

УДК 677.017

В.Г. ЗДОРЕНКО, С.В. БАРИЛКО, А.С. ДЯЧЕНКО
Київський національний університет технологій та дизайну**ТЕХНОЛОГІЧНИЙ КОНТРОЛЬ ПОРИСТОСТІ ТЕКСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ
ІЗ СКЛАДНОЮ СТРУКТУРОЮ**

У даній роботі розглянуто методи безконтактного контролю зміни пористості матеріалів із складною структурою. Обґрунтована доцільність використання ультразвукового безконтактного методу та використання значення амплітуди відбитої ультразвукової хвилі. Наведено результати теоретичних та експериментальних досліджень.

Ключові слова: пористість матеріалу, амплітуда ультразвукової хвилі, безконтактний контроль.

В.Г. ЗДОРЕНКО, С.В. БАРИЛКО, А.С. ДЯЧЕНКО
Київський національний університет технологій та дизайну**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ПОРИСТОСТИ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ СО
СЛОЖНОЙ СТРУКТУРОЙ**

В данной работе рассмотрены методы безконтактного контроля изменения пористости материалов со сложной структурой. Обоснована целесообразность использования ультразвукового бесконтактного метода и использование значения амплитуды отраженной ультразвуковой волны. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований.

Ключевые слова: пористость материала, амплитуда ультразвуковой волны, бесконтактный контроль.

V.G. ZDORENKO, S.V. BARYLKO, A.S. DYACHENKO
Kyiv National University of Technologies and Design**TECHNOLOGICAL CONTROL POROSITY OF TEXTILE MATERIALS WITH
COMPLEX STRUCTURE**

In this work considered methods of non-contact control of changes porosity of materials with complex structure. The expediency of using non-contact ultrasonic method and the use value of amplitude of the reflected ultrasound wave. Results theoretical and experimental researches are resulted.

Keywords: porosity of material, amplitude of the ultrasonic wave, non-contact control.

Постановка проблеми

Сьогодні існує необхідність в автоматизованому контролі технологічних параметрів різних фільтрувальних тканин та виробів із складною структурою, а також у сортуванні цих матеріалів безпосередньо на виробництві. Для реалізації поставленої задачі можна застосовувати роботизовані комплекси із безконтактними датчиками, що дозволить оптимізувати процес сортування та спростити задачу технічної реалізації таких систем. Різні матеріали, що необхідно контролювати можуть мати складну структуру. Складна структура для багатьох матеріалів, які використовуються у фільтрах різного призначення має вигляд сітки, що може мати різну пористість. Пористість та поверхневу густину необхідно враховувати при контролі фільтрувальних матеріалів різного призначення як для очищення газів, рідин, сипучих речовин, так і для контролю виробів із складною структурою. Тому для сортування фільтрувальних матеріалів, а також для підвищення оперативності контролю можна використовувати безконтактний метод визначення пористості контрольованих виробів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Пневматичні методи та засоби [1] можуть застосовуватися для сортування матеріалів із різною пористістю. Однак, до недоліків пневматичних методів та засобів необхідно віднести: низьку чутливість, малий діапазон вимірюваної величини та складність експлуатації. Оптичні методи та засоби [2] можна використовувати для визначення зміни пористості виробів із складною структурою за зміною інтенсивності оптичного випромінювання, яке надходить від джерела освітлення. Проте їх основними недоліками є: мала чутливість до вимірюваної величини та похибки, що виникають при значній запиленості навколишнього середовища. Доцільно використовувати ультразвукові методи та засоби [3], які прості в експлуатації, мають високу точність вимірювання, а також надійні в роботі протягом тривалого часу в умовах виробництва. Тому безконтактні ультразвукові методи та засоби можна

використовувати для подальшого проектування та створення автоматизованих роботизованих комплексів для контролю та сортування матеріалів із складною структурою безпосередньо на виробництві.

