дії якого полягатиме у диференційному підході до вимірювання кількості заряджених часток, тобто одночасному вимірюванні кількості іонів позитивної та негативної полярностей та обчисленні коефіцієнту ініполярності, розроблено структурну схему приладу.

The problem of control of ionization of air in apartments is enough actual. Control after ionization was needed as a method of observance of sanitary norms, and also as a method of avoidance of negative consequences for a health. Automation of this process - one of tasks of modern science. It is suggested to consider the variant of creation of this device on the basis of meter of ions straight related to the ionizer.

Вступ. У сучасних житлових, робочих і суспільних приміщеннях спостерігається фізіологічно несприятлива аероіонна обстановка. Особливу небезпеку представляє робота багатьох технічних пристроїв (наприклад, комп'ютерів або електрокопіїв), і технологічних процесів, здатних створювати значні аероіонні аномалії. Під особливо сильний вплив несприятливої аероіонної обстановки підпадають люди з ослабленим здоров'ям і медичний персонал, що тривалий час знаходиться в приміщеннях фізіотерапії і рентгенодіагностики.

Фізіологічно несприятлива аероіонна обстановка характеризується відносно низькою (менше 250 іон/см³) концентрацією легких негативних аероіонів, значними концентраціями легких позитивних аероіонів (більше 500 іон/см³) і важких аероіонів (більше 1000 іон/см³ кожної полярності). Також має значення динамічність аероіонної обстановки, і стан таких чинників навколишнього середовища, як температура і вологість повітря. Своєчасне і ефективне коректування аероіонної обстановки можливе шляхом застосування спеціальних технічних пристроїв - аероіонізаторів, оптимізації систем вентиляції і розташування техногенних джерел локальної іонізації, режимів виробничих процесів [1].

Аероіони здатні надавати сильну фізіологічну дію на організм людини і використовуються при лікуванні і профілактиці багатьох захворювань, тому сучасна офіційна медицина визнає необхідність іонізації повітря в приміщеннях, де живуть і працюють люди. Недолік іонізації в приміщенні позначається негативно на самопочутті: постійне кисневе голодування призводить до погіршення самопочуття, головних болів, депресій, підвищеної стомлюваності, втраті уваги і, як наслідок, до зниження працездатності. Крім

того, знижується імунітет, що провокує розвиток різного роду захворювань. Створено цілий перелік іонізаторів, які мають вирішувати цю проблему, збільшуючи кількість негативних аероіонів в приміщенні, і тим самим поліпшують якість повітря, даючи можливість повноцінно дихати, знижуючи стомлюваність, даруючи здоров'я і довголіття.

Проте багато досліджень показують, що існуючі дані по діях негативних іонів на продуктивність праці непослідовно і суперечливо [2]. Тому представляється, що ще неможливо довести безумовно, що генерація негативних іонів дає реальні переваги, тобто велика кількість негативних іонів не однозначно позитивно впливає на здоров'я людини. Фахівці не рекомендують використовувати іонізатори в таких випадках:

- за наявності злویкісних новоутворень. Аероіони, які виробляються іонізатором, підсилюють обмін речовин, що може привести до швидшого розвитку ракових пухлин;

- при високій температурі тіла. Прискорення обміну речовин може привести до тимчасового погіршення самопочуття хворого;

- у сильно запиленому і задимленому приміщенні. Частинки пилу електризуються і глибше проникають в легені;

- при індивідуальній нестерпності.

Аналіз літератури. Звертаючись до сучасної літератури з цієї тематики, було знайдено декілька пристроїв, дія яких спрямована головним чином лише на реєстрацію кількості легких аероіонів, припускаючи, що всі іони мають однаковий заряд, тобто рахують сумарну кількість часток [1, 2, 4]. Крім того, необхідно мати на увазі, що ці пристрої мають обмеження ще й унаслідок впливу інших чинників, таких як вологість і статичне електричне поле. Таким чином, ці пристрої не дають необхідної картини про якість повітря.

Крім того, існуючі прилади не відповідають сучасним вимогам:

- контроль норм ступені іонізації повинен бути пов'язан з фізіологічними особливостями організму;

- наявність іонізатора в приміщенні призводить до поступової зміни концентрації іонів, яку треба фіксувати не одноразово, а враховуючи цю динаміку;

- повинні бути зручними у використанні.

Постановка задачі. Корегування аероіонної обстановки вимагає вимірювання характеристик аероіонів. Активні дослідження аерофонів, як елементу атмосферної електростатики почалися більше сторіччя тому, в результаті досягнуті значні теоретичні та практичні результати. Проте до теперішнього часу, подібні вимірювання ще недосить упроваджені в практику, оскільки технічні, експлуатаційні і вартісні характеристики відомих аероіонметрів серійного виготовлення не повністю задовольняють сучасним вимогам.

Норми іонізації вже затверджені та доведена необхідність контролювати їх дотримання. Але питання контролю за іонізацією залишається відкритим і дотепер не вирішеним, тому є потреба розглянути саме цю проблему.

Вимірювання іонного стану будь-якої речовини полягає у знаходженні кількості часток, а саме: позитивно, негативно і нейтрально заряджених іонів. За параметр контролю слід взяти ступінь іонізації повітря, який визначається як відношення числа іонізованих часток n до загального числа часток N :

$$s = \frac{n}{N}. \quad (1)$$

Необхідно вимірювання концентрації іонів одночасно позитивної і негативної полярності, а також для виведення ступеня іонізації в приміщенні. Тобто ступінь іонізації в цьому випадку є коефіцієнтом уніполярності:

$$s = \frac{n_p + n_n}{N}, \quad (2)$$

де n_p – кількість негативно заряджених часток, а n_n – кількість позитивно заряджених часток.

Розробка структурної схеми та принцип дії приладу. Для того, щоб охарактеризувати стан іонів в повітрі, недостатньо знати тільки відсоткову присутність їх у повітрі, оскільки іонні властивості повітря визначаються також властивостями самих іонів. Необхідно вимірювати не електричну провідність повітря, оцінюючи іонний склад, а робити виміри концентрації самих іонів. І це, на наш погляд, є єдиний правильний і точний метод вимірювання іонів.

Таким чином можна поставити конкретні вимоги до приладу, що розробляється:

1. Вимірювання іонів негативно і позитивної полярностей одночасно.
2. Знаходження коефіцієнту уніполярності.
3. Зведення часу затримки приладу до мінімуму.
4. Перевірка отриманих даних на відповідність класу точності та можливість їх коректування.
5. Живлення приладу відбуватиметься від гілки напруги, також має бути можливість живлення від акумулятору (в такому разі необхідно виводити дані про стан акумулятора та попередження про його розрядку на індикацію).
6. Можливість вибору режиму роботи.
7. Наявність цифрової індикації.
8. Вибірка, обробка та зберігання інформації за допомогою мікропроцесорного блока.
9. Можливість зв'язку з персональним комп'ютером.
10. Захист приладу від найбільш вагомих зовнішніх впливів та стану навколишнього середовища.

11. Можливість оцінки працездатності та виявлення пошкоджень, та можливість швидкого та якісного їх відладження.

12. Можливість зв'язку з іонізатором та коректування його роботи.

Основна частина. За основу приладу взято іонізаційний метод, принцип дії якого спрямовано на властивості самих іонів [3]. Однією з цих властивостей є рухливість іонів. Рухливість іонів можна знайти, вимірюючи число іонів залежно від поляризуючого потенціалу, прикладеного до іонізаційної камери. Характеристична крива для позитивних іонів відрізняється від кривої для негативних іонів (див. рис. 1). Характеристика для негативних іонів має вигляд безперервної кривої, в той час, як відмітною особливістю характеристики позитивних іонів є те, що вона є рядом прямих ліній з точками зламу, при певних значеннях поляризуючого потенціалу (дискретні рухливості). Можна розрізнити три різні групи позитивних іонів з відповідними рухомостями 0.42, 0.84 і 2.5 см²/(с*в). Тому при розробці методу розрахунку кількості часток слід узяти за досліджуваній параметр саме рухомість часток.

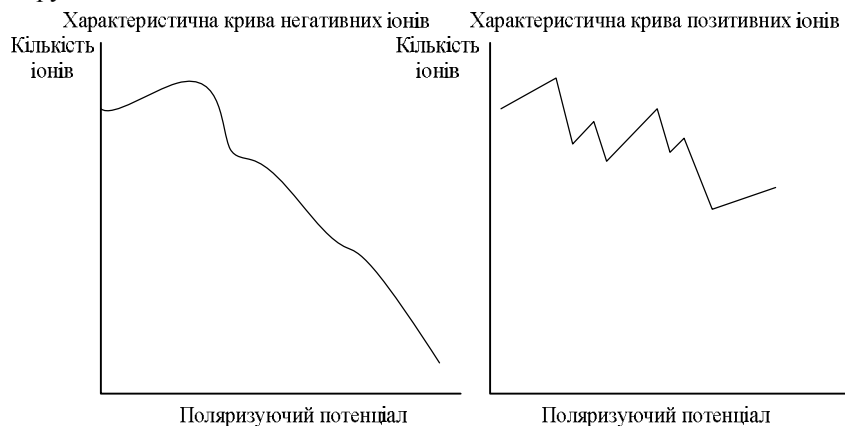


Рис. 1. Характеристичні криві іонів різних полярностей

Повітря, що містить іони, засмоктується через розтруб в іонізаційну камеру (іонізаційна камера може мати вигляд конденсатора) невеликим вентилятором. На зовнішню обкладку конденсатора подається напруга, полярність якої однакова із знаком вимірюваних іонів. На другу обкладку цього конденсатора приєднується другий полюс батареї. В результаті однозначні (із зовнішньою обкладкою) іони осядуть на вимірювальному електроді та створять падіння напруги на вимірювальному опорі. Протилежно заряджені іони осядуть на зовнішньому обкладанні та не будуть враховані лічильником.

Падіння напруги на вимірювальному опорі фіксується електронним вольтметром:

$$U = I \cdot R = R \cdot e \cdot n \cdot \Phi, \quad (3)$$

де I – струм через вимірювальний опір,

R – вимірювальний опір, Ом,

e – елементарний заряд іона ($1,6 \cdot 10^{-19}$ кулон),

n – концентрація іонів - число іонів в кубічному сантиметрі,

Φ – об'єм повітря, що пройшло в секунду через прилад, см³/с.

Отже, якщо проградувати вольтметр безпосередньо в концентраціях іонів n , то є змога за шкалою відлічувати концентрацію іонів у см³/с. Формула, яка приведена вище, є вірною при вимірюванні іонів, рухливість яких більше або дорівнює граничній. Гранична рухливість іонів визначається за формулою:

$$K = \frac{\Phi}{4 \cdot \pi \cdot C \cdot U}, \quad \left[\frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}} \right] \quad (4)$$

де C – ємність конденсатора, мФ,

U – напруга на зовнішній обкладці, В.

Всі іони з рухливістю більше K будуть уловлені й враховані. Встановлюючи на конденсаторі напругу U , можна уловлювати іони з вибраною межею рухомостей. Очевидно, що для урахування іонів іншого знаку необхідно додати ще два електроди.

В такому випадку іонізаційну камеру можна розглядати, як аспіраційний конденсатор (див. рис. 2) з чотирма електродами, відокремленими один від одного [4]. Через аспіраційний конденсатор (Ак), до обкладок якого прикладено деяку різниця потенціалів, просмоктується досліджуване повітря. Так як Ак – повітряний конденсатор, уздовж обкладок якого продувається досліджуване повітря, то його можна використовувати для дослідження зарядного складу.

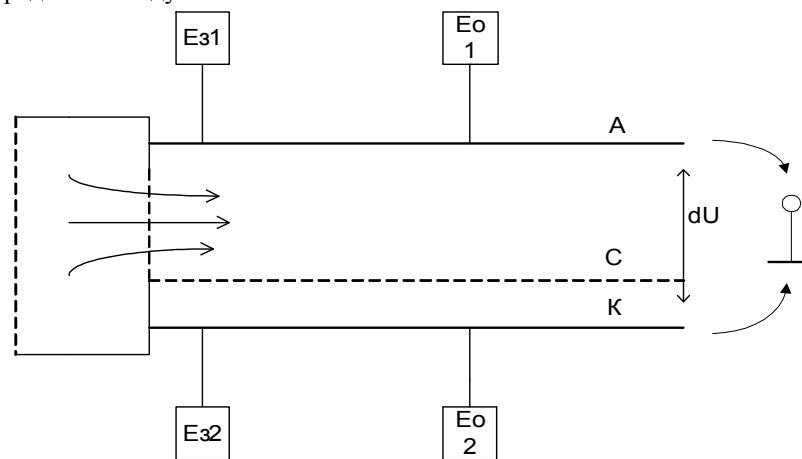


Рис. 2. Схема аспіраційного конденсатора

Рухливість іонів k - швидкість дрейфу іонів під дією електричної сили в полі напруженістю E , рівній одиниці:

$$k = \frac{u}{E}, \quad (5)$$

де u – швидкість руху іонів, см²/В*с.

Іони, що опинилися в потоці повітря, переміщуються разом з потоком і одночасно зміщуються в електричному полі, осідаючи на відповідному обкладанні конденсатора, що веде до зміни різниці потенціалів між обкладками A_k . При цьому досліджується швидкість розрядки A_k , що відбувається через змінний опір на вході і за рахунок осадження іонів. У разі наявності заряджених частинок в повітрі розрядка відбувається декілька швидше, ніж при їх відсутності. Чим більше число заряджених частинок в досліджуваному потоці, тим більше крутою буде крива розрядки. Порівняння кривих розрядки дає можливість визначити струм іонів у вимірювальному конденсаторі, а потім і їх концентрацію.

Розглянутий принцип дослідження дає можливість одночасного вимірювання концентрацій іонів всього спектру рухомостей до деякої граничної. Гранична рухливість k' обчислюється за формулою:

$$k' = \frac{d^2 \times V_{nproc}}{L \times U}, \quad (6)$$

де V_{nproc} – швидкість просмокування повітря через вимірювальний конденсатор, до обкладок ширини d і довжини L якого прикладена напруга V . Всі іони повітряного потоку, рухливість яких більше або рівна k' , уловлюються конденсатором і створюють в ньому струм насичення. Іони менших рухомостей уловлюються лише частково.

Таким чином, у міру розрядки конденсатора напруга між його обкладками зменшується, і уловлюються іони великих рухомостей.

Обчислення концентрацій іонів виробляється за формулою:

$$n = \frac{C_c \Delta V}{q \omega t}, \quad (7)$$

де C_c – загальна місткість конденсатора, вольтметра і провідників,

ΔV – зміна потенціалу між обкладками конденсатора за час t ,

q – заряд іона,

ω – об'ємна швидкість продування повітря.

На основі наведених вище аргументів, можна скласти структурну схему приладу контролю ступеня іонізації та поставити конкретні вимоги до блоків. Структурна схема приладу наведено на рис. 3:

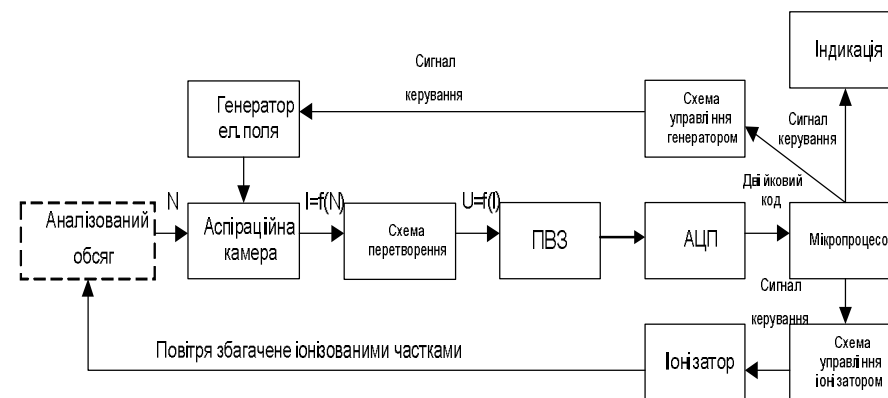


Рис. 3. Структурна схема приладу контролю ступеня іонізації в приміщенні

Аспіраційна камера являє собою блок, що складається з власне аспіраційної іонної камери, що розташована першою у напрямку руху повітря і є датчиком приладу, і вентилятора. Вентилятор призначається для засмокування досліджуваного повітря в простір камери.

Прилад буде напряму пов'язаний з іонізатором, що полегшує задачу контролювання іонізаційного стану повітря. Генератор електромагнітного поля подає заряди на електроди, в наслідок чого іонізовані частки осідають на збираючих електродах. Вихідним сигналом аспіраційної камери є струм, який залежить від кількості іонізованих часток. Вихідний струм аспіраційної камери має бути у діапазоні від 0 до 100 мА.

$$I = f(N) \quad (8)$$

Схема перетворення призначена для перетворення змінного струму в уніфікований сигнал постійного струму в діапазоні від 0 до 100 мА, а також для перетворення сигналу струму в сигнал напруги, для нормальної роботи аналого-цифрового перетворювача, який працює з сигналами напруги. Зі схеми перетворення виходить сигнал в діапазоні (0..5) В:

$$U = f(I) \quad (9)$$

Б.В. ПРИХОДЧЕНКО, асп., ДонНТУ,
В.П. ТАРАСЮК, к-т. техн. наук, доц., ДонНТУ

ОСНОВНІ МАТЕМАТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ПОБУДОВИ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ОЧИЩЕННЯ СТИЧНИХ ВОД

У роботі наведено результати нейромережевого моделювання технологічного процесу очищення стічних вод для вибору оптимального технологічного режиму, був розглянутий математичний апарат даного технологічного процесу і різного роду складності і невизначеності, що виникають при його протіканні.

In the work the results of modeling of technological process of sewage treatment by means of a neural network for a choice of an optimum technological mode are resulted, the mathematical apparatus of the given technological process and any complexity and the uncertainty, arising at its course has been considered.

Вступ. На сьогоднішній день більше 80% очисних споруд в Україні не працюють або не забезпечують необхідну якість очищення із-за ненадійності при тривалій експлуатації аераційного устаткування, що приводить до погіршення і повного припинення процесу біологічного очищення в холодну пору року, швидкої загибелі активного мула при перервах у подачі електроенергії і аварійному стані. До вказаного числа відносяться майже всі застарілі споруди з біологічними фільтрами.

Обмежені можливості бюджетного фінансування не дозволяють в повному обсязі нормалізувати роботу систем водовідведення. Замовлення на проектування і будівництво очисних споруд виконуються в основному за рахунок бюджетних коштів.

Величезна кількість коштів витрачається на будівництво дорогих, неекономічних і недостатньо ефективних очисних споруд, тоді як вдосконалення вже існуючих споруд може істотно покращити якість очищення стічних вод і зменшити витрати електроенергії.

Загальна постановка проблеми. Управління технологічними процесами очищення стічних вод доводиться здійснювати в умовах інформаційної невизначеності, пов'язаною із складністю протікання біохімічного процесу очищення стічних вод [1]. За даних обставин вживання традиційних методів управління не є досить ефективним. У основу побудови інформаційно-вимірювальної системи управління процесом очищення стічних вод покладений глибинний аналіз найтехнологічнішого процесу очищення стічних вод, а точніше його біологічного етапу.

Аналіз робіт [2-3] показує, що для підтримки заданого експлуатаційного режиму інформаційно-вимірювальна система повинна мати в своєму складі досить складний механізм прийняття рішень, що робиться можливим лише з

Пристрій вибірки зберігання (ПВЗ) застосовується, щоб виключити похибку вимірювання при швидкозмінюваному сигналі.

Аналого-цифровий перетворювач (АЦП), призначений для перетворення аналогового уніфікованого сигналу в цифровий код. Розрядність АЦП дорівнює 12.

Одержана інформація обробляється, фіксується, передається і зберігається за допомогою мікропроцесорного блоку.

Результати вимірювань після обробки виводяться на індикацію. Можливе з'єднання з персональним комп'ютером через USB порт, та з'єднання з іонізатором.

Досконалий опис всіх блоків дає можливість для подальших розробок у майбутньому, а саме складання принципової схеми приладу.

Висновки. Аналіз проблеми доводить, що необхідним є диференційний підхід до оцінки іонного складу повітря. Це можливо здійснити за допомогою іонізаційного метода, який спрямовано на урахування властивостей окремих заряджених часток, а саме рухливостей, та знаходження коефіцієнту уніполярності. Враховуючи всі вимоги було складено структурну схему приладу контролю ступеня іонізації в приміщенні та поставлені вимоги до блоків.

Прилад, структурну схему якого запропоновано у цій роботі, відрізняється від аналогів тим, що здійснює урахування часток обох полярностей окремо, що забезпечується шляхом встановлення двох електродів різних полярностей до аспіраційної камери. Він має наступні переваги:

- наявність мікропроцесорного блоку, що дає можливість швидкої обробки інформації та контролювання роботи іонізатору.

- наявність цифрової індикації, та зв'язок з комп'ютером, що поліпшує роботу оператора.

Прилад, може знайти застосування на виробництві виробів мікроелектроніки (у складі устаткування для "чистих кімнат"), в комп'ютерних класах, в залах обчислювальних центрів, в текстильній, поліграфічній промисловості, в місцях масового перебування людей (театри, кінотеатри, торговельні та виставкові центри, тощо) з метою контролю за забезпеченням нормального стану людини в приміщеннях зі штучним мікрокліматом.

Список літератури: 1. *Мещеряков А.Ю., Федотов Ю.А.* Проблемы оценивания аэроионного состояния среды обитания. //Приборы и системы управления. 1998. №11. С.75-79. 2. *Чижевский А.Л.* Ионизация воздуха как физиологически активный фактор атмосферного электричества. Доклад. Калуга, 1919.- 256 с. 3. *Методика измерения легких аэроионов воздуха, КГТУ им. Туполева - А. Ф. Туктагулов, Ф. Х. Туктагулов. 1986.- 40 с.* 4. *Принципы и методы регистрации элементарных частиц, под ред. Л. К. Л. Юан и Ву Цзян-сюн, перевод с английского, М., 1963.- 236 с.*

використанням стратегічного підходу до подолання локальних невизначеностей та обмежень в завданні управління технологічним процесом.

Для подолання цих обмежень, максимально точного прогнозування параметрів і виробки управляючих сигналів в даному технологічному процесі пропонується використовувати комбінований підхід, об'єднуючий у собі результати роботи контрольно-вимірювальних приладів (кислородомери, рівнеміри, мутноміри), теорію штучних нейронних мереж і елементи нечіткої логіки.

Основна частина. У основу інтелектуальної комп'ютерної інформаційно-вимірювальної системи управління технологічним процесом біологічного очищення стічних вод покладено детальний аналіз самого процесу біологічного очищення стічних вод та його математичного апарату.

У класичній схемі реалізації біологічного очищення стічних вод [4] в аеротенках, процес очищення здійснюється в проточному режимі і включає аераційні і відстійні споруди, устаткування і комунікації для подачі і розподілу стічних вод по аеротенках, збору і подачі суміші мула для його подальшого відділення, відведення очищеної води, забезпечення повернення в аеротенки циркуляційного активного мула і видалення надлишкового мула, подачі і розподілу повітря в аеротенках.

Аеротенком є прямокутний резервуар, розділений подовжніми перегородками на окремі коридори, по яких суміш мула протікає від входу в аеротенк до виходу з нього при постійному перемішуванні і збагаченні киснем. Схема реалізації процесу біологічного очищення стічних вод в аеротенку наведена на рис. 1.

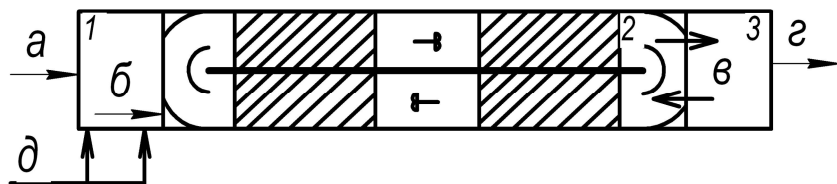


Рис. 1. Схема реалізації процесу біологічного очищення стічних вод в аеротенку: 1 - первинний відстійник; 2 - біореактор; 3 - другорядний відстійник; а - стічна вода, що надходить; б - освітлена стічна вода; в - мул, що повертається; г - очищена стічна вода; д - реагент ($FeCl_3$); заштрихована частина - зона змінної аерації.

Основними критеріями, що визначають вибір технологічного режиму біологічного очищення стічних вод є:

- концентрація розчиненого кисню в аеротенках;
- доза мула в аеротенках;
- індекс мула;
- гідробіологічний стан мула.

Основними чинниками, що впливають на процес очищення є:

- навантаження на аеротенк по органічних речовинах;
- відсоток рециркуляції активного мула;
- відсоток регенерації активного мула.

У якості контрольно-вимірювальних приладів в даному процесі використовуються датчики кислородомери, рівнеміри і мутноміри. Стан активного мула оцінюється в лабораторії за спеціально відібраними пробами кілька разів в день кваліфікованими фахівцями. На підставі всіх вказаних вище параметрів технологами підприємства робиться висновок про хід протікання технологічного процесу і його коректування.

Концентрацію активного мула, що підтримується в експлуатаційному режимі аераційної споруди, називають «дозою активного мула» і позначають a_j . Таким чином, середнє навантаження на активний мул по забрудненнях, виражених через БПК, можна представити як:

$$q_j = \frac{L_{en}}{a_j(1-S)_{tat}}, \quad (1)$$

де L_{en} – БПК стічної рідини, що поступає в аераційний басейн, мг/л або $г/м^3$;

S – зольність мула, долі одиниці;

a_j – доза мула, що виражається в $г/л$, або в $г/м^3$;

tat – тривалість перебування рідини (тобто забруднень, що знаходяться в ній) в аераційному басейні, год.

Питома швидкість окислення забруднень – це та кількість забруднень, яка може бути знята 1 г беззольної речовини сухого мула в 1 годину в заданих умовах реалізації процесу біохімічного очищення. Значення цього параметра встановлюється експериментальним шляхом. Середнє навантаження на мул і питома швидкість окислення зв'язані між собою тим, що для конкретних заданих умов технологічної реалізації процесу найбільша швидкість окислення забруднень при забезпеченні необхідної якості їх очищення досягається лише при певних навантаженнях забруднень на мул. Це означає, що якщо навантаження на мул велике, то активний мул може з ним не впоратися і необхідна якість очищення не буде забезпечена. Якщо ж навантаження на мул буде мале, то активний мул відчуватиме нестачу харчування і, отже, буде «не допрацьовувати», а в певних межах недовантаження може привести до самоокислювання активного мула і падіння робочої дози мула в аеротенку.

З формули (1) видно, що і середнє навантаження на мул і питома швидкість окислення можуть підтримуватися на певному рівні при дотриманні постійного значення $a_j t_{at}$, тобто дози мула на тривалість його дії на забруднення. Дозу мула слід розглядати як оптимальну концентрацію активного мула в аераційній споруді, що складається під впливом різних чинників, що характеризують той або інший технологічний режим роботи аераційних споруд, споруд для відділення мулу та ін. В зв'язку з цим доречно

говорити лише про деякі середні значення дози мула в аераційних спорудах, відзначивши, що вони можуть вагатися у досить великих межах, що є невизначеністю для системи управління технологічним процесом:

- 3 – 5 г/л – при продовженій аерації;
- 3 – 4 г/л – при низьких навантаженнях на мул;
- 2,5 – 3,5 г/л – при середніх навантаженнях на мул;
- 2 – 3 г/л – при високих навантаженнях на мул.

Експериментально встановлено, що в масу приросту мула включається біля (25 – 30)% БПК_{полн}, що знімається в спорудженні і біля (75 – 80)% зважених речовин, що поступили в нього. Але у зв'язку з тим, що в аеротенку може підтримуватися лише визначена для даних умов концентрація мула, маса мула, що приросла, має бути своєчасно видалена з системи біологічного очищення.

Надходження кисню в аеротенки забезпечують повітророзподільні агрегати з синхронними електродвигунами, а його регулювання здійснюється завдяки їх включенню і відключенню.

Розрахунок системи аерації передбачає визначення необхідної кількості повітря (кисню), розрахункових параметрів його подачі в аеротенки (витрата і тиск), числа повітророзподільних пристроїв – аераторів для забезпечення заданого кисневого режиму і гідродинамічних умов в аеротенку.

Для визначення необхідної кількості повітря для подачі в аеротенки виробляється розрахунок питомої витрати повітря q_{air} на 1 м³ води, що очищається, м³/м³ по формулі

$$q_{air} = \frac{q_o(L_{en} - L_{ex})}{K_1 K_2 K_3 K_t (C_a - C_t)}, \quad (2)$$

де q_o – питома витрата кисню, мг на 1 мг знятої БПК_{полн}, що приймається при очищенні до БПК_{полн} = 15 – 20 мг/л рівним 1,1, а до БПК_{полн} > 20 мг/л – 0,9;

K_1 – коефіцієнт, що враховує тип аератора, тобто розмір бульбашок повітря, що утворюються при виході з аератора. Для середньопузирчатої і низьконапірної аерації $K_1 = 0,75$;

K_2 – коефіцієнт, залежний від глибини занурення аератора, h_a : чим глибше занурений аератор, тим довше бульбашка повітря знаходиться у воді і тим більша кількість кисню встигне перейти з нього в навколишню рідину за час його підйому до поверхні і виходу з рідини. Значення коефіцієнта K_2 зростає з 0,4 при $h_a = 0,5$ м, до 3,3 при $h_a = 6$ м, що також є невизначеністю завдяки різному рівню рідини в різний час доби;

K_t – коефіцієнт, що враховує температуру стічних вод і що приймається рівним 1 при $t_w = 20^\circ\text{C}$. Для температури води відмінної від 20°C він дорівнює:

$$K_t = 1 + 0,02(t_w - 20), \quad (3)$$

(тут t_w – середньомісячна температура води за літній період, °C);

K_3 – коефіцієнт якості води, що приймається для міських стічних вод 0,85; для інших видів стічних вод визначається експериментальним шляхом. За наявності в стічних водах СПАВ коефіцієнт K_3 в значній мірі залежить від відношення сумарної площі аераторів f_{ar} до площі днища аеротенків f_{at} і змінюється від 0,59 при $f_{ar} / f_{at} = 0,05$ до 0,99 при $f_{ar} / f_{at} = 1$;

C_a – розчинність кисню у воді, мг/л, що визначається як

$$C_a = \frac{(1 + h_a)}{20,6} C_t, \quad (4)$$

тут C_t – розчинність кисню у воді залежно від температури t і атмосферного тиску.

C_o – середня концентрація розчиненого кисню в суміші мула в аеротенку, мг/л; може прийматися від 0,5 мг/л у головній частині аеротенка до 0,5 мг/л в його хвостовій частині.

Визначивши питому витрату повітря, м³ на 1 м³ рідини, що очищається, визначають загальну потребу повітря, м³/ч, як

$$Q_{air} = q_{air} q_w \quad (5)$$

По пропускній спроможності аератора (наприклад, пластина розміром 0,3x0,3 м² здатна пропустити 6 м³ повітря в 1 год.) визначається кількість пневматичних аераторів, а отже, і площа аераторів f_{ar} .

$$f_{ar} = 2n a f_{ap}, \quad (6)$$

де n_a – кількість аераторів;

f_{ap} – площа одного аератора (f_{ap} – площа пластини = 0,09 м²).

У площу аераторів включаються і проsvіти між аераторами, якщо вони не перевищують площі аератора (саме тому у формулу вводиться коефіцієнт 2).

По отриманому значенню f_{ar} визначається відношення f_{ar} / f_{at} і уточнюється значення всіх коефіцієнтів, що входять у формулу визначення питомої витрати повітря (і залежних від цього відношень), також уточнюється питома витрата повітря. Якщо прийнята в першому наближенні величина f_{ar} / f_{at} збігається з розрахунковою, то визначається інтенсивність аерації, під якою розуміється кількість повітря, що подається на 1 м² площі аеротенка за 1 год.:

$$J_a = q_{air} \frac{H_{at}}{t_{at}}, \quad (7)$$

де H_{at} – глибина аеротенка.

Інтенсивність аерації не має бути нижче певної межі з тим, щоб забезпечувати належне перемішування вмісту аеротенка незалежно від потреби мула в кисні. Мінімальна інтенсивність лежить в межах від 48 м³/(м²ч) при глибині занурення аератора $h_a = 0,5$ м і до 2,5 м³/(м²ч) при

$h_a = 6$ м. З іншого боку, інтенсивність аерації не повинна перевищувати певних значень, оскільки із-за підвищеного вмісту повітря в рідині фактична ефективність аерації знизиться в порівнянні з розрахунковими її значеннями. Максимальні значення інтенсивності залежать від відношення far / fat і змінюються від $5 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{ч})$ при $far / fat = 0,05$ до $100 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{ч})$ при $far / fat = 1$.

На підставі проаналізованого математичного апарату побудуємо штучну нейронну мережу. Таку мережу можна віднести до класу гібридних, оскільки формально по структурі вона ідентична багат шаровій нейронній мережі з процесом навчання, наприклад, по алгоритму зворотного поширення помилки, але приховані шари в ній відповідають етапам функціонування нечіткої системи [5].

Для моделювання була використана трьохшарова нейронна мережа прямого поширення. Були проведені експерименти з нейронними мережами, в яких використовувалися різні активаційні функції: лінійна і тангенс гіперболічний ($f(s) = \frac{2}{1+e^{-2s}} - 1$). Для навчання нейронної мережі був використаний популярний алгоритм зворотного поширення помилки, програмно реалізований в середовищі Matlab [6]. Як цільовий вектор був заданий параметр, що впливає на формування та подачу управляючих сигналів у ході технологічного процесу.

Отже маємо нейронну мережу, що містить наступні шари:

- 1-й шар нейронів виконує функцію введення нечіткості на основі заданих функцій приналежності входів;
- 2-й шар відображає сукупність нечітких правил;
- 3-й шар виконує функцію приведення до чіткості.

Кожен з описаних вище шарів характеризується набором параметрів (параметрами функцій приналежності, нечітких вирішальних правил, активаційних функцій, вагами зв'язків), налаштування яких виробляється, так само, як для звичайних нейронних мереж [7].

Входи, виходи і ваги гібридної нейронної мережі - є дійсні числа, що належать відрізьку $[0,1]$. Прикладом подібної мережі служить система, що має наступну базу знань:

П1: якщо $X_1 \in L_1$ і $X_2 \in L_2$ і $X_3 \in L_3$, то $z \in H$,

П2: якщо $X_1 \in H_1$ і $X_2 \in H_2$ і $X_3 \in L_3$, то $z \in M$,

П3: якщо $X_1 \in H_1$ і $X_2 \in H_2$ і $X_3 \in H_3$, то $z \in S$,

де X_1, X_2, X_3 - вхідні змінні,

z - вихід системи,

$L_1, L_2, L_3, H_1, H_2, H_3, H, M, S$ - деяка нечіткі множини з функціями приналежності сигмоїдального типу.

Окрім функцій приналежності для гібридних нейронних систем потрібне формулювання і введення в них так званих правил типа "якщо «умова», то

«висновок»", званих імплікаціями. Правила визначають взаємозв'язок між входами і виходами системи, примушуючи її генерувати чіткий вивід, враховуючи нечіткі передумови. Формулювання правил здійснюється експертами (технологами). Від компетентності експертів залежить коректність роботи системи управління.

Сформульовані правила для нашої інформаційно-виміральної системи узагальнено і введемо в систему за допомогою кнопок редактора правил Rule Editor. Наведемо тут декілька із них:

1. Якщо рівень рідини малий і кількість кисню велика, тоді кількість мула нижче середнього;
2. Якщо рівень рідини середній, то кількість кисню середня і кількість мула середня;
3. Якщо дані з лабораторії ближче до 0, то кількість мула нижче середнього;
4. Якщо рівень рідини малий, дані з лабораторії ближче до 1, кількість кисню велика, то кількість кисню слід зменшити і кількість мула слід зменшити.

На рис.2 зображено вікно редактора з побудованим за допомогою нейронної мережі графіком залежності вхідних і вихідних змінних.

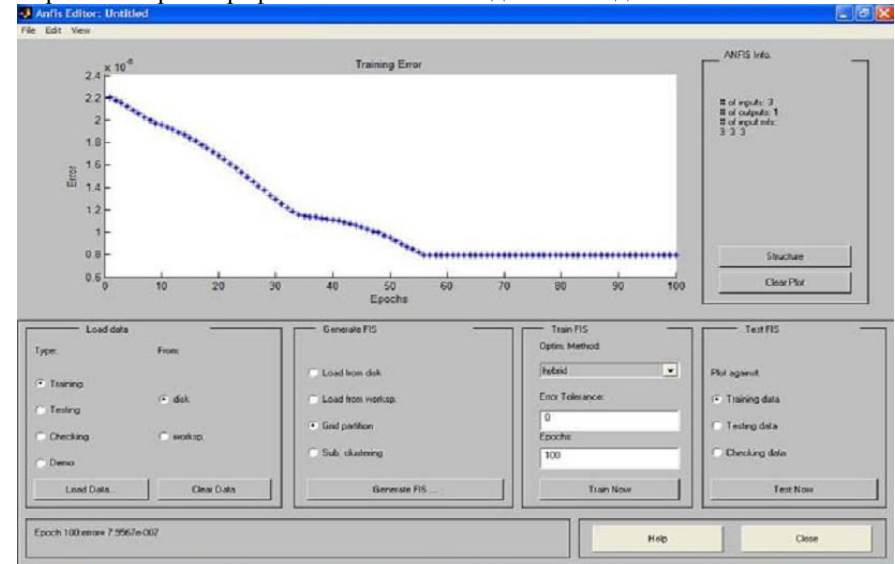


Рис. 2. Вікно редактора ANFIS з побудованим за допомогою нейронної мережі графіком залежності вхідних і вихідних змінних

Далі на рис.3 зображено вікно редактора нечіткої системи для визначення вихідних даних (управляючих сигналів).

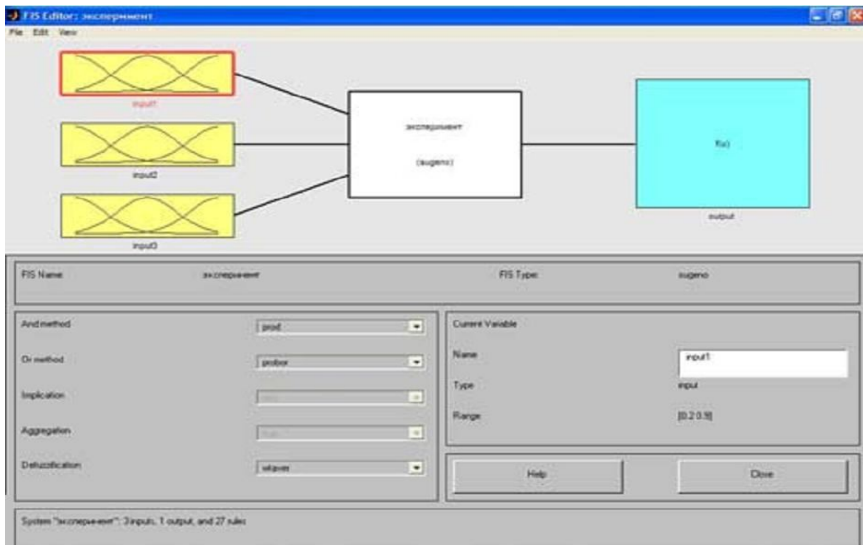


Рис. 3. Вікно редактора вікно редактора нечіткої системи для визначення вихідних даних (управляючих сигналів)

Далі на рис.4 зображено вікно редактора правил з фрагментом списку правил формування вихідних даних.

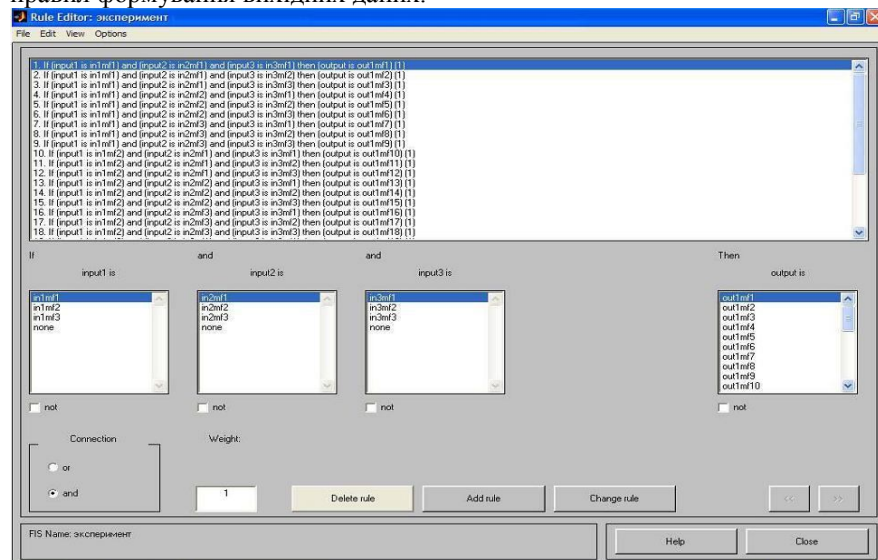


Рис. 4. Вікно редактора Rule Editor з фрагментом списку правил формування вихідних даних (у даному випадку управляючих сигналів)

На рис.5 зображена структура змодельованої нейронної мережі.

