

С. В. Барилко, д-р техн. наук, проф.; В. Д. Дашенко

ФАЗОВИЙ МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ ПОВЕРХНЕВОЇ ЩІЛЬНОСТІ ПАПЕРОВИХ МАТЕРІАЛІВ

В статті наводяться основні залежності фазового зсуву від поверхневої щільності для ультразвукових хвиль, що пройшли крізь контрольований паперовий матеріал, та для хвиль, які відбилися від матеріалу. Також запропонований та розглянутий фазовий ультразвуковий метод вимірювання поверхневої щільності паперового матеріалу.

У статті наведено результати теоретичних і експериментальних досліджень, спрямованих на вивчення фазових характеристик ультразвукових хвиль у взаємодії з паперовими матеріалами різної поверхневої щільності. Основну увагу приділено аналізу залежності фазового зсуву від поверхневої щільності для двох випадків: коли ультразвукова хвиля проходить крізь контрольований зразок та коли вона відбивається від його поверхні. Детально розглядається вплив технологічного параметру паперового матеріалу на зміну фазових параметрів сигналу, що дозволяє встановити кількісні та якісні закономірності цього процесу.

Запропоновано фазовий ультразвуковий метод визначення поверхневої щільності, який базується на реєстрації фазового зсуву хвиль у різних режимах поширення. Метод має низку переваг порівняно з традиційними способами контролю, зокрема високу чутливість до малих змін щільності, відносну простоту реалізації та можливість застосування в автоматизованих інформаційно-вимірювальних системах. Сучасні системи дадуть змогу проводити цілодобове вимірювання технологічного параметру на виробничій лінії з врахуванням великих площ самого матеріалу, що необхідно враховувати в процесі змотування та пакування готової продукції. Окремо зроблено акцент на потенціалі цього підходу для безконтактного контролю та моніторингу якості в процесі виробництва паперу та інших тонких волокнистих матеріалів.

Отримані результати можуть бути використані для подальшої розробки удосконалених методів неруйнівного контролю, спрямованих на підвищення точності та надійності визначення поверхневої щільності. Це відкриває перспективи практичного застосування у целюлозно-паперовій промисловості, а також у суміжних галузях, де необхідна висока якість та однорідність тонких матеріалів.

Ключові слова: *ультра звукові хвилі, фазовий метод, інформаційно-вимірювальна система, паперові матеріали, поверхнева щільність, вимірювальний та опорний канали, інтернет-технології, електричні кола та сигнали.*

Вступ

Поверхнева щільність є технологічним параметром, який для паперових матеріалів розраховується як відношення їх маси на одиницю площі їх поверхні. Вимірювання цього параметру відіграє важливу роль на виробництві різних паперових матеріалів: паперу або картону з однорідною структурою малої товщини до 1 мм, що може впливати на якість готової продукції. Сьогодні засоби вимірювання і контролю поверхневої щільності паперових матеріалів передбачають переважно контактні та руйнівні методи визначення цього параметру в лабораторних умовах. Це не дає можливості здійснювати, оперативний моніторинг та контроль параметру в процесі виробництва. Тому важливо враховувати нові методи вимірювання технологічних параметрів, які можна застосувати для контролю поверхневої щільності паперових матеріалів з однорідною структурою. Також необхідно пов'язати метод обробки результатів вимірів технологічного параметру безпосередньо з технологічним процесом на виробництві.

Неруйнівні методи контролю [1, 2] не потребують вирізання зразків, руйнування цілісності

готової продукції, що призводить до зменшення витрат на підприємствах. Для вимірювання поверхневої щільності різних паперових матеріалів можна застосовувати такі неруйнівні методи: радіоізотопні, оптичні, ємнісні, радіохвильові, пневматичні, фотоелектричні та ультразвукові.

Виконаний огляд наявних та перспективних методів вимірювання та контролю поверхневої щільності паперових матеріалів показав, що з усіх методів найбільше за своїми можливостями підходять ультразвукові.