Формулювання мети дослідження

Для безконтактного контролю та сортування матеріалів із структурою, яка представляє собою сітку, необхідно використовувати один із інформативних параметрів ультразвукового сигналу. За зміною амплітуди відбитої ультразвукової хвилі відносно амплітуди хвилі, яка відбилася від еталонного матеріалу, пористість якого визначалась раніше, можна визначати зміну пористості контрольованого матеріалу. Якщо проводити вимірювання величини [4] та порівнювати її з еталоном, то, в такому випадку, можна визначати точно зміну контрольованої пористості. У статті наведені результати теоретичних досліджень визначення зміни пористості фільтрувальних матеріалів за допомогою ультразвукового безконтактного методу, що в свою чергу дасть можливість розпізнавати та сортувати готові вироби за їх призначенням, а також визначати браковану продукцію.

Викладення основного матеріалу дослідження

Амплітуду ультразвукової хвилі, яка падає нормально на контрольований матеріал та відбивається, знаючи, що відношення акустичних опорів повітря та матеріалу $(\rho_1 c_1)/(\rho_2 c_2) \ll 1$, $\chi = (d_o + d_y) \frac{\pi}{4} \cos \nu$ для фільтрувальних тканин та $\chi = H \cos \nu$ для матеріалу без переплетення, можна представити у вигляді модуля [5] комплексного коефіцієнта відбиття:

$$|V| = \sqrt{1 + \frac{1 - \left(ch \alpha \chi + \frac{\rho_2 c_2}{2 \rho_1 c_1} \cdot sh \alpha \chi \right) \cdot 2 \cos \frac{2 \pi f \chi}{c_2}}{\left(\left(ch \alpha \chi + \frac{\rho_2 c_2}{2 \rho_1 c_1} \cdot sh \alpha \chi \right) \cdot \cos \frac{2 \pi f \chi}{c_2} \right)^2 + \left(\left(sh \alpha \chi + \frac{\rho_2 c_2}{2 \rho_1 c_1} \cdot ch \alpha \chi \right) \cdot \sin \frac{2 \pi f \chi}{c_2} \right)^2}}, \quad (1)$$

де $|V|$ – модуль комплексного коефіцієнта відбиття ультразвукової хвилі від контрольованого матеріалу; α – коефіцієнт згасання ультразвукових хвиль в матеріалі; f – частота ультразвукових коливань; d_o, d_y – діаметри нитки основи та нитки утоку для фільтрувальної тканини; H – товщина матеріалу із складною структурою у вигляді сітки; d_o, d_y – діаметри нитки основи та нитки утоку для фільтрувальної тканини; ρ_1, c_1 – щільність повітря та швидкість розповсюдження у ньому ультразвукової хвилі; ρ_2, c_2 – щільність матеріалу та швидкість розповсюдження у ньому ультразвукової хвилі; ν – кут між вектором хвилі, що відбивається від матеріалу у бік приймача (перетворювача ультразвукових коливань в електричну напругу), та самою поверхнею виробу.

Якщо зважати на те, що для фільтрувальних матеріалів величина $[(2 \pi f / c_2) + \alpha] \chi \ll 1$, тоді вираз (1) можна подати так:

$$|V| = \sqrt{1 - \frac{1 + \alpha \frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1} \chi}{\left(1 + \alpha \frac{\rho_2 c_2}{2 \rho_1 c_1} \chi \right)^2 + \left(\frac{2 \pi f}{c_2} \frac{\rho_2 c_2}{2 \rho_1 c_1} \chi \right)^2}}. \quad (2)$$

Коли згасання в контрольованому матеріалі менше 2% і ним можна знехтувати $\alpha \approx 0$, тоді залежність (2) можна показати як:

$$|V| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\rho_1 c_1}{\pi f \rho_2 \chi} \right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\rho_1 \lambda_1}{\pi \rho_2 \chi} \right)^2}}, \quad (3)$$

де λ_1 – довжина ультразвукової хвилі в повітрі.

Таким чином при зменшенні пористості контрольованого матеріалу, амплітуда відбитої ультразвукової хвилі збільшується і навпаки. Цю залежність можна показати так:

$$\frac{|V|}{|V_0|} = \frac{Q_0}{Q}, \quad (4)$$

де $|V_0|$ – модуль комплексного коефіцієнта відбиття ультразвукової хвилі від еталонного матеріалу з відомою пористістю; Q_0, Q – відома пористість та пористість матеріалу, що контролюється.