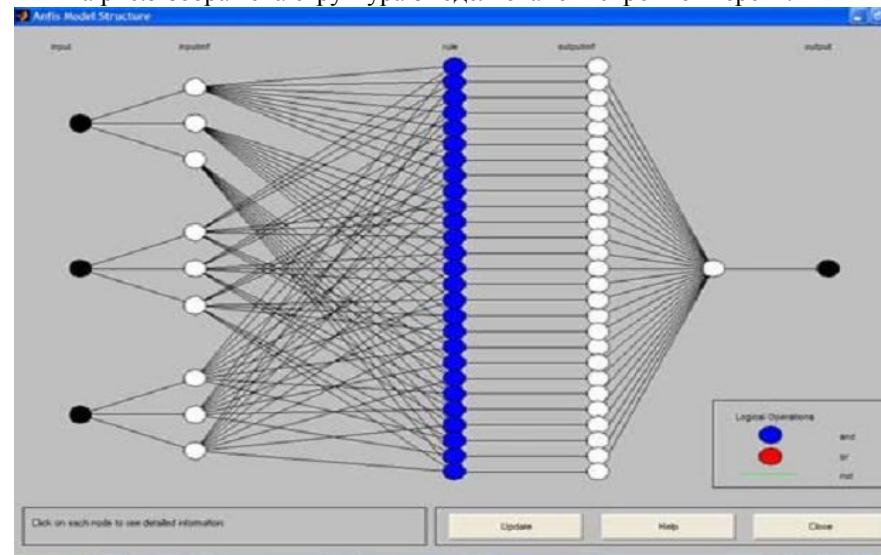


Рис. 5. Змодельована нейронна мережа

У завершенні на рис.6 зображені результати роботи нейронної мережі при поданих на її входи відповідних значеннях [0.55 0.65 0.5].

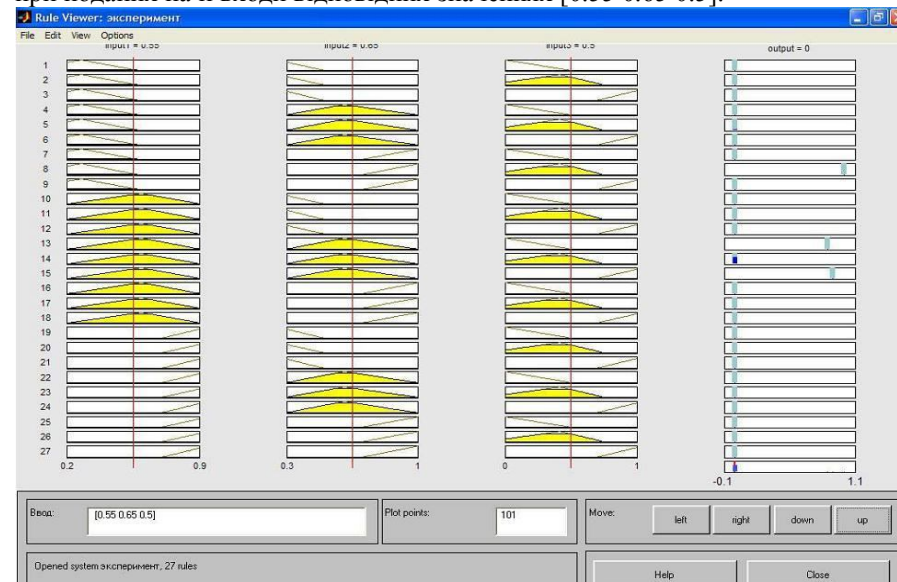


Рис. 6. Результати роботи нейронної мережі

Навчальна вибірка для нейронної мережі представлена у таблиці 1

Таблиця 1

Навчальна вибірка для нейронної мережі

Показник кислородомеру, %	Показник рівнеміра, м	Дані гідробіологічного аналізу після обробки нейронною мережею	Вихідні дані
90	0,3	1	0
70	0,5	0	0,85
50	0,7	0,9	0,9
20	1	0,7	1

Дані результати свідчать про те, що після навчання дана нейронна мережа за допомогою закладених в неї правив і обмежень (у даному випадку їх всього 27) може швидко і ефективно приймати рішення, що відповідають за формування різних дій, керуючих даним технологічним процесом.

Висновки. Розглянута вище нейронна мережа з використанням елементів нечіткої логіки, як система управління технологічним процесом біологічного очищення стічних вод здатна формувати управляючі сигнали для різних виконавчих механізмів. Коректність її роботи залежатиме від компетентності фахівців, що залучаються для формування функцій приналежності і формулювання правил роботи системи.

Використовуючи такий підхід, можна істотно підвищити ступінь автоматизації процесу, забезпечити якісне, максимально обгрунтоване і своєчасне формування управляючих сигналів. Створення інформаційно-вимірювальної системи дозволить також понизити навантаження і витрати на обслуговуючий персонал, оптимізувати витрати на електроенергію і продовжити термін життя активного мула.

Список літератури: 1. Ю.А. Комиссаров, Л.С. Гордеев, Нгуен Суан Нгуен. Анализ и синтез систем водообеспечения химических производств – М.: Химия, 2002. – 496 с. 2. В.В.Солдатов Управление проектами автоматизации предприятий / В.В. Солдатов, Д.А. Левиков, Д. С. Пащенко. Приборы и Системы. Управление, контроль, диагностика. – М.: Научтехлитиздат, 2008, №4.-с.1-3. 3. М.П. Лапицкая. Очистка сточных вод (примеры расчетов) – Минск: Высшая школа, 1983, с. 132-145. 4. С.В. Яковлев, Я.А. Карелин, Ю.М. Ласков, В.И. Калицин. Водоотведение и очистка сточных вод – М.: Стройиздат 1996, с.588-594. 5. А.Н. Авернин, И.З. Батыршин. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта - М.: Мир, 1986. – 212 с. 6. В. С. Медведев, В.Г. Потемкин. Нейронные сети Matlab 6 – М.: Диалог МИФИ 2002.– 490 с. 7. Саймон Хайкин. Нейронные сети полный курс – Вильямс 2008 – 1104 с

УДК 620.179 К 19

Е.К. ПОЗДНЯКОВ, студ., ДонНТУ,
В.Ф. СЕНЬКО, к-т техн.наук, доц., ДонНТУ

МАГНИТОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ ШАХТНОГО ПОДЪЕМНОГО КАНАТА

У роботі описано магнітографічний метод неруйнівного контролю, розглянуто ефект Хола, вживаний в магніточутливих елементах, наведено результати експериментальних досліджень з виявлення дефектів шахтного підйомного канату конструкції 6 x 49.

In the work describe the magnetic method of nondestructive control, consideration the effect of Hall, which apply in magnetic elements, consider the results of experimental researches on the discovery of a mine elevating rope defects of construction 6 x 49.

Введение. Стальные канаты, используемые в шахтных подъемных установках, при эксплуатации неизбежно подвергаются различного вида деформациям. Наиболее часто причина повреждения канатов — колебания клетки в момент разгона и замедления при движении по канатным проводникам вблизи горизонта, а также под воздействием воздушного потока при длительном нахождении клетки на горизонте при погрузочно-разгрузочных операциях на нижнем этаже. Безопасность эксплуатации шахтных подъемных установок в значительной степени определяется состоянием применяемых в них стальных канатов. Своевременный и качественный контроль за структурой ответственного элемента является основой безопасного движения клетки в стволе шахты.

Постановка задачи. В процессе эксплуатации подъемного каната, он неизбежно подвергается следующим видам деформации: уменьшению собственного диаметра в связи с процессами окисления металла, и обрывам отдельных проволок. Очевидно, что необходимо фиксировать оба вида нарушения целостности каната. Инструментальный контроль канатов с помощью современных дефектоскопов позволяет достаточно точно измерять потери сечения каната, а также определять число обрывов проволок на шаге свивки как на поверхности, так и внутри каната. Кроме того, дефектоскопия дает объективные данные о результатах контроля — дефектограммы и протоколы.

При оценке состояния шахтных подъемных канатов используется магнитный метод неразрушающего контроля (МНК). Данный метод применяется только для контроля деталей и изделий, изготовленных из ферромагнитных материалов, предварительно намагниченных постоянным магнитом. МНК основан на регистрации магнитного поля рассеяния, возникающих над дефектами. Одним из важнейших элементов в магнитном методе контроля является магниточувствительный элемент, обеспечивающий

фиксацию магнитного поля рассеяния. В качестве таких элементов применяют датчики, основанные на эффекте Холла.

Основная часть. Принцип действия преобразователя Холла основан на возникновении ЭДС U_y между гранями А и В прямоугольной пластины, по которой протекает ток в направлении, перпендикулярном АВ, когда плоскость пластины пересекается постоянным магнитным полем с индукцией B_z (см. рис.1)[1].

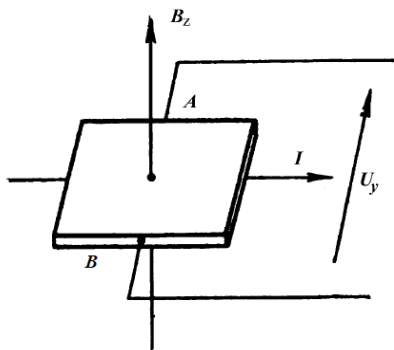


Рис. 1. Схема работы датчика Холла

Магнитное поле B_z представляет собой поле рассеяния на дефектах. Величина ЭДС Холла U_y связана с индукцией B_z формулой:

$$U_y = -b \cdot B_z, \quad (1)$$

где b вычисляется по формуле:

$$b = \frac{R_H \cdot I}{h}. \quad (2)$$

Здесь, h - толщина, I – протекающий через пластину ток, R_H - постоянная Холла для данного материала.

Поврежденная проволока или коррозионная трещина создает радиальную магнитную составляющую поля рассеяния, которая фиксируется датчиком, который для лучшей чувствительности должен быть расположен коаксиально вокруг каната, между магнитными полюсами[2]. Сигнал этого датчика скорее качественен, нежели количественен, но он обеспечивает информацию о присутствии местного дефекта.

Для определения процента потери диаметра каната используют датчик, измеряющий полное осевое магнитное поле рассеяния в канате как абсолютную величину или вариацию в устойчивой величине магнитного поля. Сигнал данного датчика пропорционален к объему стали или изменению в площади поперечного сечения каната. Датчики потери сечения для лучшей чувствительности размещают в нескольких точках вокруг каната.

Обобщенная схема работы дефектоскопа приведена на рис.2:

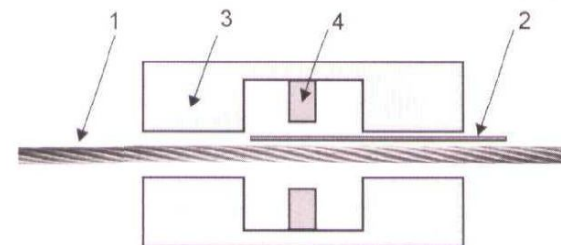


Рис. 2 – Схема работы магнитного дефектоскопа

Здесь, 1 – стальной канат, 2 – калибровочный элемент, 3 – постоянный магнит, 4 – магниточувствительный элемент.

Итогом проверки состояния каната является дефектограмма, приведенная на рис. 3 [3].

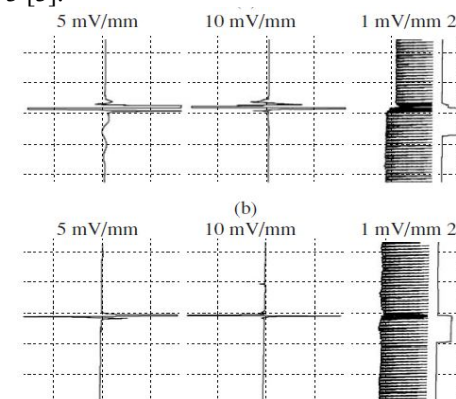


Рисунок 3 – Дефектограмма проверки каната

В эксперименте использовался магнитный дефектоскоп MD 120 В. Исследуется канат конструкции 6 x 49 (16/8 и 8/8/1), с номинальным диаметром 60 мм, поперечный разрез которого приведен на рис. 4[2].

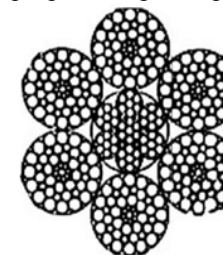


Рис. 4 – Поперечный разрез исследуемого каната

Результаты исследования каната магнитным дефектоскопом занесены в таблицу 1.

Таблица 1
Результаты проверки каната на наличие дефектов

Число месяцев после установки	Дефект/100м	Эксп. диаметр, мм	Эксп. диаметр/ном. диаметр	Ном. диаметр – Эксп. диаметр, мм
3	0,182	61,8	1,03	-1,8
9	0,181	61	1,01	-1,0
16	0,362	59,93	0,999	0,07
21	1,079	59,915	0,999	0,085
24	1,259	59,87	0,998	0,13
33	1,975	60,08	1,001	-0,08

На основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

Относительная потеря сечения в металлической перекрестно-секционной области каната незначительна во всех шести наблюдениях

Число дефектов, обнаруженных на 100 м длины подъемного каната, лежит в пределах от 0.182 до 1.975.

Соотношение диаметра каната, определенного экспериментальным путем, к номинальному в первых пяти случаях лежит в пределах от 1.03 до 0.998, последнее значение составляет 1.001.

Изменение наблюдаемых диаметров в абсолютных величинах изменяются от -1.8 до +0.13, за исключением шестого измерения, которое, очевидно, было выполнено с большой погрешностью.

Заключение. В данной работе рассмотрен магнитографический метод выявления дефектов шахтов подъемного каната, основанный на регистрации магнитного поля рассеяния, возникающего вокруг поврежденного участка, датчиком, принцип действия которого основан на эффекте Холла. В результате анализа экспериментальных данных можно сделать вывод, что магнитные дефектоскопы дают достаточно объективную информацию о результатах исследования дефектов шахтного подъемного каната, причем, как о наличии дефекта, так и о его количественных характеристиках.

Список литературы: 1. Каневский, И.Н. Неразрушающие методы контроля: учеб. пособие. – Владивосток: изд-во ДВГТУ, 2007. – 243 с. 2. D. Basak, S. Pal and D.C. Patranabis, In Situ Assessment of Independent Wire Rope Core Ropes in Cage Winders By a Nondestructive Method, 2008, № 8 [Rus. J. of Nondestructive Testing (Англ. перевод), 2008, о. 44, №. 8, стр. 4]. 3. D. Basak, S. Pal and D.C. Patranabis, Inspection of 6X19 Seale Preformed Haulage Rope by Nondestructive Technique, 2009, № 2 [Rus. J. of Nondestructive Testing (Англ. перевод), 2009, о.45, №. 2, стр. 5].

УДК 620.179.14:621.318.3

В.Я. ГАЛЬЧЕНКО, д-р техн. наук, проф., Луганский государственный медицинский университет (ЛГМУ)
А.Н. ЯКИМОВ, препод., ЛГМУ
Д.Л. ОСТАПУЩЕНКО, препод., ЛГМУ

ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ С ВЫСОКООДНОРОДНЫМИ МАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ В ДЕФЕКТОСКОПИЧЕСКОМ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ

В роботі розглянуто задачу синтезу намагнічуючих пристроїв магнітного неруйнівного контролю. Розроблено програмні засоби проектування магнітних систем, що дозволяють створювати у робочому просторі пристрою контролю магнітні поля з високим ступенем однорідності та високою інтенсивністю.

In this work a synthesis problem of magnetizing devices for nondestructive control is considered. The designed software tools let to create a high intensive and uniform magnetic field inside an effective volume of the control device.

Введение. При проведении магнитного дефектоскопического неразрушающего контроля неоднородность намагничивающего поля может выступать в качестве мешающего фактора, затрудняющего обнаружение дефектов сплошности, поэтому при проектировании намагничивающего устройства часто необходимо обеспечить высокую однородность магнитного поля в зоне контроля.

В качестве источников магнитного поля устройств неразрушающего контроля чаще всего используются П-образные магниты (рис.1) с прямоугольными полюсами, обеспечивающие достаточно высокую однородность поля в некоторой ограниченной области вблизи оси системы [1-3]. Однако проектирование более сложных намагничивающих устройств, позволяющих создавать высокооднородные магнитные поля во всем рабочем объеме межполюсного пространства электромагнита, является гораздо более актуальной задачей, имеющей существенную важность на практике.

Постановка задачи. Представляет интерес выбор в качестве контролируемого изделия прямошовной электросварной трубы [4]. Пусть рабочий объем Ω имеет форму параллелепипеда с квадратным основанием размером $2A \times 2A$ и высотой $2B$. Задачей проектирования является создание в этом объеме намагничивающего поля с высокой степенью однородности и высокой интенсивности. Для оценки однородности магнитного поля в рабочем объеме фиксируется множество контрольных точек, расположенных регулярно с шагом Δx , Δy , Δz вдоль соответствующих координатных осей.

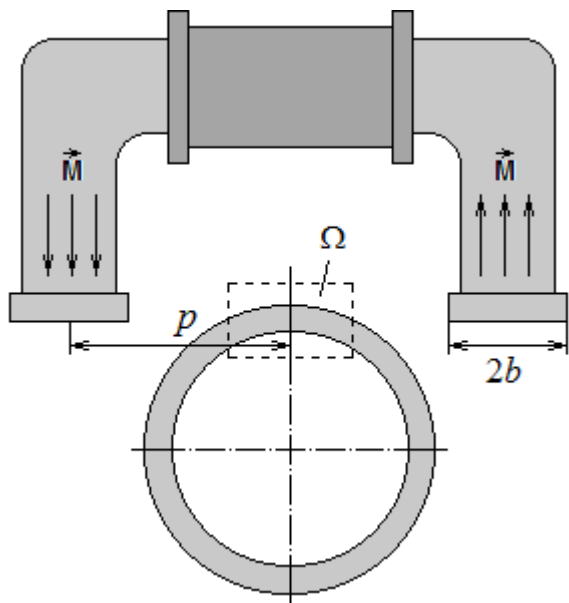


Рис. 1. Намагничивающая система с П-образным магнитом

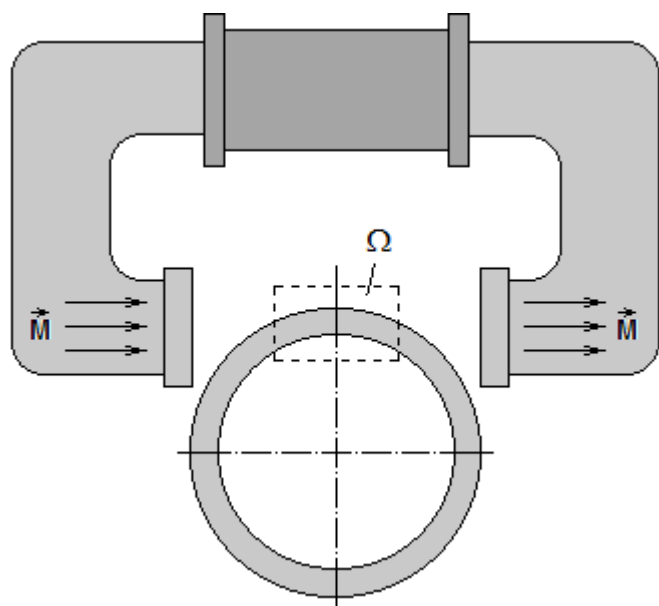


Рис. 2. Намагничивающая система с С-образным магнитом

В качестве критерия однородности магнитного поля примем наибольшее относительное отклонение значения напряженности поля в контрольных точках от поля в центре системы

$$\Delta = \frac{\max_k |H^{(k)} - H^{(0)}|}{|H^{(0)}|} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где $H^{(k)}$ – напряженность магнитного поля в k -й контрольной точке, $H^{(0)}$ – напряженность поля в центре рабочего объема.

Ставится задача оптимального выбора значений параметров полюсных наконечников, обеспечивающих требуемые условия контроля.

Основная часть. При проведении оптимального синтеза намагничивающих систем требуется многократно осуществлять решение прямой задачи расчета магнитного поля, создаваемого электромагнитом с прямоугольными полюсами. Воспользуемся моделью, в которой расчет поля в рабочем объеме осуществляется с использованием простого слоя магнитных зарядов. Пусть поверхностная плотность магнитных зарядов постоянна на всей поверхности прямоугольного полюса и равна σ , а система координат расположена так, как это показано на рис. 3.

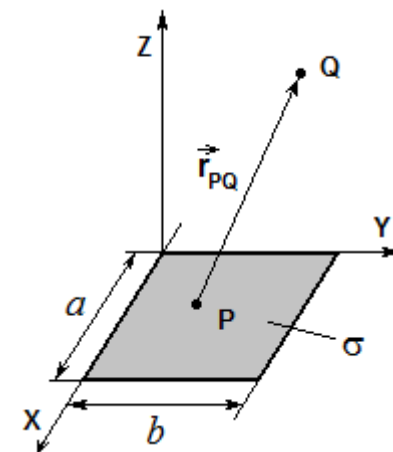


Рис. 3. Прямоугольный полюс электромагнита

Тогда компоненты напряженности магнитного поля, создаваемого прямоугольным полюсом в точке наблюдения Q с координатами x , y и z можно рассчитать по формулам (2).

$$\begin{aligned}
 H_x(x, y, z) &= \frac{\sigma}{4\pi} \int_0^b \int_0^a \frac{x-x_P}{r_{PQ}^3} dx_P dy_P \\
 H_y(x, y, z) &= \frac{\sigma}{4\pi} \int_0^b \int_0^a \frac{y-y_P}{r_{PQ}^3} dx_P dy_P \\
 H_z(x, y, z) &= \frac{\sigma}{4\pi} \int_0^b \int_0^a \frac{z}{r_{PQ}^3} dx_P dy_P
 \end{aligned} \quad (2)$$

$$r_{PQ} = \sqrt{(x-x_P)^2 + (y-y_P)^2 + (z-z_P)^2},$$

где $\sigma = \mathbf{M} \cdot \mathbf{n}$ – плотность поверхностных магнитных зарядов, \mathbf{n} – внешняя нормаль к поверхности полюса, \mathbf{M} – вектор намагниченности вблизи поверхности полюса. Вычисление интегралов приводит к формулам (3).

$$\begin{aligned}
 H_x(x, y, z) &= -\frac{\sigma}{4\pi} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 (-1)^{i+j} \ln(y_j + \sqrt{x_i^2 + y_j^2 + z^2}) \\
 H_y(x, y, z) &= -\frac{\sigma}{4\pi} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 (-1)^{i+j} \ln(x_i + \sqrt{x_i^2 + y_j^2 + z^2}) \\
 H_z(x, y, z) &= \frac{\sigma}{4\pi} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 (-1)^{i+j} \operatorname{arctg} \left(\frac{x_i y_j}{z \sqrt{x_i^2 + y_j^2 + z^2}} \right)
 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
 x_1 &= x; & y_1 &= y; \\
 x_2 &= x-a; & y_2 &= y-b.
 \end{aligned}$$

В каждой контрольной точке межполюсного пространства компоненты напряженности магнитного поля \mathbf{H} могут быть рассчитаны на основе принципа суперпозиции магнитного поля от каждого из полюсов.

В работе [2] показано, что для обеспечения значительной степени однородности магнитного поля между основаниями П-образного магнита (рис. 1) со стороной $2b$ нужно выбирать такое расстояние $2p$ между центрами полюсов, чтобы выполнялось соотношение

$$1.5 < \frac{2p}{2b} < 3 \quad (4)$$

Проведем оценку однородности и интенсивности магнитного поля для этого случая. Пусть размеры рабочего объема для трубы диаметром $d = 51$

мм составляют $20 \times 20 \times 30$ мм, а шаг между контрольными точками 1 мм. Если стороны прямоугольного полюса равны 100 мм, то численный расчет для ряда расстояний между центрами полюсов, удовлетворяющих соотношению (4), позволяет получить значения однородности и напряженности поля, приведенные в табл. 1. Величина напряженности поля в центре рабочего объема выражена в долях от намагниченности полюсов \mathbf{M} .

Таблица 1
Характеристики магнитного поля для П-образного магнита

$2p$, мм	Δ , %	$H^{(0)} \times M$, А/м
150	22	0.3354
175	12	0.2364
200	8	0.1763
250	5	0.1092
300	3	0.0744

Можно сделать вывод, что отдаление полюсов П-образного магнита приводит к увеличению однородности магнитного поля в рабочем объеме, тогда как напряженность поля при этом значительно убывает.

Намагничивающая система в виде С-образного магнита (рис. 2) при тех же размерах трубы, контрольной зоны и полюсов электромагнита при расстоянии между полюсами 52 мм дает, как показывает численный расчет, следующие оценочные значения интересующих параметров в рабочем объеме

$$\Delta = 5.2\%, \quad H^{(0)} = 0.5769 \times M \text{ А/м}$$

Таким образом, в ряде случаев, когда область контроля находится между полюсами электромагнита, более целесообразно использовать в качестве намагничивающей системы С-образный магнит, который позволяет обеспечить лучшую однородность при большей интенсивности намагничивающего поля, что также является очевидным из физических соображений.

Для повышения степени однородности поля для этой конструкции магнитной системы одним из возможных вариантов ее реализации является построение с использованием набора дискретных прямоугольных стержней. Априори предполагаются известными размеры дискретных элементов полюсных наконечников, их количество, а также то, что они намагничены до состояния близкого к насыщению (см. рис. 4).

Пусть полюсные наконечники имеют квадратную форму и на каждом основании электромагнита расположено $2N \times 2N$ квадратных элементов со сторонами размером D , намагниченность которых \mathbf{M} считается постоянной и направленной вдоль оси OZ. Требуется подобрать такие расстояния h_i от поверхностей этих элементов до плоскости XOY контрольной области, чтобы

внутри рабочего объема Ω в межполюсном пространстве создавалось высокооднородное магнитное поле максимально возможной напряженности.

В силу зеркальной симметрии задачи для однозначного описания расстояний до поверхностей прямоугольных элементов полюсных наконечников достаточно задать численные значения лишь n расстояний (см. рис. 5)

Таким образом, расстояния до полюсных наконечников однозначно

$$n = \frac{N(1+N)}{2} \quad (5)$$

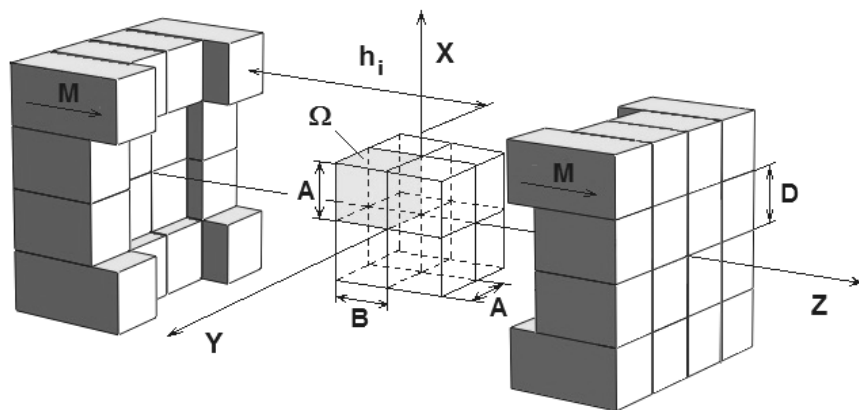


Рис. 4. Общий вид полюсных наконечников магнитной системы. определяются вектором параметров

$$\mathbf{h} = \{h_0, h_1, \dots, h_{n-1}\} \quad (6)$$

h_0	h_1	h_2	h_2	h_1	h_0
h_1	h_3	h_4	h_4	h_3	h_1
h_2	h_4	h_5	h_5	h_4	h_2
h_2	h_4	h_5	h_5	h_4	h_2
h_1	h_3	h_4	h_4	h_3	h_1
h_0	h_1	h_2	h_2	h_1	h_0

Рис. 5. Параметры квадратных полюсных элементов ($N = 3$)

При этом достаточно обеспечить однородность магнитного поля лишь в области пространства, лежащей в одном из октантов Ω и имеющей размеры $A \times A \times B$.

Для оптимального синтеза высокооднородного магнитного поля внутри объема рабочей области воспользуемся следующей нормированной многокритериальной целевой функцией

$$f(\mathbf{h}) = \frac{\sum_{k=1}^K (H_x^{(k)})^2 + \sum_{k=1}^K (H_y^{(k)})^2 + \sum_{k=1}^K (H_z^{(k)} - H_z^{(0)})^2}{K \cdot |H_z^{(0)}|^3} \quad (7)$$

где K – количество точек в контрольной области, $H_i^{(k)}$ – одна из компонент напряженности магнитного поля в k -й контрольной точке, $i = x, y, z$; $H_z^{(0)}$ – z -компонента магнитного поля в центре рабочего объема. Минимизация целевой функции (7) позволяет уменьшить значения компонент напряженности поля H_x и H_y , выполнить условия однородности по компоненте H_z и максимизировать поле по этой составляющей в рабочем объеме. Во время проведения оптимизации предлагается использовать сгущающуюся сеть контрольных точек. При этом в начале оптимизационного процесса шаги между узлами сети Δx , Δy , Δz выбираются достаточно крупными, на следующих итерациях шаги сети постепенно уменьшаются и их новые значения пересчитываются по формулам

$$\Delta x' = \frac{\Delta x}{s_x}; \quad \Delta y' = \frac{\Delta y}{s_y}; \quad \Delta z' = \frac{\Delta z}{s_z}, \quad (8)$$

где $\Delta x'$, $\Delta y'$, $\Delta z'$ – новые значение расстояний между соседними контрольными точками, s_x , s_y , s_z – масштабирующие коэффициенты для соответствующих осей координат. Для плавного сгущения сети значения масштабирующих коэффициентов s предлагается задавать несколькими большими единицами. При таком выборе новые контрольные точки не совпадут с предыдущими, и однородность поля будет оцениваться в других точках рабочего объема, т. е. происходит более тщательное исследование области контроля ограниченным количеством «плавающих» точек.

Таким образом, при оптимизации с использованием сгущающейся сети сначала находится грубое решение задачи, а затем значение вектора \mathbf{h} уточняется при меньшем шаге между контрольными точками. Результат такого подхода – ускорение оптимизационного процесса за счет уменьшения общего числа расчетов магнитного поля в контрольных точках.

Зададимся ограничениями на изменения значений h_i выступов полюсных элементов магнитной системы (см. рис. 4). Так как выступы полюса не могут пересекать поверхность трубы, и в то же время для обеспечения значительной напряженности магнитного поля должны находиться достаточно близко от нее, то для любого выступа должно выполняться неравенство

$$B < h_i \leq h_{\max}, \quad (9)$$

где h_{\max} – наибольшее допустимое расстояние между плоскостью XOY контрольной зоны и выступами элементов магнитного полюса; $i = \overline{0, n-1}$.

Для решения поставленной оптимизационной задачи использовался разработанный авторами гибридный алгоритм оптимизации роем частиц PSO и генетического алгоритма GA с вещественными хромосомами со случайной топологией связей между частицами. Эта разновидность эволюционного мультиагентного метода роевого интеллекта обеспечивает более высокую сходимость, чем каждый из этих алгоритмов в отдельности, и позволяет находить глобальное решение многоэкстремальной оптимизационной задачи высокой размерности за минимальное число вычислений целевой функции, что выгодно отличает его от классического PSO [5, 6].

Проиллюстрируем работу разработанного ПО на численном эксперименте. В качестве значений исходных данных для магнитной системы с полюсными наконечниками, состоящими из набора прямоугольных элементов, выбирались значения $N = 5$, $D = 10$ мм, $h_{\max} = 100$ мм, $A = 10$ мм, $B = 15$ мм, $\Delta x^{(0)} = \Delta y^{(0)} = \Delta z^{(0)} = 5$ мм, $s_x = s_y = s_z = 1.017$.

При этом полюсные наконечники и контрольная зона имеют размеры, аналогичные тем, которые применялись для оценки характеристик поля, создаваемого П-образным магнитом.

Сгущение сетки продолжалось до шага 1 мм через каждые 15 итераций оптимизационного процесса. Размер роя принимался равным 20 частицам, количество кроссоверов – 4, вероятность мутации – 0.3. При данном количестве полюсных элементов требовалось найти оптимальные значения для $n = 15$ параметров. Результаты решения этой задачи оптимизации приведены в табл. 2.

Внешний вид одного из двух оптимальных полюсных наконечников для данного случая моделирования проиллюстрирован на рис. 6. Сравнительный анализ показал, что синтезированный вариант конструкции имеет более высокие показатели однородности и интенсивности магнитного поля, чем П-образные и С-образные системы с плоскими полюсами.

В процессе изготовления полюсных наконечников могут быть допущены погрешности, наиболее существенными из которых в смысле влияния на распределение поля являются отклонения в расстояниях h_i .

Таблица 2

Оптимальные значения выступов полюсных элементов

Выступ	Значение, мм	Выступ	Значение, мм
h_0	96.692	h_8	96.453
h_1	26.000	h_9	78.389
h_2	47.754	h_{10}	50.310
h_3	26.128	h_{11}	78.702
h_4	44.503	h_{12}	84.844
h_5	71.583	h_{13}	79.225
h_6	96.060	h_{14}	97.846
h_7	80.343		
Однородность магнитного поля, %		Δ_x, Δ_y	0.005
		Δ_z	0.013
Напряженность поля в центре рабочей области, А/м		$H^{(0)}$	$0.2133 \cdot M$

Для оценки влияния погрешностей изготовления численно промоделируем случайные отклонения оптимальных размеров выступов, воспользовавшись для определенности нормальным законом их распределения.

Из технологических соображений будем считать, что стандартное отклонение этих значений составляет 0.1 мм. На рис. 7 приведены гистограммы, показывающие распределение однородности магнитного поля при заданном уровне отклонения. Размер выборки равен $m = 1000$.

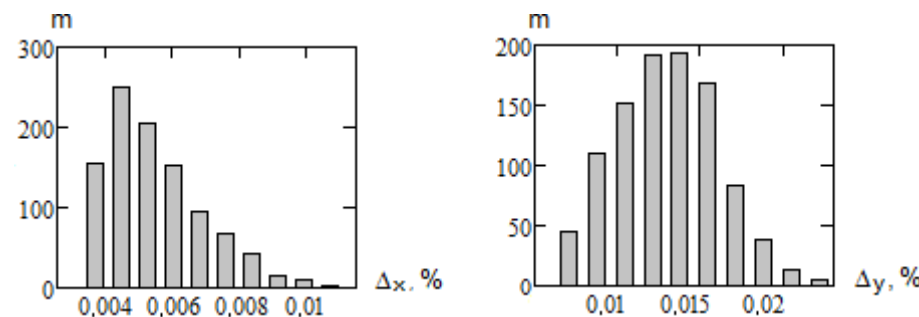


Рис. 7. Гистограммы влияния погрешностей выступов на однородность поля

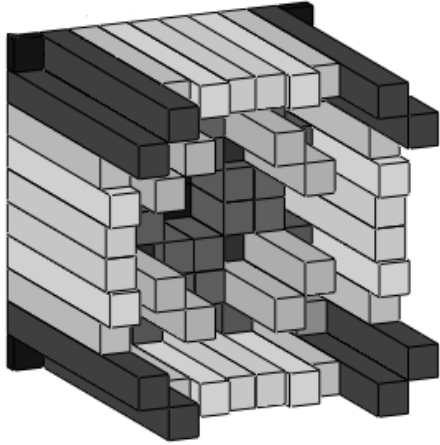


Рис. 6. Внешний вид оптимального полюсного наконечника ($N = 5$)

Полученные в результате статистической обработки данные для математических ожиданий и стандартных отклонений однородности магнитного поля составляют

$$\begin{aligned} \overline{\Delta_x} = \overline{\Delta_y} &= 0.0055\% & \sigma(\Delta_x) = \sigma(\Delta_y) &= 0.0015\% \\ \overline{\Delta_z} &= 0.0129\% & \sigma(\Delta_z) &= 0.0031\% \end{aligned}$$

Заклучение. Результатом работы является создание программного комплекса оптимального синтеза намагничивающих устройств дефектоскопического контроля с высокооднородными магнитными полями, позволяющего проектировать широкий спектр устройств для конкретных объектов контроля. В качестве примера оптимального синтеза удалось спроектировать магнитную систему для намагничивания электросварных труб диаметром 51 мм, обеспечивающую в рабочем объеме магнитное поле с однородностью 0.01 %. Предложенный вариант оказался более эффективным, чем обычно применяемые на практике намагничивающие устройства в виде П-образных магнитов.

Список литературы: 1. Зацепин Н.Н., Коржова Л.В. Магнитная дефектоскопия. – Мн.: Наука и техника, 1981. – 208 с. 2. Мужичкий В.Ф., Кудрявцев Д.А. Некоторые вопросы определения оптимальных размеров намагничивающих систем на постоянных магнитах // Дефектоскопия. – 2004. – № 2. – С. 67–75. 3. Загидулин Р.В., Якшибаев Б.Р., Загидулин Т.Р. Влияние дискретности магнитной системы на величину ее магнитного поля // Контроль. Диагностика. – 2009. – № 10. – С. 9–14. 4. Шлеенков А.С., Бульчев О.А., Шлеенков С.А. Установка УМД–101М для автоматизированного магнитного контроля качества электросварных труб по всему объему. – 2008. 5. Kennedy J., Eberhart R. Particle Swarm Optimization. // Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks (Perth, Australia), IEEE Service Center, Piscataway, NJ. 5(3). – 1995. – PP. 1942–1948. 6. Clerc. M. Back to random topology. Режим доступа к статье: http://clerc.maurice.free.fr/psa/random_topology.pdf.

Г.М. СУЧКОВ, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХП»;
О.М. ПЕТРИЩЕВ, д-р техн. наук, проф., НТУУ «КП»;
О.В. ДЕСЯТНИЧЕНКО, асп., НТУ «ХП»;
Н.М. ЮДАНОВА, ст. викладач, НТУ «ХП»

ЕМА ТОВЩИНОМЕРІЯ. (ОГЛЯД).

Виконано аналіз інформаційних джерел з методів, приладів, установок та систем товщинометрії виробів при використанні електромагнітно - акустичного способу збудження та прийому ультразвукових імпульсів. Визначені напрямки вдосконалення розглянутого виду контролю.

The analysis of information sources for methods, instruments and systems of thickness measuring for electromagnetic acoustic type of excitation and receiving has been executed. The basic directions for betterment of this control type have been designated.

Бурхливий розвиток методів і засобів неруйнівного контролю вимагає розробки нових методів і приладів неруйнівного контролю [1] і, в тому числі, товщини виробів. Переважно це прилади, що реалізують метод ультразвукового контролю з використанням контактної рідини. У той же час були визначені області [3], у яких застосування контактних методів контролю недостатньо ефективно. Це контроль виробів з забрудненої поверхні без спеціальної зачистки, дефектоскопія гарячих і холодних виробів, високопродуктивний контроль, товщинометрія з низькими експлуатаційними витратами і т.д. Тому в останні роки спостерігається інтенсифікація досліджень і розробок у напрямі створення засобів визначення товщини виробів безконтактними способами. Найбільші технічні успіхи у зазначеному напрямку досягнуті за рахунок застосування електромагнітних - акустичного (ЕМА) способу збудження і прийому ультразвукових коливань [1-26].

Можливості ЕМА способу ультразвукової товщинометрії. Можливості електромагнітно - акустичного способу збудження і прийому ультразвукових (УЗ) коливань (УЗК) найбільш перспективні стосовно товщинометрії [1]. У цьому напрямі ведуться інтенсивні дослідження і апаратні розробки [2-26]. Автори роботи [2] провели об'ємні дослідження з товщинометрії феромагнітних труб імпульсним ЕМА способом і створили зразок товщиноміру. Необхідна для збудження і прийому УЗК магнітне поле створюється імпульсним електромагнітом. Вимірювання товщини виробів здійснюється імпульсами зсувних УЗК, що, за інших рівних умов, дозволяє контролювати менші товщини. Обробка сигналу при вимірюванні здійснюється двома методами - з вимірюванням часового інтервалу між зондуючими імпульсом і будь-яким донним імпульсом або за часовим інтервалом між будь-якою парою донних сигналів. Вимірювання інтервалу між донними імпульсами особливо перспективно для ЕМА способу

товщинометрії, так як при цьому виключаються традиційні похибки, а також похибки, обумовлені об'ємним розподілом електромагнітно - динамічних сил у поверхневому шарі об'єкта контролю (ОК) при збудженні і прийомі УЗК. Найбільш доцільне застосування такого режиму при товщинометрії тонких виробів з ферромагнітних металів з низькою електропровідністю, тому що похибки можуть збільшитися до істотних величин. Крім того, зменшується «мертва зона». Однак такий спосіб не може застосовуватися для контролю матеріалу ОК з високим загасанням УЗК або виробів з кородованими поверхнями. При дослідженнях автори [2] встановили, що крім корисного відлуння сигналів, що несуть інформацію про товщину виробу, спостерігаються імпульси завад, обумовлені тим, що перетворювач збуджує як зсувні (корисні), так і подовжні УЗ коливання, що трансформуються при прийомі у зсувні. Отже, необхідно застосовувати заходи для усунення впливу когерентних перешкод. Автори [2] також встановили, що в процесі контролю, внаслідок змін величини зазору між ЕМАП і поверхнею виробу, впливу якості контрольованої поверхні і т. п., загальний рівень сигналу на виході перетворювача може змінюватися в п'ять і більше разів. Тому необхідно застосовувати засоби боротьби з впливом вказаних факторів. Автори стверджують, що при оптимальних параметрах (напруга, струм) зондуючого імпульсу і імпульсу підмагнічування, за допомогою товщиномірів можуть контролюватися ферромагнітні труби з товщиною стінки 3-50 мм з точністю 2%. У той же час згадані оптимальні параметри автори не вказали.

Характеристики макета товщиноміру, в якому застосовується ЕМА метод контролю з використанням частотно - модульованих УЗ і електромагнітних хвиль, описані в роботі [3]. Товщина тонкостінного металевго виробу на ділянках з плоскими поверхнями вимірюється за рахунок резонансу пружних коливань. Похибка вимірювання цим приладом не перевищує $\pm 1,4\%$. Проте, в даний час резонансний метод застосовують рідко і лише для надтонких виробів з плоскими поверхнями.

У роботах [4-6] виконано значний обсяг досліджень з товщинометрії ОК нагрітих до високих температур - область, в якій практично неможливо застосовувати традиційні контактні товщиноміри. Встановлено особливості вимірювань товщини ферромагнітних виробів нагрітих до температури точки Кюрі і вище. Обґрунтовано висновок про необхідність виконання товщинометрії гарячих ОК поздовжніми ультразвуковими хвилями. Розроблено засоби для вимірювань товщини стінок труб. Наприклад, прилад [4] вимірює товщину стінки труби в діапазоні 1,5-30 мм з точністю 1%. Для забезпечення заданої чутливості автори пропонують підвищувати амплітуду зондуючих імпульсів.