Багато ультразвукових неруйнівних методів застосовують у різних напрямках господарства людини. У свою чергу, ультразвукові методи умовно можна поділити на дві великі підгрупи: методи проходження хвиль, відбиття хвиль [3], комбіновані, які застосовують імпульсне випромінювання хвиль [4 – 5] або рідше методи із використанням безперервного випромінювання хвиль, що взаємодіють з контрольованим об'єктом.

Під час використання безперервного випромінювання можуть відбуватися явища накладання перевідбитих хвиль від поверхонь датчиків та паперового матеріалу. Також можуть відбуватися й інші небажані негативні процеси під час випромінювання ультразвукових хвиль на поверхню матеріалу. Ці хвилі, після перетворення їх в електричні коливання та оброблені сигнали, можуть створювати додаткові спотворені сигнали на різних ділянках електричної схеми вимірювального каналу. Це може суттєво ускладнювати обробку вимірювального сигналу в різних електричних колах, тому доцільно застосовувати саме імпульсне випромінювання ультразвукових хвиль для реалізації безконтактного методу вимірювання поверхневої щільності паперового матеріалу.

Основні залежності фазових зсувів ультразвукових хвиль, що взаємодіють з паперовим матеріалом

Після проведення детального аналізу взаємодії ультразвукових хвиль з паперовими різними матеріалами можна прийти до висновку, що визначати поверхневу щільність як технологічний параметр на виробництві доцільно використовуючи фазовий зсув ультразвукових хвиль відносно опорного ультразвукового сигналу. За допомогою безконтактного фазового методу, при якому паперові рулонні матеріали можна зондувати ультразвуковими хвилями, що з одного боку дає можливість оперативно перевіряти за головним технологічним параметром на виробничих лініях або в процесі сортування, а з іншого боку можна виконувати перевірку якості продукції не пошкоджуючи цілісності паперового полотна. Головна перевага полягає в оперативності вимірювання та подальшого контролю технологічного параметру на виробництві. При цьому паперовий матеріал опромінюється ультразвуковими хвилями і значення поверхневої щільності визначається за фазовим зсувом ультразвукових хвиль, що пройшли матеріал, відносно хвиль в опорному каналі, якщо структура матеріалу однорідна.

Фазовий зсув ϕ_w між падаючою хвилею та хвилею, що проходить крізь паперовий матеріал, можна показати наступною залежністю:

$$\phi_w = \arctg \left(\frac{\left(\operatorname{sh} \frac{\alpha_3 m_s}{\rho_2} + \left(\frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2} \right) \cdot \operatorname{ch} \frac{\alpha_3 m_s}{\rho_2} \right) \cdot \sin \frac{\omega m_s}{Z_2}}{\left(\operatorname{ch} \frac{\alpha_3 m_s}{\rho_2} + \left(\frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2} \right) \cdot \operatorname{sh} \frac{\alpha_3 m_s}{\rho_2} \right) \cdot \cos \frac{\omega m_s}{Z_2}} \right), \quad (1)$$

де m_s – поверхнева щільність паперового матеріалу; ω – колова частота ультразвукових хвиль; α_3 – коефіцієнт згасання ультразвукових хвиль в матеріалі паперу; Z_1 – акустичний опір повітря; Z_2 – акустичний опір паперового матеріалу; ρ_2 – об'ємна щільність паперового матеріалу.

За значення $\alpha_3 = 0$ та $Z_1/Z_2 \ll 1$ вираз (1) можна подати так:

$$\phi_w = \arctg \left(\frac{\frac{Z_2}{2Z_1} \cdot \sin \frac{\omega m_s}{Z_2}}{\cos \frac{\omega m_s}{Z_2}} \right). \quad (2)$$