Вираз (4), з врахуванням коефіцієнтів, що характеризують тільки часткове надходження відбитих ультразвукових сигналів до приймача, можна подати у наступному вигляді:

$$\frac{|V|K_{\rho}}{|V_0|K_{\rho 0}} \approx \frac{Q_0}{Q}, \quad (5)$$

де $K_{\rho 0}, K_{\rho}$ – коефіцієнти еталонного та контрольованого матеріалів, що характеризують надходження відбитого ультразвукового сигналу до приймача звукових коливань від структурних показників матеріалів та їхнього положення відносно самого приймача.

При вимірюванні визначаються амплітуди відбитих ультразвукових коливань від еталонного та контрольованого матеріалів, які пропорційні величинам $|V_0|K_{\rho 0}$ та $|V|K_{\rho}$.

Підставивши залежність (3) у (4) враховуючи умову $\left((d_o + d_y)\frac{\pi}{4}\right)_0 = H_0, \left((d_o + d_y)\frac{\pi}{4}\right)_2 = H_2$, якщо величини $H_0 \approx H_2$ та $\rho_0 \approx \rho_2$ майже однакові (розбіжність складає менше 5%) як для еталонного, так і для контрольованого матеріалів, тоді можна представити відношення модулів коефіцієнтів відбиття ультразвукових коливань в наступному вигляді:

$$\frac{|V|}{|V_0|} = \sqrt{\frac{\left(\left(\pi f_0 \rho_0 H_0 \cos v_0\right)^2 + (\rho_1 c_1)^2\right) \cdot (\cos v_x f_0)^2}{\left(\left(\pi f_0 \rho_0 H_0 \cos v_x\right)^2 + (\rho_1 c_1)^2\right) \cdot (\cos v_0 f_0)^2}}, \quad (6)$$

де $\cos v_0, \cos v_x$ – величини, що характеризують розмір пор еталонного та контрольованого матеріалів; f_0 – частота о заультраукових хвиль, якими опромінюються еталонний та контрольований матеріали (при виконанні перших вимірювань).

Для того щоб точно можна було визначити, наскільки змінився розмір пор в контрольованому матеріалі, необхідно забезпечити виконання рівності, яку можна подати так:

$$\frac{|V|^*}{|V_0|} = \sqrt{\frac{\left(\pi f_0 f_x \rho_0 H_0\right)^2 + \left(\frac{f_x \rho_1 c_1}{\cos v_0}\right)^2}{\left(\pi f_0 f_x \rho_0 H_0\right)^2 + \left(\frac{f_0 \rho_1 c_1}{\cos v_x}\right)^2}} = 1, \quad (7)$$

де $|V|^*$ – модуль, що відповідає амплітуді відбитої від контрольованого матеріалу ультразвукової хвилі, яка змінюється у процесі регулювання частоти f_x .

При певному положенні датчиків та контрольованого матеріалу, може виконуватися умова $\frac{K_{\rho}}{K_{\rho 0}} \approx 1$, тоді:

$$\cos v_x = \frac{(f_0 \rho_1 c_1)^2}{\sqrt{\left(\pi f_0 f_x \rho_0 H_0 \frac{|V_0|}{|V|^*}\right)^2 + \left(\frac{f_x \rho_1 c_1}{\cos v_0} \frac{|V_0|}{|V|^*}\right)^2} - (\pi f_0 f_x \rho_0 H_0)^2}. \quad (8)$$

Якщо $\frac{|V|^*}{|V_0|} = 1$, то вираз (8) можна записати як:

$$\cos v_x = \frac{f_0}{f_x} \cdot \cos v_0. \quad (9)$$

Визначати, на скільки змінюється розмір пор в контрольованому матеріалі порівняно з еталоном, можна визначивши величину $\cos v_x$, а загальну пористість можна знайти з наступного виразу:

$$Q = \frac{|V_0|}{|V|} \cdot Q_0. \quad (10)$$

Виходячи з наведеного, відносну зміну δ_Q пористості контрольованого матеріалу у відсотках можна подати в наступному вигляді:

$$\delta_Q = \left(\frac{Q_0 - \frac{Q_0 |V_0|}{|V|}}{Q_0} \right) \cdot 100\% = \left(1 - \frac{|V_0|}{|V|} \right) \cdot 100\%, \quad (11)$$