Дані про малогабаритні пристрої для ЕМА товщиномірів наведені в роботах [7, 9]. У НДІ електронної інтроскопії [7] у вигляді модуля розроблена компактна аналогова частина товщиноміру. Електромагнітно - акустичний перетворювач, генератор ударного збудження і широкосмуговий попередній

підсилювач конструктивно об'єднані в одному корпусі діаметром 30 мм і високою 54 мм. Модуль з'єднується з приладом кабелем, по якому передаються потенціали від джерел живлення (+700 В, +5 В), синхроімпульс для запуску генератора і вихідний сигнал (прийняті відбиті імпульси). Генератор забезпечує пропускання через провідники котушки індуктора ЕМА перетворювача імпульсів струму 80 А з частотою зондування до 1 кГц. ЕМАП містить високочастотну котушку з 12 витків дроту ПЕВ діаметром 0,31 мм, яка збуджується імпульсом тривалістю 0,3 мкс і амплітудою 500 В. Час перехідного процесу, пов'язаний з насиченням підсилювача, становить близько 3 мкс. З наведених авторами даних випливає, що при таких значних імпульсних потужностях співвідношення сигнал/шум при нульовому зазорі між ЕМАП і поверхнею алюмінієвого зразка становить 6 разів, а «мертва» зона перевищує 9 мм. Отримані в цьому пристрої технологічні характеристики імпульсів збудження узгоджуються з рекомендаціями роботи [8], де стверджується, що через низьку ефективність ЕМА перетворення для нормальної роботи ЕМАП струм у його індукторі повинен досягати 100 А і більше, а індукція поляризуючого магнітного поля - 1 ... 5 Тл, що мало ймовірно навіть для сучасного розвитку техніки. Окрім того, сканувати ферромагнітний виріб ЕМАП з таким магнітом буде практично неможливо.

Ще більш потужний зразок пристрою УВТ-03 для товщинометрії створений авторами роботи [9]. Його генератор ударного збудження живиться напругою 1 кВ. Повідомляється, що ЕМА перетворювач забезпечує роздільну здатність вимірювання товщини матеріалу - близько 0,1 мм по алюмінію. Похибка вимірювань становить 2%. Максимально допустимий зазор між ЕМАП і металом 0,5 мм. Як показує аналіз даних цієї роботи, підвищення потужності генератора товщиноміру УВТ-03, у порівнянні з роботою [7], помітного виграшу не дало.

У НДІ [10] розроблено автоматичний ЕМА товщиномір УТ-40Б, призначений для контролю металевих листів завтовшки 0,5 ... 6 мм. Проектна продуктивність контролю 2600 км² в рік, похибка вимірювання не більше 2%. Там же розроблений УЗ автоматичний чотирьохканальний товщиномір УТ-80Б [11], призначений для контролю сталевих ферромагнітних труб діаметром 30-150 мм з товщиною стінок 3 ... 15 мм. Зондуючий імпульс являє собою напівхвилю синусоїди тривалістю $0,25 \pm 0,05$ мкс з амплітудою струму 50 ± 10 А Частота зондування - 1000 Гц. Швидкість контролю - до 3 м/с. Межа основної похибки - $\pm 2\%$. У результаті дослідної експлуатації електромагнітно - акустичного товщиноміру УТ-80Б встановлено ряд важливих результатів з яких випливає, що основну погрішність у вимірювання товщини вносить традиційний спосіб вимірювання проміжків часу між донними імпульсами, характеристики яких змінюються в процесі контролю. Нестабільність положення ЕМАП відносно поверхні труби практично не впливає на спрямованість випромінювання зсувних УЗК. Не потрібна настройка ЕМА товщиноміру на кожен тип досліджених сталей в

діапазоні ст.10 ... ст.45. Мінімальний діаметр контрольованої труби склав 18 мм. У той же час встановлено наявність додаткових заважаючих імпульсів, обумовлених прийомом імпульсів поздовжніх хвиль у проміжку між інформаційними донними сигналами. Виявлена значна неоднорідність пружних властивостей гарячекатаних труб. Визначено, що з-за неоднорідності металу стінок труби, коливань зазору між ЕМАП і ОК, кривизни труби, наявності на поверхні дефектів, окалини, а також задирок на торцях амплітуда донних імпульсів може ставати занадто малою або спотворюється. У результаті близько 26% вимірювань від загального обсягу не виконувалися. Отримані в цій роботі важливі висновки говорять про необхідність виконання подальших досліджень електроакустичного тракту, а також перегляду принципів побудови ЕМА товщиномірів.

Дані про сучасні розробки, які спрямовані на створення ЕМА товщиномірів, наведені в роботах [12-26]. У роботі [18] було показано перевагу застосування при товщинометрії радіоімпульсів. Таке ж технологічне рішення використано в дефектоскопі - товщиномірі [17], в якому, на відміну від раніше застосованого ударного збудження ЕМАП [2, 7-10], живлення ЕМА перетворювачів здійснено радіоімпульсами струму тривалістю 1 ... 3 періоди частоти заповнення 1 ... 3 МГц. Імпульсна потужність генератора товщиноміру [17] дорівнює 25 кВт, частота збудження зонduючих імпульсів - до 5 кГц. У повідомленні автори не вказали, які мінімальні товщини можна вимірювати при використанні довготривалих зонduючих імпульсів. Судячи з наведених характеристик, цей прилад може використовуватися тільки в стаціонарних умовах для контролю достатньо товстих виробів.

В інституті ІЕЗ ім. Є.О. Патона [12] виконані дослідження та розробка ЕМА товщиноміру для космічної техніки. Встановлено, що ЕМАП, збуджують і приймають зсувні хвилі під кутом 0°. Вони ефективні для вимірювання товщини виробів з алюмінію і сталі. Похибка вимірювання товщини в діапазоні 2,5 ... 200 мм не перевищувала $\pm 0,25$ мм, а похибка вимірювання товщини зразка з покриттям величиною 0,1 - 0,3 мм склала $\pm 0,5$ мм. Встановлено, що більш низька точність вимірювання товщини має місце при наявності на ОК покриттів. Очевидно, збільшення похибки пов'язано з еквівалентним збільшенням зазору між ЕМАП і металом. Тому слід розробляти прилади, які можуть виконувати контроль при значних зазорах між ЕМАП і поверхнею виробу.

В об'єднанні ЗАТ «НДІ МНВО «СПЕКТР» розроблений портативний ЕМА товщиномір [19, 24], який за габаритами і вагою не набагато перевищує аналогічні контактні пристрої. Як стверджують автори, відмітною особливістю цього приладу є можливість роботи на виробках з сильно кородованою, нерівною і необробленою поверхнею. Товщиномір ЕМАТ-100 обладнаний мікропроцесором, що дозволяє забезпечити стабільну роботу всіх систем приладу. Межа допустимої основної абсолютної похибки становить

$\pm (0,1+0,001 \times H)$ мм, де H – товщина виробу). Пристрій може працювати через шар фарби або захисне покриття товщиною до 1,5 мм. У той же час у статті йдеться про відхилення вимірної товщини від дійсної на 0,2 мм, а в одній точці навіть на 2,5 мм. Можливо, сильне відхилення товщини від дійсної обумовлено не тільки наявністю внутрішнього дефекту, а, як і в роботі [11], визначається спотвореннями інформаційного сигналу із-за неоднорідностей пружних властивостей контрольованого об'єму металу.

Товщиномір ЕМАТ-1 [21] складається з електронного блоку, зібраного в корпусі товщиноміру УТ-93П і ЕМА перетворювача зсувних хвиль. За даними авторів, принципова відмінність товщиноміру ЕМАТ-1 від товщиноміру УВТ-03 [9] - здатність контролювати не тільки сплави алюмінію, але й магнітні марки сталі, що істотно розширює область його застосування.

Подальше кроки щодо вдосконалення ЕМА товщиномірів зроблені в роботах [13 - 17, 19-20, 22, 24-26]. Товщиноміри «КРМ-Ц-Дельта» [14, 22, 24] забезпечений графічним рідкокристалічним індикатором. Зображення на екрані використовується для точного встановлення вимірювальних курсорів в заданих місцях яку вказують реалізації. Оцінка товщини виробу проводиться за традиційною технологією - шляхом вимірювання тривалості часових інтервалів між зонduючим і одним з донних імпульсів, або між двома обраними донними імпульсами. Таким чином, ускладнивши конструкцію приладу, автори істотно збільшили вірогідність правильного вимірювання товщини. Крім того, при недостатній величині донних сигналів застосовується накопичення амплітуд сигналів від 2 до 20 зонduючих посилок. Автори декларують, що основна абсолютна похибка, оцінена в спеціальних умовах, в діапазоні товщин 2,5 ... 20 мм не перевищує 0,06 мм. У цьому приладі застосовується ударне збудження ЕМАП при частоті слідування зонduючих імпульсів 1 Гц.

Аналіз розглянутих відомих досліджень і розробок приводить до висновку, що подальше вдосконалення ЕМА товщиноміром можливо за рахунок застосування нових технологій товщинометрії. Сучасні мікропроцесори і елементна база дозволяють здійснити найскладніші алгоритми функціонування ЕМА товщиноміра. Основу технології товщинометрії становить процедура визначення товщини ОК. Одним з ефективних математичних апаратів, який може кардинально змінити процес товщинометрії, є кореляційний. Перевагу застосування кореляційного аналізу в ЕМА товщиномірі було доведено в роботі [27]. Подальший розвиток особливостей застосування та ефективності методу кореляційного аналізу в ЕМА приладах виконано в роботі [28]. Вперше практична реалізація кореляційного аналізу була здійснена при розробці та впровадженні апаратури 4-х каналного автоматичного ЕМА товщиноміру [25 26] на ЗАТ «Ніко Тьюб» (м. Нікополь). Впроваджений 20.07.2001 р. прилад забезпечує на швидкості до 1 м/с вимір товщини стінок труб в діапазоні 3 ... 12 мм уздовж

4-х утворюючих по всій довжині, виключаючи кінцеві ділянки розміром 5 ... 10 мм. Діаметр контрольованих труб одним і там же ЕМАП – 42 ... 115 мм. Апаратура установки має більш широкі можливості. Вона дозволяє виконувати контроль труб товщиною від 0, 6 мм, діаметром більше 12 мм. Точність вимірювання товщини - $\pm 0,1$ мм. При виконанні впроваджувальних робіт на ЗАТ «Ніко Тьюб» було встановлено, що метал суцільнотягнутих труб має локальні неоднорідності, витягнуті уздовж твірної труби. Результат збігається з даними роботи [11]. Тобто цей чинник є загальним для різних технологій виробництва труб. Його вплив призводив до істотних коливань часу поширення УЗК в різних ділянках металу під робочою зоною ЕМАП шириною 5 мм. Помилка вимірювань була значною, якщо використовувався традиційний метод вимірювання проміжків часу між зондуючим імпульсом або між заданими донними імпульсами, а іноді вимірювання товщини неможливо було виконати. Завдання вимірювання товщини суцільнотягнутих труб була вирішена лише після застосування апарату автокореляційного аналізу.

В роботі [29] також було підтверджено перевагу кореляційної обробки інформації при ЕМА товщинометрії. На підставі робіт [25-27, 29] в об'єднанні ЗАТ «НДІ МНВО «СПЕКТР» ТОВ «Акустичні контрольні системи» розроблений ЕМА товщиномір А1270 для контролю прокату з алюмінієвих сплавів [13, 20]. Для досліджень можливостей застосування в товщиномірах кореляційної обробки була використана лабораторна установка з цифровим осцилографом і персональним комп'ютером [20]. Так само як і в пристроях за даними робіт [16, 22, 24] прилад забезпечений рідкокристалічним екраном для візуалізації прийнятої реалізації. Такий підхід дозволяє помітно підвищити надійність виконання правильних вимірювань.

Автори робіт [15, 23] пішли по шляху вдосконалення характеристик ЕМА товщиномірів шляхом застосування ультразвукових сигналів у вигляді коду Баркера або спеціальних послідовностей. У такому разі прийняті сигнали необхідно також обробляти кореляційним методом, наприклад з використанням оптимального фільтра. У результаті корисний сигнал краще виділиться на фоні шуму і завад. Слід зазначити, що реалізація спеціальних сигналів при ЕМА товщинометрії можлива при широкопasmовому генераторі зондуючих імпульсів (ГЗІ), ЕМАП та попередньому підсилювачі. Це є суттєвим недоліком, так як навіть при ударному збудженні ультразвукових імпульсів завдання побудови аналогової частини ЕМА товщиноміру вимагає участі великої групи висококваліфікованих інженерів різних спеціальностей.

В останній час вчені багатьох країн світу приділяють увагу теоретичним, модельним та експериментальним дослідженням акустичного тракту електромагнітно - акустичних перетворювачів [30-34]. Автори цих робіт розглянули вплив різних факторів на перетворення електромагнітної енергії в акустичну, а також в зворотному напрямку. Розглянуті питання з розрахунку зміщень в акустичному полі в залежності від провідності металів, частотні

залежності, вплив скін-ефекту. Показано, що при використанні тангенціального магнітного поля основний вклад в ЕМА перетворення дає магнітострикційний механізм. Стверджується, що магнітний механізм перетворення має місце при контролі матеріалів з незначною електропровідністю. Проте в цих роботах та аналогічних роботах інших авторів недостатньо досліджено акустичний тракт з урахуванням використання пакетних імпульсів з заданою частотою заповнення та заданою тривалістю пакету.

Особливо важливі результати стосовно побудови електромагнітно-акустичних перетворювачів отримані в роботі [31, 35]. Отримані моделі та їх використання дозволяє побудувати конструкції ЕМАП, виходячи з інформації відносно характеристик матеріалів, які будуть контролюватися цими перетворювачами. В роботі [35] встановлено, що форма і розміри контуру ЕМАП та довжина пружної хвилі однозначно пов'язані між собою. Цей зв'язок обумовлений інтегруючими властивостями перетворювача. Авторами показана необхідність обов'язкового врахування частотного діапазону та різновиду ультразвукової хвилі. Надано рекомендації щодо вибору форми і розміру індуктора конкретного ЕМАП.

Аналіз відомих робіт [1-39] показав, що основною причиною, яка стримує розробку ефективних ЕМА товщиномірів є традиційний підхід до їх побудови. Найбільшою мірою це стосується портативних приладів, так як багато вдалих технологічних та технічних рішень, отриманих при розробці автоматичних установок [2, 11, 25-26], часто використати неможливо. З огляду на тенденції щодо розвитку ЕМА товщиномірів [15,17-18, 20, 23, 25-29] були сформульовані основні принципи побудови таких приладів [37]. Їх основна суть полягає в наступному. Технологічний процес товщинометрії, реалізований при конструюванні ЕМА приладів, повинен складатися з трьох основних етапів. Перший етап - формування оптимізованого початкового сигналу з заданими параметрами - тривалістю, частотою і функцією її зміни, фазою і функцією її зміни, амплітудою і функцією її зміни. Цей етап виконується з використанням мікропроцесора, а потім сформований сигнал підсилюється потужним смуговим підсилювачем - ГЗІ. Другий етап - збудження і прийом оптимального сигналу. Цей етап здійснюється ЕМАП із смугою пропускання, близької до смуги інформаційного сигналу. Третій етап - оптимальна обробка інформаційної реалізації з урахуванням відомих характеристик вихідного імпульсу (у вигляді реалізації заданої тривалості). Цей етап повинен виконуватися спеціальним і оптимальним фільтрами. Вони можуть бути здійснені аналоговим або (і) цифровим пристроєм, або корелятором.

Для перевірки розроблених принципів був спроектований і виготовлений «ручний» ЕМА товщиномір, в якому були враховані економічні та конструктивні особливості, а також реалізовані наступні основні положення. Оригінальний інформаційний сигнал формується мікропроцесором у вигляді

радіосигналу тривалістю від 1 до 7 періодів із частотою, величину якої можна регулювати в інтервалі 1,8 ... 8 МГц. Потім корисний сигнал підсилюється смуговим ГЗІ. Імпульсна потужність живлення широкосмугового ЕМАП знижена до 2 ... 3 кВт, що майже на порядок менше, ніж, наприклад, в приладі [17]. Такий підхід дозволяє зменшити «мертву» зону, захистити вхід попереднього підсилювача від впливу наведеного зонduючого імпульсу і, отже, контролювати менші товщини. Товщиномір не втрачає працездатності при зменшенні імпульсної потужності ГЗІ до 600 Вт. ГЗІ товщиноміру живиться від батарей (акумуляторів) типу «Крона», а решта електронної частини - від пальчикових батарей (акумуляторів). Частота проходження зонduючих імпульсів сформованих ГЗІ може досягати 50 кГц, проте обмежена 100 Гц - в цілях економії енергії батарей. Час безперервної роботи пальчикових батарей – 20 годин, батарей типу «Крона» - більше 3 місяців. Джерело поляризованого магнітного поля (ДПМП) [37] виконаний зі сплаву на основі елементів Nd Fe В. ЕМА перетворювач містить роздільно-суміщений плоский індуктор з двома одношаровими котушками індуктивності, що містять по 18 витків дроту ПЕТВ-0, 12 мм, віднесених один від одного на 1 мм. ЕМАП містить пристрої для запобігання від збудження в її елементах когерентних перешкод при проходженні зонduючого імпульсу, а також протектор із зносостійкого матеріалу завтовшки 0,7 мм. Корпус ЕМАП виконаний з алюмінієвого сплаву, що дозволяє екранувати перетворювач від впливу електромагнітних завад. У корпусі ЕМАП розташовані схема захисту підсилювача від впливу наведення зонduючого імпульсу і регульований попередній підсилювач з коефіцієнтом підсилення до 60 дБ. ЕМАП з'єднується з електронним блоком товщиноміру екранованим багатожильним кабелем. В електронному блоці реалізація заданої довжини оцифровується, обробляється вейвлет-фільтром і піддається крос - кореляційному аналізу з допомогою другого мікропроцесора. Переваги такої технології обробки інформації полягає у виключенні операцій постійної регулювання посилення і стабілізації величини амплітуди інформаційних сигналів, які раніше були обов'язковими навіть для сучасних ЕМА товщиномірів [24]. На результати вимірювань не впливають спотворення форми сигналу [8, 24], величини амплітуд напівхвиль в інформаційному сигналі і їх співвідношення. Вимірювання можуть виконуватися в складних умовах, коли амплітуда донних імпульсів менше рівня шумів на 20 ... 40 дБ. З виходу другого мікропроцесора цифрова інформація надходить на яскравий напівпровідниковий індикатор червоного кольору. Цифри індикатора добре видно як при сонячному освітленні, так і при слабкому освітленні або його відсутності. На підставі результатів відомих робіт, а також виходячи з призначення ЕМА товщиномірів контролювати ОК з кородованою, грубою або забрудненою поверхнею, дискретність індикації товщини обрана рівний 0,1 мм. Оскільки всі операції підготовки та проведення вимірювань покладені на два мікропроцесора, то прилад дуже простий в управлінні. Виконання

вимірювань відбувається автоматично після натискання кнопки «Пуск». Калібрування товщиноміри на зразку з відомою товщиною проводиться за допомогою трьох кнопок: «Калібрування», при цьому загоряється індикаторний світлодіод, і кнопки «+» і «-». Крім згаданих кнопок і вмикача інших регуляторів не передбачено. (Частота і тривалість зонduючих імпульсів встановлюється регуляторами, розміщеними на внутрішніх електронних платах).

Дослідженнями роботи товщиноміру встановлено, що він працездатний при зазорах між протектором ЕМАП і металом до 3 мм. Цей висновок підтверджується виконаними 100-кратними вимірами на зразку, виготовленим зі сталі У8 товщиною 15,6 мм при частоті УЗК 3 МГц і тривалості вихідного імпульсу, рівній трьом періодам заповнення частоти ультразвукових коливань. Дані про ймовірність правильного вимірювання товщини ОК наведені в таблиці.

Тимчасова стабільність роботи нового товщиноміри виявилася високою. Його випробування на одній ділянці зразка показали, що показання приладу протягом 8 годин не змінилися.

Таблиця 1

Залежність ймовірності правильного вимірювання товщини ОК від величини зазору між протектором ЕМАП і металом зразка

Зазор між протектором ЕМАП і ОК, мм	0,2	1	2	2,5	3	3,5
Вірогідність правильного вимірювання, %	100	100	100	100	98	62

При вимірах товщин ОК з різних матеріалів (сталі ст.3, ст.45, У7 і У8, алюміній, 09Г2С, 12ХМ, трубні сталі виробництва ЗАТ «Ніко Тьюб», сталі обсадних труб нафтового сортаменту і аналогічні) в діапазоні товщин 3 ... 27 мм встановлено, що калібрування приладу на кожен тип матеріалу не потрібно, тому що основна абсолютна похибка не перевищує $\pm 0,1$ мм. Очевидно, що для ніші в області товщинометрії, займаної ЕМА приладами (кородовані поверхні, груба обробка, катана поверхня із забрудненнями і т.д.), встановлювати більшу точність і меншу похибку не має сенсу.

На результати вимірювань розробленим приладом в значно меншій мірі впливають неоднорідності часу поширення УЗК в металі під робочою зоною ЕМАП, а також когерентні додаткові завадові імпульси поздовжніх [2, 11] і трансформованих [38] хвиль.

Встановлено, що, на відміну від [11], наявність на поверхні ОК в активній зоні ЕМАП скріпленої з поверхнею окалини при нормальній

температурі, збільшує співвідношення корисний сигнал/шум. Шар скріпленої окалини товщиною більше 0,5 мм може збільшувати корисний сигнал до 90 дБ. Чим більше товщина окалини, тим більше амплітуда донних сигналів (у вказаному діапазоні). Ступінь збільшення сигналу залежить також від складу окалини, її температури, технології виробництва металу, впливу на неї навколишнього середовища. Ефект збільшення окалиною амплітуди сигналів можна пояснити переважаючим впливом магніострикційних механізму збудження і прийому УЗК [39]. При традиційному вимірі товщини наявність не скріплених з поверхнею ОК частинок окалини призводить до зменшення співвідношення амплітуд донний сигнал/шум і до появи перешкод, амплітуда яких експоненціально зменшується з моменту завершення зондування імпульсу. При використанні кореляційної обробки наявність відшарованої окалини в зазорі між ЕМАП і металом на похибку вимірювань товщини практично не впливає.

Слід зазначити, що наявність поверхневих дефектів слабо впливає на результати вимірювань навіть при значному їхньому розвитку (за умови, що вони не перекривають акустичне поле). Наявність внутрішніх дефектів помітно позначається на результатах вимірювань у випадку, якщо вони є суттєвою перешкодою для поширення імпульсів пружних зсувних коливань, наприклад, розшарування, тріщини, закати і т.д. Оцінка впливу кривизни поверхні ОК на результати товщинометрії показала таке. Якщо загальне значення відстані між ЕМАП і металом, обумовлене локальною кривизною і товщиною покриття перевищує 3 мм, то кривизна позначається на точності і стабільності вимірювань. Якщо менше - то ні.

Дослідженнями встановлено, що одним і тим же ЕМА перетворювачем описаної конструкції вдається вимірювати товщину труб зовнішнім діаметром 6 мм і більше. При цьому технологічний зазор по найближчій відстані не повинен перевищувати 0,2 мм. При виготовленні ЕМАП з криволінійною поверхнею робочого торця обмежень по кривизні ОК не виникає.

Висновки

1. Встановлена (теоретичними, експериментальними та модельними дослідженнями) доцільність вдосконалення акустичного тракту електромагнітно-акустичного товщиноміру з ЕМА перетворювачем, який формує заданий кут введення акустичного поля, з врахуванням збудження і прийому акустичних імпульсів у вигляді пакету з різною часовою тривалістю та заповненням з заданою частотою.

2. Визначено, що одним з напрямків підвищення ефективності контролю товщини виробів «ручним» ЕМА товщиноміром являється збільшення потужності генератора зондування імпульсів за рахунок створення конструкцій нового типу та використання сучасних підсилюючих радіоелементів.

3. Встановлена необхідність дослідження впливу характеристик ЕМАП

та ЕМА товщиноміру, властивостей контрольного матеріалу виробів, стану його поверхні і геометричної форми та інших факторів, які визначають похибку вимірювання товщини

4. Визначена необхідність розробки нових методів обробки реалізацій, отриманих від ЕМАП, які б дали можливість, на відміну від кореляційних та аналогічних методів, суттєво підвищити продуктивність контролю товщини.

5. Встановлено, що форма і розміри контуру ЕМАП та довжина пружної хвилі однозначно пов'язані між собою. Цей зв'язок обумовлений інтегруючими властивостями перетворювача. Показана необхідність обов'язкового врахування частотного діапазону та різновиду ультразвукової хвилі. Розроблені рекомендації щодо вибору форми і розміру індуктора конкретного ЕМАП.

6. Аналіз потреби ринку неруйнівного контролю в товщиномірах та стан їх поставок показує, що ЕМА товщиноміри нового різновиду можуть доповнити існуючу гаму приладів для ультразвукового контролю товщини.

Список литературы: 1. 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. 2. Бутенко А. И., Малинка А. В., Стефаров В. И. и др. Толщинометрия труб импульсным электромагнитно – акустическим методом // Дефектоскопия. 1973. № 3. С. 7 - 11. 3. Филимонов С.А. Бесконтактный контроль толщины с помощью ультразвуковых и электромагнитных волн // Дефектоскопия. 1976. № 5. С. 29 – 33. 4. Буденков Г.А., Бедов С.Н., Вологов Ю.В. и др. Цифровой ультразвуковой толщиномер ТЭМАЦ-1. – Информационный листок № 482-74. Челябинск: 1974. – 4 с. 5. Себко В.П., Сучков Г.М., Ищенко В.Н. Исследование факторов, влияющих на результаты контроля горячего металла ЭМА способом // Дефектоскопия. – 2004. – № 11. – С. 40-49. 6. Гуревич С.Ю. Основы теории и практического применения высокотемпературного ультразвукового контроля ферромагнитных металлоизделий. – Дис. на соиск. уч. степ. докт. техн. наук, Екатеринбург: ИФМ УрО РАН. 1995. – 416 с. 7. Жуков В.К., Ольшанский В.П. Электромагнитно – акустический преобразовательный модуль // Дефектоскопия. 1985. № 12. С. 74 – 76. 8. Гусев Е. А., Королев М. В., Карпельсон А. Е. и др. Приборы неразрушающего контроля толщины в машиностроении. – М.: Машиностроение. 1993. – 144 с. 9. Герасенко Н.Ю., Ольшанский В.П. Портативный ЭМА толщиномер УВТ-03 // Дефектоскопия. 1990. № 6. С. 80 – 82. 10. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: Справочник: в 2 т. под ред. В.В. Клюева. Т. 2. М.: Машиностроение, 1976. –327 с. 11. Клюев В.В., Шубаев С.Н., Мужичук В.Ф. Опыт эксплуатации электромагнитно – акустического толщиномера УТ-80Б // Дефектоскопия. 1982. №9. С. 37-43. 12. Радько В.П. Преобразователи и приборы для неразрушающего контроля электромагнитно – акустическим методом. Результаты экспериментальных исследований // Бюллетень УТ НКГД. № 1. 2002. С. 14-21. 13. Самокрутов А.А. и др. ЭМА толщиномер для авиакосмической промышленности. 16-я российская научно-техническая конференция «неразрушающий контроль и диагностика». Труды конференции. Санкт-Петербург, 9-12 сентября, 2002 г., доклад 4.5.38. 14. Клюев В.В., Мужичук В.Ф., Безлюбка Г.Я. и др. Бесконтактный ультразвуковой толщиномер для измерения толщины стенки насосно – компрессорных труб // Контроль. Диагностика. 2002. № 4. С. 43-44. 15. Карнаш О.М., Криничный П.Я., Виськов О.В. ЭМА – товщиномір з підвищеною чутливістю. - 36. научных работ “Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів”. Вип. 6 – “ЛЕОТЕСТ-2001”. Київ-Львів. 2001. С. 38-41. 16. Универсальный ультразвуковой толщиномер 37 DL PLUS Реклама фирмы GE Panametrics // В мире неразрушающего контроля. 2003. № 3 (21). С. 37. 17. Неволин О.В., Иванов А.И., Астафьев А.Н. и др. Электромагнитно – акустический дефектоскоп – толщиномер. – В кн. «Информационные материалы ежегодного семинара-

выставки «Современные технологии и приборы неразрушающего контроля и технической диагностики». Харьков: 20-21 ноября 2003 г. С. 13 – 15. **18. Себко В. П., Сучков Г.М., Алексеев Е. А.** Оптимизация параметров ЭМА толщиномеров для контроля тонкостенных изделий. - Дефектоскопия. 2002. № 12. С. 21 – 28. **19. Бердников В.М., Леценко Н.Г., Мужичкий В.Ф.,** и др. Опыт опробования электромагнитно – акустических толщиномеров типа ЭМАТ-100 на предприятиях МПС и в нефтегазовой промышленности // Дефектоскопия. 2004. № 1. С. 20 – 24. **20. Самокрутов А.А., Бобров В.Т., Шевалдыкин В.Г.** и др. Применение ЭМА толщиномеров А1270 для контроля проката из алюминиевых сплавов // В мире неразрушающего контроля. 2002. № 4 (18). С. 24 – 28. **21. Леценко Н.Г., Шаповалов П.Ф.** Малогабаритный ЭМА толщиномер ЭМАТ-1 // Дефектоскопия. 1993. № 10. С. 95 – 96. **22. Безлюдько Г.Я., Долбня Е.В., Мужичкий В.Ф.** и др. Портативный бесконтактный ЭМА – толщиномер // Дефектоскопия. 2004. № 1. С. 46 – 53. **23. Вісков О.В.** Підвищення вірогідності та інформативності акустичного контролю трубних виробів. Автореф. канд. дис. Івано-Франківськ: Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. 2003. – 20 с. **24. Безлюдько Г.Я., Долбня Е.В., Леценко Н.Г.** и др. Портативные электромагнитноакустические толщиномеры (ЭМАТ) // Дефектоскопия. 2004. № 4. С. 28 – 35. **25. Сучков Г.М.** Разработка технологии и аппаратуры для ЭМА толщиномеров // Контроль. Диагностика. № 11. 2001. С. 38-39. **26. Ваарив Д. М., Сучков Г.М., Виноградов В. В.** и др. Создание электромагнитно – акустического толщиномеров для контроля тонкостенных труб // Дефектоскопия. 2002. № 10. С. 7-13. **27. Сучков Г. М.** Обработка информации. Возможности корреляционного анализа при толщинометрии ЭМА методом // Контроль. Диагностика. 2002. № 8. С.37 - 40. **28. Сучков Г.М.** Обработка информации. Повышение возможностей корреляционного анализа в ЭМА приборах // Контроль. Диагностика. - 2004. - № 12. - С. 13-16. **29. Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г.** Применение корреляционных методов обработки сигналов импульсных ультразвуковых толщиномеров. 16-я российская научно-техническая конференция «неразрушающий контроль и диагностика». Труды конференции. Санкт-Петербург, 9-12 сентября, 2002 г., доклад 2.01. **30. Palmer S.B.** Industrially viable non-contact ultrasound. Insight. 2003. V.45. N.3. P.211-217. **31. Петрищев О.Н.** Математическое моделирование преобразователей электромагнитного типа в режиме приема ультразвуковых волн в металах. – Акустичний вісник. 2005. Т.8. №3. С. 50-59. **32. Мужичкий В.Ф., Ремезав В.Б., Комаров В.А.** К основам ЭМА толщинометрии с помощью накладных преобразователей. Обратное и двойное ЭМАП в нормальном поляризуемом поле. Дефектоскопия. 2007. № 1. С. 64-79. **33. Мужичкий В.Ф., Ремезав В.Б., Комаров В.А.** К основам ЭМА толщинометрии с помощью накладных преобразователей. Обратное и двойное ЭМАП в тангенциальном поляризуемом поле. Дефектоскопия. 2007. № 2. С. 35-52. **34. Комаров В.А., Мужичкий В.Ф., Гуревич С.Ю.** Теория физических полей. Т.111. Связанные поля. – Челябинск-Ижевск: ЮУрГУ, 2000, - 627 с. **35. Петрищев О.Н., Сучков Г.М.** Теоретические концепции создания преобразователей электромагнитного типа. Режим возбуждения // Вестник НТУ «ХПИ» – 2009. – Вып. 14. – С. 34 – 44. **36. Сучков Г.М.** Построение приборов для ультразвукового контроля и измерений с использованием ЭМА способа возбуждения и приема упругих импульсов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. - 2005. - № 2 - С. 36-39. **37. Козен-Далин В.В., Комаров В.Е.** Расчет и испытание систем с постоянными магнитами. – М.: Энергия, 1977. – 248 с. **38. Сучков Г.М.** Исследование особенностей распространения упругих волн, возбужденных ЭМА способом. - Контроль. Диагностика. 2001. №12. С.36-39. **39. Сучков Г.М.** Исследования ЭМА способом выявляемости плоскодонных отражателей в образцах из различных материалов // Контроль. Диагностика. 2002. № 5. С. 50-51.

УДК 620.179.111

С.Н. ГЛОБА, к-т техн. наук, доц., НТУ "ХПИ";
Н.Ф. ХОРЛО, директор АЦНК ОАО ПТП "Укрэнергочермет";
С.В. СТОРОЖЕНКО, инженер-методист АЦНК ОАО ПТП "Укрэнергочермет" (г. Харьков)

ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ КАПИЛЛЯРНОГО МЕТОДА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Описані капілярні методи неруйнівного контролю поверхні об'єктів. Розглянуто основні сумісні дефектоскопічні матеріали, які укомплектовують в цільові дефектоскопічні набори. Наведені також інші методи контролю поверхневих дефектів. Проаналізовано особливості проведення капілярного методу неруйнівного контролю. Виділені переваги щодо використання на практиці капілярних методів неруйнівного контролю.

The penetrate nondestructive testing of surface objects are described. The main defektoscope compatible materials, which are usual completed in special testing set, are considered. Other methods of surface defects control are described. The features of the penetrate nondestructive testing are analyzed. The advantages of using penetrate methods in practice of nondestructive testing are pointed.

Капиллярный метод (РТ) является одним из наиболее распространенных поверхностных методов неразрушающего контроля (НК). РТ основан на проникновении индикаторных жидкостей (пенетрантов) в полости поверхностных дефектов (несплошностей) материала объекта контроля (ОК) под действием капиллярных сил с последующей регистрацией образующихся индикаторных следов из полостей дефектов визуальным способом или с помощью приборов [1-3]. Получаемый индикаторный рисунок представляет собой «след дефекта», образованный индикаторной жидкостью в месте его выхода на поверхность ОК. Для извлечения пенетранта из полости дефекта используется проявитель для выделения контрастирующего с индикацией фона (например, для цветного контроля – это красный пенетрант на белом фоне проявителя), что способствует улучшению выявляемости. По своей величине получаемая индикация в несколько раз превышает ширину раскрытия дефекта, что и позволяет обнаруживать невооруженным глазом места их расположения.

Основные капиллярные методы контроля в зависимости от способа получения первичной информации согласно ГОСТ 18442-80 [4] классифицируют на:

- яркостной (ахроматический);
- цветной (хроматический);
- люминесцентный;
- люминесцентно-цветной.

Капиллярные методы могут быть комбинированными, т. е. основанными на сочетании двух и более различных по физическому принципу методов

неразрушающего контроля (капиллярно-магнитный, капиллярно-электростатический, капиллярно-радиационный излучения и т. п.).

При РТ применяют и используют капиллярные дефектоскопические материалы для пропитки, нейтрализации или удаления избытка проникающего вещества с поверхности и проявления его остатков с целью получения первичной информации о наличии несплошности в ОК. Основные дефектоскопические материалы – *индикаторный пенетрант, очиститель* ОК от пенетранта, *проявитель* пенетранта и *гаситель* пенетранта [4]. Дефектоскопические материалы выбирают в зависимости от требований, которые предъявляются к ОК, состояния ОК, условий контроля и укомплектовывают в целевые наборы дефектоскопических материалов, куда входят полностью или частично совместимые дефектоскопические средства.

На рис. 1 представлен используемый часто на практике дефектоскопический набор NORD-TEST (HELLING GMBH, Германия) для проведения контрастного (красно-белого) метода, в который входят аэрозольные баллоны по 500 мл:

- очиститель U87;
- пенетранты U88 и Rot 3000;
- проявитель U89.

Очиститель U87 экологически безопасен на спиртовой основе, быстро испаряется не оставляя следов. Пенетранты U88 и Rot 3000 имеют высокую чувствительность – II-уровень

(согласно DIN EN ISO 3452-2), хорошо смываются водой, имеют незначительный запах. Пенетрант Rot 3000 применяется для контроля люминесцентным методом с помощью УФ освещения. Проявитель U89 – очень мелкозернистый белый порошок на спиртовой основе, не содержит ароматических добавок. Представленный дефектоскопический набор NORD-TEST широко применяют в различных областях промышленности для контроля легированных сталей, чугуна, цветных металлов, металлических покрытий, сварочных соединений, пластмасс и др. материалов [5].

Рассмотрим другие поверхностные методы НК. Наряду с капиллярным контролем, одними из основных поверхностных методов являются визуально-оптический (VT), магнитопорошковый (МТ) и др. методы НК, получивших достаточно широкое распространение в области неразрушающего контроля. Наиболее простым в применении считается визуально-оптический контроль невооружённым глазом или с помощью оптических приборов (например,



Рис. 1. Дефектоскопический набор NORD-TEST (HELLING, Германия)

лупы, эндоскопов). Визуально-оптический метод позволяет проводить контроль формы изделий и обнаруживать дефекты (трещины, поры, волосовины, плёны и др.) в металлических изделиях, и внутренние дефекты в изделиях из стекла или прозрачных для видимого света пластмасс. Однако, не смотря на свою относительную простоту в применении, VT имеет достаточно небольшую чувствительность по сравнению с РТ контролем. Чувствительность VT невооружённым глазом составляет от 0,1 мм и более согласно ГОСТ 23479-79 [6].

ОК из ферромагнитных материалов обычно контролируют магнитопорошковым методом, который основан на обнаружении магнитных полей рассеяния, возникающих над дефектами с помощью ферромагнитных частиц, которые под действием магнитного поля притягиваются к месту расположения дефекта и накапливаются над ним, образуя индикацию. МТ позволяет выявлять как поверхностные, так и подповерхностные (скрытые на небольшой глубине) дефекты, обеспечивая при выявлении поверхностных несплошностей более высокую чувствительность по сравнению с VT, но уступающую капиллярному методу. Минимальный выявляемый условный дефект по уровню чувствительности «А» [7] имеет ширину раскрытия 2,0 мкм и протяженность 0,5 мм. В свою очередь, МТ требует использования дополнительного оборудования (дефектоскопов), имеет ограничения по применению, которые связаны с формой и размерами контролируемых объектов, условиями их эксплуатации, но прежде всего с магнитными свойствами контролируемых материалов. МТ применим только для деталей из ферромагнитных материалов с относительной магнитной проницаемостью $\mu \geq 40$ согласно требований ГОСТ 21105-87 [7].

Среди основных капиллярных методов наиболее широкое применение на практике получил цветной (хроматический) метод, основанный на регистрации контраста цветного индикаторного рисунка на фоне поверхности ОК в видимом излучении. Не менее распространен и люминесцентный метод, который позволяет достичь максимальную чувствительность, однако требует наличие специальной аппаратуры для регистрации контраста люминесцирующего видимого индикаторного рисунка на фоне поверхности ОК в длинноволновом ультрафиолетовом (УФ) излучении.

При цветном методе капиллярной дефектоскопии необходимо наличие:

- совместимого набора дефектоскопических материалов для цветной дефектоскопии (в общем случае это набор дефектоскопических материалов, состоящий из трех элементов: очиститель, пенетрант и проявитель);

- необходимых условий для проведения контроля, таких как освещенность, облученность, подготовка (очистка) поверхности ОК и полостей выявляемых дефектов, контрольный образец для проверки качества дефектоскопических материалов (заключается в определении степени выявляемости дефектов с заданными линейными размерами);

- квалифицированного персонала для качественного проведения

капиллярного контроля в соответствии с требованиями НД, четкого и последовательного выполнения технологических операций, обработки и интерпретации полученных результатов, соблюдения необходимой техники безопасности. Персонал должен быть сертифицирован в соответствии с признанной процедурой сертификации – национальной (НПАОП 0.00-6.14-97) или международной (EN 473: 2008).

Цветной капиллярный метод неразрушающего контроля широко применяется для обнаружения поверхностных дефектов (трещины, поры и др.) в металлах и сварных соединениях. Процесс контроля цветным методом можно разделить на следующие основные этапы:

- подготовка поверхности ОК (очистка поверхности и полостей дефектов от всевозможных загрязнений);
- нанесение на поверхность (пропитка) контролируемого участка дефектоскопического материала – пенетранта (от лат. *penetrans* – проникающий), который проникает в поверхностные дефекты ОК;
- удаление очистителем излишков пенетранта с поверхности ОК;
- нанесение на поверхность ОК проявителя (проявление), содержащего светлое (белое, желтое) адсорбирующее вещество, способствующее извлечению пенетранта из дефектов, и одновременно служащее для создания необходимого контраста.

В результате проведения цветного метода РТ контроля поверхностные дефекты ОК обнаруживаются в виде ярких, четких (цветных, люминесцентных или бесцветных) линейных или круглых индикаций на контрастном фоне.

