

С.В. Барилко, д.т.н., проф.

В.Д. Дашенко, аспірант

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Експериментальні вимірювання поверхневої щільності плівки та паперу ультразвуковим методом

Для вимірювання та контролю поверхневої щільності плівки та паперового матеріалу в процесі виробництва сьогодні використовують контактний руйнівний метод визначення параметра, що не дає можливості реалізувати постійний його моніторинг. Для вирішення цієї проблеми у ході досліджень був розроблений зразок комп'ютеризованої системи і запропонований безконтактний ультразвуковий метод вимірювання поверхневої щільності матеріалу для можливості забезпечення моніторингу параметра в режимі реального часу при невеликих грошових витратах порівняно з аналогами.

Для моделювання та розробки зразка інформаційно-вимірювальної системи поверхневої щільності плівкових та паперових матеріалів було наведено основні співвідношення амплітуд ультразвукових хвиль, які взаємодіють з матеріалом; розроблено алгоритм вимірювальних процедур з подальшим розрахунком для визначення параметра поверхневої щільності матеріалу. Додатково були проведені дослідження з визначення поверхневої щільності матеріалу з використанням контактного руйнівного методу та електронних ваг, що дало можливість порівняти зазначені методи.

При безконтактному ультразвуковому методі плівковий та паперовий матеріал опромінювалися хвилями, а значення поверхневої щільності визначалося співвідношенням амплітуди ультразвукової хвилі, що пройшла крізь матеріал, до амплітуди хвилі, яка падає на нього.

Ключові слова: *поверхнева щільність; паперовий матеріал; плівка; ультразвуковий метод вимірювання; моделювання; комп'ютеризована інформаційно-вимірювальна система.*

Актуальність теми. Стандартний процес виготовлення паперу починається із підготовки целюлозної маси, де її перемелюють, фарбують, змішують із хімічними добавками і розбавляють водою. Після цього відбувається процес очищення суміші, яку потім пресують і просушують. Наступний крок – каландрування, після чого поверхня паперу стає гладкою. Потім листи ріжуть та сортують. Верстати на паперових виробництвах працюють безперервно. Як наповнювач при виготовленні паперу використовується каолін, парафінова емульсія, клеї, смоли, тальк, крохмаль. Вони потрібні для міцності, довговічності та покращення характеристик матеріалу. Сушать папір на спеціальних шліфувальних циліндрах за підвищених температур. Коли лист проходить між ними, він стає щільним, рівномірним та гладким. Після цього паперове полотно перевіряється за поверхневою щільністю матеріалу та збирається в рулон. Папір для друку за державними стандартами має масу до 250 г/м².

Для виготовлення плівки теж застосовується технологічний процес, який можна показати у декілька етапів. Після підготовки однорідного гранульованого матеріалу для виготовлення плівки він поміщається в екструдер для подальшого плавлення при температурі від 150 °C і більше. В результаті виходить тонкий розтоплений матеріал у формі поліетиленової труби. Такий пластиковий рукав поступово охолоджується, після чого його розкочують валиком. Потім такий рукав розрізають, щоб отримати дві окремі частини. Такий поділ значно спрощує подальший процес обробки, а вже потім можуть вимірювати товщину матеріалу контактними вимірювальними засобами або можна її визначити через вимірюване значення поверхневої щільності безконтактним методом з подальшим розрахунком товщини за потреби. Далі автоматизований робот обрізає ножом плівку до потрібної ширини, а потім вона змотується в рулони, вага яких може досягати 150 кг.

Таким чином, виникає важлива наукова та практична проблема, яка полягає в забезпеченні оперативного моніторингу поверхневої щільності паперового та плівкового матеріалів у процесі виробництва для контролю якості кінцевої продукції.

Постановка проблеми й огляд останніх досліджень. Сьогодні найпростішим методом визначення поверхневої щільності тонких матеріалів є метод вирізання їх пробних зразків та подальшого зважування [1]. Для цього в лабораторних умовах беруть зразок розміром 10 см² та зважують його. Масу 10 см² помножують на відповідний множник 100 та отримують значення поверхневої щільності полотна. Проте такий метод не дозволяє проводити оперативний контроль технологічного параметра.