а абсолютну зміну Δ_Q можна показати так:

$$\Delta_Q = Q_0 \cdot \left(1 - \frac{|V_0|}{|V|} \right). \quad (12)$$

Отже, за зміною амплітуди відбитої ультразвукової хвилі можна безконтактно визначати зміну пористості контрольованого матеріалу. Поверхні, які показують вплив зміни частоти f та розмірів пор через величину $\cos v$ на амплітуду ультразвукової хвилі, яка відбивається від контрольованого матеріалу та представлена модулем $|V|$, наведені на рис.1. Моделювання впливу зміни частоти хвиль, що відбиваються від поверхні матеріалу, та зміни розмірів його пор на амплітуду коливань показало, що безконтактний контроль структури різних матеріалів можна здійснювати керуючи частотою хвиль, якими зондується вироби.

Наведений метод контролю можна використати для реалізації роботизованих комплексів, завдання яких може полягати у розпізнаванні бракованої продукції із недопустимим розміром пор. Як складова частина таких комплексів може бути показана структурна схема пристрою з використанням мікроконтролера (МК) для розпізнавання браку, що зображена на рис.2. На рис. 3 наведена поверхня, що демонструє однаковий вплив двох параметрів (частоти хвиль та розмірів пор) на амплітуду коливань у вигляді цифрових кодів, якими оперує МК при зондуванні контрольованого виробу.

Пристрій, який наведений на рис. 2 працює наступним чином. Спочатку визначається пористість еталонного матеріалу, шляхом знаходження об'єму, який займає повітря в порах зразка цього матеріалу, скануванням його з обох сторін та виконанням мікрорізів, з наступним багаторазовим збільшенням в масштабі та обробкою даних на ПК. Значення загальної пористості Q_0 , модуля, який їй відповідає $|V_0|$ та параметра $\cos v_0$ вводяться в мікроконтролер у вигляді кодів N_0 , Nv_0 , $N \cos v_0$. Далі задається алгоритм роботи усього пристрою, що передбачає спочатку зондування контрольованого матеріалу ультразвуковими хвилями з частотою f_0 , яка задається кодом $N f_0$ з МК 1 при налаштуванні блоку формувача імпульсного сигналу 2, далі імпульси подаються на підсилювач потужності 3, після чого

поступають на випромінювач ультразвукових коливань 4. Ультразвукові коливання, що випромінюються п'єзоперетворювачем 4, потрапляють до приймаючого п'єзоперетворювача 6, після відбиття їх від поверхні контролюваного матеріалу 5. Амплітуда електричних коливань, які утворилася після відбиття ультразвукового сигналу від контролюваного виробу 5, пропорційна амплітуді зазначених ультразвукових хвиль, а після підсилення підсилювачем 7, напруга електричних коливань U_1 , що детектується піковим детектором 8, потрапляє до АЦП 9 за допомогою якого перетворюється у цифровий код N_{yx} .