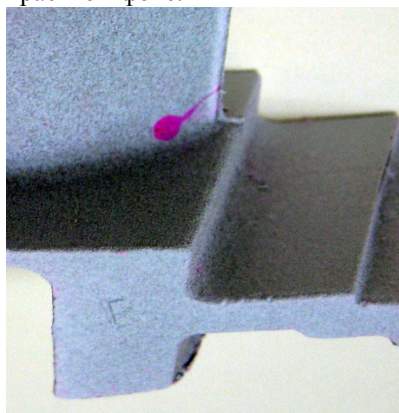


Рис. 2. Индикация от дефекта типа трещина на лопатке турбины

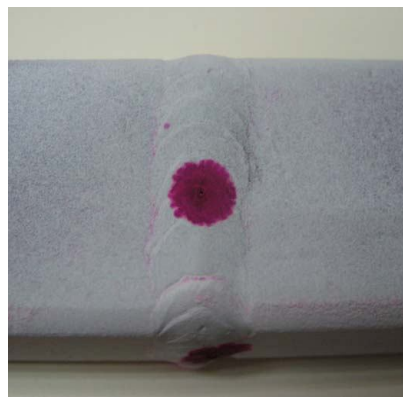


Рис. 3. Круглая индикация в сварном шве от дефекта типа пора

Чем больше контраст достигается между цветным рисунком (следом) и проявителем (фоном), тем выше чувствительность, а следовательно больше

вероятность обнаружения дефекта. На рис. 2 и рис. 3 показаны результаты контроля цветным капиллярным методом, полученные на базе АЦНК ОАО ПТП "Укрэнергочермет" (г. Харьков).

Таким образом, при капиллярном методе контроля поверхностных дефектов можно выделить следующие особенности проведения контроля:

1. Необходимость качественной подготовки поверхности объекта контроля и полостей дефекта к проведению контроля. Это требование касается, как и удаления всевозможных загрязнений, препятствующих нанесению и проникновению пенетранта, так и соблюдения требований по параметрам шероховатости поверхности ОК. Какие-либо существенные отклонения или нарушения этих требований может привести к снижению чувствительности контроля, его достоверности, а в некоторых случаях и к пропуску дефектов.

2. Использование в процессе контроля не только стандартных образцов для проверки качества подготовленных дефектоскопических материалов, но и в том числе образцов для мониторингового контроля качества работы всей дефектоскопической системы в целом, как пример – панель PSM-5 (см. рис. 4). Тест-панель PSM-5 позволяет определять реальную чувствительность дефектоскопических материалов при конкретных условиях проведения контроля – температура, влажность, атмосферное давление, временные параметры.

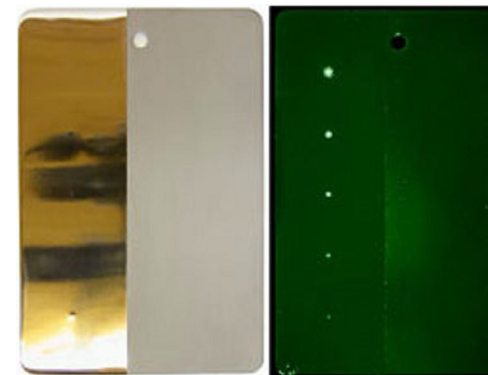


Рис. 4. Тест-панель PSM-5

3. При проведении контроля необходимо учитывать ряд факторов, которые могут повлиять на результаты и достоверность контроля: временные параметры (каждая технологическая операция, например, пропитка, должна выполняться в определенные промежутки времени), температура окружающей среды и поверхности ОК, атмосферное давление, влажность.

4. Различные виды капиллярных методов требуют создания определенных условий для осмотра. Для цветного и яркостного методов осмотр проводится в видимом излучении, при этом используются общее, местное и комбинированное освещение, соответствующее значениям освещенности в зависимости от типа используемых ламп и класса чувствительности согласно требованиям ГОСТ 18442-80, EN ISO 3059:2001. При люминесцентном контроле осмотр проводится в ультрафиолетовом

излучении, что требует применения специальных УФ-ламп определенной мощности и затемненного участка помещения. Обнаружение дефектов происходит по люминесцирующему индикаторному следу. Значения УФ-облученности также установлены в соответствующей НД согласно ГОСТ 18442-80, EN ISO 3059:2001.

5. В процессе проявления, для достоверности расшифровки и интерпретации полученных результатов, возникает необходимость проводить осмотр в два этапа. Первый этап – через 2-4 минуты после высыхания проявителя – для установления характера и действительных размеров более крупных индикаций. Второй этап – через 15-20 минут после высыхания проявителя – определяет характер и размеры более мелких индикаторных рисунков. Существенным фактором является правильность определения характера обнаруженных индикаций и их классификация, что играет важную роль при составлении протокола по результатам контроля, оценке качества проконтролированного объекта, принятии решения об отбраковке.

Преимуществом РТ контроля является то, что с его помощью можно не только обнаружить поверхностные и сквозные дефекты, но по их расположению, протяженности, форме и ориентации по поверхности можно получить важную информацию о характере дефекта и даже некоторых причинах его возникновения (концентрация напряжений, несоблюдение технологии и др.). В качестве достоинств капиллярного контроля необходимо упомянуть и про наглядность полученных результатов (цветная, бесцветная или люминесцентная индикация на контрастном фоне слоя проявителя), достаточную простоту в применении и высокий уровень чувствительности – минимальная ширина раскрытия дефектов по I классу чувствительности составляет менее 1 мкм [4], что является наиболее высоким показателем среди рассмотренных поверхностных методов. Кроме того, в отличие от МТ контроля, РТ контроль позволяет контролировать с целью выявления поверхностных дефектов ОК любых размеров и форм, которые изготовлены из черных и цветных металлов, их сплавов, а в некоторых случаях из неметаллических материалов (таких как керамика, пластмассы и т.п.).

Список литературы: 1. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 4: В 3 кн. Кн. 3: М.В. Филинов. Капиллярный контроль. – 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2006. – 736 с. 2. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / Под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1995. – 488 с. 3. Горкунов Б.М., Глоба С.Н. Капиллярный неразрушающий контроль. Чувствительность и оценка результатов контроля: Учебн.-метод. пособие. – Харьков: НТУ"ХПИ", 2005. – 72 с. 4. ГОСТ 18442-80 Контроль неразрушающий. Капиллярные методы. Общие требования. 5. Рекламный проспект HELLING GMBH. Неразрушающий контроль, 2004. – 37 с. 6. ГОСТ 23479-79. Контроль неразрушающий. Методы оптического вида. Общие требования. 7. ГОСТ 21105-87 Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод.

Б.М. ГОРКУНОВ, к-т техн. наук, проф., НТУ "ХПИ",
А.А. ТИЩЕНКО, асп., НТУ "ХПИ"

АНАЛИЗ МЕТОДОВ И УСТРОЙСТВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

У роботі запропонований огляд існуючих методів і пристроїв для контролю фізико-механічних характеристик зміцненого шару металевих виробів. Наведено актуальність та проведений аналіз двох основних напрямків контролю фізико-механічних характеристик зміцненого шару металевих виробів, вказана доцільність їх використання. Для кожного методу вказані переваги та недоліки.

In the work the review of existing methods and devices for the testing of the hardened layer of metal products is offered. The actuality is resulted and the analysis of two basic directions in the testing of physico-mechanical characteristics of the hardened layer of the metal products, the specified expediency of their use is carried out. For each method merits and demerits are specified.

Постановка проблемы. Актуальной задачей современного машиностроения является обеспечение долговечности деталей машин, которая в существенной мере определяется качеством поверхностного слоя. Важными являются вопросы повышения надёжности приборов, установок, повышение их качества и эффективности работы, а, следовательно, вопросы экономии металлов, борьбы с коррозией и износом деталей машин. Особенно это важно в настоящее время, так как развитие большинства отраслей промышленности (авиационная, ракетная, теплоэнергетика, атомная энергетика, радиоэлектроника и др.) связано с повышением нагрузок, температур, агрессивности сред, в которых работает деталь.

Решение этих задач, прежде всего, связано с упрочнением поверхностных слоёв металлических изделий. Изменять свойства поверхностного слоя можно различными способами: нанесением на поверхность нового материала с необходимыми свойствами; изменением структуры поверхностного слоя металла; термической, химической и механической обработками поверхности и другими способами [1-3].

Поскольку необходимый комплекс эксплуатационных характеристик и ресурс изделий закладывается на стадии их производства, то чрезвычайно важным является контроль качества исходных материалов и определения глубины упрочненного слоя.

Именно контроль механических свойств на стадии изготовления должен являться первоочередным в реализации комплексной программы диагностики объектов в процессе их эксплуатации, так как только в этом случае можно зафиксировать тенденцию изменения тех параметров, от которых зависит остаточный ресурс.

Анализ литературы. В настоящее время известны два основных направления в контроле физико-механических характеристик металлических изделий: разрушающее [4,5] и неразрушающее [6,7].

При определении физико-механических характеристик материала с помощью разрушающего контроля необходимо строго выполнять условия проведения испытаний, которые изложены в стандартах или в других нормативных документах [8]. При отклонении от принятых условий испытаний неизбежны погрешности. Недостатком данного контроля является то, что это длительный процесс, который приводит к разрушению испытуемого образца. Неразрушающий контроль устраняет данные недостатки, поэтому неразрушающий контроль и диагностика являются приоритетными направлениями в задачах обеспечения контроля физико-механических свойств упрочненных слоев металлических изделий [9-12].

Цель статьи. Цель данной работы заключается в расширении сведений о существующих методах и устройствах для определения физико-механических характеристик упрочненных слоев металлических изделий.

Разрушающие методы. Для определения механических свойств металлов в основном применяют три стандартизованных испытания: растяжение, сжатие и кручение образцов. Эти методы дают достоверную информацию о свойствах материалов [13-15].

Метод измерения твердости является одним из видов механических испытаний металла и эффективным средством диагностики его структурно-механического состояния. Можно выделить следующие методы измерения твердости [8, 16-19]:

- Метод Бринелля: твердость определяется по диаметру отпечатка, оставляемому металлическим шариком, вдавливаемым в поверхность.

- Метод Роквелла: твердость определяется по относительной глубине вдавливания металлического шарика или алмазного конуса в поверхность тестируемого материала.

- Метод Виккерса: твердость определяется по площади отпечатка, оставляемого четырёхгранной алмазной пирамидкой.

- Метод Шора: твердость определяется по высоте отскакивания стального шарика от поверхности изучаемого металла или по глубине введения закаленной стальной иглы под действием пружины.

- Метод Кузнецова-Герберта-Ребиндера: твердость определяется временем затухания колебаний маятника, опорой которого является исследуемый металл.

- Шкала Мооса: твердость определяется по тому, какой из десяти стандартных минералов царапает тестируемый материал, и какой материал из десяти стандартных минералов царапается тестируемым материалом.

- Метод ESATEST (разработка ERNST SA, Швейцария): особенностью данного метода является использования в качестве индентора алмазной

пирамидки с электропроводящим напылением. Проводящая поверхность индентора формирует электрическую цепь между испытываемым объектом и металлической оправкой алмазного индентора. Измеряя электрическое сопротивление между оправкой и испытываемым объектом, можно получить показание о положении алмаза относительно поверхности, следовательно, его глубину проникновения. Данная технология положена в основу прибора HTD 900 (производство ERNST, Швейцария) для автоматического определения твердости и глубины упрочненного слоя, в котором алмазный индентор является одновременно и датчиком глубины [20].

Глубину упрочненного слоя можно определить традиционным металлографическим методом, при котором структуру выявляют с помощью травления, либо среза, шлифования и полирования образца [21, 22].

Не смотря на усовершенствование оборудования, разрушающие методы являются долгим и кропотливым процессом, приводящим к разрушению испытуемого образца. Более того, в некоторых случаях изготовить образцы необходимых размеров или в необходимом количестве либо не представляется возможным, либо нецелесообразно по экономическим или техническим причинам.

Неразрушающие методы. К неразрушающим методам определения физико-механических характеристик упрочненных слоев металлических изделий можно отнести: магнитный, электромагнитный, радиоизотопный, ультразвуковой контроль и другие [23].

Магнитный контроль глубины поверхностно упрочненного слоя известен достаточно давно [24]. Данный вид неразрушающего контроля применяют в основном для контроля изделий из ферромагнитных материалов, т.е. из материалов, которые способны существенно изменять свои магнитные характеристики под воздействием внешнего (намагничивающего) магнитного поля. Операция намагничивания при этом виде контроля является обязательной. Съём информации может быть осуществлен с полного сечения образца либо с его поверхности [25, 26].

В неразрушающем контроле структуры и механических свойств стальных и чугунных изделий наиболее широко используется коэрцитивная сила H_c , поскольку после цементации и термической обработки коэрцитивная сила цементированного слоя почти на порядок превосходит коэрцитивную силу сердцевины [27-29].

Коэрцитиметры широко внедрены для неразрушающего контроля глубины и твердости после закалки цементированных слоев на деталях бурильных долот, для контроля качества цементированных слоев на плужных отвалах, упорного гребня турбин и для ряда других деталей [30, 31].

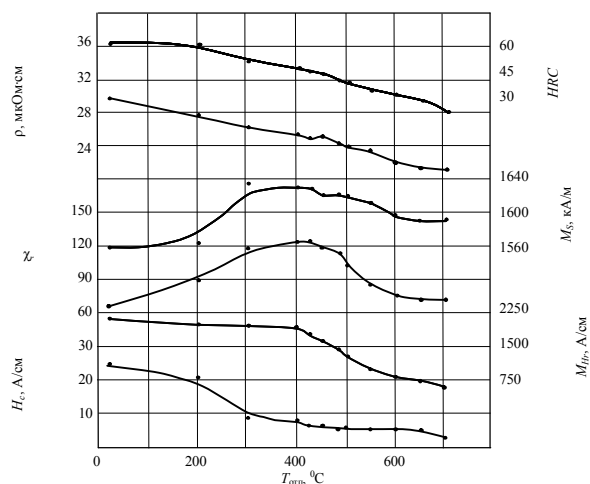


Рис. 1. Зависимости коэрцитивной силы H_c , релаксационных намагниченности M_{sr} и магнитной восприимчивости χ , намагниченности насыщения M_s , удельного электросопротивления ρ и твердости HRC из стали 45X1 от температуры отпуска $T_{отп}$.

Электромагнитный метод контроля основан на анализе взаимодействия внешнего электромагнитного поля с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых возбуждающей катушкой в электропроводящем объекте контроля. Это позволяет использовать вихретоковые методы для широкого круга проводящих материалов и решения различных задач контроля, в том числе оценки механических характеристик усредненных по сечению или в поверхностных слоях [32, 33].

Теоретической основой вихретоковой структуроскопии является наличие корреляционных связей между электрическими характеристиками металлов и сплавов и их химическим составом или структурным состоянием. Поэтому на основании измерений удельной электрической проводимости возможно контролировать структуру, однородность химического состава, механические свойства материала и т. п. [34].

Особенность электромагнитного контроля состоит в том, что его можно проводить без контакта преобразователя и объекта. Их взаимодействие происходит обычно на расстояниях, достаточных для свободного движения преобразователя относительно объекта (от долей миллиметра до нескольких миллиметров). Поэтому этим методом можно получать хорошие результаты контроля даже при высоких скоростях движения объектов или под защитным слоем [35-38].

В работе [39] показано, что на значения вихретоковых параметров при пластической деформации определяющее значение оказывает изменение плотности дислокаций в металлическом материале. Плотность дислокаций на начальном этапе деформирования в области малоциклового усталости резко

возрастает, после чего ее рост существенно замедляется [40]. Таким образом, наблюдаемый характер изменения показаний вихретокового прибора соответствует изменению плотности дислокаций при деформировании стали.

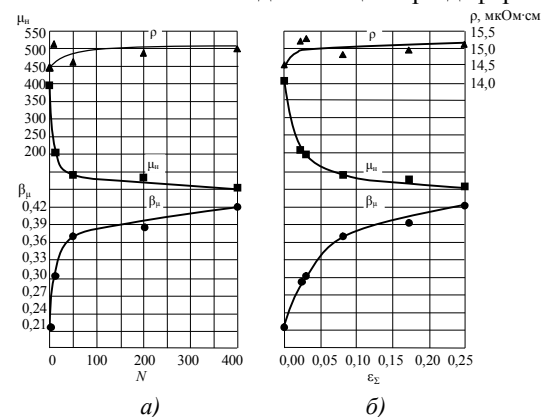


Рис. 2. Зависимость изменения удельного электрического сопротивления ρ начальной магнитной проницаемости μ_n , значений вихретокового параметра β_n от числа циклов нагружения а) и величины накопленной пластической деформации б) образцов из стали 45.

Получение первичной информации в виде электрических сигналов, бесконтактность и высокая производительность определяют широкие возможности автоматизации электромагнитного контроля.

В [41] описан радиоизотопный способ неразрушающего контроля, физическая сущность которого основана на результатах анализа экспериментальной зависимости между плотностью и радиоизотопными параметрами. Такие условия создаются при облучении поверхностного слоя гамма-квантами радионуклида и регистрации характеристического К-излучения марганца (Mn), содержащегося в трубопроводной стали.

Структурная схема измерительной установки для данного метода приведена на рис. 3.

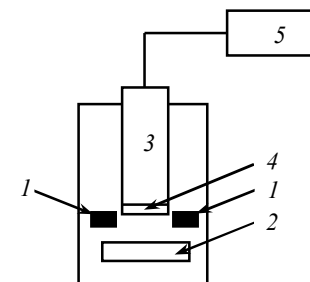


Рис. 3. Структурная схема радиоизотопной установки.

Фотонами радионуклида 1 облучается поверхность исследуемой среды 2. Рентгенофлуоресцентное К-излучение Мп регистрируется сцинтилляционным детектором 3. Для исключения мешающего влияния железа, содержащегося в стали, перед входным окошком счетчика устанавливается селективный хромовый фильтр 4. С детектора сигнал подается в гамма-спектрометр 5, на выходе которого регистрируется скорость счета на К-пике Мп (имп/с). Достоинствами данного метода являются портативность и автономное питание аппаратуры, экспрессность контроля.

Ультразвуковой метод контроля заключается в следующем: структура металла, подвергнутого поверхностной электрозакалке, содержит твердый закаленный слой I, переходную зону II, глубже которой расположен сырой (незакаленный) металл III (см. рис. 4, б). Закаленный слой имеет мелкозернистую структуру и наименьшую величину скорости звука. Сырой металл имеет крупнозернистую структуру и более высокую скорость звука. Промежуточная зона характеризуется промежуточными постепенно меняющимися значениями твердости, величины зерна и скорости ультразвука (УЗ). Для определения толщины закаленного слоя продольные или поперечные волны направляют под большим углом к поверхности объекта контроля (см. рис. 4, в). Увеличение скорости УЗ с понижением твердости *НВ* и глубины под поверхностью вызывает рефракцию (искривление) лучей и возвращение их на поверхность ввода. Интерференция искривленных лучей приводит к возникновению максимумов, отмечаемых приемным преобразователем (см. рис. 4, а). Положение максимумов позволяет рассчитать глубину закаленного слоя и градиент изменения скорости с глубиной, характеризующих переходную зону [42-44].

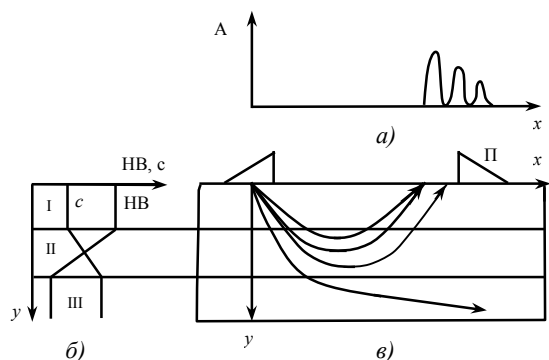


Рис.4. Контроль закаленного слоя по рефракции волн:

- а – амплитуда сигнала в зависимости от расстояния *x* между излучателем и приемником; б - изменение твердости *НВ* и скорости ультразвука с глубиной; в – рефракция расходящегося пучка лучей с разными углами ввода.

Заключение. Таким образом, для определения характеристик поверхностей, микроструктуры и механических свойств упрочненных слоев металлических изделий целесообразно использовать неразрушающий контроль, который к настоящему времени превращается в самостоятельную отрасль промышленности, решающую задачи обследования и создания аппаратуры, методики контроля, проведения научных исследований, сертификации, стандартизации и обучения.

Список литературы: 1. Д.М. Гуреев. Лазерно-ультразвуковое упрочнение поверхности стали // Квантовая электроника. – 1998. – № 3. – С. 282-286. 2. Е.В. Долбиллин, А. В. Кокорин. Новые методы химико-термической обработки в электрическом разряде // Технология машиностроения. – 2007. – № 6. – С. 40-45. 3. А.М. Нежинский. Совершенствование технологии обработки поверхностей деталей машин методами поверхностно-пластического деформирования // Технология машиностроения. – 2007. – № 10. – С. 14-17. 4. Федосов С.А., Пешек Л. Определение механических свойств материалов микроиндентированием: Современные зарубежные методики. – М.: Физический факультет МГУ, 2004. – 100 с. 5. Д.А. Коновалов, С.В. Смирнов, А.В. Коновалов. Определение кривых деформационного упрочнения металлов по результатам вдавливания конических инденторов // Дефектоскопия. – 2008. – № 12. – С. 55-63. 6. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т.2: В 2 кн.: Вихретоковый контроль. Книга 2 / Ю.К. Федосенко, В.Г. Герасимов, А.Д. Покровский, Ю.Я. Останин. – М.: Машиностроение, 2003. – 688 с.: ил. 7. Каневский И.Н. Неразрушающие методы контроля: учеб. пособие / И.Н. Каневский, Е.Н. Сальникова. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. – 243 с. 8. ГОСТ 2999-75. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу. – Введ. 01.07.1976 (изм. 23.06.2009). 9. В.И. Боченин. Неразрушающий способ экспресс-анализа фазового состава заготовок рессорного производства после индукционной закалки // Технология машиностроения. – 2007. – № 1. – С. 12-14. 10. Г.В. Бида, Л.Н. Сташков. Комплексное использование магнитных свойств сталей при неразрушающем контроле качества термообработанных деталей // Дефектоскопия. – 2003. – №4. – С. 67-74. 11. ГОСТ 30415 – 96. Сталь. Неразрушающий контроль механических свойств и микроструктуры металлопродукции магнитным методом. – Введ. 01.01.1998. 12. А.Н. Хайлов, Т.Н. Пенькова, А.С. Бакунов, В.Ф. Мужижский, Н.Д. Преснов, В.И. Агальцов. Неразрушающий контроль механических характеристик алюминиевых сплавов по удельной электрической проводимости // Дефектоскопия. – 2006. – № 7. – С. 3-14. 13. Соболев Н.Д., Богданович К.П. Механические свойства материалов и основы физики прочности. М., 1985. 14. Фетисов Г.П., Гарифуллин Ф.А. Материаловедение и технология металлов. Изд.: Оникс, 2007. – 624 с. 15. Чередниченко В.С. Материаловедение. Технология конструкционных материалов. Изд.: Омега-Л, 2007. – 752 с. 16. ГОСТ 9012-59. Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю. – Введ. 01.01.1960 (изм. 23.06.2009). 17. ГОСТ 9013-59. Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу. – Введ. 01.01.1960 (изм. 23.06.2009). 18. ГОСТ 23273-78. Металлы и сплавы. Измерение твердости методом упругого отскока бойка (по Шору). – Введ. 01.02.1985 (изм. 23.06.2009). 19. <http://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/14654>. 20. www.ndt-ua.com. 21. ГОСТ 5640-68 Сталь. Металлографический метод оценки микроструктуры листов и лент. – Введ. 01.01.1970. 22. <http://src-w.ru/index.html>. 23. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2005 г. 24. Кузнецов И.А., Скрипова Н.М. Неразрушающий контроль глубины и твердости цементированного слоя деталей из сталей 12ХН3А и 12ХН4А // Дефектоскопия. – 1983. – № 6. – С. 16-21. 25. А.А. Лухвич, О.В. Булатов. Магнитный контроль распределения по глубине физико-механических свойств // Дефектоскопия. – 2005. – № 11. – С. 30-38. 26. Г.В. Бида, А.П. Ничитурук. Многопараметровые методы в магнитной структуроскопии и неразрушающем контроле механических свойств сталей // Дефектоскопия. – 2007. – № 8. – С. 3-24. 27. Бида Г.В., Горкунов Э.С., Шевнин В.М. Магнитный контроль механических свойств проката. – Екатеринбург: УрО РАН, 2002. – 252 с. 28. Бида Г.В. Магнитные свойства термоупрочненных сталей и неразрушающий контроль их качества. – М.:

Маршрут, 2006. – 350 с. **29.** Г.В. Бидя, А.П. Ничипурук. Коэрцитиметрия в неразрушающем контроле // Дефектоскопия. – 2000. – № 10. – С. 3-28. **30.** Г.В. Бидя. Магнитный контроль глубины и твердости поверхностно упрочненных слоев на изделиях (обзор) // Дефектоскопия. – 2006. – № 5. – С. 10-28. **31.** Г.В. Бидя. Магнитный контроль качества закаленных и отпущенных деталей из углеродистых и низколегированных сталей (обзор) // Дефектоскопия. – 2006. – № 7. – С. 15-27. **32.** Бакунов А.С., Мужичкий В.Ф., Попов Б.Е. Контроль механических свойств алюминиевых сплавов электромагнитным методом // Дефектоскопия. – 1995. – № 2. – С. 61-67. **33.** А.В. Макаров, Э.С. Горкунов, Л.Х. Коган, Ю.М. Колобылин, Л.Г. Коршунов, А.Л. Осинцева. Особенности электромагнитных методов контроля износостойкости среднеуглеродистой конструкционной стали, подвергнутой лазерной или объемной закалке и отпуску // Дефектоскопия. – 2006. – № 7. – С. 28-39. **34.** В.С. Чернов. Контроль термообработки литейных алюминиевых сплавов по электропроводности на Заволжском моторном заводе // В мире НК. – 2009. – № 1. С. 32-34. **35.** А.Н. Хайлов, Т.Н. Пенькова, А.С. Бакунов, В.Ф. Мужичкий, Н.Д. Преснов, В.И. Агальцов. Неразрушающий контроль механических характеристик алюминиевых сплавов по удельной электрической проводимости // Дефектоскопия. – 2006. – № 7. – С. 3-14. **36.** Л.Х. Коган, А.П. Ничипурук, Л.Д. Гаврилова. Влияние содержания углерода на магнитные, электрические свойства термообработанных углеродистых сталей и возможности контроля качества отпуска изделий из них вихретоковым методом // Дефектоскопия. – 2006. – № 9. – С. 72-90. **37.** А.С. Бакунов, В.Ф. Мужичкий, С.Е. Шубочкин. Структуроскоп вихретоковый ВЭ-26НП // Дефектоскопия. – 2003. – № 11. – С. 67-72. **38.** Э.С. Горкунов, Р.А. Саврай, А.В. Макаров, Л.Х. Коган, С.А. Роговая. Применение вихретокового метода для оценки накопленной пластической деформации и остаточных механических свойств после циклического нагружения отожженной среднеуглеродистой стали // Дефектоскопия. – 2007. – № 4. – С. 24-30. **39.** Сандаловский В.А., Уваров А.И., Терещенко Н.А. Влияние пластической деформации и отжига армо-железа на сигнал накладного вихретокового преобразователя // Дефектоскопия. – 1999. – № 3. – С. 61-67. **40.** Терентьев В.Ф. Усталостная прочность металлов и сплавов. – М.: Интермет Инжиниринг. – 2002. – 288 с. **41.** В.И. Боченин, В.П. Кузнецов. Радиоизотопный способ контроля глубины поверхностного наклепа нефтегазовых трубопроводов // Дефектоскопия. – 2004. – № 12. С. 26-48. **42.** 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.: ил. **43.** Ермолов И.К., Алешин Н.П., Потапов А.И. Акустические методы контроля – М.: Высш. школа, 1991. **44.** В.Г. Бадалян. Оценка результатов контроля по акустическим изображениям // Дефектоскопия. – 2007. – № 4. – С. 39-58.

УДК 620.179

О.Л. БАГМЕТ, к-т техн. наук, доц. НТУ "ХПИ",
С.Г. ЛЬВОВ, к-т техн. наук, доц. НТУ "ХПИ"

БЕСКОНТАКТНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ РАДИУСА ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ИЗДЕЛИЯ ПЕРЕМЕННО-ЧАСТОТНЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ МЕТОДОМ

Показано можливість використання змінно-частотного електромагнітного методу для вимірювання радіусу немагнітного провідного циліндричного виробу. Побудовано градувальні характеристики трансформаторного електромагнітного перетворювача (ТЕМП) при вимірюванні радіусу циліндричного виробу з нержавіючої сталі та алюмінію. Визначено чутливість перетворювача до зміни радіусу.

Possibility of the using non-contact variable-frequency electromagnetic method measuring of cylindrical nonmagnetic article radius is offered. The calibration characteristics of the transformations electromagnetic converter (TEMC) for measurements of radius aluminum and steels cylindrical articles is obtained. Sensitivity of the converter is calculated.

Для определения радиуса цилиндрического проводящего немагнитного изделия может быть применен электромагнитный переменного-частотный метод, имеющий преимущества в бесконтактности и простоте своей реализации.

К настоящему времени в литературе рассмотрены многопараметровые электромагнитные методы совместного измерения параметров цилиндрического изделия [1–3], однако указанный однопараметровый переменного-частотный метод благодаря своей простоте и надежности может использоваться при разбраковке прутков из немагнитных сталей и слабомагнитных материалов, в тех случаях, где нужна калибровка изделий по радиусу (диаметру), например, при отборе прутков для станков с ЧПУ.

На рис.1 показана схема включения трансформаторного электромагнитного преобразователя с исследуемым цилиндрическим изделием. Схема содержит генератор Г синусоидальных сигналов, частотомер Ч, амперметр А, измеряющий намагничивающий ток I до частот 1500 Гц. Ток более высокой частоты определяется вольтметром В1 по падению напряжений U_{R_0} на образцовом сопротивлении R_0 . При этом $I = U_{R_0} / R_0$.

Схема включает в себя рабочий РП и два опорных ОП и ОП1 трансформаторных электромагнитных проходных преобразователя (ТЭМП). В РП помещается исследуемое изделие И. Фазометр Ф регистрирует фазовый угол $\varphi_{вн}$ между вносимой ЭДС $E_{вн}$ и ЭДС E_0 , которая возникает на концах измерительной обмотки РП при отсутствии в нём изделия. Намагничивающие обмотки РП, ОП и ОП1 включены последовательно–согласно, а измерительные обмотки РП и ОП соединены последовательно–встречно. РП,

ОП и ОП1 – идентичные по своим параметрам преобразователи, поэтому РП без изделия, а также ОП и ОП1 во вторичной (измерительной) обмотке имеют такую же ЭДС E_0 .

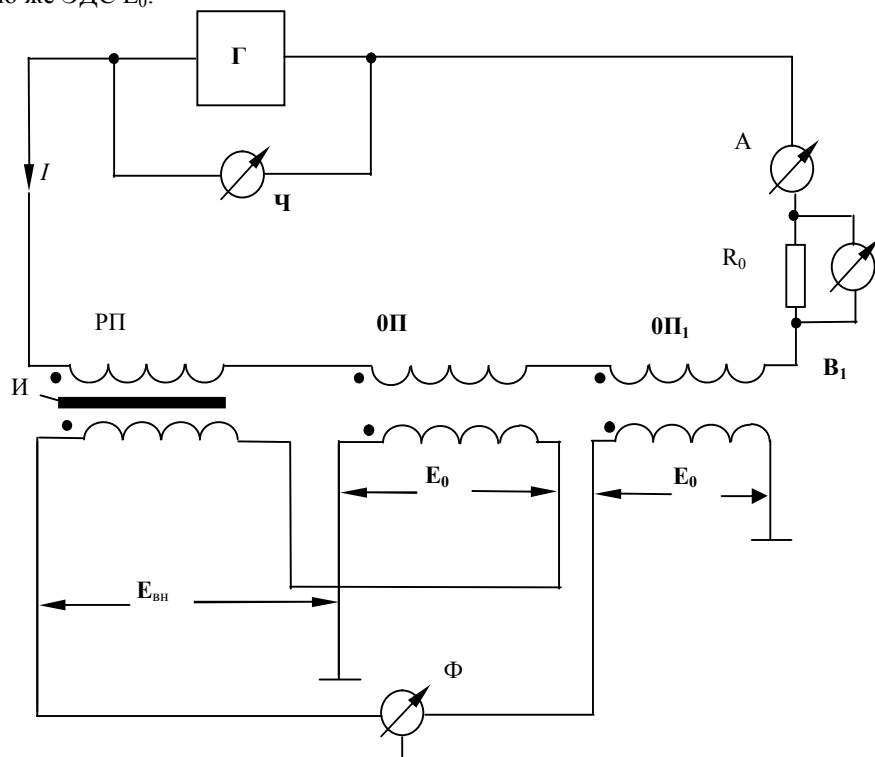


Рис. 1. Схема включения ТЕМП с цилиндрическим изделием

Схема настраивается следующим образом. Во избежание нагрева изделия вихревыми токами напряженность H_0 магнитного поля внутри преобразователя должна быть небольшой (порядка 50 – 200 А/м). При этом, эффективное значение намагничивающего тока I должно быть порядка 100 – 150 мА, ток определяется из формулы

$$I_{эф} = \frac{H_0 l_n}{\sqrt{2} \cdot W_1 C}, \quad (1)$$

где W_1 - число витков намагничивающей обмотки, C – коэффициент, зависящий от отношения длины преобразователя к диаметру и при $l_n/d = 10$ равный 0,95; l_n – длина намагничивающей обмотки преобразователя.

Суть переменного-частотного метода состоит в поддержании постоянным значения фазового угла $\varphi_{вн} = \varphi_{вн1} = const$ при изменении радиуса изделия путем изменения частоты f магнитного поля. $\varphi_{вн}$ – фазовый угол вносимой ЭДС $E_{вн}$ ТЭМП, обусловленной магнитным потоком в цилиндрическом изделии при внесении его в преобразователь. Параметр $\varphi_{вн1}$ характеризует рабочую точку x_1 на универсальной функции преобразования $\varphi_{вн} = f(x)$, здесь x – обобщенный электромагнитный параметр, характеризующий степень затухания магнитного поля в изделии, определяемый из соотношения [4]

$$x = a \sqrt{2\pi f \mu_0 \mu_r / \rho}, \quad (2)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление материала, μ_0 – магнитная постоянная; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Таким образом, достижение условия $\varphi_{вн} = \varphi_{вн1} = const$ при изменении радиуса изделия сводится к поддержанию с помощью изменения частоты f равенства $x = x_1 = const$. В этом случае для немагнитного изделия ($\mu_r = 1$) при известной марке материала, а, следовательно, известном значении ρ , существует однозначная зависимость между радиусом изделия и частотой f намагничивающего тока.

$$a = \frac{x \sqrt{\rho}}{\sqrt{2\pi f \mu_0}}. \quad (3)$$

Данная схема не требует компенсации эффекта воздушного зазора, в связи с тем что в ней используется в качестве параметров выходного сигнала вносимые значение ЭДС и ее фазы, поэтому отпадает необходимость в измерении с помощью вольтметра ЭДС на измерительных обмотках преобразователей РП, ОП и ОП1.

Рабочую точку $x = x_1 = 4$ выбираем в оптимальном по погрешности и чувствительности режиме работы $1,5 \leq x \leq 4,5$ преобразователя, что соответствует максимальной крутизне характеристики $\varphi_{вн} = f(x)$. Постоянство значения x_1 достигается постоянством фазового угла $\varphi_{вн} = 24,43$ град [4].

Перепишем зависимость (3) в виде

$$a = \frac{K_1}{\sqrt{f}}, \quad (4)$$

где K_1 – постоянный коэффициент для выбранной марки материала и значения рабочей точки x_1 ;

$$K_1 = \frac{x \sqrt{\rho}}{\sqrt{2\pi \mu_0}}. \quad (5)$$

Оценим значения коэффициента K_1 для исследуемых изделий из нержавеющей стали 1X18Н10Т и алюминия. Удельная электропроводность этих материалов: $\rho_{\text{стали}} = 72,8 \cdot 10^{-8}$ Ом м; $\rho_{\text{алюм}} = 2,6 \cdot 10^{-8}$ Ом м.

$$K_{1\text{стали}} = \frac{4\sqrt{72,8 \cdot 10^{-8}}}{\sqrt{6,28 \cdot 12,56 \cdot 10^{-7}}} = 1,215; \quad K_{1\text{алюм}} = \frac{4\sqrt{2,6 \cdot 10^{-8}}}{\sqrt{6,28 \cdot 12,56 \cdot 10^{-7}}} = 0,229.$$

Таким образом, функция преобразования при измерении радиуса стального изделия имеет вид

$$a = \frac{1,215}{\sqrt{f}}, \quad (6)$$

а для алюминиевого изделия

$$a = \frac{0,229}{\sqrt{f}}. \quad (7)$$

Градуировочные характеристики ТЭМП со стальным и алюминиевым изделиями, построенные при использовании зависимостей (6) и (7), приведены на рис.2.

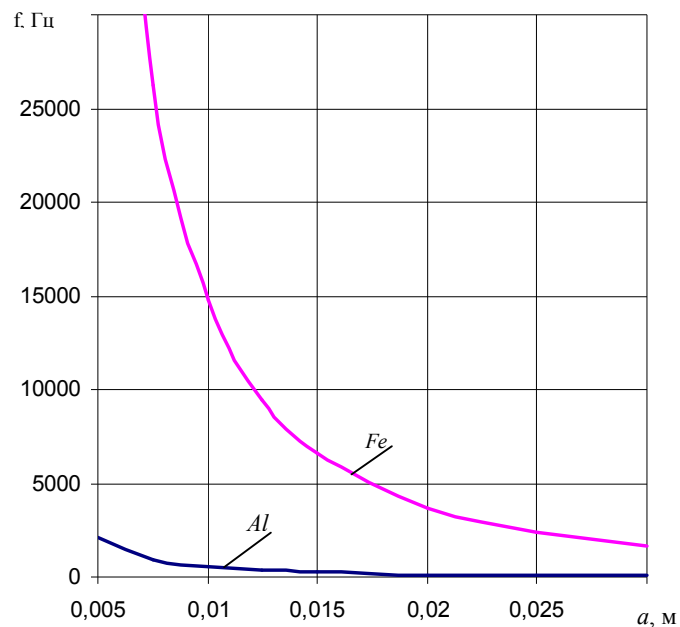


Рис.2. Градуировочные характеристики ТЭМП с алюминиевым и стальным изделиями

Как видно из рис.2, несмотря на нелинейность, крутизна градуировочной характеристики ТЭМП для изделия из стали довольно велика, что говорит о высокой чувствительности преобразователя к изменению радиуса изделия.

На основании расчетов таблицы на рис. 3. построены зависимости абсолютной чувствительности S ТЭМП к изменению радиуса в Гц/мкм для алюминиевого и стального изделия (соответственно кривые Al и Fe), рассчитанные на основании градуировочных характеристик ТЭМП. Для расчета чувствительности использовалось соотношение

$$S = \frac{\Delta f}{\Delta a} = \frac{f_{i+1} - f_i}{a_{i+1} - a_i},$$

где f_{i+1} и f_i - соответственно предыдущее и последующее значения частот, полученные по градуировочной характеристике ТЭМП; a_{i+1} и a_i - предыдущее и последующее значение радиуса.

S , Гц/мкм

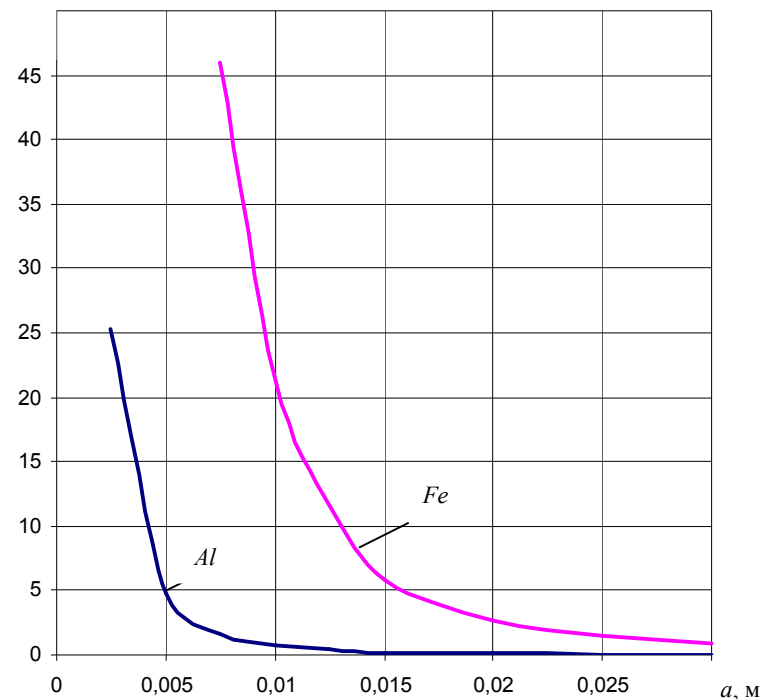


Рис.3. Зависимость чувствительности ТЭМП от изменения радиуса изделий из алюминия и нержавеющей стали

Таблица

$a, \text{ м}$	$S_{Al}, \text{ Гц/мкм}$	$S_{Fe}, \text{ Гц/мкм}$
0,0025	25,31	708,83
0,0050	4,69	131,26
0,0075	1,64	45,94
0,0100	0,76	21,26
0,0125	0,41	11,55
0,0150	0,21	5,74
0,0200	0,10	2,66
0,0250	0,05	1,44
0,0300	0,03	0,87

На основании расчета чувствительностей (см. табл.) можно выбрать оптимальные режимы работы преобразователя. Для изделий из нержавеющей стали наиболее предпочтительным является диапазон изменения радиусов изделия от 2,5 мм до 25 мм. При этом чувствительность составляет $S_{Fe}=708,83$ Гц/мкм и $S_{Fe} = 1,44$ Гц/мкм, соответственно в начале и конце диапазона. Изделия из алюминия можно измерять до значений радиуса a , равных примерно 10 мм. Чувствительность ТЭМП для этого значения радиуса алюминиевого изделия составляет $S_{Al} = 0,76$ Гц/мкм. При больших значениях радиусов чувствительность ТЭМП падает.