Для аналізу відбитого ультразвукового сигналу скористаємося наступною залежністю для визначення фазового зсуву [6]:

$$\begin{aligned} \phi_V = \arctg \left(- \left(\operatorname{sh} \frac{\alpha_3 m_s}{\rho_2} + \left(\frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2} \right) \cdot \operatorname{ch} \frac{\alpha_3 m_s}{\rho_2} \right) \cdot \sin \frac{\omega m_s}{Z_2} \times \right. \\ \times \left(\left(\left(\operatorname{ch} \frac{\alpha_3 m_s}{\rho_2} + \left(\frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2} \right) \cdot \operatorname{sh} \frac{\alpha_3 m_s}{\rho_2} \right) \cdot \cos \frac{\omega m_s}{Z_2} \right)^2 + \left(\left(\operatorname{sh} \frac{\alpha_3 m_s}{\rho_2} + \left(\frac{Z_2}{2Z_1} + \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + \frac{Z_1}{2Z_2} \right) \cdot \operatorname{ch} \frac{\alpha_3 m_s}{\rho_2} \right) \cdot \sin \frac{\omega m_s}{Z_2} \right)^2 - \left(\operatorname{ch} \frac{\alpha_3 m_s}{\rho_2} + \left(\frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2} \right) \cdot \operatorname{sh} \frac{\alpha_3 m_s}{\rho_2} \right) \cdot \cos \frac{\omega m_s}{Z_2} \right)^{-1} \Bigg), \end{aligned} \quad (3)$$

Відповідно до виразу (1) можна спочатку показати залежність між інформативним параметром відбитої від матеріалу ультразвукової хвилі та між технологічним параметром, який потрібно контролювати. Якщо показати фазовий зсув ϕ_V між падаючою хвилею та хвилею, що відбивається від паперового матеріалу, і подати його залежність від поверхневої щільності паперового матеріалу, тоді цей параметр з врахуванням $\alpha_3 = 0$ та $Z_1/Z_2 \ll 1$ можна виразити наступною залежністю:

$$\phi_V = \arctg \left(\frac{-\frac{Z_2}{2Z_1} \cdot \sin \frac{\omega m_s}{Z_2}}{\left(\cos \frac{\omega m_s}{Z_2} \right)^2 + \left(\frac{Z_2}{2Z_1} \cdot \sin \frac{\omega m_s}{Z_2} \right)^2 - \cos \frac{\omega m_s}{Z_2}} \right). \quad (4)$$

Для дослідження ультразвукових сигналів було використано зразки паперу із різною поверхневою щільністю: 8 г/м², 16 г/м², 32 г/м² та 80 г/м².

У результаті математичного моделювання на основі виразів (2) та (4) були побудовані криві залежностей кутів фазового зсуву хвилі, що пройшла крізь паперовий матеріал (рис. 1), та фазового зсуву відбитої хвилі (рис. 2) від поверхневої щільності.

Отримані залежності можуть бути використані для подальшої розробки неруйнівних методів вимірювання технологічних параметрів однорідних матеріалів у виробничих умовах.

На рис. 3 представлена структурна схема інформаційно-вимірювальної системи для визначення поверхневої щільності паперових матеріалів.

Інформаційно-вимірювальна система містить: генератор гармонічних коливань напруги 1 (робоча частота генератора 40 кГц), генератор електричних прямокутних імпульсів 2, формувач пакетів гармонічних коливань 3, підсилювач напруги 4, випромінюючі п'єзоперетворювачі 5 та 6, приймаючі п'єзоперетворювачі 7 та 8, регульований підсилювач коливань напруги 9, фазовий детектор 10, мікроконтролерний блок (МКБ) 11 перетворення та обробки вимірювальної інформації, перетворювач інтерфейсів (ПІ) 12, персональний комп'ютер (ПК) 13, контрольований паперовий матеріал 14.

Перед вимірюванням поверхневої щільності m_s контрольованого паперового матеріалу 14 у відповідності до вимірюваних значень напруги на опорному каналі та напруги на вимірювальному каналі налаштовують ультразвукову інформаційно-вимірювальну систему. Налаштування за напругами з каналів системи проходить так, щоб визначене значення поверхневої щільності спочатку було $m_s = 0$ та за нормальних умов співпадало із значенням, що відображається на ПК 13. Набіги фази спочатку перед вимірами врегульовуються за допомогою програмного коду в МКБ 11.