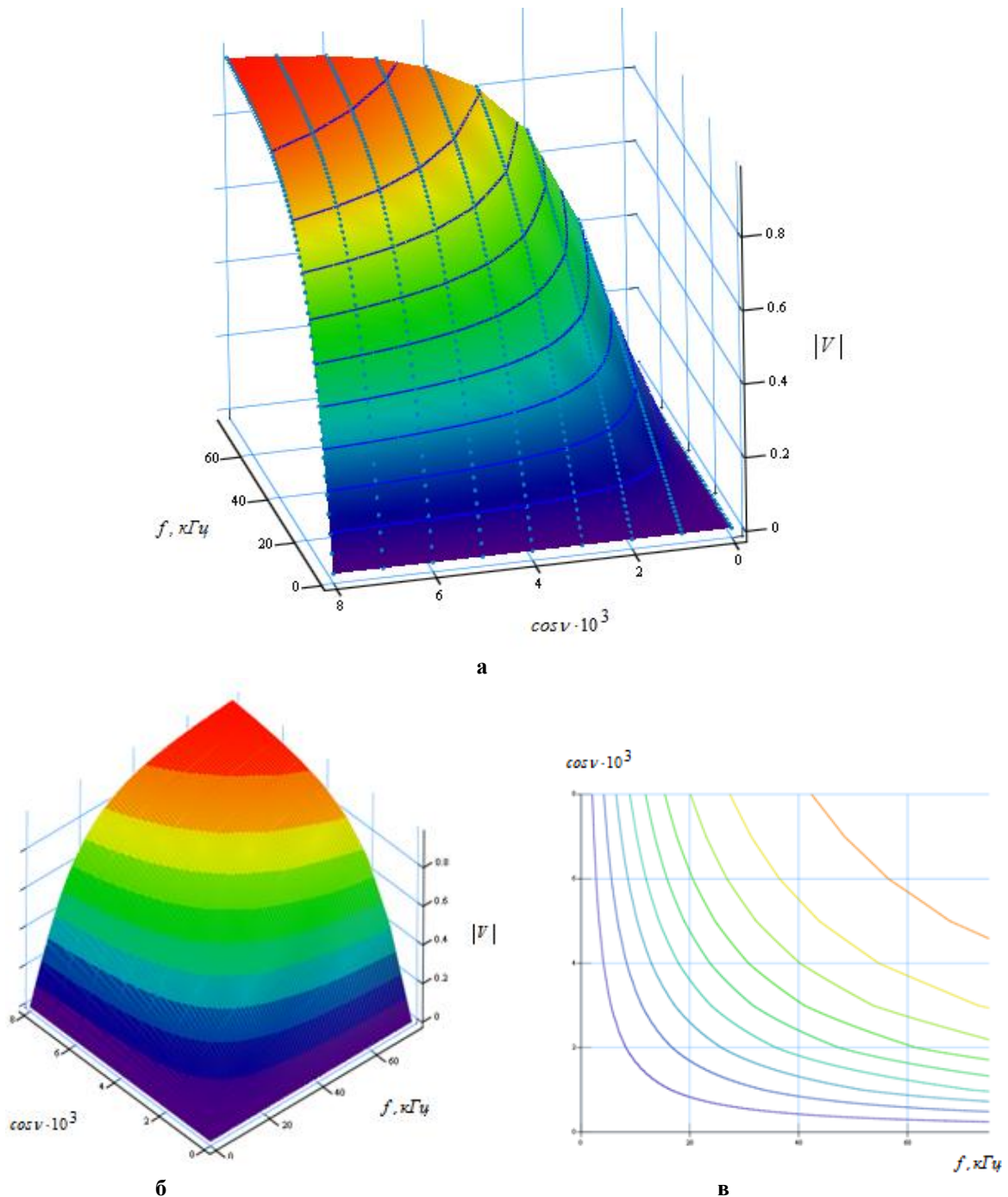


Рис.1. Поверхні, які показують вплив зміни частоти f та розмірів пор через величину $\cos \nu$ на амплітуду ультразвукової хвилі, яка представлена модулем $|V|$:

- а – поверхня з рівнями розмірів пор та амплітуди; б – поверхня з рівнями амплітуди;
- в – проекції рівнів амплітуди на координатах впливових параметрів f та $\cos \nu$