Якщо коротко розглянути неруйнівні методи вимірювання технологічного параметра поверхневої щільності, то можна виокремити: метод відбиття радіохвиль, що дозволяє отримати значення параметра за відбитим сигналом [2] із формуванням реєстраційного сигналу в детекторній системі, але є складним у налаштуванні; ємнісний метод [3], який є перспективним для контролю щільності, але має обмежену чутливість до зміни параметрів різних матеріалів; ультразвуковий безконтактний метод [4], що є найбільш ефективним, оскільки забезпечує постійний моніторинг параметра без руйнування цілісності контролюваного полотна. Зазвичай в ультразвукових вимірювальних системах випромінювання спрямовується перпендикулярно до поверхні матеріалу, але можуть бути випадки провисання матеріалу, тоді враховується діапазон кута провисання та можливе збільшення похибки вимірювання.

Сьогодні не існує у світі стандартного рішення, яке дозволило би оперативно контролювати поверхневу щільність плівкових та паперових матеріалів, тому необхідно застосовувати метод, який буде враховувати особливості технологічних процесів різних матеріалів та забезпечить безконтактність первинних перетворювачів з матеріалом з мінімальними ефектами перевідбиття та накладання хвиль у процесі роботи вимірювальної системи. Аналіз показав, що одні з найбільш ефективних методів вимірювання та контролю поверхневої щільності паперових та плівкових матеріалів є безконтактні ультразвукові методи [5–11]. На основі безконтактних методів можна провести моделювання та проєктування різних інформаційно-вимірювальних систем для різноманітних задач на виробництві.

Метою роботи є експериментальне дослідження ультразвукового методу та зразка інформаційно-вимірювальної системи для вимірювання і контролю поверхневої щільності плівкових та паперових матеріалів з метою подальшої можливості реалізації безперервного оперативного контролю цього параметра на виробництві.

Для досягнення мети необхідно вирішити такі завдання:

- навести основні співвідношення амплітуд ультразвукових хвиль, які описують принципи реалізації безконтактного методу вимірювання поверхневої щільності для тонких плівкових та паперових матеріалів;
- провести експериментальні дослідження із застосуванням зразка інформаційно-вимірювальної системи для визначення поверхневої щільності плівкових та паперових матеріалів безконтактним ультразвуковим методом.

Викладення основного матеріалу. Був проведений аналіз проходження ультразвукових хвиль через шар тонкого матеріалу з поверхневою щільністю m_s , яка контролюється. Комплексний коефіцієнт проходження ультразвукових хвиль, що падають під кутом β до поверхні матеріалу (ефект можливого провисання матеріалу у виробничих умовах), поверхневу щільність m_s якого контролюють, можна виразити залежністю:

$$W_\beta = \left(1 + \left(\frac{\pi f}{Z_1} \frac{m_s}{\cos \beta} \right)^2 \right)^{-1} + j \left(\frac{Z_1}{\pi f} \frac{\cos \beta}{m_s} + \frac{\pi f}{Z_1} \frac{m_s}{\cos \beta} \right)^{-1}, \quad (1)$$

де W_β – комплексний коефіцієнт проходження ультразвукових хвиль через шар матеріалу; β – кут падіння ультразвукової хвилі між нормаллю до поверхні матеріалу та її хвильовим вектором; f – частота ультразвукових хвиль; Z_1 – акустичний опір повітря.

Модуль комплексного коефіцієнта проходження ультразвукових хвиль через шар матеріалу, який пропорційний амплітуді хвиль, можна подати так:

$$|W_\beta| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\pi f m_s}{Z_1 \cos \beta} \right)^2}}. \quad (2)$$

Таким чином можна безконтактно визначати поверхневу щільність m_s різних матеріалів, що контролюються.

У процесі виконання досліджень було розроблено зразок експериментальної комп'ютеризованої інформаційно-вимірювальної системи (КІВС) на основі безконтактного ультразвукового методу для визначення поверхневої щільності тонких матеріалів (рис. 1–2). У цій системі зазначено такі блоки: генератори ультразвукових хвиль 1, первинні перетворювачі 2, 3 на опорі, блок детектування пікового значення амплітуди хвиль із підсиленням сигналу 4, мікроконтролерний блок (МКБ) обробки вимірювальної інформації 5, цифровий осцилограф 6 та персональний комп'ютер (ПК) 7, контрольована плівка 8.