Одним из способов повышения чувствительности, а, следовательно, расширения диапазона измерения преобразователя, может быть увеличение значения рабочей точки x . Однако при этом уменьшается глубина проникновения магнитного поля в изделие. Этот вопрос подлежит дальнейшему исследованию, так как и вопросы точности измерения радиуса изделий с помощью переменного-частотного электромагнитного метода.

Таким образом, с помощью ТЭМП измеряют переменного-частотным методом радиус цилиндрического изделия для конкретной марки немагнитного или слабомагнитного материала с известным значением удельной электропроводности.

Список литературы: 1. Себко В.П., Сиренко Н.Н., Горкунов Б.М. Определение магнитных, электрических и геометрических параметров цилиндрических изделий // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1992. - №2. –С.39-43. 2. Сандовский В.А., Носальская Н.И. Исследование возможности разбраковки прутковой стали по маркам методом вихревых токов в двухпараметровом варианте // Дефектоскопия. – 1983. - № 6. - С.30-34. 3. Себко В.П., Пантелеев М.С. Бесконтактное измерение диаметра и удельной электрической проводимости цилиндрических изделий // Заводская лаборатория. – 1987. - Т.53. - №9. -С.48-51. 4. Багмет О.Л. К теории электромагнитного преобразователя температуры. Сборник научных трудов ХГПУ «Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье». – Вып.7 – Ч.3 – Харьков. – 1999. – С.86-88.

К.Ю. БЕЗИМЯННА, інж. ІПМ НАН України,
А.М. КОЛЕСНИКОВ, головний технолог ІПМ НАН України,
К.А. КОМАРОВ, наук. співроб. ІПМ НАН України,
О.В. ТАЛЬКО, мол. наук. співроб. ІПМ НАН України

ДОСЛІДЖЕННЯ СПОТВОРЕННЯ АКУСТИЧНОГО ПОЛЯ ПОБЛИЗУ ДВОВИМІРНОГО ДЕФЕКТУ

В работе приведены результаты экспериментальных исследований по выявлению закономерностей формирования акустического поля малой интенсивности вблизи двумерного дефекта. Показана возможность использования нелинейных эффектов акустического поля малой интенсивности для контроля по качеству контактов порошковых материалов.

In the article results of experimental researches of detection of low of formation of an acoustic field of small intensity near to two-dimensional defect are resulted. Possibility of use of nonlinear effects of an acoustic field of small intensity for the control on quality of contacts of powder materials

Вступ. Контактотворення – один із головних процесів, притаманних технології отримання порошкових матеріалів [1]. Створення досконалих контактів і контроль за їхньою якістю є традиційною проблемою порошкової металургії [2]. Для контролю процесу контактотворення використовують різні методи, у тому числі й ультразвукові, але кожен з них має суттєві недоліки [3-5]. Тому обґрунтування та розробка нових методів актуальна.

Маловивченим напрямком вирішення цієї проблеми є використання нелінійних ефектів акустичного поля, обумовлених структурною неоднорідністю матеріалу [6]. Традиційні методи вимірювання нелінійних ефектів в акустичних полях [7] далеко не завжди придатні для цих цілей, тому що в них застосовують високий рівень механічних напружень, які можуть викликати розвинення дефекту. Останнім часом з'явилися роботи [9-10], у яких показана перспективність використання нетрадиційних методів нелінійної акустодіагностики для вирішення задач матеріалознавства.

Постановка задачі. Нелінійність у результаті структурної неоднорідності матеріалу може проявлятися навіть в акустичних полях малої інтенсивності [11]. Характерним елементом недосконалих контактів у матеріалах, отримуваних методами порошкової металургії, є двовимірна пора [4]. Виявлення закономірностей спотворення акустичного поля такою порою дозволить обґрунтувати діагностичні параметри контролю її характеристик. Всебічне дослідження акустичного поля поблизу такої поодинокі пори у порошковому матеріалі неможливо з-за розподілу недосконалих контактів в об'ємі матеріалу. Моделлю двовимірного дефекту порошкових матеріалів може бути тріщина від утомленості. Тому метою цієї роботи було дослідження закономірностей формування акустичного поля малих

інтенсивностей поблизу тріщини від утомленості й можливості використання цих закономірностей для діагностики стану порошкових матеріалів. Пошук ефективних діагностичних параметрів нелінійної акустодіагностики було проведено за допомогою модельного експерименту, результати якого узагальнено на порошкові матеріали.

Експериментальні дослідження. Проводилися на зразках з алюмінієвого сплаву Д16чАТ з тріщинами від утомленості. Сплав Д16чАТ обраний у зв'язку з його широким використанням у літальних апаратах. Зразки (рис.1 а) являли собою смуги, вирізані з листового металу, що мають прямокутний переріз і концентратор у вигляді круглого наскрізного отвору в центральній частині зразка. Така форма зразків зручна для проведення випробувань на втому і досліджень акустичного поля. Тріщини від утомленості в зразках створювали в результаті їх циклічного навантаження на установці «Амслер» [12]. Для вивчення впливу масштабного фактора при формуванні акустичного поля поблизу тріщини зі зразків були вирізані елементи (рис.1 б – г).

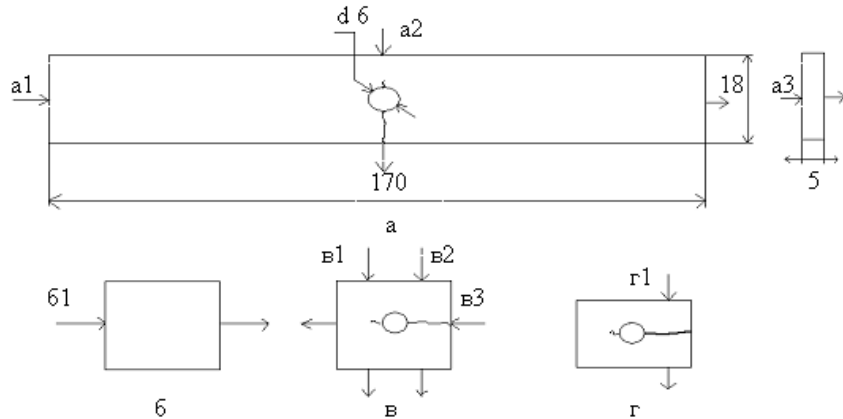


Рис. 1. Зразки для досліджень: а – вихідний зразок після випробувань на утому (надалі зразок 1); б - г – його фрагменти (зразки 2, 3, 4; номер 5 – відповідає зразку 3 із прозвучуванням уздовж тріщини)

Дослідження проводилися на установці для прецизійних вимірів параметрів пружної хвилі, розробленій в ІПМ НАНУ [13] за двома методиками. Перша реалізувала традиційний імпульсний метод [7] вимірювання вищих гармонік (рис.2 а), а друга - оригінальний метод при безперервному синусоїдальному випромінюванні (рис.2 б). Обидві методики мали на меті при невеликих рівнях збудження встановити вплив тріщини на параметри акустичного поля. Для цього методом наскрізного прозвучування на частоті 2 МГц збуджували поздовжні пружні коливання в різних

напрямах фрагментів зазначених зразків (рис.1) і вимірювали рівень і частоту другої гармоніки (рис.2 а) та амплітудну характеристику матеріалу (рис.2 б).

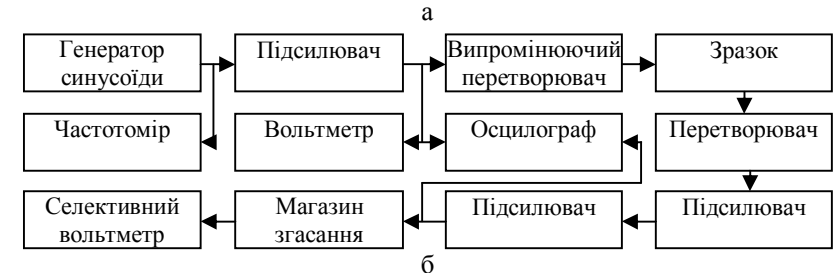
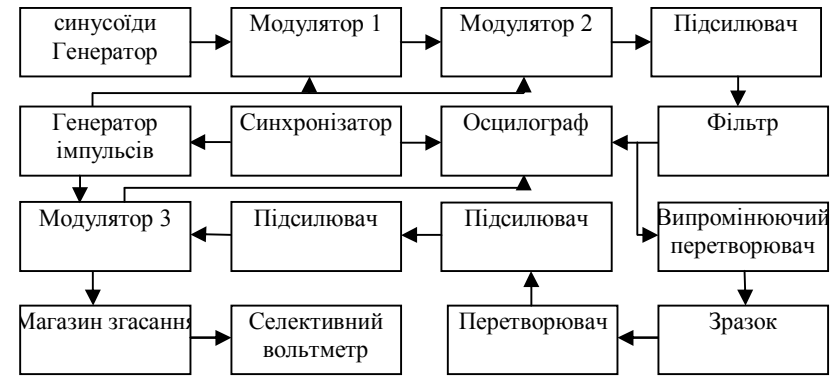


Рис. 2. Структурні схеми вимірювання імпульсним методом (а) та методом безперервного синусоїдального випромінювання (б)

Результати вимірювань за першою методикою представлені на рис.3, а за другою – рис.4. На графіках номери зразків і напрямків прозвучування відповідають рис.1.

При вимірюваннях у зразках з розвинутою тріщиною, починаючи з певного рівня сигналу випромінювання, акустичне поле було нестабільне в часі. Використання спеціальної методики вимірювання дозволило досягнути стабілізації результатів.

Обговорення результатів. Вимірювання у вихідному зразку (рис.1) показали, що акустичне поле в ньому нечутливе до наявності тріщини. Зменшення масштабу озвучування до порівнянного з розміром тріщини дозволило виявити вплив тріщини на параметри пружної хвилі. Цей факт говорить про те, що спотворення акустичного поля тріщиною зосереджене поблизу самої тріщини.

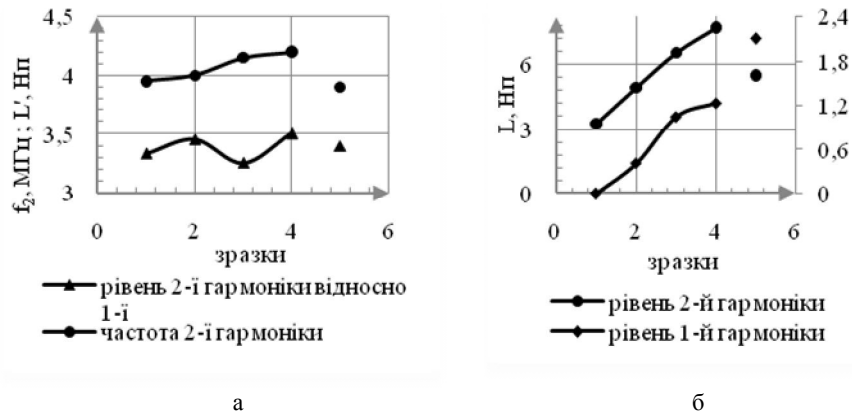


Рис. 3. Частоти другої гармоніки і її відносного рівня (а), а також рівні першої й другої гармонік (б) для різних зразків

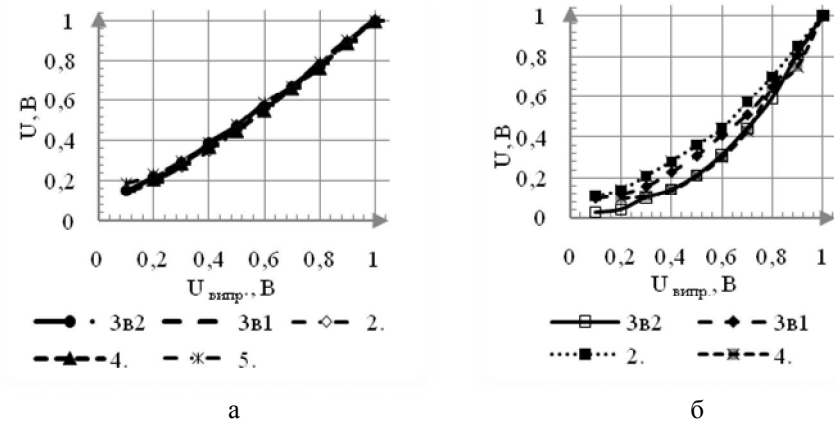
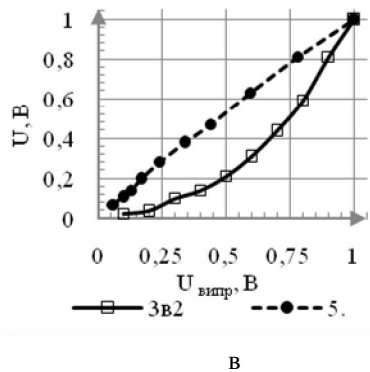


Рис. 4. Амплітудні залежності першої (а) та другої (б) гармонік для різних зразків, а також другої гармоніки при різних напрямках опромінення тріщини (в)



Результати, отримані за першою методикою, показали, що при малих амплітудах навантаження відносний рівень другої гармоніки не корелює з параметрами тріщини й не може служити інформативним параметром. Такими параметрами можуть бути абсолютне значення рівня першої гармоніки, а також абсолютне значення рівня й частота другої гармоніки.

Результати, отримані за другою методикою, показали, що при малих амплітудах навантаження амплітудна характеристика першої гармоніки не чутлива до тріщини, її розмірів й не може служити інформативним параметром. Таким параметром може бути амплітудна характеристика другої гармоніки. Додатковим індикатором наявності тріщини може служити нестабільність акустичного поля при амплітудах навантаження, перевищуючих для даного експерименту 0,5 В на вході п'єзоперетворювача.

Для обох методик характерний вплив на величину інформативного параметра напрямку опромінення тріщини (рис.4 в).

Можливість використання другої методики для контролю якості контактоутворення було перевірено на зразках двох видів порошкових матеріалів: пресовок на основі мідного порошку з вольфрамовими вкрапленнями [14] та алмазних композитів на основі металевої матриці [15]. Для цього було взято по три зразки вказаних матеріалів з різною якістю контактів. Результати вимірів наведено на рис.5.

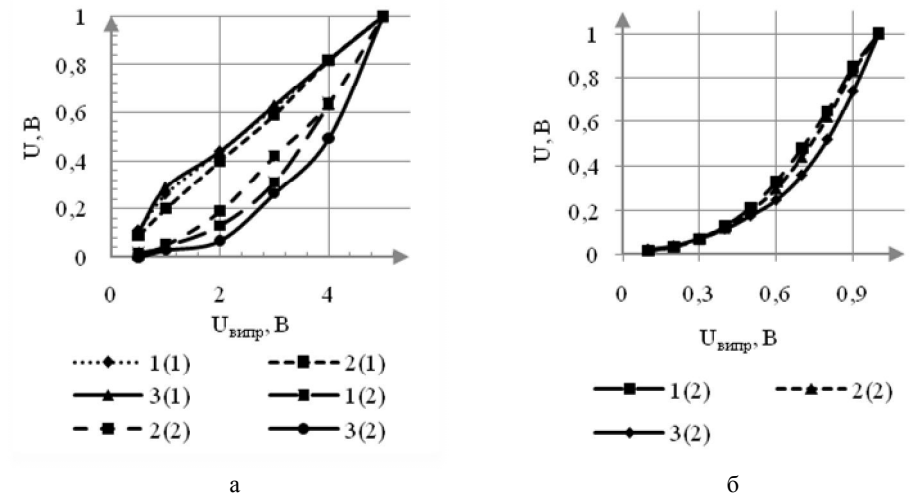


Рис. 5. Амплітудні характеристики пресовок на основі мідного порошку з вольфрамовими вкрапленнями при різній якості контактів (а, перші та другі гармоніки) та алмазних композитів на основі металевої матриці з різною якістю спікання (б, другі гармоніки)

З рис.5 видно, що результати, отримані на модельному експерименті з тріщиною від утомленості, підтверджуються і для порошкових пресовок, і для спечених порошкових матеріалів.

Висновки. Показано, що при взаємодії акустичного поля малої інтенсивності з двовимірним дефектом виникають нелінійні спотворення амплітудної характеристики другої гармоніки сигналу опромінення матеріалу, величина яких залежить від масштабу й напрямку озвучування, а також від розмірів дефекту.

Показана можливість використання нелінійних ефектів акустичного поля малої інтенсивності для контролю за якістю контактів порошкових матеріалів.

Напрямами розвитку цієї роботи можуть бути використання поперечних пружних хвиль для вирішення розглянутого завдання й перехід до відносних величин при аналізі кореляції нелінійних характеристик прийнятої пружної хвилі й параметрів дефекту.

Список літератури: 1. *Косторнов А.Г.* Материаловедение дисперсных и пористых металлов и сплавов. В 2 т. –т.1 – Киев: Наукова думка, 2002. – 572 с. 2. *Бальшин М. Ю.* Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна. – М.: Металлургия, 1972. – 336 с. 3. *Косторнов А.Г.* Материаловедение дисперсных и пористых металлов и сплавов. В 2 т. –т.2 – Киев: Наукова думка, 2003. – 552 с. 4. *Роман О.В., Скороход В.В., Фридман Г.Р.* Ультразвуковой и резистометрический контроль в порошковой металлургии. – Мн.: Высш. шк., 1989. – 182 с. 5. *Безьямянный Ю.Г., Талько О.В.* Анализ возможностей акустических методов при контроле контактообразования в порошковых материалах // Электроника и связь. – 2006. – № 1. – С. 48–57. 6. *Незрушающий контроль и диагностика: Справочник / Под ред. В.В.Клюева.* – М.: Машиностроение, 2003. – 656 с. 7. *Ультразвук. Маленькая энциклопедия / Под ред. И.П.Голяминой.* – М.: Советская энциклопедия, 1979, – 400 с. 8. *Зайцев В.Ю., Назаров В.Е., Таланов В.И., «Неклассические» проявления микроструктурно обусловленной нелинейности: новые возможности для акустической диагностики // УФН, 2006, т. 176, №1.* 9. *Nazarov V.E., Ostrovsky L.A., Soustova I.A., Sutin A.M.* Nonlinear acoustics of microinhomogeneous media // Phys.Earth & Planet. Interiors, 1988, vol. 50, № 1, pp. 65-73. 10. *V. Tournat, V. Zaitsev, V. Gusev, V. Nazarov, P. Bequin, B. Castagnede.* Probing granular media by acoustic parametric emitting antenna: clapping contacts, nonlinear dilatancy and polarization anisotropy // Phys. Rev. Lett, 2004, vol. 92, № 8, p. 085502. 11. *Грінченко В.Т., Вовк І.В., Мацитура В.Т.* Основи акустики. – К.: Наук. думка, 2007. – 640 с. 12. *Усталостные испытания на высоких частотах нагружения / Под ред. В.А.Кузьменко.* – К.: Наук. думка, 1979. 336 с. 13. *Безьямянный Ю.Г.* Возможности акустических методов при контроле структуры и физико-механических свойств пористых материалов // Порошковая металлургия. – 2001. – № 5-6. – С. 23-33. 14. *Исследование корреляции скорости распространения упругой волны с параметрами композита на основе медного порошка с вольфрамовыми включениями / Ю.Г.Безьямянный, Т.А.Епифанцева, Е.А.Козирацкий.* // Акустичний симпозиум «Консонанс-2009». – 36. наук. праць. – Київ. – 2009. - С.83-88. 15. *Исследование корреляции скорости распространения упругой волны с параметрами композита на основе металлических порошков с алмазными включениями. /Ю.Г.Безьямянный, А.Н.Высоцкий, Т.И.Истомина, А.Н.Колесников, Н.Иванюк.* // Акустичний симпозиум «Консонанс-2009». – 36. наук. праць. – Київ. – 2009. - С.79-82.

Ю.Г. БЕЗЬМЯННИЙ, д-р техн. наук, с.н.с., ІПМ НАН України,
Т.О. ЄПІФАНЦЕВА, к-т. техн. наук, с.н.с., ІПМ НАН України
Є.О. КОЗИРАЦЬКИЙ, здобувач ІПМ НАН України

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СТРУКТУРИ КОМПОЗИТА НА ОСНОВІ МІДНОГО ПОРОШКУ ІЗ ВОЛЬФРАМОВИМИ ВКРАПЛЕННЯМИ НА ШВИДКІСТЬ ПОШИРЕННЯ ПРУЖНОЇ ХВИЛІ

В работе приведены результаты экспериментальных исследований по выявлению корреляции скорости распространения упругой волны с параметрами структуры композита на основе медного порошка с вольфрамовыми включениями. Показано, что эффективная скорость распространения продольной упругой волны связана с размерами и содержанием включений, пористостью, качеством контактов и потому может быть использованная как диагностический параметр указанных свойств композита.

In the article results of experimental researches of detection of correlation of speed of propagation of elastic wave with parameters of structure of a composite on the basis of a copper flour with tungsten inclusions are resulted. It is shown that effective speed of propagation of longitudinal elastic wave is connected with the sizes and contents of inclusions, porosity, quality of contacts and consequently can be used as diagnostic parameter of the specified properties of a composite.

Вступ. Композити на основі мідного порошку застосовують як конструкційні матеріали для електрокатодного обладнання, а також як вироби спеціального призначення [1]. При отриманні таких матеріалів з гарантованими властивостями доцільно в процесі їх виготовлення контролювати параметри структури, такі як щільність пресовки, якість контактів, пористість, розміри та вміст компонентів [2,3]. Перспективними для розв'язання цієї задачі є акустичні методи неруйнівного контролю [4] і, перш за все, структурночутливі імпульсні ультразвукові методи, засновані на вимірах параметрів пружної хвилі [5].

Постановка задачі. При використанні будь-якого параметру пружної хвилі для діагностики стану структури матеріалу, необхідно встановити, чи є кореляція між діагностичним параметром та параметрами структури досліджуваного композиту і чи можна виділити вплив на нього окремих елементів структури.

У роботі проведена оцінка впливу розміру та вмісту вкраплень, пористості та якості контактів на швидкість поширення пружної хвилі у пресовках на основі мідного порошку із вольфрамовими вкрапленнями. Для цього були проведені виміри швидкості поширення ефективної поздовжньої пружної хвилі у зразках досліджуваного матеріалу, отриманих за різними технологіями, з різним розміром та вмістом вкраплень, різною пористістю. Виокремлення впливу якості контактів на швидкість поширення пружної

хвилі було проведено шляхом порівняння з відомими модельними уявленнями про модулі пружності композитів.

Експериментальні дослідження. Для проведення експерименту були виготовлені зразки прямокутної форми із композитів на основі мідного порошку з вольфрамовими вкрапленнями. Характеристики об'єкта досліджень показані на рис.1. Матеріали композитів відрізнялись розмірами частинок матриці D_{Cu} , а також розмірами D_W і масовою долею Q_W вкраплень (див. табл.1). Суміші № 1-13 отримані за технологією холодного пресування,

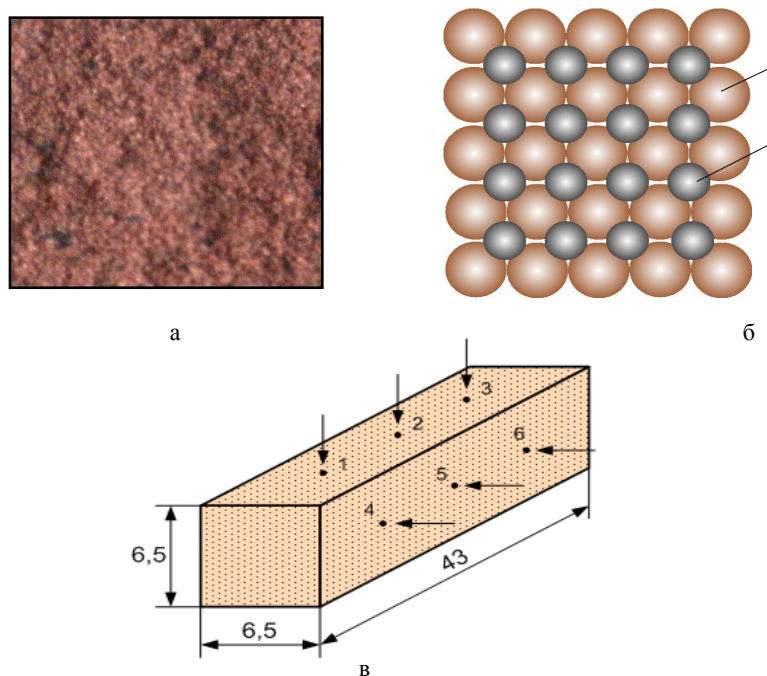


Рис. 1. Характеристики об'єкта дослідження: а – структура матеріалу (x10); б – структурна модель матеріалу, де 1 – частинка міді, 2 – частинка вольфраму; в – досліджуваний зразок, де стрілками показані напрямки прозвучування у різних точках

а № 14 та 15 – гвинтової екструзії [6]. Зразки були розділені на 6 груп сумішей. У кожній групі змінювався лише один параметр структури матеріалу. Розміри зразків дозволяли статистично осереднювати властивості матеріалу в об'ємі озвучування [7].

Швидкість поширення пружної хвилі визначалась за часом наскрізного проходження пружного імпульсу через досліджуваний зразок. Вимірювання

часу проходження проводилось методом радіоімпульсу з дискретною затримкою [8].

Структурна схема вимірювань показана на рис.2. В акустичній вимірювальній камері за допомогою спеціального притискного пристрою між випромінюючим та приймальним перетворювачами встановлювався досліджуваний зразок. З виходу генератора на випромінюючий перетворювач з резонансною частотою 5 МГц подавалась періодична послідовність електричних прямокутних імпульсів. Перетворений сигнал проходив через контактний шар, досліджуваний зразок, другий контактний шар і надходив на приймальний перетворювач. Далі він трансформувался у електричний сигнал і через підсилювач надходив на осцилограф, де, за допомогою вимірювача часових інтервалів, вимірювався час затримки $t_{вим}$ між моментом запуску генератора і приходом сигналу на вхід осцилографа. Для компенсації систематичної похибки вимірювань, обумовленої часом проходження сигналу без досліджуваного зразка t_0 , проводились аналогічні вимірювання при відсутності зразка між п'єзоперетворювачами.

Таблиця

Характеристики досліджуваних матеріалів

Група №	Суміш №	Розмір частинок		Вміст вкраплень Q_W , мас. %	Пористість П, %	Середнє значення швидкості, м/с		Модуль пружності Е, ГПа
		D_{Cu} , мкм	D_W , мкм			У напрямку пресування	Перпендик. напрямку пресування	
1	1	+50	15	50	23	907	1145	81
	2	+50	28	50	23	957	1248	90
	3	+50	100	50	23	782	1047	60
2	4	-50	15	50	23	950	1286	89
	5	-50	28	50	23	987	1346	96
	6	-50	100	50	23	845	1139	70
3	7	+50	15	20	23	737	1097	44
	8	+50	28	20	23	769	1124	48
4	9	+50	100	20	23	632	979	32
	10	-50	15	20	23	737	1097	44
5	11	-50	15	50	23	992	1301	97
	12	-50	28	20	23	693	997	39
6	13	-50	28	50	23	987	1292	96
	14	+50	10	50	10	4272	3969	179
	15	+50	100	50	1	3035	3540	90

У якості контактної рідини застосовувалась вода. Для захисту зразка від

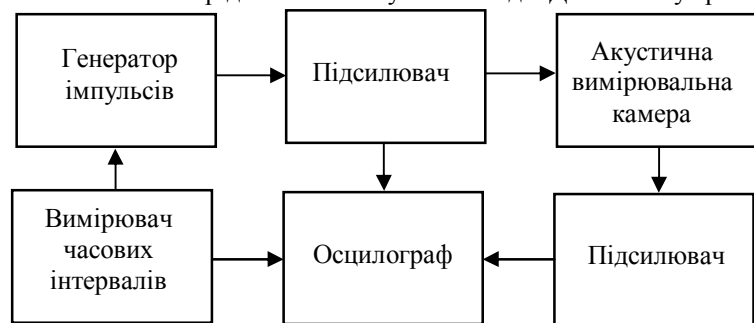


Рис. 2. Структурна схема вимірювань

впливу контактної рідини використовувалась плівка товщиною 0,13 мм.

Товщина зразків h вимірювалась мікрометром.

Швидкість поширення пружної хвилі визначали за формулою:

$$C = \frac{h}{t_{вим} - t_0} \quad (1)$$

Для описаної методики похибка визначення швидкості поширення пружної хвилі у досліджуваних зразках складає не більше ніж 0,5 %.

Прозвучування зразків проводилось в двох напрямках: у напрямку пресування і перпендикулярно напрямку пресування. Для врахування розкиду властивостей матеріалу по об'єму заміри часу проходження пружної хвилі через зразок були виконані у трьох точках для кожного напрямку, а швидкість для кожного напрямку визначалась за усередненим значенням часу. Отримані результати усереднювались для 3-4 однакових зразків. Результати експерименту наведено у табл.1 й на рис.3 та 4.

На рис.5 приведені експериментальні залежності швидкості поширення пружних хвиль від пористості для 4-х різних сумішей композитів. Тут використані результати попереднього експерименту [9].

Оцінка модуля пружності. Для визначення модуля пружності використовували два підходи: за експериментально визначеними ефективними швидкостями поширення пружних хвиль та за відомими модельними уявленнями.

За експериментально визначеними ефективними швидкостями поширення пружних хвиль. У однорідному ізотропному твердому середовищі зв'язок характеристик пружності (модуля Юнга E і коефіцієнта Пуассона ν) та щільності ρ матеріалу зі швидкістю поширення поздовжньої пружної хвилі визначається відомою [10] формулою:

$$E = \frac{C^2 \rho (1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad (2)$$

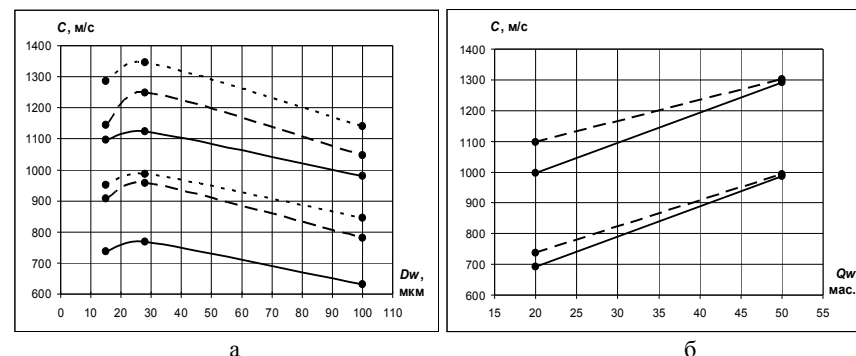


Рис. 3. Залежності швидкості поширення пружної хвилі від розміру (а) та масової частки вольфрамових крапель (б) в зразках, отриманих за технологією холодного пресування. Номер кривої співпадає з групою суміші у табл.1. (відсутність індексу "п" відповідає напрямку пресування, а наявність – напрямку, перпендикулярному пресуванню)

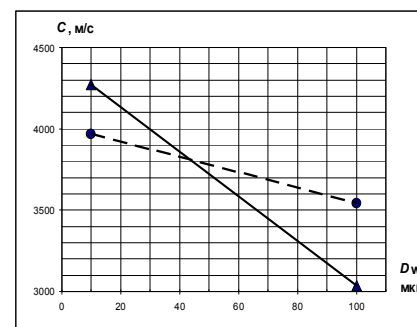


Рис. 4. Залежності швидкості поширення пружної хвилі від розміру вольфрамових крапель в зразках, отриманих методом гвинтової екструзії: б – у напрямку пресування; б_п – у напрямку, перпендикулярному пресуванню

Формула (2) залишається справедливою для досліджуваних композитів за умови, що величини, які у неї входять, замінюються їх ефективними значеннями для відповідного середовища. При цьому для багатозначних матеріалів ефективні значення можуть бути знайдені за допомогою різних методів усереднення [11].

Ефективне значення швидкості поширення пружної хвилі було знайдено в результаті експерименту.

Ефективне значення коефіцієнта Пуассона як функції пористості θ визначається за формулою [12]:

$$\nu_e = \nu_0 (1 - \theta), \quad (3)$$

враховуючи, що для обох компонентів матеріалу за відсутності пористості він має однакове значення: $\nu_o = 0,35$ [13]. Тоді при $\theta = 0,23$ $\nu_e = 0,27$.

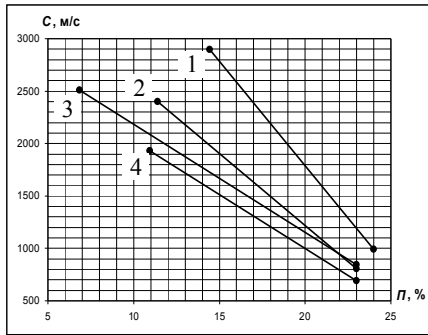


Рис. 5. Залежності швидкості поширення пружної хвилі від пористості для різних сумішей композитів: 1 – Cu₋₅₀ 50W₂₈; 2 – Cu₊₅₀ 20W₂₈; 3 – Cu₋₅₀ 50W₁₀₀; 4 – Cu₋₅₀ 20W₂₈

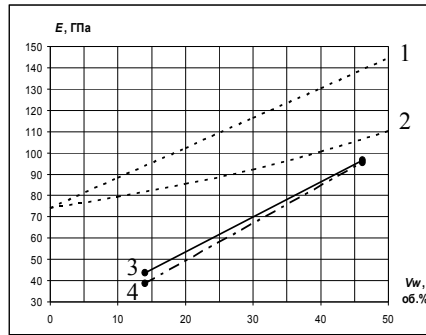


Рис. 6. Функціональні та емпіричні залежності модуля пружності від об'ємної доли вольфрамових вкраплень

Ефективне значення щільності як функції пористості визначається за формулою [12]:

$$\rho_e = \rho_{eo}(1 - \theta), \quad (4)$$

де для двохкомпонентного безпористого матеріалу [13]:

$$\rho_{eo} = \frac{\rho_{Cu}\rho_W \cdot 100}{\rho_W Q_{Cu} + \rho_{Cu} Q_W}, \quad (5)$$

де Q_{Cu} , Q_W – відсоткове співвідношення компонентів за масою, причому $\rho_{Cu} = 8,96$ г/см³, $\rho_W = 19,32$ г/см³ [13]. В результаті розрахунків за формулами (4) і (5) суміші № 1-6, 11-15 мають щільність $\rho_e = 12,24$ г/см³; суміші № 7-10 і 12 – 10,04 г/см³.

Для нашого випадку отримаємо

$$E_e \approx 0,8\rho_e C_e^2 \quad (6)$$

За відомими модельними уявленнями. У відповідності до [4] залежність ефективного модуля пружності від пористості визначається за формулою:

$$E_e = E_{eo}(1 - \theta)^2 \approx 0,59E_{eo}, \quad (7)$$

Граничні значення E_{eo} можна визначити за формулами Рейеса і Фойгхта [11] для двохкомпонентного матеріалу:

$$\frac{1}{E_{Re0}} = \frac{V_{Cu}}{E_{Cu0}} + \frac{V_W}{E_{W0}}; \quad E_{Fe0} = V_{Cu}E_{Cu0} + V_W E_{W0} \quad (8)$$

де V_{Cu} , V_W – об'ємна концентрація відповідного матеріалу, $E_{Cu0} = 125$ ГПа, $E_{W0} = 362$ ГПа [13].

На рис.6 показані функціональні залежності (1, 2), отримані за формулами (7) і (8), та експериментальні значення (3, 4), отримані за результатами вимірювань швидкості поширення пружної хвилі з використанням формули (6) для груп зразків 4 і 5.

Аналіз результатів. З рис.3 та 5 видно, що ефективна швидкість поширення поздовжньої пружної хвилі корелює з розміром та вмістом вкраплень, а також пористістю. Причому, для усіх груп сумішей характер впливу вказаних параметрів структури подібний. Відхилення впливу розмірів вкраплень на ефективну швидкість поширення поздовжньої пружної хвилі від лінійного закону (рис.3а) суттєво перевищує похибку вимірів. Дослідження на інших матеріалах [14] дають підставу пояснювати отриману нелінійність нерегулярністю формування якості контактів у пресовках.

З рис.3 видно, що ефективна швидкість поширення поздовжньої пружної хвилі у напрямку пресування зразка менша, ніж у перпендикулярному напрямку. Отримане підтверджує теорію М.Ю.Бальшина [12] і експериментальні результати О.В.Романа із співавторами [4] про вплив на властивості матеріалу площинних дефектів несформованих контактів. Цей же факт підтверджують результати, наведені на рис.4. При формуванні пресовок за технологією гвинтової екструзії напрям пресування не співпадає з напрямом формування дефектів контактів і тому не корелює з напрямом прозвучування.

По аналогії з двофазним матеріалом [15], у досліджуваному ефективну швидкість поширення поздовжньої пружної хвилі C_e можна записати як функцію від властивостей матеріалу та його компонентів (матриці та вкраплень, порового простору і якості контактів) у наступній формі:

$$C_e = C_{eo} K_{\Gamma} K_K, \quad (9)$$

де C_{eo} – ефективна швидкість поширення поздовжньої пружної хвилі у двокомпонентному безпористому матеріалі; K_{Γ} , K_K – коефіцієнти, що враховують пористість і якість контактів між окремими елементами мезоструктури.

Оскільки пористість досліджуваних матеріалів однакова (групи 1-5), а формули (7) і (8) для розрахунку функціональних залежностей не враховують контактних явищ у матеріалах пресовок, то саме впливом недосконалих контактів можна пояснити суттєво менші значення експериментально отриманих модулів пружності у порівнянні з теоретичними. При цьому з

рис.6 видно, що у неспечених пресовках недосконалі контакти є визначальними у величині модуля пружності матеріалу.

Висновки. Виявлений кореляційний зв'язок ефективної швидкості поширення поздовжньої пружної хвилі з параметрами структури (розмірами та відсотковим вмістом частинок, пористістю, якістю контактів між частинками) неспечених пресовок з композитів на основі мідного порошку з вольфрамовими вкрапленнями. Показано, що вплив кожного параметра структури можна виокремити за допомогою експериментальних чи розрахункових методів.

Отримані результати дозволяють рекомендувати ефективну швидкість поширення поздовжньої пружної хвилі як діагностичний параметр для відпрацювання структури і властивостей гетерогенних пресовок з порошкових композиційних матеріалів на основі пластичної матриці і твердих вкрапель.

Подальший напрямок досліджень пов'язаний з отриманням та аналізом статистичних даних для вивченням нерегулярності формування контактних явищ при формуванні пресовок.

Список літератури: 1. *Сердюк Г.Г., Епифанцева Т.А., Державец Л.И.* Применение порошкового материала для нефтяных и газовых скважин. // Порошковая металлургия. – 1990. – №4. – С.38-42. 2. *Косторнов А.Г.* Материаловедение дисперсных и пористых металлов и сплавов. В 2 т. –т.1 – Киев: Наукова думка, 2002. – 572 с. 3. *Косторнов А.Г.* Материаловедение дисперсных и пористых металлов и сплавов. В 2 т. –т.2 – Киев: Наукова думка, 2003. – 552 с. 4. *Роман О.В., Скороход В.В., Фридман Г.Р.* Ультразвуковой и резистометрический контроль в порошковой металлургии. – Мн.: Выш. шк., 1989. – 182 с. 5. *Безьянный Ю.Г.* Возможности акустических методов при контроле структуры и физико-механических свойств пористых материалов // Порошковая металлургия. – 2001. – № 5-6. – С. 23-33. 6. Компактирование порошковой меди с УМЗ структурой методом комбинированного прессования / Я.Е. Бейгельзимер, А.С. Сынков, Т.Т. Мороз, Т.П. Заика, Н.Н. Белоусов, А.А. Коваленко // Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. Том 8. Пластична деформація металів. Дніпропетровськ: „Системні технології”. – 2005.– с. 508-510. 7. *Безьянный Ю.Г.* Акустическое отображение материалов, изготавливаемых методами порошковой металлургии. / Акустичний вісник. – т. 9. № 2. – 2006. – С. 3–16. 8. *Труэлл Р., Эльбаум, Чик Б.* Ультразвуковые методы в физике твердого тела. – М.: Мир, 1972. – 302 с. 9. Исследование влияния состава и структуры на скорость ультразвука в порошковом материале с медной матрицей и вольфрамовыми включениями / *Ю.Г.Безьянный, Т.А.Епифанцева, Л.О.Тесленко, Е.А.Козирацкий* // Тез. докл. V международ. конф. Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследование, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий: Большая Ялта, Жуковка, 2008. – С. 296. 10. *Ландау Л. Д., Лившиц Е. М.* Теория упругости. – М., 1965. 11. *Скороход В.В.* Теория физических свойств пористых и композиционных материалов и принципы управления их микроструктурой в технологических процессах // Порошковая металлургия. – 1995. – № 1/2. – С.53-70. 12. *Бальшин М. Ю.* Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна. – М.: Металлургия, 1972. – 336 с. 13. Физические величины: Справочник / Под ред. *И.С.Григорьева, Е.З.Мейлихова.* – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с. 14. *Безьянный Ю.Г., Кузнецкий А.Е., Силенко Р.В.* Акустическое отображение нерегулярности формирования свойств полидисперсного порошкового железа. / Электроника и связь. 2005. - № 28. – С. 78-82. 15. *Безьянный Ю. Г.* Использование акустических характеристик для контроля структуры пористых материалов // Электронная микроскопия и прочность материалов. – К. – 1999. – С. 93–105.