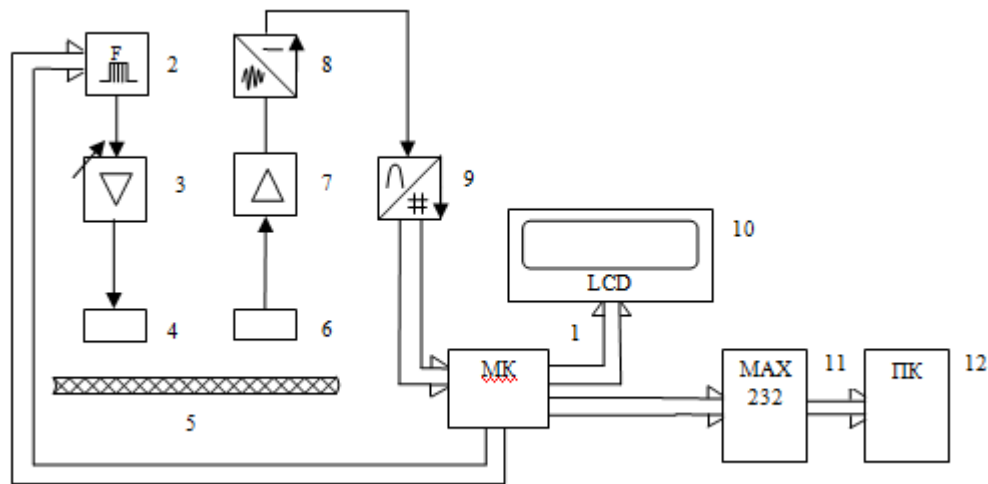


Рис.2. Структурна схема пристрою для визначення зміни розмірів пор матеріалів із складною структурою

Враховуючи коефіцієнти передачі різних ланок пристрою, напругу U_1 та цифровий код N_{vx} можна представити у наступному вигляді:

$$N_{vx} = \frac{U_1}{r_1} = K_1 K_2 K_3 K_4 \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\rho_1 c_1}{\pi f \rho_2 \chi}\right)^2}} \frac{U_m}{r_1}, \quad (13)$$

де U_m – амплітуда напруги електричних коливань генератора формувача імпульсів 2; K_1 – коефіцієнт підсилення підсилювача 3; K_2 – коефіцієнт перетворення блоків 4, 6; K_3 – коефіцієнт підсилення підсилювача 7; K_4 – коефіцієнт детектування пікового детектора 8; r_1 – одиниця молодшого розряду АЦП 9.

Далі зондування повторюється, але із зменшенням частоти f_x ультразвукових хвиль, яке регулюється кодом N_{fx} з МК 1, до того часу поки коди, які пропорційні амплітудам відбитих ультразвукових хвиль не зрівняються між собою ($N_{v0} = N_{vx}$). Коли зондування припиняється МК 1 визначає параметр $\cos v_x$ у вигляді коду наступним чином:

$$N_{\cos vx} = \frac{N_{f0}}{N_{fx}} \cdot N_{\cos v0}. \quad (14)$$

За параметром $\cos v_x$ можна визначити розмір пор контрольованого матеріалу та їх зміну, а загальна пористість виробу Q визначається у вигляді коду так:

$$N_x = \frac{N_{v0}}{N_{vx}} \cdot N_0. \quad (15)$$

Цифрові коди $N_{\cos v_x}$, N_x виводяться на LCD екран 10, передаються через послідовний порт та мікросхему MAX232 11 і записуються на ПК 12, де відбувається обробка та зберігання інформації.

На рис. 3 показано поверхню, яка демонструє взаємозв'язок кодів, що використовуються в мікроконтролері для визначення бракованих матеріалів за їхньою пористістю.

Величини кодів помножені на коефіцієнти пропорційності, які показують рівнозначний вплив зміни розмірів пор матеріалу та зміни частоти ультразвукових коливань на амплітуду відбитих хвиль, в межах, що відповідають безконтактному діапазону зондування виробів із пористою структурою.

Для спрощення задачі реалізації макетного дослідного зразку у вигляді мобільного робота, який може вирішувати задачі орієнтування у просторі та розпізнавання бракованих виробів, можна застосовувати відладочні модулі. Ці модулі мають можливість програмувати мікроконтролери, які інтегровані в їхній структурі, в залежності від поставленої задачі.

У процесі роботи був реалізований амплітудний детектор для безконтактного ультразвукового датчика. Ультразвуковий датчик зміни пористості матеріалу підключався до амплітудного детектора, а сам загальний блок (датчик та детектор) був реалізований на макетній платі, яка передавала вимірювальну інформацію до внутрішнього АЦП мікроконтролера. На рис. 4 представлено реалізований амплітудний детектор з безконтактним ультразвуковим датчиком на макетній платі.