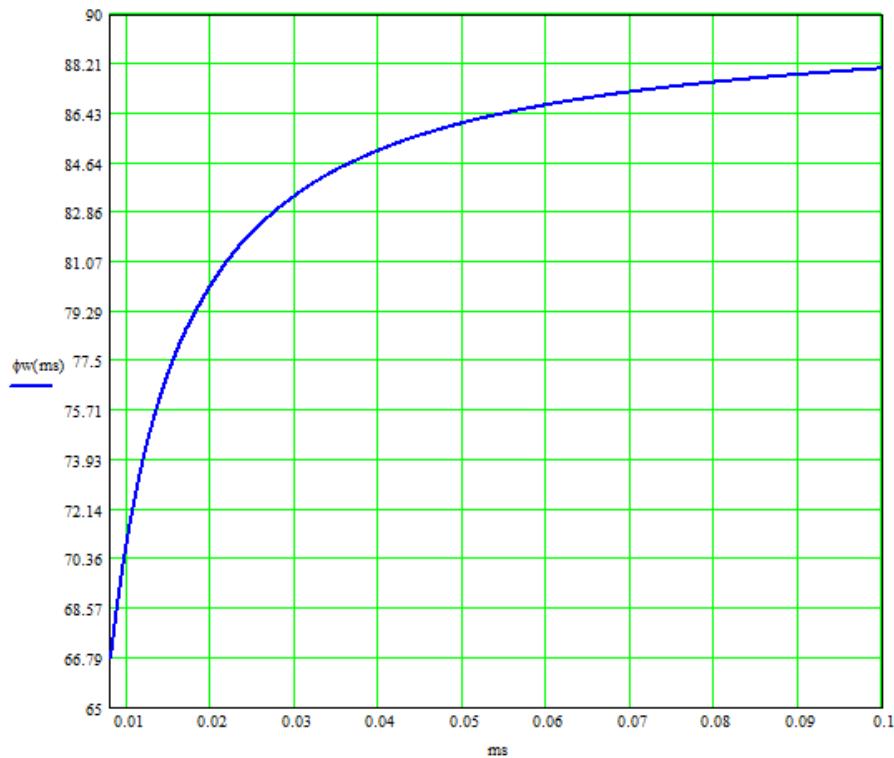


Рис. 1. Залежність фазового зсуву ϕ_w , град від поверхневої щільності m_s , кг/м² паперових матеріалів