УДК 681.121.4

А.К. ГОЛОВИНА, студ., ДВНЗ «ДонНТУ»,
А.А. ЗОРИ, д-р техн.наук проф., ДВНЗ «ДонНТУ»,
В. П. ТАРАСЮК, к-т техн. наук, доц., ДВНЗ «ДонНТУ»,

ПРИБОР ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕМНОГО РАСХОДА ТЕПЛА НА ОСНОВЕ УЛЬТРАЗВУКА И ПЬЕЗОКЕРАМИКИ

В данной работе аргументирована необходимость контроля расхода тепла в высотных зданиях, оборудованных автономными котельными. Предложена структура прибора с применением микропроцессорной технологии. В основу прибора входит пьезокерамика, обеспечивающая не только точность ультразвукового метода измерений, но и высокую эксплуатационную надежность приборов.

In this article was argued the need to control heat flow in high-rise buildings equipped with independent boilers. Proposed develop a device using microprocessor technology and piezoceramic elements, which provides accuracy of the ultrasonic measurement method and the reliability of devices too.

Введение. Системы учета тепла становятся необходимыми, как потребителям тепла, так и его поставщикам. Основным критерием качества систем теплоснабжения является отсутствие температурного дискомфорта в помещениях и постоянное наличие горячей воды с определенной температурой в требуемом объеме. Это достигается за счет внедрения автономных котельных, функционирующих по принципу полной автоматизации технологического процесса. Важным преимуществом децентрализованных систем теплоснабжения является возможность местного регулирования в системах квартирного отопления и горячего водоснабжения. Однако эксплуатация источника теплоты и всего комплекса вспомогательного оборудования квартирной системы теплоснабжения жильцами не всегда дает возможность в полной мере использовать это преимущество. Последние исследования показали [1], что существует необходимость контроля потерь тепла на каждом этаже. Для того, чтобы не привлекать ремонтно-эксплуатационную организацию для обслуживания источников теплоснабжения необходимо не только в квартирах, но и на каждом этаже установить теплосчетчики, для оперативного слежения за потерями тепла в здании и управления процессом теплоснабжения.

Анализ литературы.

Анализ разработок по этой теме позволил сделать вывод, что для контроля расхода воды и тепла существуют различные приборы и системы. Одними из их основных недостатков являются относительно высокая погрешность измерения и недостаточная метрологическая надежность. Эту проблему в автономных котельных можно решить путем использования ультразвуковых расходомеров, работающих на принципе изменения времени прохождения ультразвукового сигнала от источника до приемника, которое

зависит от скорости потока жидкости и обладающих сравнительно высокой надежностью при относительно низкой стоимости.

Постановка задачи. В настоящее время к расходомерам и счетчикам предъявляются много требований, удовлетворить которые совместно достаточно сложно и не всегда возможно.[2] При этом имеют место две группы требований. К первой группе относятся индивидуальные требования: высокая точность, надежность, независимость результатов измерения от изменения плотности вещества, быстродействие и значительный динамический диапазон измерения. Ко второй группе относят требования, которые характеризуют всю группу расходомеров и счетчиков: необходимость измерения расхода и количества тепла очень разнообразной номенклатуры веществ с отличительными свойствами при существенных значениях внешних дестабилизирующих факторов (относительно больших изменениях давлений и температуры).

Таким образом, для устранения указанных недостатков работа направлена на повышение точности измерений - одного из основных требований предъявляемых к приборам при требуемой надежности и относительно невысокой стоимости.

Основная часть.

Изготовители расходомеров постоянно работают над тем, чтобы найти наилучшую замену механическим счетчикам.[3] Конструкторско-исследовательские работы показали, что наиболее удачной заменой является использование ультразвукового метода измерения расхода построенного на основе пьезокерамики и микропроцессорных технологий, обеспечивающих не только требуемую точность измерений, но и высокие метрологическую и эксплуатационную надежность приборов.

Пьезоэлектрический эффект присущ некоторым природным кристаллам, таким как кварц и турмалин, которые в течение многих лет использовались в качестве электромеханических преобразователей. Кристаллическая решетка кристаллов, обладающих пьезоэлектрическим эффектом, не имеет центра симметрии. Воздействие (сжимающее или растягивающее), приложенное к такому кристаллу, приводит к поляризации после разделения положительных и отрицательных зарядов, имеющих в каждой отдельной элементарной частице. Эффект практически линейный, то есть степень поляризации прямо пропорциональна величине прилагаемого усилия, но направление поляризации зависит, так как усилие сжатия или растяжения генерируют электрические поля, а следовательно, и напряжение, противоположной полярности. Соответственно, при помещении кристалла в электрическое поле упругая деформация вызовет увеличение или уменьшение его длины в соответствии с величиной и направлением полярности поля.

Под воздействием электрического поля (напряжения) размеры пьезокерамического элемента изменяются. При механических воздействиях пьезокерамический элемент генерирует электрический ток. Поэтому

пьезокерамический элемент может использоваться в качестве как излучателя так и приемника сигнала, т.е. как приемопередатчик.

Два основных принципа ультразвукового метода измерения расхода - это транзитно-временной метод и метод на основе эффекта Доплера. Метод Доплера использует эффект изменения частоты звука, отражающегося от движущихся частиц. Транзитно-временной метод основан на том факте, что ультразвуковому сигналу, направленному против движения потока, для прохождения расстояния от излучателя до приемника требуется больше времени, чем сигналу, направленному по ходу движения потока. Разность времени прохождения сигнала в пределах трубы расходомера крайне мала (наносекунды).

Поэтому для достижения необходимой точности измерения разность времени прохождения сигнала определяют по разности фаз между двумя сигналами с частотой 1МГц. Определение величины расхода Q производится измерением расходной скорости F потока и умножением ее на площадь сечения A измерительной трубы:

$$Q = F \cdot A \quad (1)$$

Площадь и расстояние, которые проходит сигнал в измерительной трубе, известны. Расстояние, проходимое сигналом, можно представить в виде выражения $L = V \cdot T$, из которого получаем

$$T = \frac{L}{V}, \quad (2)$$

где: L - измеряемое расстояние

V - скорость прохождения звукового сигнала

T - время его прохождения.

Теперь время можно выразить как разность между скоростями сигналов, направленных по направлению потока и против него:

$$\Delta T = L \cdot \left(\frac{1}{V_1} - \frac{1}{V_2} \right). \quad (3)$$

В применении к ультразвуковым расходомерам скорости V_1 и V_2 можно записать как:

$V_1 = C - F$ соответственно $V_2 = C + F$ где:

C - скорость распространения звука в воде

Применяя вышеприведенную формулу, получаем:

$$\Delta T = L \cdot \frac{1}{C - F} - \frac{1}{C + F}, \quad (4)$$

что можно выразить как

$$\Delta T = L \cdot \frac{(C+F) - (C-F)}{(C-F) \cdot (C+F)} \Rightarrow \Delta T = L \cdot \frac{2F}{C^2 - F^2} \quad (5)$$

Поскольку $C \gg F$, то можно величиной F^2 пренебречь и выражение будет иметь вид:

$$F = \frac{\Delta T \cdot C^2}{L \cdot 2} \quad (6)$$

Т.о. контроль объемного расхода тепла следует рассчитывать по формуле (6).

Чтобы минимизировать неточности, вызываемые изменениями скорости звука в воде, производят ее измерение. Измерения скорости распространения звука в воде производятся по специальным методикам Доплера. Для этой цели производится ряд измерений абсолютного времени прохождения сигнала между двумя приемопередатчиками. Результаты измерений затем пересчитываются в текущую скорость распространения звука, используемую далее при вычислениях. [4]

В динамическом диапазоне прибора от порога чувствительности до абсолютного максимального расхода имеет место линейная зависимость между протекающим объемом жидкости и выдаваемым количеством импульсов. На рисунке 1 приведен пример зависимости между расходом и частотой импульсов.

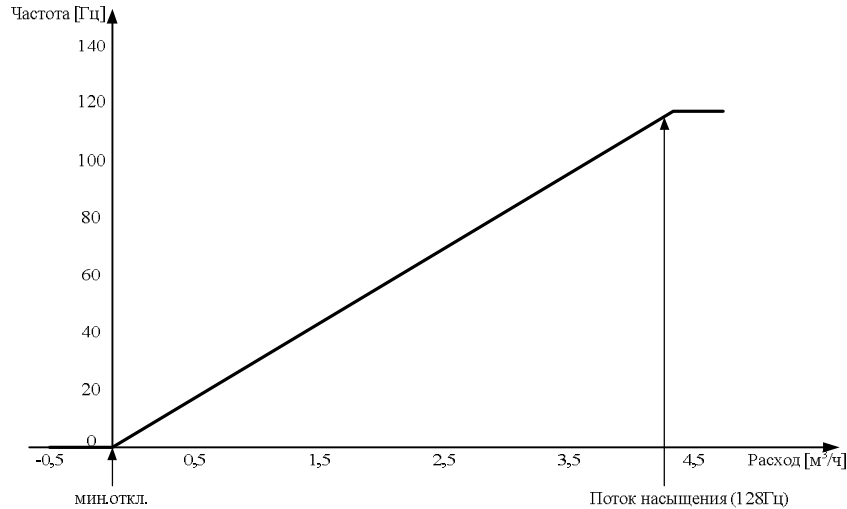


Рис. 1. Зависимость между частотой и расходом тепла.

Если расход ниже порога чувствительности или противоположен по направлению, импульсы не генерируются. (см.рис. 1).

При значениях расхода выше потока насыщения, которому соответствует макс. частота 128 Гц, будет продолжаться генерирование импульсов максимальной частоты.

Структурная схема прибора. Для улучшения отношения сигнал/ шум время распространения ультразвукового сигнала часто измеряется в двух направлениях, при этом оба пьезокристалла работают попеременно то приемниками, то передатчиками. Это можно реализовать при помощи переключающего устройства, показанного на рис. 2, который работает со сравнительно низкой частотой (например, 400 Гц). Синусоидальные ультразвуковые волны (с частотой около 3 МГц) передаются в импульсном режиме с той же самой тактовой частотой (400 Гц). Принятый ВЧ сигнал отстает от задающего на время T . Величина этой задержки зависит от скорости потока среды. Время T измеряется при помощи времяпролетного детектора, а синхронный детектор используется для определения разницы времен $\Delta \hat{O}$, затраченных на распространение сигнала вдоль и против течения потока. Такой ультразвуковой датчик обладает достаточно высокой точностью (порядка 2%).

Классы точности:

Клас 1: $E_c = \pm (0,5 + \frac{3\Delta\Theta_{\min}}{\Delta\Theta})$;

Клас 2: $E_t = \pm (2 + \frac{0,02q_p}{q})$, але не більш ніж $\pm 5\%$;

Клас 3: $E_t = \pm (3 + \frac{0,05q_p}{q})$, але не більш ніж $\pm 5\%$;

где погрешность E_c устанавливает связь между измеренным значением количества теплоты и его, значения E_c и E_t для класса 1 определяют тогда, когда усовершенствования методик испытаний и преобразований расхода позволяют это сделать .

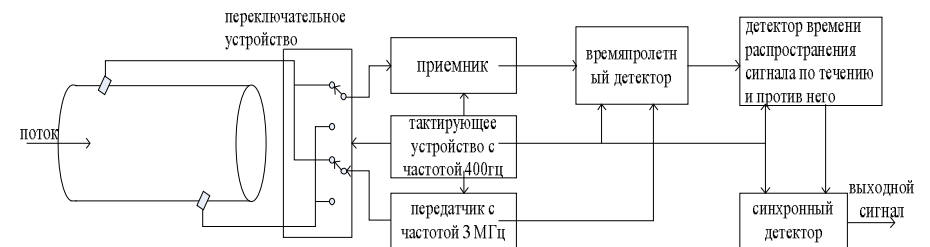


Рис.2. Схема ультразвукового расходомера, в котором каждый кристалл играет роль и передатчика, и приемника.

Выводы. 1. Разработана структура прибора контроля расхода количества тепла с заданной степенью точности не более 2% который отслеживает расход и потери тепла на каждом этаже. Прибор реализован путем установки на этажах высотного дома ультразвуковых тепловодосчетчиков.

2. В ультразвуковых расходомерах в качестве излучателей и приемников акустических колебаний предложено использовать пьезокерамические материалы с высокой диэлектрической проницаемостью.

3. Для измерения расхода чистых жидкостей предложено использовать высокие резонансные частоты и тонкие пьезокерамические пластины. Для измерения расхода веществ с механическими примесями или газовыми пузырями - использовать пьезокерамику большей толщины, имеющую более низкую резонансную частоту.

Список литературы: 1. <http://www.c-o-k.com.ua/content/view/35/0/> 2. *Кремлевский П.П.* Расходомеры и счетчики количества: Справочник.–Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние. 3.www.kamstrup.com 4.*Дж. Фрайден* Современные датчики. Справочник – Москва: Техносфера, 2006.

УДК 622. 276.6

С.П. МОСТОВОЙ, к-т физ.-мат. наук, доц., НТУ "ХПИ"

ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ИНДУКЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В статті запропонована розрахункова модель для визначення параметрів імпульсу акустичного тиску, який створює випромінюючий перетворювач енергії індукційно-динамічного типу. Модель побудована з використанням методів електромеханічних аналогій. Наведено порівняння розрахункових і експериментальних даних.

In the article a calculation model is offered for determination of parameters of impulse of acoustic pressure, which creates transformer of energy of induction-dynamic type. A model is built with the use of methods of electroanalogies. Comparison over of calculation and experimental data is brought

Составным элементом современной аппаратуры для геофизических исследований дна океана является источник сейсмических сигналов. Диапазон частот 500 Гц...10 кГц перекрывается электроискровыми и электродинамическими источниками на основе индукционно-динамических преобразователей, известными под названием "спаркер" и "бумер" [1, 2]. При этом опытным путем установлено, что источники типа "бумер", обладают более высокой стабильностью характеристик и большим ресурсом.

Интерес к электродинамическим источникам в последнее время значительно вырос в связи с расширением работ по поиску нефти, газа и железомарганцевых конкреций. Широко используемые для этих целей пневматические источники, работающие в диапазоне частот 5...150 Гц, обеспечивают значительную глубину исследования морского дна, но не позволяют получить детальную информацию о его строении. Высокочастотные пьезокерамические и магнитострикционные источники приводят к лучшему разрешению структур, но их излучение не проникает достаточно глубоко в грунт. Поэтому именно среднечастотные источники - "спаркер" и "бумер" – оказались весьма эффективными при геофизических исследованиях морского дна и структуры придонных осадков.

Для определения функциональных возможностей и области применения источников сейсмических сигналов целесообразным является наличие ясных и адекватных математических моделей таких источников, позволяющих на этапе проектирования учесть основные факторы, влияющие на работоспособность источников и позволяющие оценивать параметры выходного сигнала с достаточной точностью,

Для решения этих задач ниже приведены некоторые результаты теоретических и экспериментальных исследований источников сейсмических сигналов на базе индукционно-динамических преобразователей (ИДП) для

геофизических исследований на акваториях. Конструктивно импульсный индукционно-динамический преобразователь для сейсмоакустических исследований с плоской электромагнитной системой состоит из укрепленной на диэлектрическом основании плоской дисковой катушки и электрически изолированного от нее подвижного заземленного электропроводного проводящего диска. При подключении к катушке предварительно заряженного емкостного накопителя энергии в диэлектрическом зазоре между катушкой и диском возникает импульс радиального магнитного поля. В результате диск под действием давления этого магнитного поля отталкивается от катушки и, взаимодействуя с упругой средой, излучает сейсмический сигнал.

Для определения функциональных возможностей преобразователя в процессе генерации сейсмических сигналов предлагается рассматривать два взаимосвязанных процесса: процесс формирования силового импульса в электромагнитной подсистеме ИДП и процесс взаимодействия преобразователя с геологической средой. При этом, представляется целесообразным, рассмотрение преобразователя в виде электромагнитной и механической подсистем, которые взаимодействуют через электромагнитное поле связи таким образом, что оказывается возможным преобразование энергии электромагнитного поля в энергию упругих колебаний среды.

Электромагнитная подсистема ИДП характеризуется такими основными параметрами: $L_{ИДП}, R_{ИДП}, S_k, C, U_c, b, \omega_0$ – индуктивностью ИДП, активным электрическим сопротивлением преобразователя, площадью катушки (с внешним r_1 и внутренним r_2 радиусами катушки), величиной электрической емкости накопителя энергии, зарядным напряжением, толщиной проводника катушки, эквивалентной частотой разрядного тока, численные значения которых при известных конструктивных соотношениях могут быть определены, например, из [3].

Механическая система преобразователя характеризуется его геометрическими размерами и физическими свойствами материала диска, условиями механического заземления и параметрами нагрузки преобразователя - свойствами геологической среды.

Для моделирования процесса генерации акустического колебаний импульсным индукционно - динамическим преобразователем воспользуемся методом электромеханических аналогий, который базируется на подобию дифференциальных уравнений, описывающих динамические процессы в электротехнике, механике, акустике. Сущность метода заключается в составлении механических цепей исследуемого объекта, в нашем случае ИДП, и их электрических схем-аналогов с последующим моделированием динамических процессов объекта методами, принятыми в электротехнике. Более разработанной и используемой при исследовании механических систем является система электромеханических аналогий «сила-напряжение». Это обусловлено тем, что источники силы моделируются источниками

Э.Д.С., а полное комплексное сопротивление электрической цепи соответствует полному механическому сопротивлению, при этом размерности электрической цепи –аналога соответствуют размерности элементов механической цепи [4].

Рассмотрим основные свойства механической подсистемы ИДП. Отметим, что аналогично гидроакустическим излучателям других типов, работающим на колебаниях изгиба, наиболее эффективно ИДП функционирует при следующем конструктивном соотношении: $a_0 \leq 0,2r$, которое связывает основные геометрические размеры диска – его толщину a_0 и радиус r . Если это условие не выполняется, т.е. диск становится относительно "толстым" и, как следствие, более жестким, деформации изгиба уменьшаются и эффективность преобразователя снижается [5].

Для определения основных акустических параметров ИДП с помощью эквивалентной электромеханической схемы оценим его эквивалентные параметры: массу $m_{эkv}$, гибкость $c_{эkv}$ и сопротивление R_s . Известно, что их определяют через формы колебаний, размеры и упругие параметры излучающего элемента. На частотах до и вблизи первого механического резонанса форма осесимметричных колебаний круглых заземленных пластин описывается функцией [6, 7]:

$$\varphi(\Delta r) = \left(1 - \left(\frac{\Delta r}{r}\right)^2\right)^2, \quad (1)$$

где Δr - текущий радиус точки на поверхности диска.

Эквивалентные масса и гибкость преобразователя в этом случае выражаются в следующем виде:

$$m_{эkv} = 0,18m; \quad (2)$$

$$c_{эkv} = 0,0167r^2/D,$$

где $D = \frac{E(2a_0)^3}{12(1-\nu^2)}$ - изгибная жесткость диска; E, ν - модуль Юнга

и коэффициент Пуассона материала диска; m - масса диска.

Форма колебаний заземленного упругого диска определяет также среднюю площадь излучающей поверхности S_{cp} диска, которую в соответствии с выводами работ [5, 7] для излучательных преобразователей запишем в виде $S_{cp} = 0,35S_0$, где S_0 - геометрическая площадь диска.

Это соотношение определяет сопротивление излучения преобразователя

следующим образом:

$$R = 0,35Z_e S_\sigma \quad (3)$$

где Z_e - волновое сопротивление воды.

При исследовании режима генерации сейсмических сигналов примем следующие допущения.

1. Электродинамическая сила, развиваемая ИДП, действует в течение первого полупериода импульса разрядного тока:

$$F(t) \neq 0 \text{ при } 0 \leq t \leq \frac{\pi}{\omega_s},$$

$$F(t) = 0 \text{ при } t \geq \frac{\pi}{\omega_s}.$$

2. Диск ИДП испытывает упругую деформацию, а все остальные конструктивные элементы недеформируемые.

3. При соотношении $\frac{2r}{\lambda} \cong 1$, где λ - длина генерируемой волны, влияние акустической среды учтем с помощью активного сопротивления излучения R_s и соколеблющейся массы m_s , величины которых оценим по формулам для поршневого излучателя [8]:

$$R_s = 1,1 \cdot 0,35Z_e S_\sigma; \quad (4)$$

$$m_s = 0,1\rho_o(2r)^{\frac{3}{4}}.$$

Таким образом, методами, принятыми в теории электрических цепей для электромеханической схемы-аналога режима генерации ИДП, составим систему дифференциальных уравнений, описывающую колебания электропроводного диска в жидкой среде под действием электродинамической силы разрядного тока емкостного накопителя энергии:

$$\frac{dU}{dt} = \frac{1}{m_s + m_{эке}} (F(t) - vR_s - U_{сд});$$

$$\frac{dU_{сд}}{dt} = \frac{v}{C_{эке}};$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L_{ИДП}} (U_c - iR_{ИДП}); \quad (5)$$

$$\frac{dU_c}{dt} = -\frac{i}{C};$$

$$F(t) = \frac{\mu_0 i^2(t) S_k}{2b^2},$$

где $L_{ИДП}, R_{ИДП}, S_k, C, U_c, b$ - параметры электрической подсистемы ИДП; $F(t)$ - мгновенное значение электродинамической силы; v - скорость движения заземленного диска; $U_{сд}$ - величина упругой силы "пружины" с гибкостью $C_{эке}$; i - величина тока в разрядной цепи ИДП; U_c - значение напряжения емкостного накопителя.

Поскольку в начальный момент времени $t = 0$, ток в ИДП тоже равен нулю и диск неподвижен, начальные условия записываются в виде: $v = U_{сд} = i = 0, U_c = U_0$, где U_0 - значение зарядного напряжения емкостного накопителя энергии. Решение системы (5) проводилось численными методами. Давление вблизи диска определялось по выражению $P_{mo} = Z_b v$, а на расстоянии Δh от диска - $P = \frac{P_{mo} S_{ср}}{(\lambda \Delta h)}$ [7].

Анализируя полученные расчетные и экспериментальные данные, можно сделать следующие выводы о характеристиках излучаемого импульса давления и соответствия предложенной методике результатам эксперимента:

- развиваемое ИДП акустическое давление линейно зависит от подводимой электрической энергии (в исследуемом диапазоне частот и энергий);

- расхождение расчетных и экспериментальных амплитудных значений импульса давления не превышает 15 %, что является удовлетворительным для инженерных расчетов.

- превышение расчетных значений импульса давления над измеренными, по-видимому, может быть объяснено дифракционными явлениями, характеризующими свойства акустического излучения данного типа плоского излучателя;

- преобладающая частота в спектре импульса давления зависит от параметров разрядного контура и приблизительно совпадает с удвоенной частотой импульса тока в ИДП;

- интенсивность излучаемого сигнала по оси ИДП линейно убывает с ростом расстояния.

В заключении отметим, что экспериментальная проверка ИДП

проводилась в составе промысловых сейсмоакустических комплексов в условиях полевых геофизических работ по методике непрерывного сейсмического профилирования. Глубинность исследования илистого участка акватории достигала 60-100 м при разрешающей способности, определяемой по мощности самых тонких пластов, различных на записи, 0,15...0,20 м.

Список литературы: 1. Калинин А.В., Калинин В.В., Пивоваров В.Л. Сейсмические исследования на акваториях.- М.:Недра,1983.- 421 с. 2. Балашканд М.И., Ловля С.А. Источники возбуждения упругих волн при сейсморазведке на акваториях.- М.:Недра,1977.- 374с. 3. Белый И.В., Фертик С.М., Хименко Л.Т. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов.- Харьков: Выща шк.,1977.- 198 с. 4. Тетельбаум И.М., Шлыков Ф.М. Электрическое моделирование динамики электропривода механизмов.- М.:Энергия,1970.- 191с. 5. Свердлин Г.И. Гидроакустические преобразователи и антенны.- Л.: Судостроение,1988.- 200с 6. Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. Пластины и оболочки.- М.: Физматгиз,1953.- 636 с. 7. Богородский В.В. Подводные электроакустические преобразователи.- Л.: Судостроение,1983.- 245 с. 8. Аронов В.С. Электромеханические преобразователи из пьезоэлектрической керамики.- Л.: Энергоатомиздат,1990.- 272 с.

УДК 620.170.14

Г. М. СУЧКОВ, д-р техн.наук, проф. НТУ «ХП»
К. Л. НОЗДРАЧОВА, аспирант каф. ПМНК НТУ «ХП»
С. В. ХАЩИНА, студент каф. ПМНК НТУ «ХП»

ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ФАКТОРІВ, ЯКІ ВИЗНАЧАЮТЬ РОБОТУ ЕМА ДЕФЕКТОСКОПУ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ДОВГОМІРНИХ ВИРОБІВ

Разработан стенд для контроля длинномерных стальных изделий цилиндрической формы с переходным размером диаметра от 10 до 50 мм с ЭМА преобразователем, в котором применен «зигзагообразный» высокочастотный индуктор, позволяющий вводить акустические импульсы под углом к поверхности металла. Проанализировано влияние основных факторов, которые определяют работу ЭМА дефектоскопа: угол перекоса, зазор между преобразователем и объектом контроля, а также тока в индукторе датчика, длительности пакета, частоты заполнения импульса, которые питают преобразователь.

The stand for the control of lengthy steel products of the cylindrical form with the transitive size of diameter from 10 to 50 mm is made. It is developed EMA transducer with use "zigzag" high-frequency inductor which allows to enter acoustic impulses under a corner to the surface. Influence of major factors which define work EMA flaw detector, such as a declivity angle, a backlash between the transducer and the object of the control is defined. Schedules of characteristics of EMA transducer for the control of ferromagnetic rods from pressure, current, quantities of impulses in a package and frequencies which enter from the probe pulse generator to the transducer are resulted.

Для правильної оцінки якості довгомірного виробу ЕМА методом необхідно експериментально оцінити вплив на результати контролю факторів різного характеру. Встановлено, що серед тих які слід врахувати: зазор між ЕМА перетворювачем (ЕМАП) і поверхнею металу; перекоси; величина амплітуди сигналу живлення перетворювача; величина імпульсного високочастотного струму в котушці ЕМАП; структура основної матриці металу виробу; чутливість до дефектів різних розмірів, орієнтації, розміщення в перетині, форми, заповнення; відстані до дефекту, торця виробу; взаємного просторового розташування ЕМА датчика і виявляемого дефекту та інших [1].

Для виконання експериментальних досліджень був розроблений стенд, блок-схема якого приведено на рис. 1. Стенд включає формувач 1 імпульсів, генератор зондуючі імпульсів (ГЗІ) 2, ЕМАП 3, попередній підсилювач (ПУ) 4, осцилограф 5 і об'єкт контролю (ОК) 6. Функціонує схема наступним чином. Формувач 1 виробляє напруги, які необхідні для живлення ЕМАП і синхронізації блоків пристрою. ГЗІ 2 посилює зондуючі імпульси до величини, достатньої для роботи ЕМАП 3. Так як перетворювач має подвійну діаграму спрямованості, в ОК 6 збуджуються пакети 7 імпульсів, які розповсюджуються вздовж сталевго стрижня 6, довжиною 210 см та діаметром 18 мм з дефектом 9 у вигляді поперечного свердління глибиною 3

мм у двох напрямках до торців виробу, збільшуючи з кожним відбиттям кількість різнонаправлених променів в ультразвуковому пакеті. Відбиваючись від торців, пакети імпульсів від одного 8 та другого 12 торця розповсюджуються у напрямку ЕМАП 3. При наявності в виробі 6 поверхневого або внутрішнього дефекту 9 імпульси пакету дифрагують на ньому. Дифраговані імпульси 10 в вигляді пакету 11 повертаються до ЕМАП 3 і приймаються та реєструються на екрані осцилографу 5. Пакети імпульсів від торців ОК визначають максимальну зону контролю.

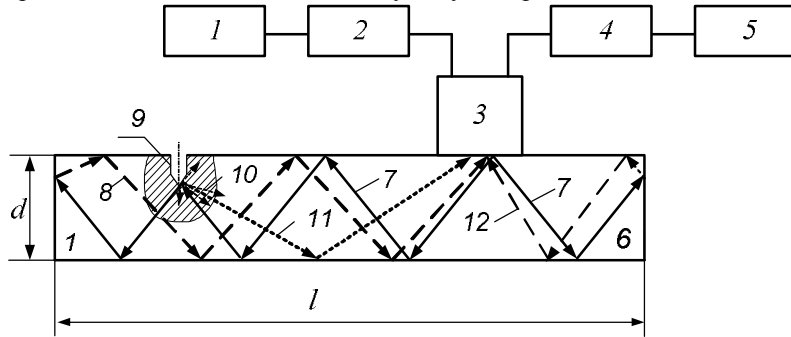


Рис. 1. Блок-схема стану для експериментальних досліджень луна-дифракційного методу при контролі довгомірних виробів з використанням ЕМАП

На рис.2 наведено реалізацію, отриману з допомогою розробленого стану. Очевидно, що є можливість проведення ефективного контролю довгомірних ОК з використанням ЕМА перетворювачів.

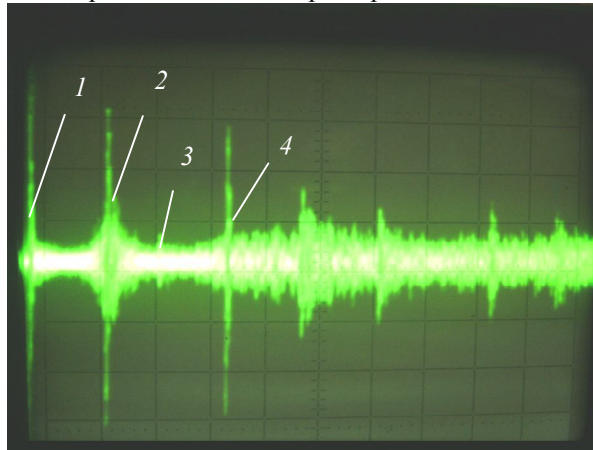


Рис. 2. Реалізація на екрані осцилографу з сигналами від торців стрижня та від дефекту

1 – зондуючий імпульс; 2 – імпульс від ближчого торця ОК 6;
3 – імпульс від дефекту; 4 – імпульс від дальнього торця 1 ОК

Оцінка впливу зазору між ЕМАП і поверхнею контрольованого виробу є важкою задачею. В роботі [2] вона була визначена для випадку, коли поверхня виробу плоска, в вигляді

$$K = 1 - 2g/G,$$

де g – зазор між поверхнею металу і площиною, на якій розміщена поверхня полюса джерела магнітного поля, поверненого до металу; G – ефективний розмір робочого полюса магніту.

Частіше за все цей коефіцієнт розраховується числовими методами. Проте для практики більш важливим є експериментальне визначення його впливу. Для цього було виготовлено джерело магнітного поля на основі постійного магніту Ne-Fe-B з формою полюса, яка повторювала форму поверхні стрижня. Результати вимірювання впливу зазору h та кута α перекосу датчика з різних сторін на величину амплітуди сигналу приведено на рис. 3 і рис.4.

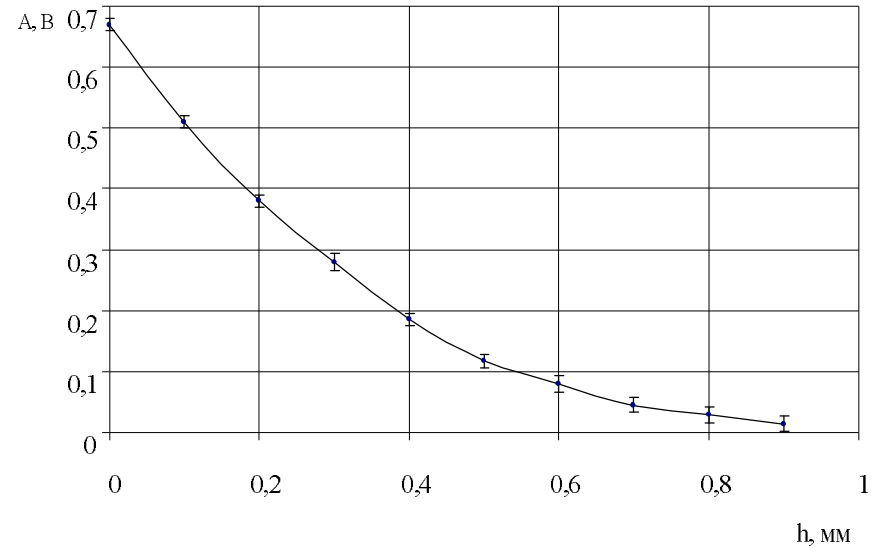


Рис. 3. Вплив величини зазору між полюсом магніту і поверхнею металу на амплітуду корисного сигналу ЕМАП

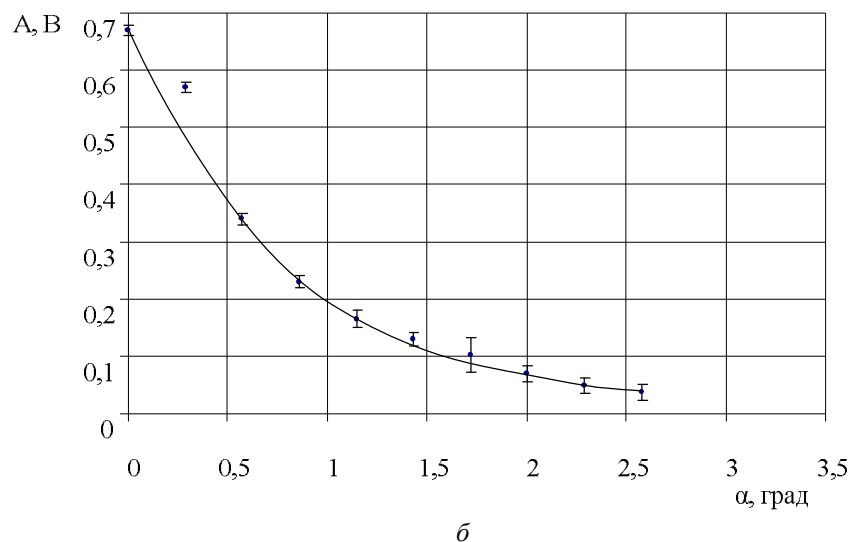
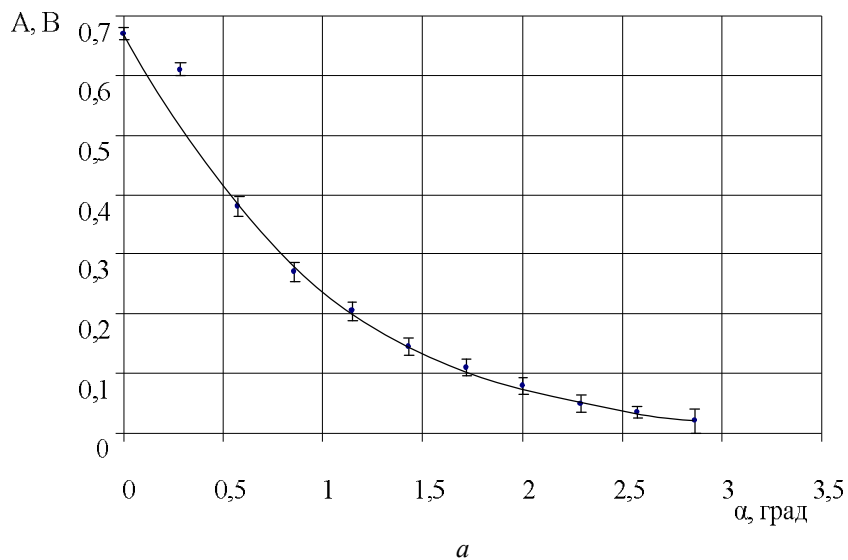


Рис. 4. Вплив величини кутів перекосу на амплітуду вихідного сигналу ЕМАП: а) – кути перекосу вздовж випромінювання-прийому з різних сторін ЕМАП; б) – кут перекосу поперек випромінювання-прийому ЕМАП

Аналіз результатів наведених на рис. 3 показує, що на 0,8 мм зазору

зміна амплітуди вихідного сигналу складає 0,6 В. В роботі [2] показано що вплив зазору на корисний сигнал в котушці ЕМА перетворювача, визначений тільки для плоского виробу, визначається виразом

$$Q = F(R)\exp(-4\pi h/r),$$

де $F(R)$ – коефіцієнт, який враховує форму індуктора перетворювача; h – зазор між індуктором і металом; r – ефективний розмір індуктора.

Тобто наведені експериментальні дані якісно співпадають з теоретичними результатами інших авторів [1-2].

З даних рис.4 можна зробити висновок, що при куті перекосу на 0,3 град, амплітуда сигналу змінюється на 0,1 В.

Амплітуда інформаційного сигналу повинна перевищувати завади в 2 рази і більше Отже допустимі зміни для зазору не повинні перевищувати 0,8 мм, а для кутів перекосу ЕМАП приблизно 2 град. Тому слід обов'язково стабілізувати зазор та перекоси датчика і підтримувати ці величини постійними за допомогою механічних систем.

Суттєве значення для забезпечення чутливості контролю мають апаратні характеристики дефектоскопу. На рис. 5-рис. 8 наведені дані при контролі феромагнітних стрижнів від напруги, струму, тривалості імпульсів в пакеті та частоти заповнення, які надходять на перетворювач з ГЗІ.

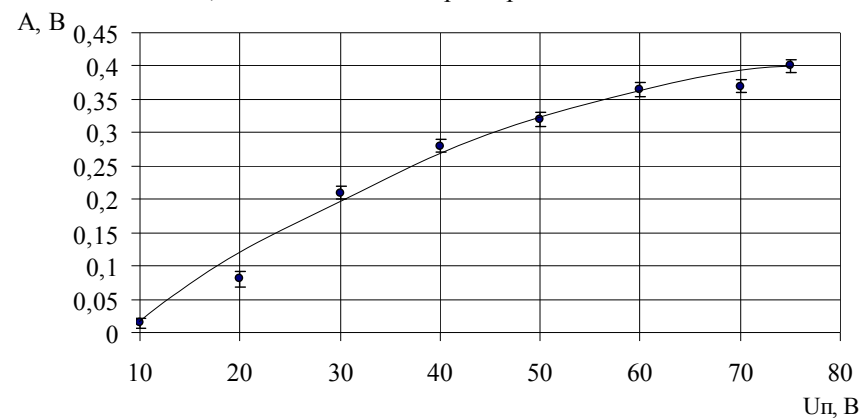


Рис. 5. Залежність амплітуди прийнятого сигналу від величини напруги живлення вихідного каскаду ГЗІ

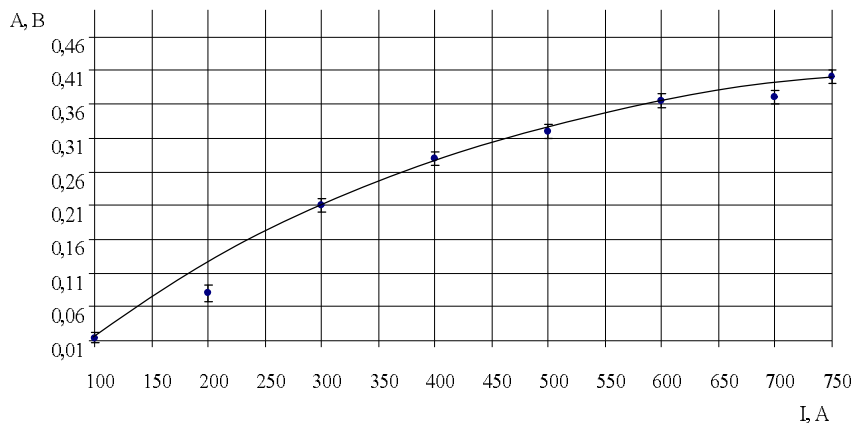


Рис. 6. Залежність амплітуди прийнятого сигналу від величини струму в індукторі ЕМАП

З даних рис. 5, рис.6 можливо зробити висновок, що при зміні напруги джерела живлення від 10 до 75 В та струму в котушці ЕМАП від 100 до 750 А (напруга на індукторі ЕМАП досягала 1,5 кВ), амплітуда прийнятого сигналу змінюється від 0,01 до 0,4 В. Максимум амплітуди прийнятого сигналу $A = 0,4$ В досягається при напрузі джерела живлення $U = 75$ В та величині струму в ЕМАП $I = 750$ А, тобто при їх максимальних значеннях. Проте задавати більшу напругу та струм для збільшення амплітуди імпульсу не слід із-за можливості пробоя ізоляції між витками високочастотного індуктора ЕМАП.

Окрім того, з даних рис.6 впливає нелінійна залежність амплітуди прийнятого сигналу від струму в індукторі перетворювача. В той же час з в теоретичних роботах [3] показано, що така залежність повинна бути лінійна. В наступних роботах необхідно дослідити встановлену невідповідність.

З наведених на рис.7 даних можна зробити висновок про встановлення тривалості імпульсів живлення ЕМАП не менше 3 періодів заповнення пакету. Така вимога обумовлена необхідністю розкачати коливальний контур ЕМАП. Більша тривалість не приводить до збільшення амплітуди корисного сигналу. А подальше зменшення амплітуди прийнятого імпульсу при збільшенні тривалості імпульсу обумовлене падінням напруги джерела живлення вихідного каскаду ГЗІ. Таким чином, доцільно встановлювати тривалість зонduючого імпульсу рівним 3 періодам заповнення пакету для даного ЕМАП.