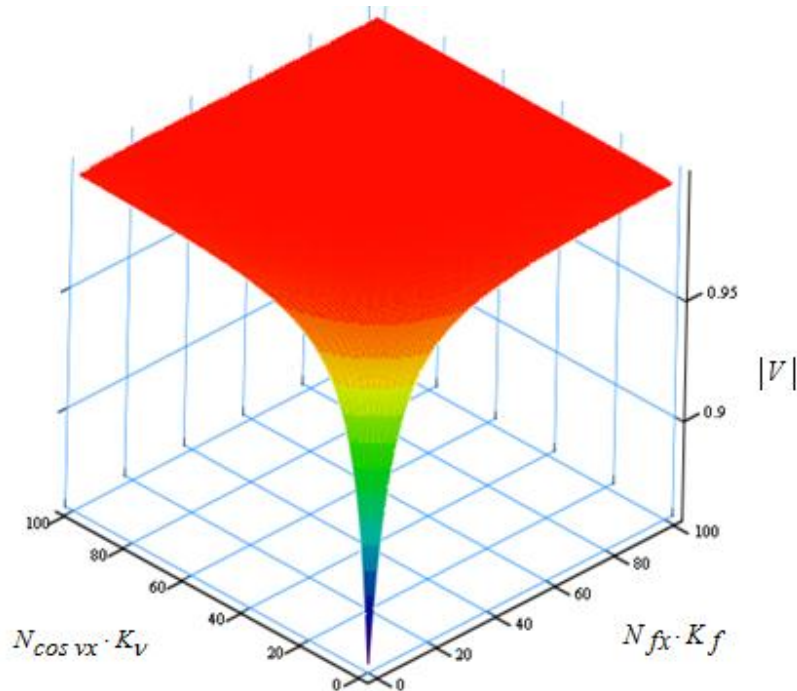


Рис.3. Поверхня, яка показує вплив частоти хвиль та розмірів пор матеріалу на рівень амплітуди відбитих ультразвукових коливань у вигляді цифрових кодів, якими оперує МК при зондуванні контрольованого виробу

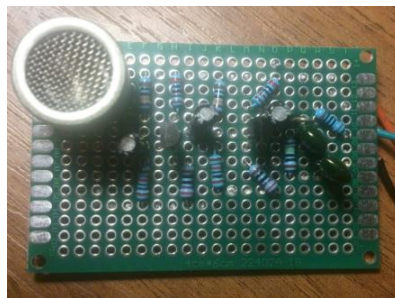


Рис. 4. Ультразвуковий датчик з амплітудним детектором

Частота максимального випромінювання становить 33-43 кГц. Вхідний електричний імпеданс на частоті максимального випромінювання до 1,8 кОм. Частота максимального прийому – 35-45 кГц.

Розроблений метод безконтактного контролю зміни пористості матеріалів перевірявся експериментально на прикладі зразків тканин та листа картону. Для експерименту підбиралися зразки тканин з майже однаковими товщинами та з різними порами, з яких одна тканина має саржеве переплетіння, а два інших – полотняне. Результати експериментальних даних представлені у графічному вигляді на рис. 5.

Тканина саржевого переплетіння має майже в 2 рази більшу поверхневу густину, ніж зразки полотняного переплетіння та відповідно меншу пористість. Матеріал картону в експерименті використовувався для того, щоб показати повне відбиття сигналу у порівнянні з матеріалами з наявністю пор.