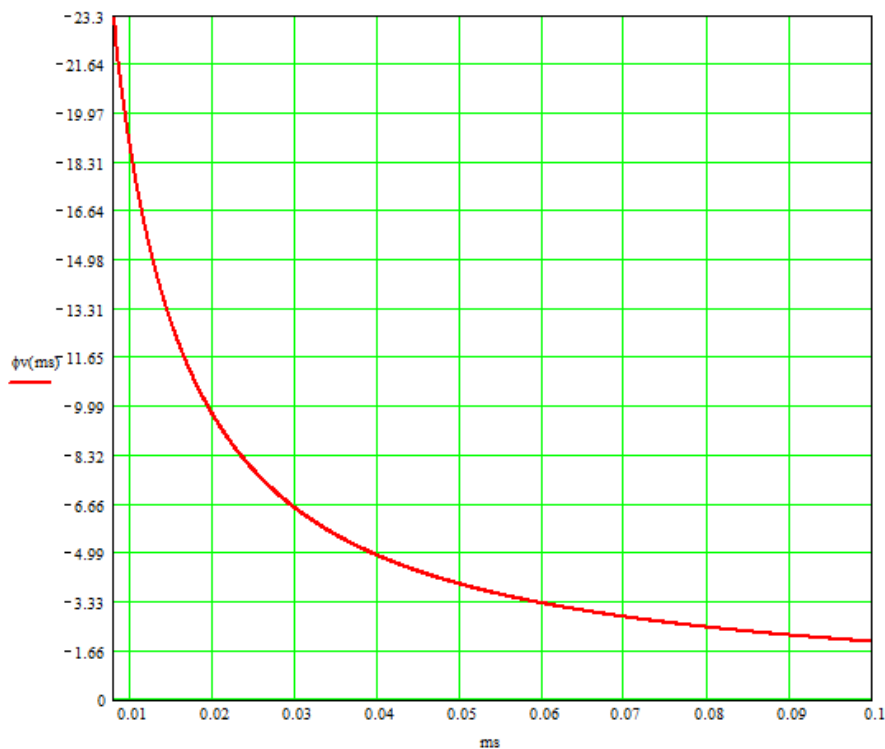


Рис. 2. Залежність фазового зсуву ϕ_v , град від поверхневої щільності m_s , кг/м² паперових матеріалів

Гармонічні коливання напруги з виходу генератора 1 перетворюються за допомогою генератора прямокутних імпульсів 2 та формувача пакетів гармонічних коливань напруги 3 у пакети коливань, які підсилюються підсилювачем 4 і надходять на п'єзоперетворювач 5 вимірювального каналу, де перетворюються в ультразвукові хвилі, а вже у вигляді пакетів ультразвукових пакетів хвиль вони падають перпендикулярно на поверхню контролюваного

Наукові праці ВНТУ, 2025, №3

матеріалу 14 та проходять його. Потім ці ультразвукові хвилі потрапляють на п'єзоперетворювач 7, після чого вони перетворюються в електричні коливання напруги підсилюються блоком 9 та подаються на перший вхід фазового детектора 10. Одночасно з цим пакети ультразвукових хвиль випромінюються п'єзоперетворювачем 6 у повітряне середовище опорного каналу. Ці пакети хвиль приймаються п'єзоперетворювачем 8 та надходять на другий вхід фазового детектора 10.

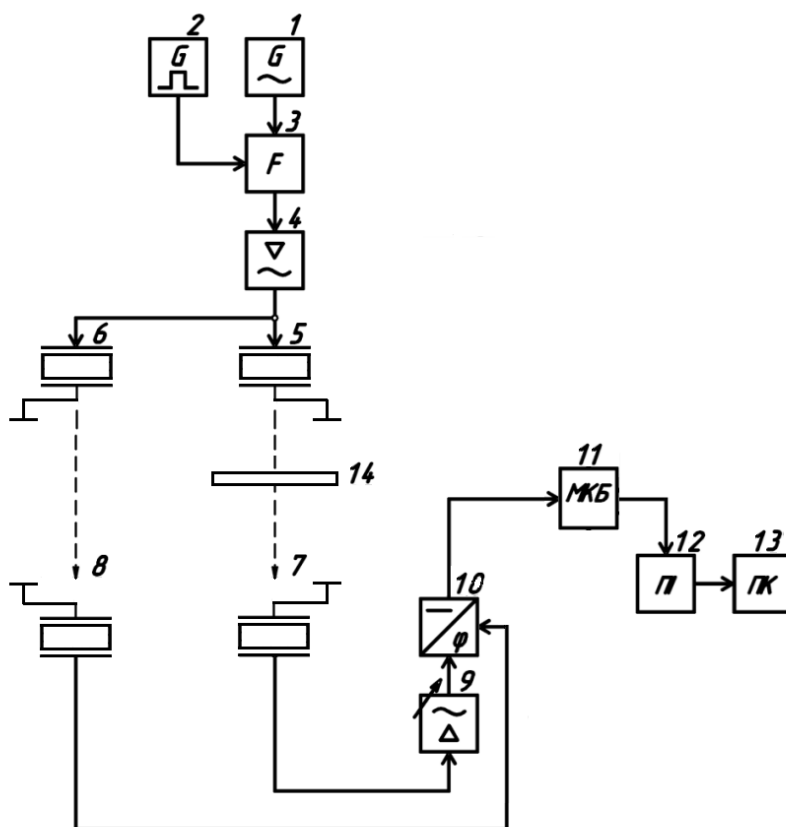


Рис. 3. Загальний вигляд структурної схеми інформаційно-вимірювальної системи для визначення поверхневої щільності m_s паперових матеріалів