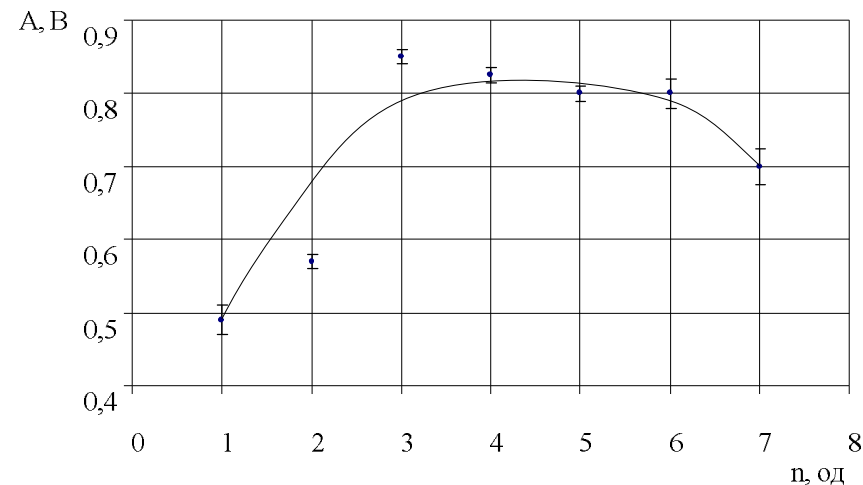


Рис. 7. Залежність амплітуди прийнятого сигналу від тривалості імпульсів (кількості n періодів коливань в пакеті), яким живиться ЕМАП

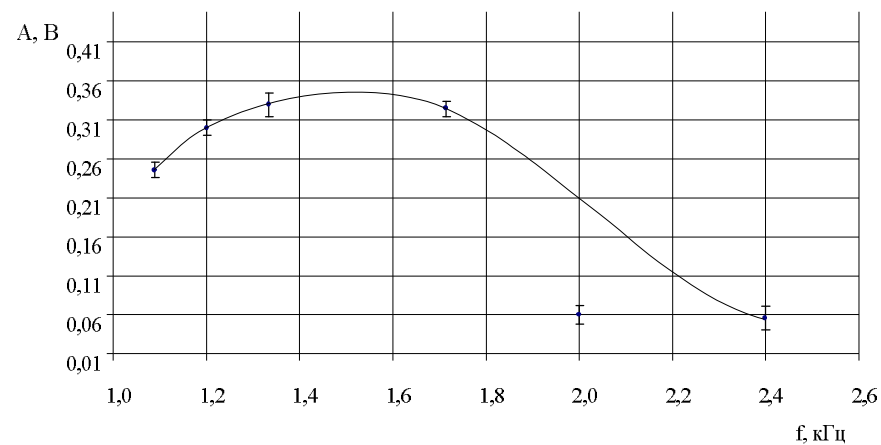


Рис. 8. Залежність амплітуди прийнятого сигналу від частоти заповнення зонduючого пакету

Результати досліджень наведені на рис. 8 показують, що для електричного тракту розробленого макету з врахуванням смуги пропускання системи блоків ГЗІ-ЕМАП-ПУ максимальний прийнятий сигнал складає

1,5 МГц. Допустимий діапазон встановлення частоти заповнення може знаходитися в діапазоні 1,2...1,9 МГц.

Висновки.

1. Експериментально доказано ефективність високопродуктивного виявлення дефектів довгомірних виробів з використанням електромагнітно-акустичних перетворювачів

2. Розроблено стенд для контролю довгомірних сталених виробів циліндричної форми з перехідним розміром діаметру від 10 до 50 мм, в складі якого використано ЕМАП з «зигзагоподібним» височастотним індуктором, який дозволяє вводити акустичні імпульси під кутом до поверхні.

3. Визначено вплив основних факторів, які визначають роботу ЕМА дефектоскопу. Показано, що зазор між ЕМАП і поверхнею контрольованого ОК повинен бути мінімальним, а його зміни не повинні перевищувати 0,1 мм. Величини перекосів ЕМАП відносно поверхні ОК не повинні бути більше 0,3 градусів.

Напруга на ЕМАП і струм живлення повинні бути максимальними, але мінімальними з точки зору відсутності електричного пробою. Так для розробленого макету перетворювача напруга на індукторі ЕМАП може досягати 1,5 кВ, а струм – до 750 А.

При встановленій оптимальній частоті заповнення пакетів $1,5 \pm 0,3$ МГц тривалість імпульсів живлення повинна складати 3+3 періоди частоти заповнення.

Список літератури: 1. 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. 2. Сучков Г.М. Развитие теории и практики створення приладів для електромагнітно-акустичного контролю металовиробів. Дис. на зд. наукового ступеня д.т.н. 2005. Харків. НТУ «ХП». 521 с. 3. Ермолов И. Н. Теория и практика ультразвукового контроля. - М: Машиностроение, 1981. – 240 с.

УДК 543.271.3

Н.Д. БАЗАРОВ, студ., ДВНЗ «ДонНТУ»,
В.П. ТАРАСЮК, к-т техн. наук, доц., ДВНЗ «ДонНТУ»,

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ В'ЯЗКОСТІ РОЗПЛАВЛЕНОГО МЕТАЛУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ

У роботі наведено результати досліджень можливості використання розробленої математичної моделі для акустичного аналізу пластичних властивостей розплавленого металу. Він дозволяє значно скоротити часові та матеріальні витрати при контролі якості виготовлення кінцевих виробів.

In the work the results of researches possibility using the developed mathematical model for the method of acoustic analysis for plastic properties of fusions metals is explored. That will allow to shorten temporal and material expenses on the control of quality in the conditions of industrial production substantially.

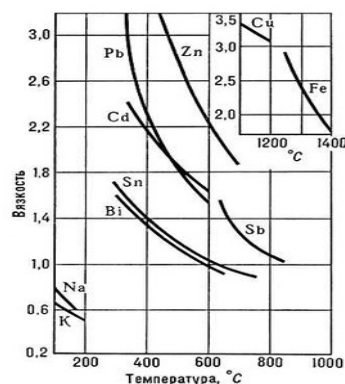
Загальна постановка завдання. При виготовленні суцільнолитих виробів складної форми із сталі і її сплавів, а також в процесі безперервного розливання стали важливим завданням є контроль в'язкості сталі, що знаходиться в розплавленому стані. Це пов'язаним з контролем досягнення сплавом необхідної рідкотекучості для: рівномірного заповнення форми при мінімальних витратах енергоносіїв на розігрівання сплаву у разі суцільнолитих виробів; уникнення передчасного зносу кристалізатора, що випробовує тиск при контакті з потоком розплавленого металу у разі безперервного розливання сталі [1-2]. Найбільш поширеними на даний момент методами такого контролю є ротаційна і вібраційна віскозиметрія [6]. Але використання вказаних методів в описаній ситуації пов'язане з рядом труднощів, основним з яких є безпосередній контакт чутливого елемента віскозиметрів з агресивним середовищем, ведучий до його передчасного зносу. Тому актуальною проблемою є розробка безконтактного методу експрес - контролю в'язкості.

Постановка завдання дослідження. Необхідно дослідити можливість безконтактного експрес - контролю в'язкості розплаву за допомогою аналізу швидкості розповсюдження сдвігових ультразвукових хвиль. Подовжні ультразвукові хвилі характеризують пружні властивості рідин, їх структуру і сили міжмолекулярного відштовхування, сдвігові – в'язкі властивості, і як наслідок, сили міжмолекулярного тяжіння. І якщо методи визначення швидкості розповсюдження подовжніх ультразвукових хвиль в рідині досить добре розроблені і знаходять широке застосування в практиці ультразвукового контролю стану рідких середовищ, то сдвігові хвилі практично не використовуються із-за загасання в рідині на відстанях порядку

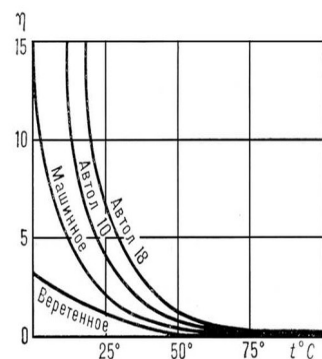
довжини хвилі [3-6]. Тому значний інтерес представляє розробка методів вимірювання швидкості розповсюдження поперечних хвиль.

Рішення задачі і результати досліджень. Розплавлені метали мають в'язкість того ж порядку, що і звичайні рідини (див. мал. 1) [3-6].

У рідинах, де відстані між молекулами багато менше, ніж в газах, в'язкість обумовлена, насамперед, міжмолекулярною взаємодією, що обмежує рухливість молекул. У рідині молекула може проникнути в сусідній шар лише при освіті в ній порожнини, достатньої для перескакування туди молекули. На утворення порожнини (на «спушення» рідини) витрачається так звана енергія активації в'язкої течії. Енергія активації зменшується із зростанням температури і пониженням тиску. У цьому полягає одна з причин різкого зниження в'язкості рідин з підвищенням температури (див. мал. 2) і зростання її при високому тиску. При підвищенні тиску до декількох тис. атмосфер η збільшується в десятки і сотні разів.



Мал. 1. В'язкості деяких розплавлених металів в спз



Мал. 2. - Вимірювання в'язкості деяких змащувальних масел залежно від температури (η дана в пз)

У основі пропонованого способу експрес-контролю лежить вимір акустичних характеристик вихідної сировини (коефіцієнт поглинання, швидкість ультразвуку) методами молекулярної акустики, розділу фізичної акустики, в якому властивості речовини і кінетика молекулярних процесів досліджуються акустичними методами.

За швидкістю звуку можна визначити такі характеристики речовини, як стисливість, відношення теплоємностей, пружні властивості твердого тіла та ін., а по поглинанню звуку — значення сдвигової і об'ємної в'язкості, час релаксації і ін. У рідині, обчислюючи швидкість звуку на підставі тієї або іншої моделі рідини і порівнюючи результати розрахунку з дослідними даними, у ряді випадків можна оцінити правдоподібність використовуваної моделі і визначити енергію взаємодії молекул. На швидкість звуку впливають

особливості молекулярної структури, сили міжмолекулярної взаємодії і щільність упаковки молекул. Таким чином, вимірюючи швидкість звуку і поглинання залежно від частоти і визначаючи час релаксації, можна судити про характер молекулярних процесів і про те, який з цих процесів вносить основний внесок в релаксацію.

У молекулярній акустиці для досліджень зазвичай застосовується ультразвук. Це пов'язано як з високим розвитком техніки випромінювання та прийому ультразвуку і з великою точністю вимірювань в цьому діапазоні частот, так і з тим, що робота на нижчих частотах зажадала б дуже великих об'ємів досліджуваної речовини, а на вищих частотах поглинання звуку стає таким великим, що багато акустичних методів виявляються непридатними.

Однією з суттєвих переваг ультразвукових коливань високої частоти перед звуковими є те, що їх можна посилати у вигляді малих пучків променів, що розходяться. Це забезпечує можливість спрямованого випромінювання і прийому. Відомо, що чим більше діаметр випромінюючої п'єзопластини в порівнянні з довжиною хвилі, тим вище спрямованість випромінювання. Наприклад, для забезпечення на частоті 1 Мгц випромінювання у вигляді пучка променів з кутом розбіжності що не перевищує 10° ($0,2$ рад) досить вибрати діаметр п'єзоелементу рівним 20мм.

Частоти вживаного ультразвуку в рідинах і твердих тілах — в діапазоні 10^5 — 10^8 Гц. Поглинання звуку, перетворення енергії звукової хвилі в інші види енергії, і зокрема в тепло, характеризується коефіцієнтом поглинання α , який визначається як величина, зворотна відстані, на якій амплітуда звукової хвилі зменшується в $e = 2,718$ разів, а виражається в см^{-1} тобто в Непері на см або ж в децибелах на м ($1 \text{ дб/м} = 1,15 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$). Поглинання звуку характеризують також коефіцієнтом втрат

$$e = \alpha l/p,$$

(де l — довжина хвилі звуку) або добротністю $Q = 1/e$. Величина $\alpha \cdot l$ називається логарифмічним декрементом загасання. При розповсюдженні звуку в середовищі, що володіє, в'язкістю і теплопровідністю

$$\alpha = \frac{\omega^2}{2 \cdot \rho \cdot \tilde{n}^3} \left[\frac{4}{3} \cdot \eta + \xi + \chi \cdot \left(\frac{1}{\tilde{N}_v} - \frac{1}{\tilde{N}_\rho} \right) \right] \quad (1)$$

де ρ — щільність середовища, C — швидкість звуку в ній, ω — кругова частота звукової хвилі, η і ξ — коефіцієнт сдвигової і об'ємної в'язкості відповідно, χ — коефіцієнт теплопровідності, C_p і C_v — теплоємності середовища при постійному тиску і об'ємі відповідно. Якщо жоден з коефіцієнтів η , ξ і χ не залежить від частоти, що часто виконується на практиці, то $\alpha \sim \omega^2$. Якщо при проходженні звуку порушується рівноважний

стан середовища, поглинання звуку виявляється значно більшим, ніж визначуване по формулі (1). Таке поглинання називається релаксаційним і описується формулою:

$$\alpha = \frac{1}{2 \cdot C_0^3} \cdot \frac{\omega^2 \cdot \tau \cdot (C_\omega^2 - C_0^2)}{1 + \omega^2 \cdot \tau^2}, \quad (2)$$

де τ — час релаксації, C_0 і C_ω — швидкості звуку при $\omega t \ll 1$ і при $\omega t > 1$ відповідно. В цьому випадку поглинання звуку супроводиться дисперсією звуку. Величина a/f^2 , де $f = 1/2\pi$, є характеристикою речовини, що визначає поглинання звуку. Вона, як правило, в рідинах менше, ніж в газах, а в твердих тілах для подовжніх хвиль менше, ніж в рідинах.

У рідинах поглинання звуку в основному визначається в'язкістю, а внесок теплопровідності малий і його можна не враховувати. У більшості рідин для поглинання звуку істотної об'ємна в'язкість і релаксаційні процеси. Частота релаксації в рідинах, тобто величина $\rho \cdot \omega = 1/t$, як правило, дуже велика і область релаксації виявляється лежачою в діапазоні високих ультразвукових і гіперзвукових частот. Коефіцієнт поглинання звуку зазвичай сильно залежить від температури і від наявності домішок.

Вимірювання швидкості ультразвуку в більшості випадків зводиться до вимірювання часу пробігу τ акустичного імпульсу в досліджуваному зразку і вимірювання довжини акустичного шляху l . В цьому випадку швидкість розповсюдження ультразвукових хвиль:

$$c = l/\tau, \quad (3)$$

Вимірювання коефіцієнта затухання ультразвуку в рідинах і твердих тілах може проводитися при імпульсних і безперервних ультразвукових коливаннях. У разі імпульсних коливань прийом ультразвукової хвилі може здійснюватися як окремим приймачем, так і самим випромінювачем після віддзеркалення імпульсу від відбивача. При цьому коефіцієнт затухання визначається по формулі:

$$\alpha = \frac{1}{h} \cdot \ln \frac{A_1}{A_2}, \quad (4)$$

де h — товщина зразка, A_1 , A_2 — амплітуди випромінювача і приймача відповідно.

У основі залежності акустичних параметрів (затухання і швидкість ультразвуку) від в'язкопружних властивостей (модуль Юнга, ефективна в'язкість), відповідно до феноменологічної теорії, може бути використана модель в'язкопружного тіла з довільним числом релаксаційних

максвелловських механізмів. Відповідно до цієї моделі вираз для комплексного модуля пружності має вигляд [4]:

$$\begin{aligned} \tilde{E} &= E(\omega) + i\omega\eta(\omega) = E_0 + i\omega\eta_\infty + \sum_{j=1}^n \frac{i\omega\eta_j}{1 + i\omega\tau_j} = \\ &= \left(E_0 + \sum_{j=1}^n \frac{E_j \omega^2 \tau_j^2}{1 + \omega^2 \tau_j^2} \right) + i\omega \left(\eta_\infty + \sum_{j=1}^n \frac{\eta_j}{1 + \omega^2 \tau_j^2} \right), \end{aligned} \quad (5)$$

де E_0 — рівноважний або статичний модуль, що характеризує чисто пружні властивості полімерів; η_∞ — нерелаксуюча в'язкість (для випадку нескінченно швидкій деформації); η_j, τ_j, E_j — в'язкість, часи релаксації і модулі пружності різних релаксаційних механізмів; ω — частота акустичних коливань; n — число релаксаційних механізмів.

Також відомо [4], що вирази для c та (5), можуть бути записані у вигляді:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \sqrt{\frac{2(1 + \omega^2 r^2) \left(\sqrt{1 + \omega^2 r^2} - 1 \right)}{\omega^2 r^2}} \quad (6)$$

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\rho}{E}} \sqrt{\frac{\sqrt{1 + \omega^2 r^2} - 1}{2(1 + \omega^2 r^2)}}. \quad (7)$$

З урахуванням виразів (5), (6), (7) ми можемо отримати залежності для E і η [4]:

$$E(\omega) = \rho c^2 \frac{1 - (\alpha c/\omega)^2}{\left[1 + (\alpha c/\omega)^2 \right]^2}, \quad (8)$$

$$\eta(\omega) = \frac{2\rho c^2}{\omega} \frac{\alpha c/\omega}{\left[1 + (\alpha c/\omega)^2 \right]^2}. \quad (9)$$

Розглянемо в'язку складову. Ефективна в'язкість є сумою двох складових [4]:

$$\eta = \frac{4}{3} \eta' + \eta'', \quad (10)$$

де η' — зсувна в'язкість, пов'язує швидкість деформації зсуву з виникаючою тангенціальною напруженою [4], обумовлена механізмом в'язкого тертя ланок макромолекул.

η'' — об'ємна в'язкість, визначає диссипативні сили, що виникають при всебічному рівномірному стисненні або розширенні [4].

Т. ч. використання залежностей (9) і (10) дозволяє, знаючи акустичні параметри матеріалу, визначити в'язку складову.

Дослідженню впливу молекулярної маси і інших параметрів ММР на течію розчинів, зокрема на зсувну в'язкість, присвячено достатньо багато робіт [6].

За основу визначення молекулярної маси по в'язкості розчинів і розплавів полімерів, як правило, береться рівняння Марка-куна-хувінка [7].

$$\eta = K_1 \cdot MM^{K_2}, \quad (11)$$

де K_1, K_2 – const;

MM – молекулярна вага зразку.

Це рівняння зв'язує молекулярну вагу (ММ) з характеристичною в'язкістю без урахування розгалуженості, зшивання і дисперсності полімеру.

Також існують дослідження впливу ММ і параметрів молекулярно масового розподілу (ММР) на такі технологічні характеристики, як в'язкість по Муні (Mh), пластичність, жорсткість і ін.[8,9]. В'язкість по Муні без урахування розгалуженості і зшивання, як функція ММ, може бути описана наступним рівнянням.

$$Mh = m_1 \cdot MM_v^{m_2} \cdot K_f^{m_3}, \quad (12)$$

де m_1, m_2, m_3 – const;

MM_v – молекулярна вага, визначувана методами віскозиметрії.

K_f – коефіцієнт полідисперсності;

Найчастіше, його впливом можна нехтувати, тоді формула (12) спроститься до вигляду:

$$Mh = m_1 \cdot MM_v^{m_2}, \quad (13)$$

Т. ч., виражаючи ММ з (11), підставляючи в (13) і замінюючи η на (9) можна отримати залежність, що об'єднує модель акустичних властивостей розплаву (α, C) і його в'язкопружних характеристик (ефективна в'язкість η і модуль пружності E) з моделлю пластоеластичних властивостей розплаву і що дозволяє зв'язати в'язкість по Муні (Mh) з акустичними властивостями:

$$Mh = m_1 \left(\frac{2\rho c^2}{K_1 \omega} \cdot \frac{\alpha c / \omega}{[1 + (\alpha c / \omega)^2]^{\frac{m_2}{K_2}}} \right) \quad (14)$$

введемо $Z_1 = m_1 \left(\frac{2}{K_1} \right)^{\frac{m_2}{K_2}}$ та $Z_2 = \frac{m_2}{K_2}$, отримаємо:

$$Mh = Z_1 \left(\rho \alpha c^3 / \omega^2 \left[1 + \left(\frac{\alpha c}{\omega} \right)^2 \right]^2 \right)^{Z_2} \quad (15)$$

де Z_1 і Z_2 – параметри моделі, індивідуальні для кожної марки сплаву.

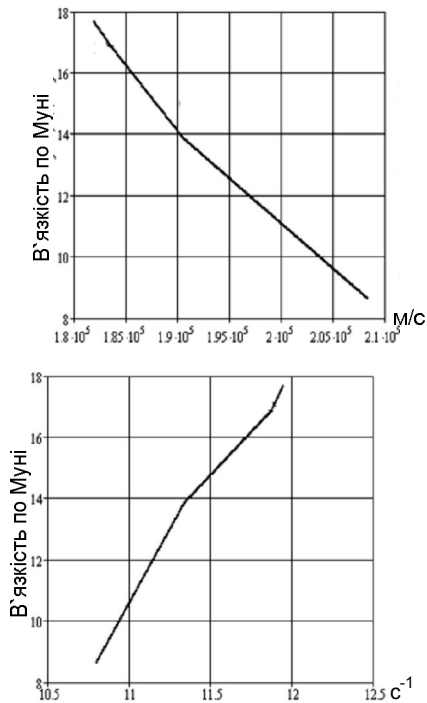
Для експериментальної перевірки отриманої математичної моделі пропонується принципова схема експериментальної установки для визначення параметрів залежності (15), яка є сукупністю апаратних засобів (генератор, цифровий осцилограф з виведенням даних на комп'ютер і п'єзокварцеві перетворювачі: випромінювач і приймач) (див. мал.3).



Мал. 3. Принципова схема експериментальної установки для оцінки параметрів математичної моделі (15)

Електричний імпульс подається генератором на випромінювач і перший канал цифрового осцилографа. Випромінювач перетворює електричний імпульс в механічні коливання, які після проходження через зразок перетворюються приймачем назад в електричні коливання і реєструються другим каналом цифрового осцилографа. Отримані дані необхідно обробляти за допомогою спеціального розробленого програмного модуля (ПМ).

Виникають передумови для розробки відповідного ПМ, що дозволяє визначити параметри пропонованої математичної моделі, а також розраховувати статистичні оцінки моделі: відносну погрішність, абсолютну погрішність і коефіцієнт парної кореляції. Криві залежності коефіцієнта загасання і швидкості ультразвука від в'язкості, побудовані з використанням розробленої моделі представлені на малюнку 4.



Мал. 4. Залежність коефіцієнта загасання і швидкості ультразвука від в'язкості

Висновки. Отримані залежності дозволяють зробити висновок про можливість використання розробленої математичної моделі як метод акустичного аналізу в'язких властивостей розплавів металів, що дозволить істотно скоротити тимчасові і матеріальні витрати на контролі якості в умовах промислового виробництва. Для розробки приладу експрес-контролю в'язкості розплавленого металу виникає завдання підтвердити модель експериментально і оцінити її адекватність.

Список літератури: 1. Б.С.Линчевський, Техніка металургійного експерименту, «Металургія», М., 1967, стор. 239. 2. С. Ст. Михайліков, С. Ст. Штенгельмейер, Р. С. Ершов, Изв. АН СРСР. Металургія і гірська справа №1, 1964. 3. А. М. Коваленко, І. А. Новохатський, Р. С. Ершов, А. До. Петров, Изв. АН СРСР. Метали № 6, 1969. 4. Резниковський, М.М., Лукомська, А.І. Механічні випробування каучуку і гуми. 2-е видавництво, перероб. і доп. М.: Хімія. 1968. - 500с. 5. Труелл Р., Ельбаум Ч., Чик Б. Ультразвукові методи у фізиці твердого тіла. М.: мир, 1972. 6. Бражників Н.І. Ультразвукові методи. 7. Фізичні і фізикохімічні методи контролю і складу властивостей речовини під загальною редакцією академіка АН Киргизькою РСР Н. Н. Шуміловського. М.-Л., видавництво «Енергія». 1965. - 248 с.

Ж.А. КИРЕЕВА, к-т. техн. наук; доц. НТУ «ХПИ»
В.А. КИРЕЕВ, к-т. техн. наук; доц. НАКУ «ХАИ»
С.П. СИЗОНОВ, студент НАКУ «ХАИ»

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ УЗЛОВ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Розроблена стратегія пошуку несправності, заснована на методі активізації шляхів. Приведена методика та алгоритм діагностування помилок монтажу та катастрофічних відказів цифрових вузлів радіоелектронної апаратури реалізовані на конкретному прикладі.

Devised a strategy for troubleshooting, based on the method of activization ways. The above method and algorithm of diagnosing errors mounting and catastrophic failure of digital junctions radio-electronic equipment implemented in a specific example.

Введение. Объектами диагностирования являются печатные узлы радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). Печатные узлы (ПУ) – представляют собой плату со смонтированными на ней компонентами (аналоговыми и цифровыми). Цифровые элементы с каждым годом приобретают все больший удельный вес в РЭА. Поэтому контролю и диагностированию цифровых компонентов в составе печатных узлов РЭА уделяется большое внимание.

Различают три вида дефектов печатных узлов, содержащих цифровые интегральные схемы:

- возникающие в результате неправильной сборки;
- обусловленные внутренними неисправностями;
- возникающие в результате взаимодействия взаимного влияния устройств.

Основная часть. Рассмотрим проблему контроля дефектов сборки: короткие замыкания, обрывы монтажа, неправильную установку, неправильную ориентацию цифровых компонентов.

На первом этапе проверяется правильность топологии печатного монтажа. Определяется отсутствие обрывов и коротких замыканий между проводниками [1]. Затем при отключенном напряжении питания проверяется соответствие установленных компонентов и правильность их ориентации. Проверка проводится при малых значениях тестирующих сигналов, обеспечивающих неповрежденный контроль. При отсутствии дефектов переходим ко второму этапу.

На этом этапе проверяется отсутствие подачи питания к цифровой интегральной схеме; искажение логических уровней на входах; фиксированное состояние «логическая единица»; фиксированное состояние «логический нуль»; отсутствие перехода в третье высокоимпеданное логическое состояние на шинах. Диагностирование основано на методе

активизации путей [2]. При этом используется понятие ранжирования проверяемых компонентов. К цифровым интегральным схемам первого ранга относятся такие, все входы которых соединены с контактами разъема и не имеют связей с выходами других микросхем. К компонентам второго ранга – такие, входы которых связаны с входными контактами разъема и выходами микросхем первого ранга и т.д.

Рассмотрим пример диагностирования дефектов в схеме, изображенной на рис.1.

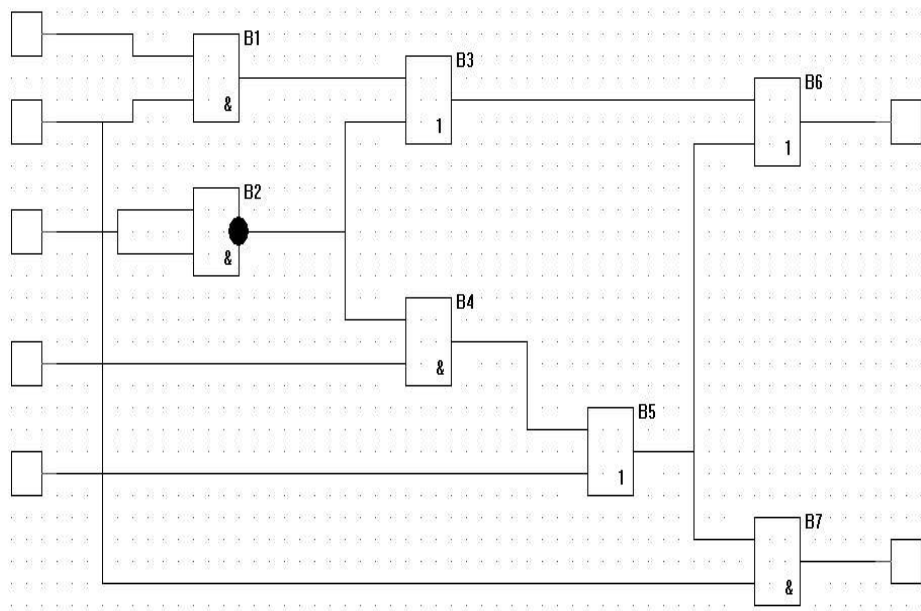


Рис. 1.

В этой схеме элементы B1 и B2 имеют первый ранг, элементы B3, B4 – второй, B5 – третий, а B6 и B7 – четвертый ранг.

Сначала подаем нулевые логические уровни на входы микросхем B1 и B2. После их проверки и устранения неисправностей осуществляется переход к проверке элементов второго ранга. Процесс повторяется до тех пор, пока не будут проверены все элементы.

На рис. 2(а и б) приводится применяемый в программе тестовый набор.

Задача состоит в определении таких состояний входных портов, которые приведут к требуемым состояниям входов выбранного элемента схемы.

На рис. 3 приводится алгоритм программы диагностирования дефектов цифровых узлов радиоэлектронной аппаратуры.

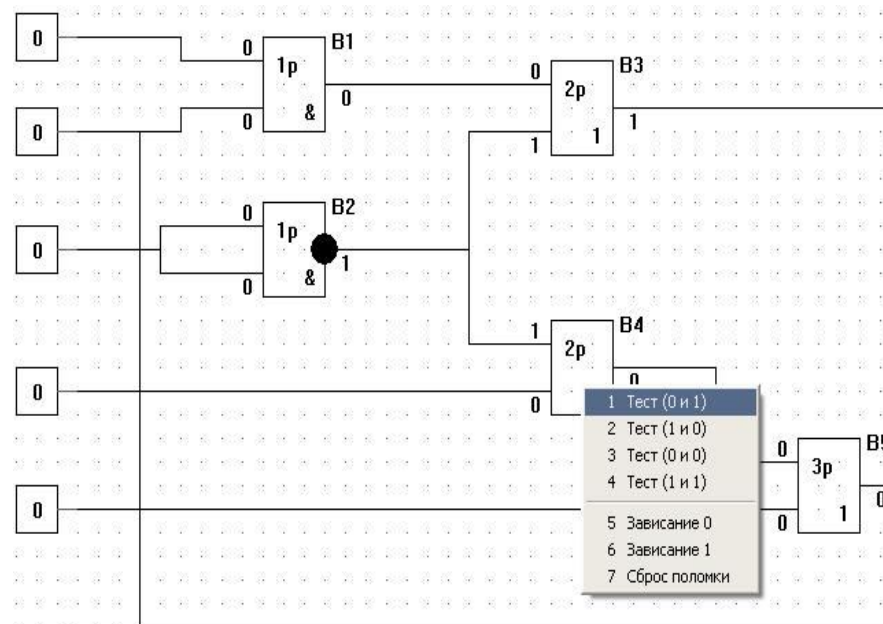


Рис. 2, а

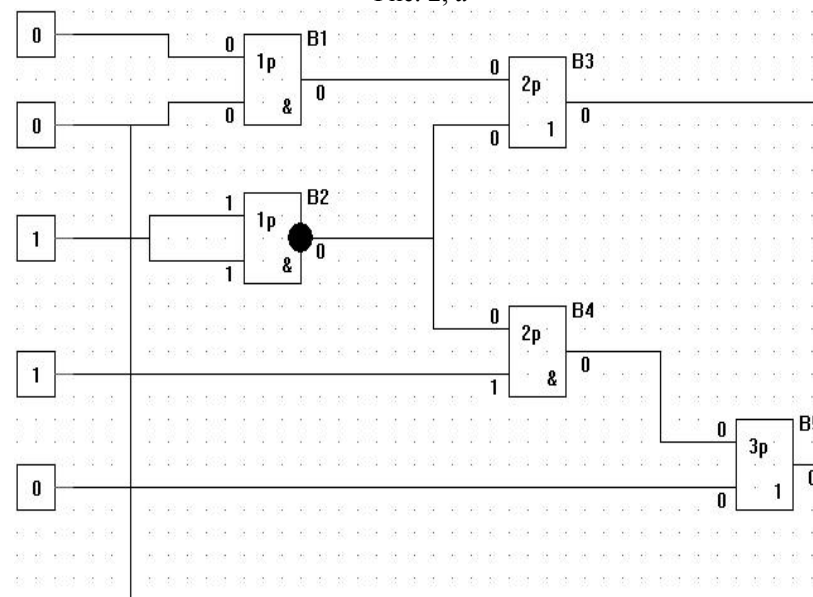


Рис. 2, б

Ж.А. КИРЕЕВА, к-т. техн. наук; доц. НТУ «ХПИ»
В.А. КИРЕЕВ, к-т. техн. наук; доц. НАКУ «ХАИ»
М.А. КРАВЧЕНКО, студент НАКУ «ХАИ»

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ И ПОСТРОЕНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Розглянуто спосіб аналізу стійкості лінійних систем по рівняннях змінних стану без побудови характеристичного полінома. Приводиться алгоритм програми побудови перехідних процесів, реалізований на конкретному прикладі.

The method of the analysis of linear systems on managements of variables of a condition without construction of a characteristic polynom is considered. The algorithm of the program of construction of the transients, realized on a concrete example is resulted.

Введение. Устойчивость систем управления важнейшее условие их работоспособности. Она обеспечивает принципиальную возможность прихода системы в некоторое установившееся состояния при любом внешнем возмущении. Необходимо, чтобы переходные процессы в системе быстро затухали, а возможные колебания вокруг установившегося состояния были невелики.

Известны ряд критериев для определения устойчивости работы системы управления. Особый интерес представляют методы, ориентированные на использование ЭВМ.

Основная часть. Динамика систем управления описывается дифференциальными уравнениями [1]

$$\dot{x} = F(t) \cdot x + G(t) \cdot w(t) + C(t) \cdot u(t), \quad (1)$$

где $x(t)$ - n - вектор, называемый состоянием системы;

$w(t)$ - p - вектор возмущений;

$u(t)$ - r - вектор управлений;

$F(t)$ - динамическая матрица системы размером $n \times n$;

$G(t)$ - переходная матрица возмущения размером $n \times p$;

$C(t)$ - переходная матрица управления размером $n \times r$;

Эти векторы и матрицы являются непрерывными функциями времени.

Рассмотрим способ анализа устойчивости линейных систем по уравнениям переменных состояния (1) без построения характеристического полинома. Основы метода функционально-преобразованных матриц были предложены Зубовым В.И.[2]. В результате был сформулирован критерий: для того чтобы система (1) была асимптотически устойчива, необходимо и достаточно, чтобы для матрицы

$$B = E - 2(E - F)^{-1} \quad (2)$$

Параметры функции:

1. Указатель на элемент - p
2. Требуемое значение сигнала на входе 1 - u_1
3. Требуемое значение сигнала на входе 2 - u_2



Рис. 3.

Программа позволяет моделировать отказы различных элементов в приведенном на рис.1 электронном устройстве и последующем обнаружении этого дефекта.

Исключение дефектов, обнаруженных на данной стадии диагностирования, значительно упрощает подготовку дальнейших программ и уменьшает возможность возникновения дополнительных отказов при подключении цифровых интегральных схем к источникам питания.

Выводы:

1. Разработанная методика и программа диагностирования цифровых узлов РЭА позволяет обнаруживать дефекты на втором этапе контроля.
2. Потребуется дальнейшая функциональная проверка при номинальных значениях напряжения питания, позволяющая обнаружить дефекты, вызванные взаимным влиянием компонентов.

Список литературы: 1. Грицай В.А., Киреев В.А., Киреева Ж.А. Контроль качества печатных плат. Материалы международной научно-практической конференции. Харьков.2007, с. 58-62.
 2. Лихтицдер Б.Я. Внутрисхемное диагностирование РЭА. Киев. Техника, 1988.-168с.

выполнялось условие

$$B^k \rightarrow 0 \text{ при } k \rightarrow \infty,$$

где 0 – нулевая матрица, E – единичная матрица.

Необходимо только, чтобы $|E - F| \neq 0$.

Можно избежать обращения матрицы в выражении (2), применяя матрицу

$$\bar{B} = E + F/R \quad (3)$$

и считая, что все собственные числа матрицы F находятся внутри круга радиуса R в левой полуплоскости комплексного переменного p. Тогда должно выполняться условие

$$B^k = 0 \text{ при } k \rightarrow \infty. \quad (4)$$

Поскольку решение однородной системы $\dot{x} = F \cdot x(t)$ имеет вид

$$x(t) = e^{F \cdot t} \cdot x_0,$$

то для соотношения (3) рассмотрим степенной ряд

$$e^{F/R} = E + \frac{F}{R} + \frac{F^2}{2!R^2} + \frac{F^3}{3!R^3} + \dots + \frac{F^m}{m!R^m} = D_m \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (5)$$

Алгоритм построения процессов с равномерным шагом h имеет вид

$$x_{k+1} = D_m \cdot x_k, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (6)$$

Функционально-преобразованные матрицы можно применять не только для анализа устойчивости, но и для построения переходных процессов при определённых начальных условиях. Для нестационарных систем функционально-преобразованная матрица перестраивается на каждом шаге, поэтому алгоритм построения переходных процессов в однородной нестационарной системе принимает вид

$$x_{k+1} = D_m(kh) \cdot x_k. \quad (7)$$

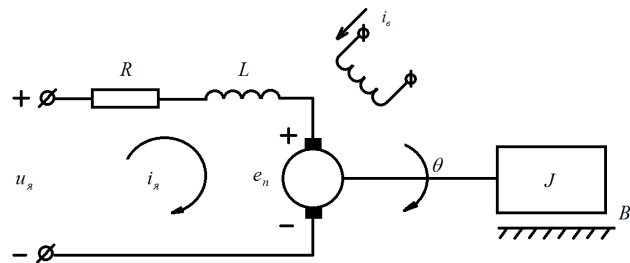


Рис. 1.

Рассмотрим пример, иллюстрирующий применение этого алгоритма. На рис.1 приведена схема электродвигателя постоянного тока с управлением в цепи якоря. Задача заключается в регулировании углового положения θ и угловой скорости $\dot{\theta}$ выходного вала с помощью изменения напряжения якоря $U_я$. В линеаризованной модели двигателя: J – инерционная нагрузка; B – коэффициент вязкого трения; R – сопротивление цепи якоря; L – индуктивность цепи якоря; $i_я$ – ток якоря; e_n – противо-Э.Д.С. якоря; $i_г = const$ – ток возбуждения.

Допустим, что выходной момент, создаваемый двигателем, пропорционален току якоря с коэффициентом пропорциональности K_m ; а e_n – пропорциональна угловой скорости $e_n = K_n \dot{\theta}$. Тогда согласно второму закону Ньютона имеем:

$$J\ddot{\theta} = -B\dot{\theta} + K_m i_я. \quad (8)$$

Для цепи якоря запишем уравнения Кирхгофа

$$L \frac{di_я}{dt} + Ri_я + e_n = u_я. \quad (9)$$

Число переменных состояния определяется порядком системы дифференциальных уравнений. Выберем три величины:

$X_1 = \theta, X_2 = \dot{\theta}, X_3 = i_я$. Решая уравнения (8) и (9) получаем:

$$\begin{aligned} \ddot{\theta} &= -\frac{B}{J}\dot{\theta} + \frac{K_m}{J}i_я; \\ \frac{di_я}{dt} &= -\frac{R}{L}i_я - \frac{K_n}{L}\dot{\theta} + \frac{1}{L}u_я. \end{aligned} \quad (10)$$

Обозначим $f_1 = -\frac{B}{J}; f_2 = \frac{K_m}{J}; f_3 = -\frac{K_n}{L}; f_4 = -\frac{R}{L}; c = \frac{1}{L};$

$u_я$ - входная управляющая переменная, поэтому $u_я = u(t)$.

Теперь уравнения (8) и (9) можно представить в виде.

$$\begin{aligned} \dot{X}_1 &= X_2 \\ \dot{X}_2 &= f_1 X_2 + f_2 X_3 \\ \dot{X}_3 &= f_3 X_2 + f_4 X_3 + cu(t) \end{aligned} \quad (11)$$

или в матрично-векторной форме

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & f_1 & f_2 \\ 0 & f_3 & f_4 \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ c \end{bmatrix} u(t) \quad (12)$$

Матрица F и вектор начальных условий $|X_0|$ имеют вид:

$$F = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & f_1 & f_2 \\ 0 & f_3 & f_4 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -0.01 & 1 \\ 0 & -100 & -10 \end{vmatrix}, \quad X_0 = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ c \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 100 \end{vmatrix}.$$

Запишем уравнение (5) в виде:

$$D_4 = E + Fh + \frac{(Fh)^2}{2!} + \frac{(Fh)^3}{3!} + \frac{(Fh)^4}{4!} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \\ + 0.01 \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -0.01 & 1 \\ 0 & -100 & -10 \end{bmatrix} + \frac{0.0001}{2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.001 \\ 0 & -0.1 & -0.01 \\ 0 & 1.001 & 0 \end{bmatrix} + \dots \quad (14)$$

Результаты вычислений для различных моментов времени $X_1(t), X_2(t), X_3(t)$ представлены на рис. 2 (а,б,в).

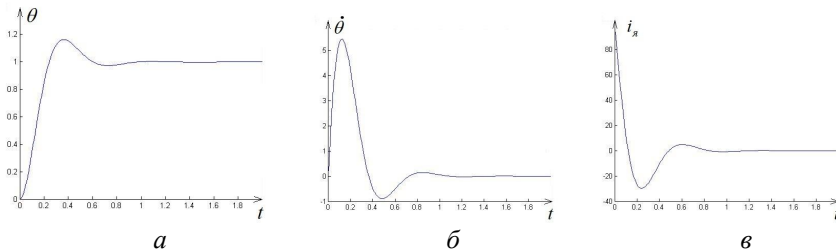


Рис. 2.

Вывод

Рассмотренный способ анализа устойчивости линейных систем по уравнениям переменных состояния с использованием ЭВМ эффективен и его применение целесообразно.

Список литературы: 1. Барышев И.В., Киреев В.А. Системы управления. – Учеб. пособие. – Харьков: Нац. аэрокосмический ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2001. – 141 с. 2. Теория автоматического управления. Ч.1. Под. ред. А.А. Воронова. – М.: Высш. Шк., 1986. – 387 с.

Л.В. ГЛЕБОВА, асп., НТУ "ХПИ"

И.В. ТЮПА, к-т техн. наук, докторант НТУ «ХПИ»

А.Л. ГРИГОРЬЕВ, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПИ"

С.Н. ГЛОБА, к-т техн. наук, доц., НТУ "ХПИ"

ВОЗБУЖДЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ЕМКОСТНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ

У даній роботі запропоновано теоретичну модель збудження акустичних коливань за допомогою ємнісного перетворювача. Отримано графічні залежності тиску для різних співвідношень поляризуючої та змінної напруги, надано рівняння зміщення акустичної хвилі в поверхневому шарі об'єкту контролю та побудовані відповідні залежності.