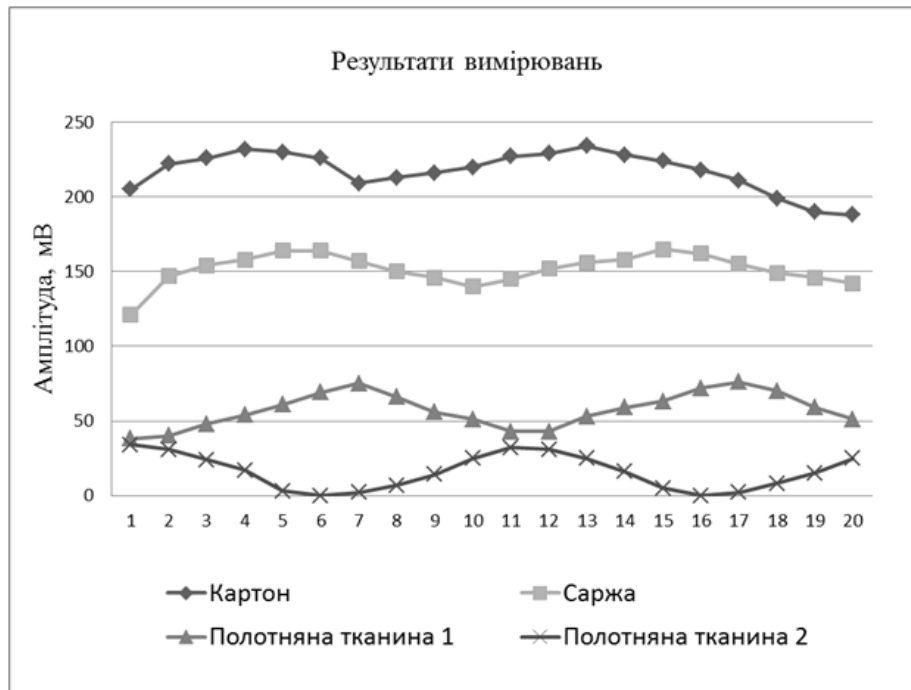


Рис. 5. Результати вимірювань

З графіків на рис. 5 видно, що відносна зміна вимірюваних значень варіюється у певному діапазоні. Це зумовлено дестабілізуючими факторами при зондуванні об'єкту контролю.

Створення систем розпізнавання різних матеріалів із складною структурою та їх перевірка на брак може допомогти у вирішенні задачі постійного технологічного контролю готової продукції на виробництві.

Більший та досконаліший промисловий зразок мобільного робота можна застосовувати для складських приміщень із готовою продукцією у виробничих цілях.

Висновки

Проведений аналіз показав, що для автоматизованого контролю технологічних параметрів різних фільтрувальних матеріалів, а також для виявлення бракованої продукції у процесі сортування виробів можна використовувати безконтактний ультразвуковий метод. Для реалізації поставленої задачі цей метод можна застосовувати із роботизованими комплексами на базі мікропроцесорної техніки. Основа методу полягає у порівнянні зміни амплітуди ультразвукової хвилі, яка відбилася від поверхні контрольованого матеріалу з амплітудою хвилі, що відбилася від еталонного зразку. Додатково також використовується регулювання частоти коливань для зрівноваження рівнів амплітуд хвиль, що порівнюються. Зміна частоти, у свою чергу, спрощує визначення параметру розміру пор матеріалу. Знаходження зміни пористості ультразвуковим безконтактним методом дозволить покращити якісні та експлуатаційні характеристики фільтрувальних тканин та інших матеріалів із складною структурою, а також підвищить оперативність контролю готової продукції, що має значення безпосередньо на виробництві.

Список використаної літератури

1. Прусенко В.С. Пневматические датчики и вторичные приборы. – М. – Л.: Энергия, 1965. – 193 с.
2. Белоусов Д.А. Контроль пространственного распределения оптического излучения, рассеянного дифракционной структурой/ Д.А. Белоусов, А.Г. Полещук, В. Н. Хомутов // Компьютерная оптика. – 2015. – Т.39, №5. – С.678-687.
3. Костюков А.Ф. Экспериментальное определение свойств волокон с помощью акустических колебаний / А.Ф. Костюков // Вестник АГАУ. – 2010. – № 9. – С. 84 – 87.
4. Здоренко В.Г. Ультразвуковой контроль поверхностной щільності тканин / В.Г. Здоренко, С.В. Барилко // Вісник ХНУ. – 2012. – №1. – С. 82-88.
5. Здоренко В.Г. Визначення зміни пористості тканини за зміною амплітуди відбитої ультразвукової хвилі / В.Г. Здоренко, С.В. Барилко, Н.М. Защепкіна, В.Ю. Санніков, В.К. Чорноморченко // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2012. – №3. – С. 122-127.