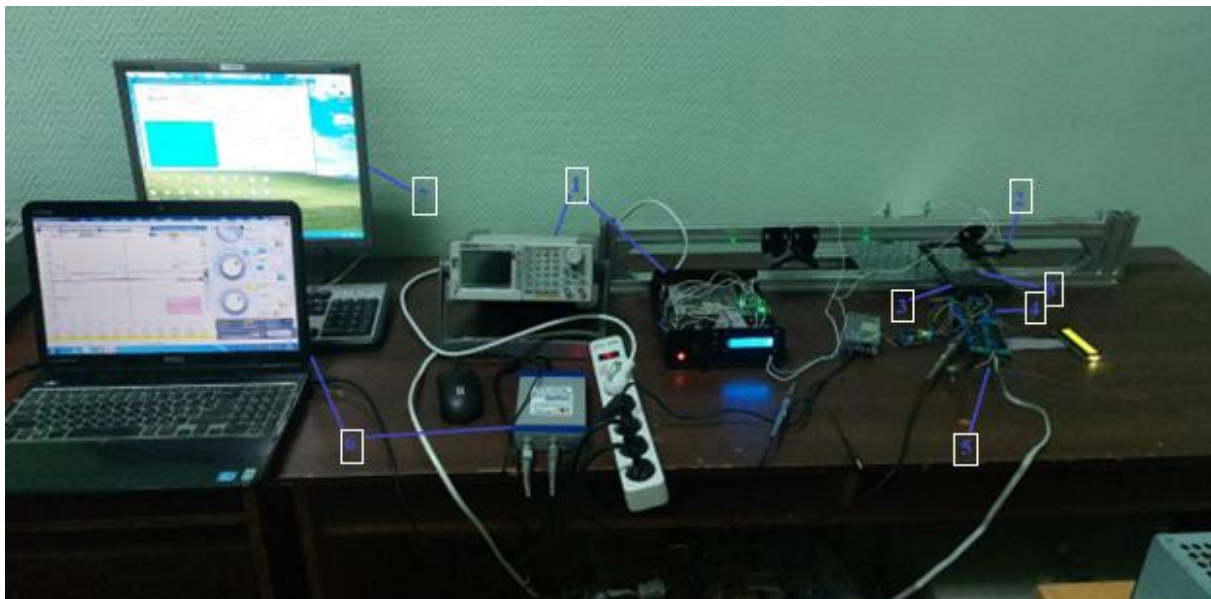


Рис. 1. Комп'ютеризована інформаційно-вимірювальна система (KIBC)

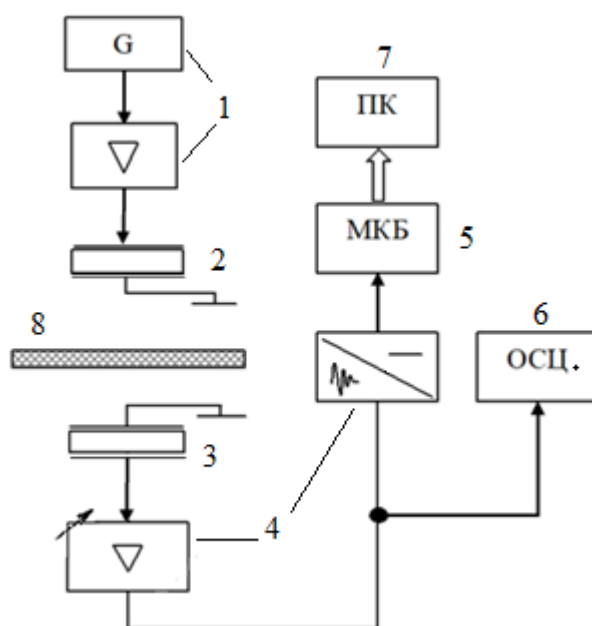


Рис. 2. Узагальнена структурна схема експериментального зразка KIBC

Для вимірювання поверхневої щільності m_s бралися різні матеріали полімерної плівки та паперу, які часто використовують у повсякденному житті людини. Серед досліджуваних матеріалів, що наводяться в статті: папір для друку; папір для самописця; плівка для пакування (чорного кольору); харчова плівка з середньою поверхневою щільністю m_s .