In this work the theoretical model of excitation of acoustic vibrations is offered by a capacity transformer. Graphic dependences of pressure are got for different correlations of polarizing and variable tension, equalization of displacement of acoustic wave is given in the superficial layer of control object and the proper dependences are built.

Введение. Наряду с известными и изученными способами ультразвукового неразрушающего контроля с использованием в качестве источника возбуждения и приема акустических колебаний пьезоэлектрических преобразователей, а также, электромагнитно-акустических преобразователей, отдельное место занимает малоизученная область – емкостные преобразователи возбуждения и приема ультразвуковых колебаний.

Данный способ наряду с очевидными преимуществами, а именно, широким частотным диапазоном возбуждения и приема ультразвуковых колебаний, отсутствием контактной жидкости, имеет существенный недостаток, связанный с низкой чувствительностью данного метода (10^3 раз) по сравнению с классическими [1]. Как показал анализ литературы, данный недостаток и повлиял на отсутствие теоретических и экспериментальных исследований в этой области. Следует отметить, что, воспользовавшись результатом работы [2], емкостной способ возбуждения позволяет сравнительно эффективно создавать ультразвуковые колебания в объекте контроля (ОК) с амплитудой порядка 10^{-9} м. Как показали экспериментальные исследования [3], емкостной преобразователь при данной амплитуде акустической волны может эффективно работать в режиме возбуждения и приема в широком частотном диапазоне.

Основная часть. На рис.1 показана конструкция ультразвукового емкостного преобразователя, одна из обкладок которого и есть ОК. Устроен он следующим образом. Параллельно одной из торцевых проводящих поверхностей образца, предназначенного для ультразвукового контроля, располагается электропроводящая пластина (электрод). Этот конденсатор поляризован постоянным напряжением $U_{п.}$ Акустические колебания в

электропроводной поверхности могут быть возбуждены силами взаимодействия электрических зарядов, если эту поверхность сделать одной из обкладок конденсатора и подавать переменное напряжение амплитуды U_0 .

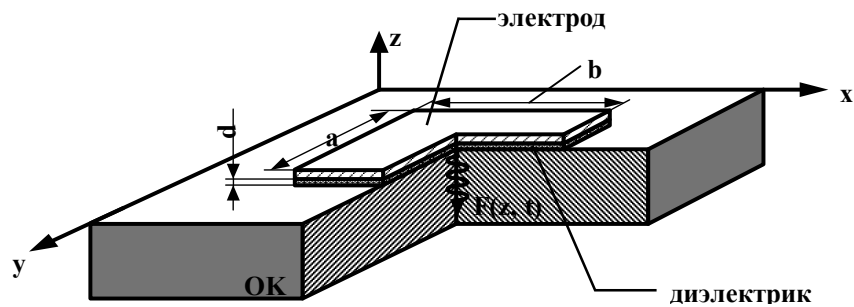


Рис. 1. Модель ультразвукового емкостного преобразователя

Переменная составляющая давления на поверхность ОК определяется формулой

$$P(t) = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 U_0 U_{\Pi} \sin \omega t}{2d_0^2} - \frac{\varepsilon\varepsilon_0 U_0^2 \cos 2\omega t}{8d_0^2} \quad (1)$$

где ε_0 – диэлектрическая постоянная; ε – диэлектрическая проницаемость прослойки; d_0 – расстояние между обкладками конденсатора.

На рис. 2,3 показаны графики изменения переменной составляющей давления для различных соотношений переменного и постоянного сигналов.

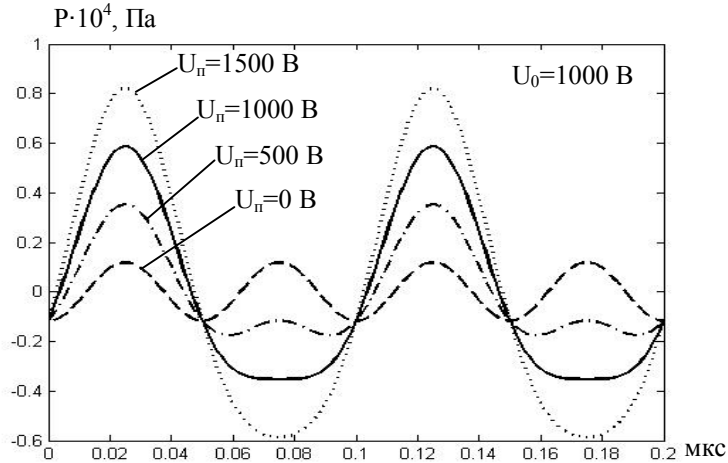


Рис. 2. Графики зависимости давления $P(t)$ при постоянной амплитуде переменного напряжения $U_0=1000$ В

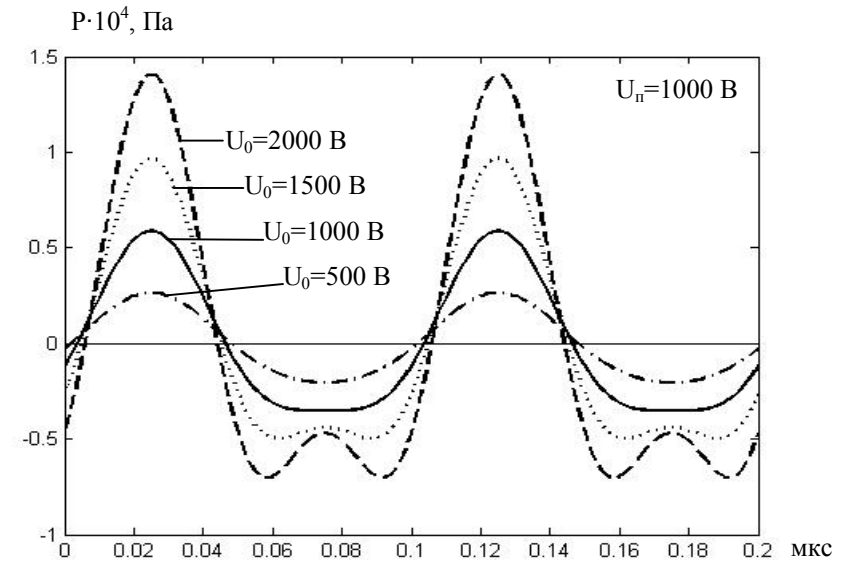


Рис. 3. Графики зависимости давления $P(t)$ при постоянном значении поляризующего напряжения $U_{\Pi}=1000$ В

Из графиков видно, что в первом случае, при отсутствии поляризующего напряжения $U_{\Pi}=0$, происходит удвоение частоты давления $P(t)$ по сравнению с возбуждающим напряжением U_0 . При этом с ростом поляризующего напряжения возрастает амплитуда давления $P(t)$, что в свою очередь в дальнейшем приводит к увеличению амплитуды смещения ультразвуковой волны. Тем не менее, бесконечное увеличение поляризующего напряжения не представляется возможным в силу ограничения со стороны возможного пробоя в диэлектрическом слое. Во втором случае, увеличение амплитуды переменного напряжения U_0 приводит к значительному изменению формы сигнала давления $P(t)$, что приводит к сложному спектру акустических колебаний в ОК. Отсюда можно сделать вывод, что наиболее благоприятным с точки зрения формы и амплитуды сигнала $P(t)$ является выбор близких по своим значениям величин поляризующего U_{Π} и переменного U_0 напряжений.

Задача распространения ультразвуковых колебаний в ОК может быть решена в потенциальном варианте. Воспользовавшись результатами работы [4], рассмотрим смещение U ультразвуковой волны на поверхности ОК как реакцию на сосредоточенную силу F создаваемую давлением $P(t)$ на малую площадку поверхности ΔS . Решение будем искать в виде распространения ультразвуковых колебаний от центра прямоугольной пластины $a>b$ вдоль координаты x (см. рис. 1). Выражение для смещения ультразвуковой волны в

любой точке поверхности ОК будет иметь вид:

$$U(R) = \frac{\rho}{2\pi K_0} \int_{-a}^a \int_{-b}^b \frac{\sin\left[k\sqrt{(x-R)^2 + y^2}\right] - 1 - \cos\left[k\sqrt{(x-R)^2 + y^2}\right]}{\sqrt{(x-R)^2 + y^2}} dy dx \quad (2)$$

где ρ – плотность материала ОК; K_0 – модуль сжимаемости; k – волновое число; R – расстояние до произвольной точки поверхности.

Для примера, на рис. 4 показан график зависимости смещения $U(R)$ в ОК для электрода размером 20x10 мм, частота возбуждения ультразвуковых колебаний $f=2,5$ МГц, ОК – стальная пластина прямоугольной формы.

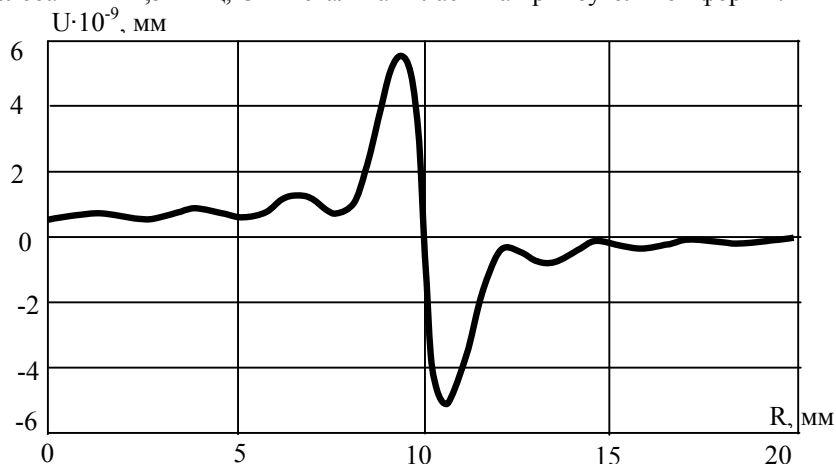


Рис. 4. Смещение упругой волны в поверхности ОК

Выводы. Из графика видно, что смещение акустической волны в центре пластины незначительно, максимальная амплитуда смещения U наблюдается вблизи границы пластины $R=10$ мм и составляет порядка $6 \cdot 10^{-9}$ мм и быстро затухает практически до нулевого значения на расстоянии $R=20$ мм. Данный расчетный результат хорошо согласуется с физическими представлениями о процессе возбуждения ультразвуковых колебаний и экспериментальными данными.

Список литературы: 1. 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. 2. Ю.Б. Дробот, А.И. Кондратьев, В.А. Луговой. Возбуждение коротких упругих импульсов емкостным методом // Дефектоскопия. – 1983. - №3. - с. 35-37. 3. Г.М. Сучков, Л.В. Глебова. Дослідження факторів, які впливають на збудження акустичних імпульсів емнісним методом // Вісник НТУ «ХПІ». – 2008. – №48. – с. 116-123. 4. Уравнения математической физики. А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. М.: Наука, 1972. 736 с.

УДК 620.179.14

Ю.В. ХОМЯК, асп., НТУ «ХПИ»

Г.М. СУЧКОВ, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ОРТОГОНАЛЬНОГО ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Розроблено розрахункову модель для оцінки взаємодії вихорострумового перетворювача з об'єктом, який має поверхневу тріщину. Наведено співвідношення для розрахунку залежностей сигналів вихорострумового перетворювача від взаємного розташування його обмоток і поверхневої тріщини сталевго зразка. Були проведені якісні порівняння результатів розрахунків з використанням даної моделі і експериментальних даних.

The numerical model of interaction of eddy-current probe with an object that has a surface crack is developed. It is shown formulas for calculating the eddy-current probe signal. The comparison of calculation and experiment is performed.

Введение. Важное место в решении задач неразрушающего контроля занимают вихретоковые методы [1-3], обладающие существенными преимуществами по сравнению с другими. С целью создания новых современных приборов, реализующих вихретоковый метод, необходимо изучение его особенностей. Глубокое исследование вихретокового метода возможно выполнить только с помощью его математической модели.

Определение зависимостей сигналов вихретокового преобразователя (ВТП) от параметров дефектов сплошности является одной из важных задач дефектоскопии. Для оценки взаимодействия ВТП с объектом, который имеет поверхностную трещину существуют расчетные модели и методы [4-8]. Известные модели имеют сложный вычислительный аппарат как при аналитических (если возможно), так и численных расчетах.

Целью данной работы является разработка упрощенной математической модели взаимодействия ВТП с ферромагнитным образцом, содержащим трещину.

Основная часть. В работе [9] проведен теоритический анализ работы накладного трансформаторного ВТП и показано соотношение для выходного сигнала измерительной обмотки:

$$\dot{U}_3 = \dot{I}_1 \left(j\omega M_{13} + \omega^2 \frac{M_{12}M_{23}}{R_2 + j\omega L_2} \right), \quad (1)$$

где U_3 – сигнал измерительной обмотки; I_1 – ток возбуждающей обмотки; ω – циклическая частота; R_2 , L_2 – эквивалентные электрические параметры исследуемого образца с трещиной; M_{13} – взаимная индуктивность между возбуждающей и измерительной обмотками; M_{12} – взаимная индуктивность

между возбуждающей обмоткой и ОК; M_{23} – взаимная индуктивность между измерительной обмоткой и ОК. Член $j\omega M_{13}$ не зависит от свойств ОК, а является лишь характеристикой преобразователя. Если использовать конструкцию ВТП представленную на рис. 1, то можно считать $M_{13} = 0$.

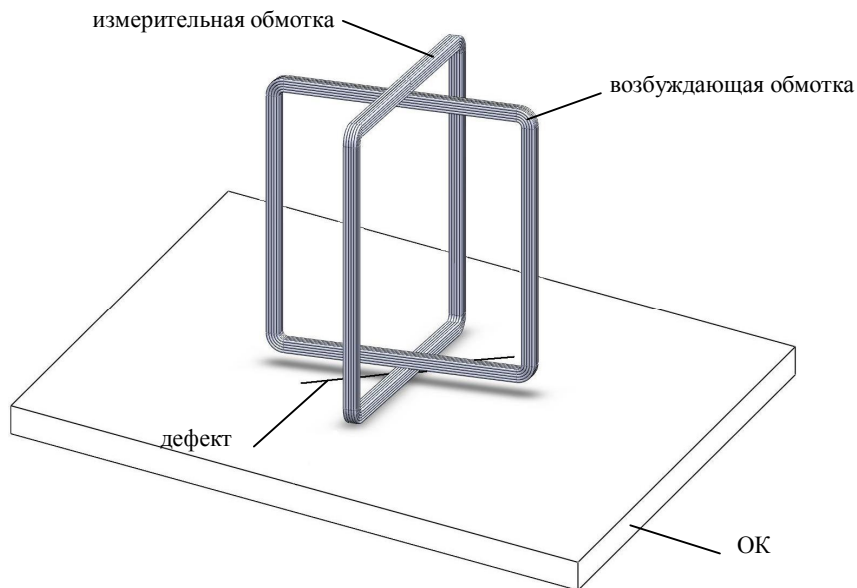


Рис. 1. Конструкция вихрекового преобразователя с ортогональными обмотками

Тогда выражение (1) примет вид

$$\dot{U}_3 = \dot{I}_1 \omega^2 \frac{M_{12} M_{23}}{R_2 + j\omega L_2}. \quad (2)$$

Из выражения (2) следует, что выходное напряжение вихрекового преобразователя является функцией взаимноиндуктивностей его обмоток с ОК:

$$\dot{U}_3 = f(M_{12} \cdot M_{23}). \quad (3)$$

В работах [4, 10, 11] показана возможность рассмотрения трещины, как системы линейных токов, совмещенных с контуром поверхностного дефекта.

Развивая данную мысль можно представить дефект как отрезок проводника с током [4].

На рис. 2 показана расчетная модель ВТП. Обмотки преобразователя и трещина представлены бесконечно тонкими проводниками.

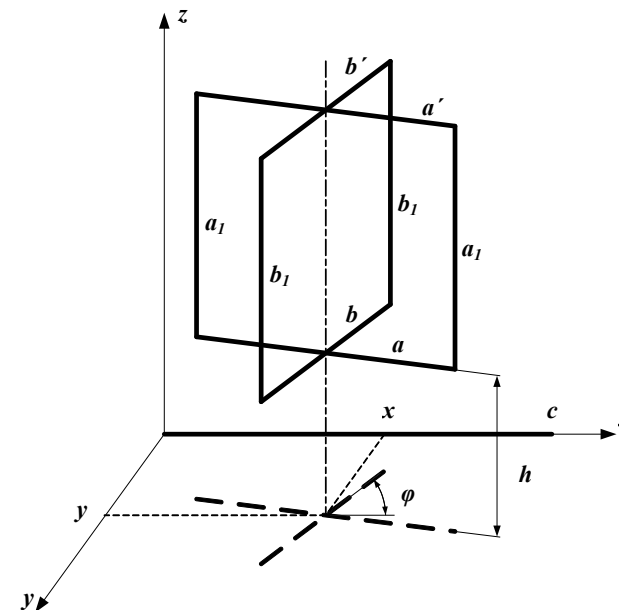


Рис.2. Расчетная модель взаимодействия ВТП с трещиной

На рисунке 2 обозначены: a – нижний участок возбуждающей обмотки; b – нижний участок измерительной обмотки; a_1 – боковая сторона возбуждающей обмотки; b_1 – боковая сторона измерительной обмотки; a' – верхний участок возбуждающей обмотки; b' – верхний участок измерительной обмотки; c – дефект; x, y – координаты проекции центра преобразователя; h – расстояние между дефектом и преобразователем (зазор); φ – угол между дефектом и измерительной обмоткой. Тогда искомые взаимноиндуктивности можно принять:

$$M_{12} = M_{ac} - M_{a'c}; \quad M_{23} = M_{bc} - M_{b'c} \quad (4)$$

Для нахождения M_{ac} , $M_{a'c}$, M_{bc} , $M_{b'c}$ воспользуемся соотношениями для линейных участков [12]. Тогда для M_{ac} можно записать:

$$M_{ac} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cos \varphi \left(x_2 \operatorname{Arth} \frac{a}{D_{22} + D_{21}} + y_2 \operatorname{Arth} \frac{c}{D_{22} + D_{12}} - x_1 \operatorname{Arth} \frac{a}{D_{11} + D_{12}} - y_1 \operatorname{Arth} \frac{c}{D_{11} + D_{21}} + \frac{h}{\sin \varphi} A \right); \quad (5)$$

$$A = \operatorname{arctg} \left(\frac{x_1 + y_1 + D_{11}}{h} \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right) + \operatorname{arctg} \left(\frac{x_2 + y_2 + D_{22}}{h} \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right) - \operatorname{arctg} \left(\frac{x_1 + y_2 + D_{12}}{h} \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right) - \operatorname{arctg} \left(\frac{x_2 + y_1 + D_{21}}{h} \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right); \quad (6)$$

$$D_{11} = \sqrt{\left(x - \frac{a}{2} \cos \varphi \right)^2 + \left(y - \frac{a}{2} \sin \varphi \right)^2 + h^2}; \quad (7)$$

$$D_{12} = \sqrt{\left(x + \frac{a}{2} \cos \varphi \right)^2 + \left(y + \frac{a}{2} \sin \varphi \right)^2 + h^2}; \quad (8)$$

$$D_{21} = \sqrt{\left(c - x - \frac{a}{2} \cos \varphi \right)^2 + \left(y - \frac{a}{2} \sin \varphi \right)^2 + h^2}; \quad (9)$$

$$D_{22} = \sqrt{\left(x + \frac{a}{2} \cos \varphi - c \right)^2 + \left(y + \frac{a}{2} \sin \varphi \right)^2 + h^2}; \quad (10)$$

$$k^2 = D_{12}^2 + D_{21}^2 - D_{11}^2 - D_{22}^2; \quad (11)$$

$$x_1 = \frac{2a^2(D_{21}^2 - D_{11}^2 - c^2) + k^2(D_{12}^2 - D_{11}^2 - a^2)}{4c^2a^2 - k^4}c; \quad (12)$$

$$y_1 = \frac{c^2(D_{12}^2 - D_{11}^2 - a^2) + k^2(D_{21}^2 - D_{11}^2 - c^2)}{4c^2a^2 - k^4}a; \quad (13)$$

$$x_2 = x_1 + c; \quad y_2 = y_1 + a. \quad (14)$$

Для остальных участков вычисления производятся аналогично, в соответствующих координатах. Для $M_{a'c}$: вместо $h - h + a_1$; M_{bc} : вместо $\varphi - 90^\circ - \varphi$, вместо $a - b$; $M_{b'c}$: вместо $\varphi - 90^\circ - \varphi$, вместо $a - b$, вместо $h - h + b_1$.

На рис. 3 приведены результаты расчетов и экспериментов для угла ориентации преобразователя относительно трещины и для зазора.

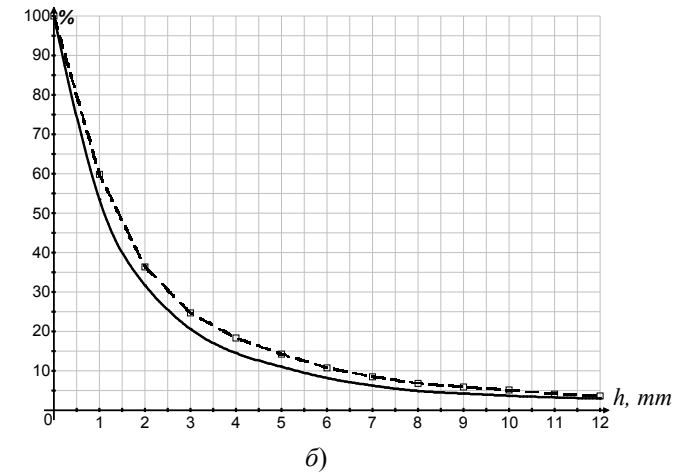
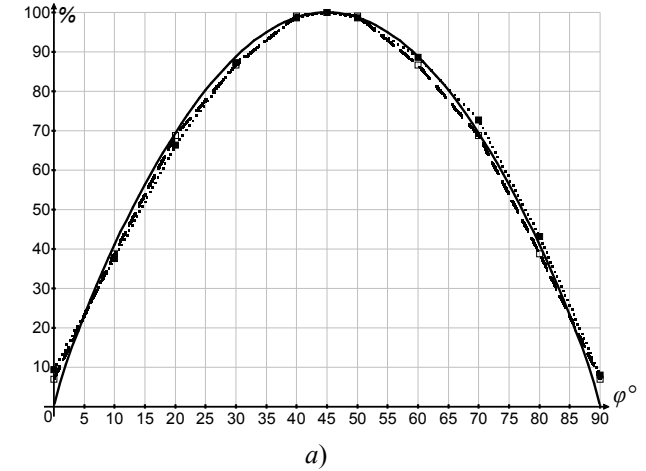


Рис. 3 – Зависимости сигнала ВТП от угла (а) и зазора (б) (расчетные кривые – сплошные)

Выводы. Результаты расчетов с использованием разработанной модели хорошо согласуются с экспериментами. Данная модель позволяет находить зависимости сигналов ВТП при заданных параметрах его обмоток и дефекта, а также их взаимного расположения. Целесообразно использовать такой подход для решения задач дефектоскопии вихретоковым методом.

Список литературы: 1. *В.В. Клюев, Ю.К. Федосенко, В.Ф. Мужижкий.* Вихретоковый контроль: современное состояние и перспективы развития // В мире неразрушающего контроля. – 2007. – №2. – с.4-9. 2. *Г.М. Сучков, Ю.В. Хомяк.* Развитие возможностей вихретоковой дефектоскопии // Методы та прилади контролю якості. – 2006. – № 17. – с.3-7. 3. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. Под общ. ред. В.В.Клюева. Т 2: В 2 кн. – М.: Машиностроение, 2003. – 688 с: ил. Вихретоковый контроль. Книга 2 / *Ю.К.Федосенко, В.Г.Герасимов, А.Д.Покровский, Ю.Я.Останин.* 4. *Хомяк Ю.В.* Фізична модель впливу тонкої поверхневої тріщини металевого зразка на накладний вихорострумний перетворювач // анотації доповідей XVII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я». – НТУ «ХПИ»– 2009. – С. 529. 5. *П.Н. Шкатов.* Математическая модель для решения задач электромагнитной дефектоскопии // Дефектоскопия. – 1988. – №1. – с.59-66. 6. *В.М. Синеглазов, В.Г. Вовк.* Математическое моделирование процесса вихретокового контроля // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2000. – №4. – с.26-29. 7. *П.Н. Шкатов, С.В. Клюев.* Математическое моделирование воздействия дефектов сплошности на вихретоковые преобразователи // Контроль. Диагностика. – 2005. – №6. – с.17-21. 8. *В.Ф. Гамалий, С.В. Серебrenников, Д.В. Трушаков.* Математическое моделирование взаимодействия вихретокового преобразователя и ферромагнитного образца с трещиной // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2007. – №2. – с.44-47. 9. *Г.М. Сучков, Ю.В. Хомяк.* Теоретическое исследование накладного вихретокового преобразователя с минимальной взаимной индуктивностью // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Прилади і методи контролю та визначення складу речовин. – Харків: НТУ «ХПИ» – №48. – 2008. – с.100–103. 10. *В.Е. Щербинин, М.Л. Шур, Р.В. Загидулин.* Топографія магнітного поля вузького поверхневого дефекта // Дефектоскопия. – 1986. – №7. – с.86-88. 11. *Р.В. Загидулин.* К расчету признаков классификации дефектов сплошности конечной протяженности в ферромагнитных изделиях // Дефектоскопия. – 1995. – №10. – с.50-58. 12. *Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А.* Расчет индуктивностей: Справочная книга. – 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.: ил.

УДК 620.179.16:620.179.17

И.В. ТЮПА, к-т техн. наук, докторант, НТУ «ХПИ»;
Б.М. ГОРКУНОВ, к-т техн. наук, проф., НТУ "ХПИ";
А.А. АВРАМЕНКО, к-т техн. наук, доц., НТУ "ХПИ";
В.В. СКОПЕНКО, соискатель, НТУ "ХПИ";

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ В ПОПЕРЕЧНОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

У роботі проведено експериментальні дослідження контролю дефектів циліндричних виробів у перпендикулярному до об'єкту контролю електромагнітному полі, яке створюється за допомогою котушок Гельмгольца. Вимірювання сигналу від дефекту здійснюється за допомогою двох взаємоперпендикулярних обмоток прохідного і накладного типу.

Experimental researches of control of defects of cylinder wares are in-process conducted in to perpendicular to the object control the electromagnetic field which is created by the spools of Helmholtz. Measuring of signal from a defect is carried out by two perpendicular coils of communicating and superimposed type.

Введение. В настоящее время для оценки структурного состояния и косвенного измерения механических напряжений и дефектов в изделиях из ферромагнитных материалов широко применяются магнитные и электромагнитные методы контроля, которые основанные на взаимосвязи магнитных и механических характеристик со структурными параметрами. Однако проблема контроля осложняется тем, что зачастую остается неизвестным состояние металла, химический состав и магнитная предыстория элементов конструкций. Поэтому возникает потребность экспериментальных исследований с привлечением широкого круга материалов и различным исходным состоянием [1].

Как показано в работе [2], при проведении исследований, на малоуглеродистых сталях Ст.20, Ст3 и низколегированных сталях 09Г2С и 10ХСНД. Выбор обусловлен тем, что эти стали:

широко применяются в различных отраслях промышленности;

относятся к разным категориям прочности, обладают хорошими характеристиками пластичности, характеризуются обычными и повышенными антикоррозионными свойствами и разной склонностью к циклическому упрочнению и разупрочнению, что имеет существенное значение при интерпретации результатов со сталями подобного класса;

позволяют описать поведение разных классов материалов и распространить полученные закономерности на все материалы, близкие к ним по составу и свойствам;

являются хорошим материалом для изучения физики магнитоупругих явлений вследствие низкого содержания углерода.

Набор сталей, а также получение на них путем применения различных видов обработки широкого спектра структурных состояний позволяют оценить их преимущества и недостатки при определении связи между структурой, механическими и магнитными свойствами. Для получения различной исходной структуры стали использовали образцы в следующих состояниях: состояние заводской поставки; поставка + отжиг при 900 и 1050 °С; поставка + прокатка на степень деформации $\varepsilon = 50\%$. Мелкозернистую структуру стали получали термоциклической обработкой в состоянии поставки и рекристаллизационным отжигом после дробной прокатки на $\varepsilon = 50\%$.

Следует отметить, что в зависимости от исходного состояния, магнитной и механической предыстории образцов начальные условия H_p (до приложения внешней нагрузки) на поверхности образца в разных зонах могут значительно различаться. Однако качественно характер зависимости напряженности магнитного поля рассеяния H_p от действующих внутренних напряжений σ при этом не меняется. Поэтому представляло интерес исследовать зависимость электромагнитных параметров в зоне максимальных внутренних напряжений, которая моделировалась уменьшением площади поперечного сечения в центральной части образца путем создания боковых радиусных проточек, а также определения дефектов различной ориентации относительно возбуждающего поля с использованием взаимоперпендикулярно расположенных относительно оси изделия измерительных катушек накладного и проходного типа. Для этого было использовано несколько образцов и создан макет установки для проведения экспериментальных исследований по выявлению поверхностных дефектов различной ориентации.

Основная часть. На рис. 1 приведена функциональная схема установки, реализующая амплитудный и фазовый методы вихретокового контроля дефектов различной ориентации в поперечном однородном магнитном поле. Установка содержит рабочий вихретоковый преобразователь ВТПР и опорный вихретоковый преобразователь ВТПО (построенные на основе катушек Гельмгольца), преобразователи, исследуемый образец O , вольтметр V_1 и образцовое сопротивление R_0 , предназначенные для контроля намагничивающего тока, опорное сопротивление R_ϕ для измерения фазового угла фазометром Φ , вольтметр V_2 и V_3 для измерения разностной ЭДС выходного сигнала проходного и накладного преобразователей соответственно, источник синусоидального напряжения G и частотомер f . В однородное электромагнитное поле, которое создается с помощью двух идентичных намагничивающих обмоток НК (катушки Гельмгольца), помещается объект контроля O с дефектом D (левая часть схемы) и с бездефектной областью (правая часть схемы). Контроль дефектного состояния осуществляется с помощью измерительной катушки накладного типа ИК1 и проходного ИК2. Для реализации данных методов вначале с помощью генератора G устанавливают значение намагничивающего тока по показаниям вольтметра V_1 и по частотомеру f устанавливают значение частоты зондирующего поля

при которой для данного исследуемого образца O значение глубина проникновения будет рациональным с точки зрения максимальной чувствительности ВТП.

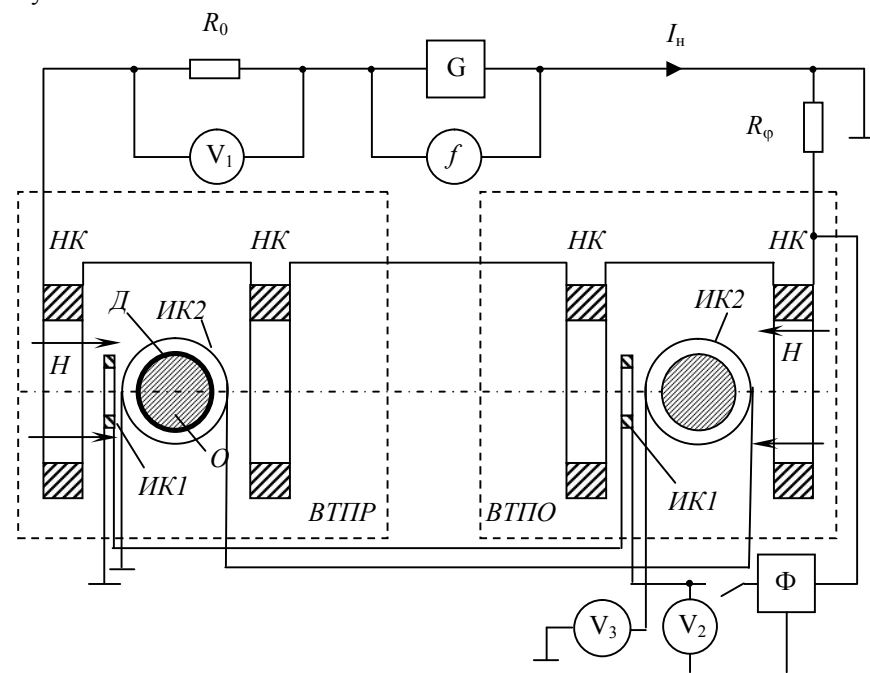


Рис. 1. Схема установки, реализующая дифференциальный амплитудный и фазовый метод контроля дефектов в поперечном поле

На рис 2 а,б показано графические зависимости чувствительности амплитуды выходного сигнала дифференциального вихретокового преобразователя к дефектам, которые выполнены в виде радиальной проточки шириной 1 мм и глубинами: 0,5 мм; 1 мм; 1,5 мм в цилиндрическом образце Ст.20 соответственно. Описанные выше методы являются разностными. Из графиков видно, что для случая накладного преобразователя ИК1 рис. 2а, чувствительность к дефекту существенно выше, по сравнению с проходной катушкой ИК2 рис. 2б. При этом, для случая катушки ИК2 наблюдается размытость характеристики границы дефекта. На рис. 3 приведены графические зависимости фазы выходного сигнала для случая накладного преобразователя. Из графиков видно, что наблюдается четкий переход фазы сигнала в месте дефекта, что с учетом высокой чувствительности использованного фазометра Ф2-34 существенно облегчает контроль дефектов данным способом.

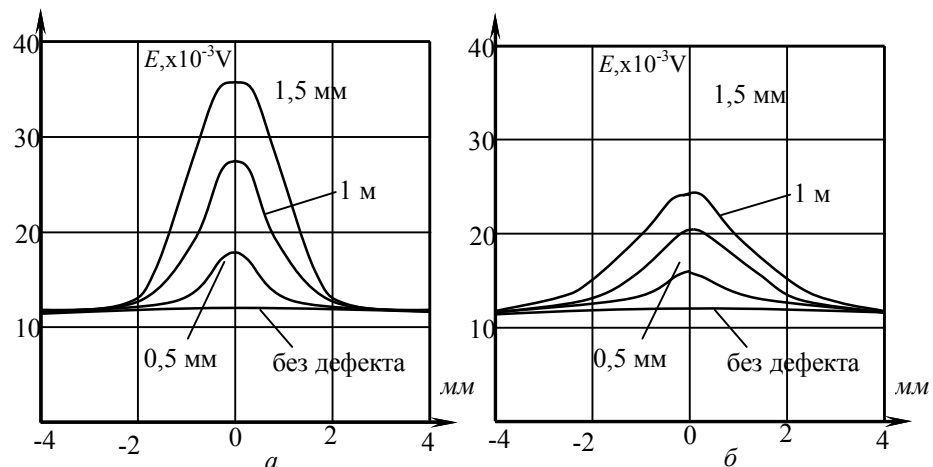


Рис. 2. Графические зависимости амплитуды сигнала накладного δ и проходного измерительного преобразователя.

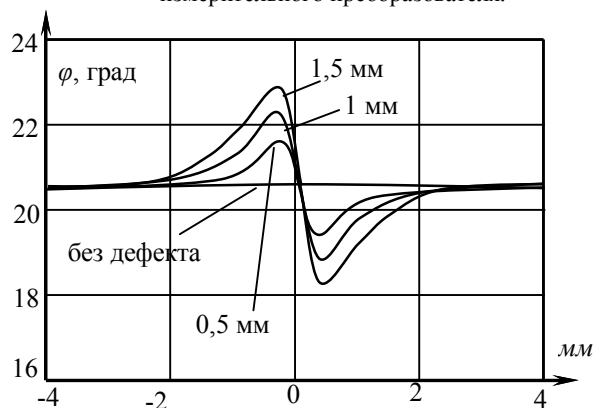


Рис. 3. Графические зависимости фазы сигнала накладного измерительного преобразователя.

В данной работе экспериментально исследован метод контроля дефектов в поперечном однородном магнитном поле катушек Гельмгольца с взаимноперпендикулярными измерительными обмотками, полученные экспериментальные зависимости позволяют сделать вывод о перспективности использования данного метода для создания средств вихретокового неразрушающего контроля и определения не только самого дефекта, но и его местоположения.

Список литературы: 1. Неразрушающий контроль: Справочник. В 7 т. Т. 2 / Под общ. ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, – 2003. – 688 с. 2. В.Е. Гордиенко, Н.В. Овчинников, А.О. Бакшеев. Контроль. Диагностика, №2. 2007. С. 60-69.

СОДЕРЖАНИЕ

Стенцель Й.І., Рябіченко А.В., Євсюков В.В. Математичні моделі зрівноважуючого ультразвукового засобу контролю рівня рідинних середовищ.....	3
Стенцель Й.І., Євсюков В.В. Експериментальні дослідження ультразвукового методу контролю рівня рідинних середовищ з нерівномірними поверхнями.....	9
Стенцель Й.І., Шаповалов О.І. Експериментальні дослідження ультразвукових сигналів магнітострикційного засобу контролю рівня рідинних середовищ	15
Поркуян О.В., Стенцель Й.І., Проказа О.І. Реологічні моделі технологічного контролю параметрів з внутрішніми зв'язками у виробництві аміачної селітри.....	21
Поркуян О.В., Сотникова Т.Г. Комбинированный метод определения относительного содержания магнетита в твердой фазе железорудной пульпы.....	29
Безвесільна О.М., Подчаїшинський Ю.О. Ідентифікація параметрів руху чутливого елемента у вимірювачі лінійних прискорень.....	37
Панченко В.А. Мониторинг коррозионного состояния железобетона и качества процесса катодной защиты посредством анализа переходной функции спада поляризаационного потенциала.....	45
Зори А.А., Соломичев Р.И., Тарасюк В.П. Исследование затухания ультразвука в воздухе и структуре металла валков горячей прокатки из стали 150ХНМ.....	51
Тарасюк В.П., Шинкарева О.В. Методика оценки показателей качества многокомпонентной смеси в экспертной системе управления рецептурной станцией.....	57
Вовна О.В., Зорі А.А., Хламов М.Г. Спосіб компенсації динамічної похибки інфрачервоного вимірювача концентрації метану для вугільних шахт.....	65
Дашин Д.О., Тарасюк В.П. Ультразвуковой толщиномер покрытий рабочих валков на прокатных станах.....	71
Авраменко С.В., Тарасюк В. П., Бурківченко В.І. Прилад контролю ступеня іонізації в приміщенні.....	78
Приходченко Б.В., Тарасюк В.П. Основні математичні передумови побудови інформаційно-вимірювальної системи очищення стічних вод.....	86
Поздняков Е.К., Сенько В.Ф. Магнитографический метод определения дефектов шахтного подъемного каната.....	96
Гальченко В.Я., Якимов А.Н., Остапущенко Д.Л. Оптимальное проектирование магнитных систем с высокооднородными магнитными полями в дефектоскопическом неразрушающем контроле.....	100
Сучков Г.М., Петрищев О.М., Десятніченко О.В., Юданова Н.М. ЕМА товщиномерія. (огляд).....	110

<i>Глоба С.Н., Хорло Н.Ф., Стороженко С.В.</i> Особенности проведения капиллярного метода неразрушающего контроля.....	122
<i>Горкунов Б.М., Тищенко А.А.</i> Анализ методов и устройств для контроля упрочненного слоя металлических изделий.....	128
<i>Багмет О.Л., Львов С.Г.</i> Бесконтактное измерение радиуса цилиндрического изделия переменного-частотным электромагнитным методом.....	136
<i>Безимьяна К.Ю., Колесников А.М., Комаров К.А., Талько О.В.</i> Дослідження спотворення акустичного поля поблизу двовимірного дефекту.....	142
<i>Безимьянний Ю.Г., Єніфанцева Т.О., Козирацький Є.О.</i> Дослідження впливу структури композита на основі мідного порошку із вольфрамовими вкрапленнями на швидкість поширення пружної хвилі.....	148
<i>Головина А.К., Зори А.А., Тарасюк В.П.</i> Прибор для определения объемного расхода тепла на основе ультразвука и пьезокерамики.....	156
<i>Мостовой С.П.</i> Инженерная методика расчета параметров индукционно-динамического преобразователя для сейсмоакустических исследований.....	162
<i>Сучков Г. М., Ноздрачева К. Л., Хащина С. В.</i> Визначення впливу факторів, які визначають роботу ЕМА дефектоскопу для контролю довгомірних виробів.....	168
<i>Базаров Н.Д., Тарасюк В.П.</i> Розробка математичної моделі методу вимірювання в'язкості розплавленого металу із застосуванням ультразвукових хвиль.....	176
<i>Киреева Ж.А., Киреев В.А., Сизонов С.П.</i> Диагностирование цифровых узлов радиоэлектронной аппаратуры.....	184
<i>Киреева Ж.А., Киреев В.А., Кравченко М.А.</i> Исследование устойчивости и построение переходных процессов систем управления... ..	188
<i>Глебова Л.В., Тюпа И.В., Григорьев А.Л., Глоба С.Н.</i> Возбуждение ультразвуковых колебаний емкостным преобразователем.....	192
<i>Хомяк Ю.В., Сучков Г.М.</i> Расчетная модель ортогонального вихретокового преобразователя.....	196
<i>Тюпа И.В., Горкунов Б.М., Авраменко А.А., Скопенко В.В.</i> Определение поверхностных дефектов в поперечном электромагнитном поле ферромагнитных цилиндрических объектов.....	202

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХП»

Сборник научных трудов «Электроэнергетика и преобразовательная техника»

Збірник наукових праць № 12, 2010 рік

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

Технічний редактор
Е.Л. Ноздрачева

Відповідальний за випуск
В.М. Луньова

Обл. вид. № 113-10

Підп. до друку 07.06.2010 р. Формат 60x84 1/16 Папір офсетний.
Riso-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 12,0.
Наклад 300 прим. 1-й з-д 1-100. Зам. № 225 . Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХП».

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК №3657 від 24.12.2009 р.
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Друкарня НТУ «ХП». 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21