Фазовий детектор визначає фазовий зсув між сигналом у вимірювальному каналі та в опорному каналі та видає напругу, яка буде пропорційна йому. Ця напруга буде перетворюватися на цифровий код N_ϕ . Виходячи із отриманого виразу (2), можна показати цей код N_ϕ так:

$$N_\phi = \arctg \left(\frac{\frac{Z_2}{2Z_1} \cdot \sin \frac{\omega m_s}{Z_2}}{\cos \frac{\omega m_s}{Z_2}} \right), \quad (5)$$

$$\text{за } \frac{\omega m_s}{Z_2} \ll 1$$

$$N_\phi = \arctg \left(\frac{\pi f m_s}{Z_1} \right) = \arctg(N_x), \quad (6)$$

$$N_x = \frac{\pi f m_s}{Z_1}, \quad (7)$$

звідки поверхнева щільність m_s паперового матеріалу 14 буде визначатись за виразом:

$$m_s = \frac{Z_1 N_x}{\pi f}, \quad (8)$$

де N_x – код, що буде пов'язаний з кодом N_ϕ , який отримується в процесі вимірювання, код N_x може вводитися до МКБ у вигляді табличних значень для всього діапазону вимірювань.

Поточне значення поверхневої щільності m_s контрольованого матеріалу 14 в процесі оперативного моніторингу технологічного параметру, додатково передається через ПІ 12 до ПК 13, де формується база вимірюваних значень параметру, що може обмінюватися та передавати вимірювальну інформацію до веб-серверу з використанням інтернет технологій.

За відсутності контрольованого матеріалу 14, коли значення коду $N_\phi = 0$ та $N_x = 0$, тоді за виразом (8) відображається на ПК 13 $m_s = 0$.

Отже, за зміни параметрів акустичного опору Z_2 контрольованого матеріалу, можна точно визначати значення технологічного параметру поверхневої щільності m_s в процесі виробництва без переналаштування інформаційно-вимірювальної системи.

Висновки

Запропонований ультразвуковий фазовий метод вимірювання поверхневої щільності паперового матеріалу можна застосовувати для моніторингу технологічного параметру в процесі виробництва. Метод дозволяє використовувати безконтактні перетворювачі ультразвукових хвиль для різних паперових матеріалів без застосування еталонних матеріалів за налаштування вимірювального обладнання. Була запропонована структурна схема простої інформаційно-вимірювальної системи для визначення поверхневої щільності різних паперових матеріалів, яка дасть можливість проводити моніторинг та контроль параметру в жорстких умовах виробництва.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Геворкян Е. С., Мельник О. М. Неруйнівні методи контролю якості: конспект лекцій. Харків: УкрДАЗТ, 2015. 42 с.
2. Сусліков Л. М., Студеняк І. П. Неруйнівні методи контролю: навчальний посібник. Ужгород: Видавництво УжНУ, 2016. 192 с.
3. Дослідження відбиття ультразвукових хвиль від одношарових текстильних полотен та двошарових текстильних пакетів із різним розміром пор / В. Г. Здоренко та ін. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія Технічні науки*. 2020. № 4 (148). С. 87–97.
4. Здоренко В. Г., Барилко С. В. Ультразвуковий контроль поверхневої щільності тканин. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2012. №1. С. 82–88.
5. Застосування фазового і амплітудно-фазового акустичних методів для автоматизованого контролювання поверхневої щільності текстильних матеріалів / В. Г. Здоренко та ін. *Стандартизація, сертифікація, якість*. 2019. № 2 (114). С. 86–94.
6. Application of Non-contact Methods to Control the Technological Parameters of Textile Materials in the Production Process / V. Zdorenko et al. *Studies in Systems, Decision and Control*. 2023. №460. P. 125–165.

Стаття надійшла до редакції 01.09.2025.

Стаття пройшла рецензування 08.09.2025.

Барилко Сергій Віталійович – д-р техн. наук, професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій.

Дащенко Володимир Дмитрович – аспірант кафедри інформаційно-вимірювальних технологій, e-mail: apph.dvd@gmail.com.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».