Під час вимірювань для кожного з матеріалів було отримано наступні знімки осцилограм ультразвукових хвиль на цифровому осцилографі 6, які пройшли крізь контрольоване середовище та повітря. Отримані осцилограми були використані для налаштування експериментальної KIBC та для розрахунку поверхневої щільності m_s матеріалу при порівнянні з руйнівним методом визначення цього технологічного параметра. На рисунках 3–6 показані проміжні результати досліджень для трьох зразків матеріалів та для сигналу в повітряному середовищі, з яким порівнюються інші сигнали.

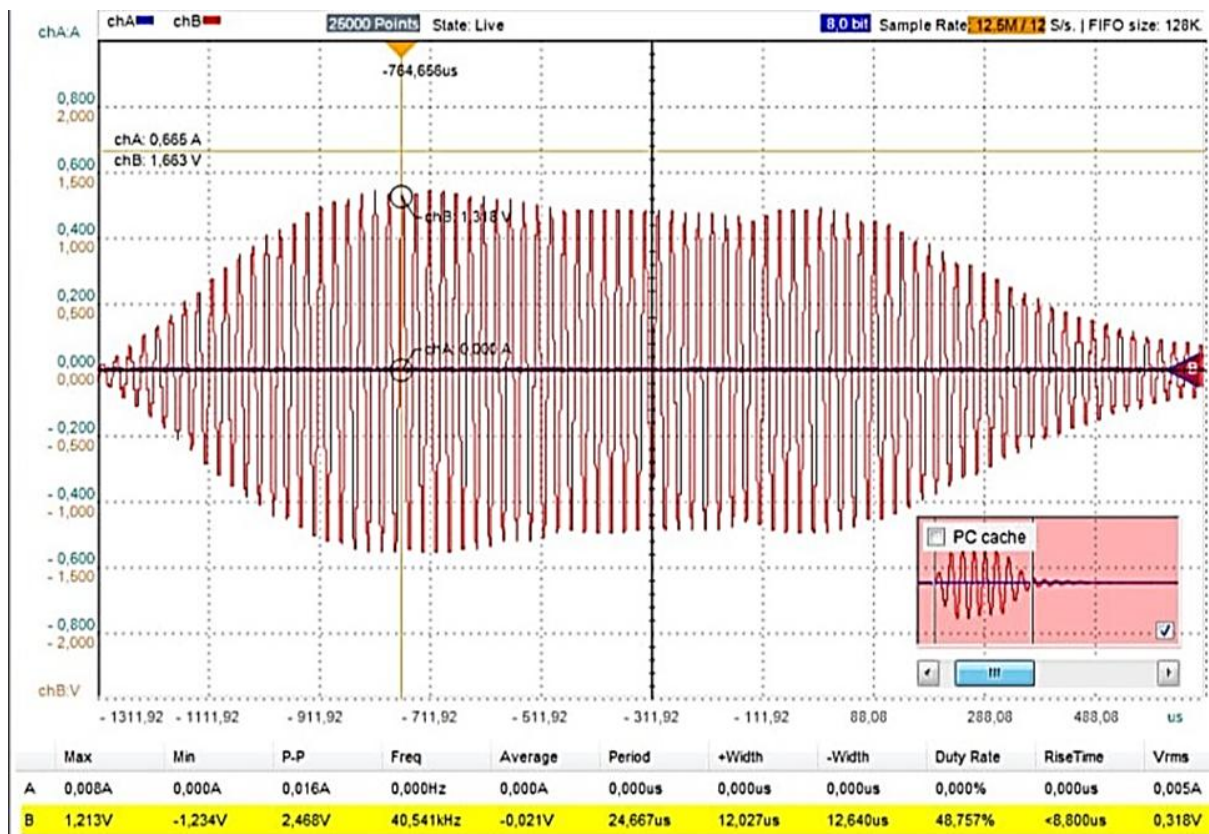


Рис. 3. Проходження імпульсного ультразвукового сигналу з частотою 40 кГц через повітряне середовище без контрольованого зразка (матеріалу площею 10 см²) для налаштування опорного сигналу на приймачому перетворювачі

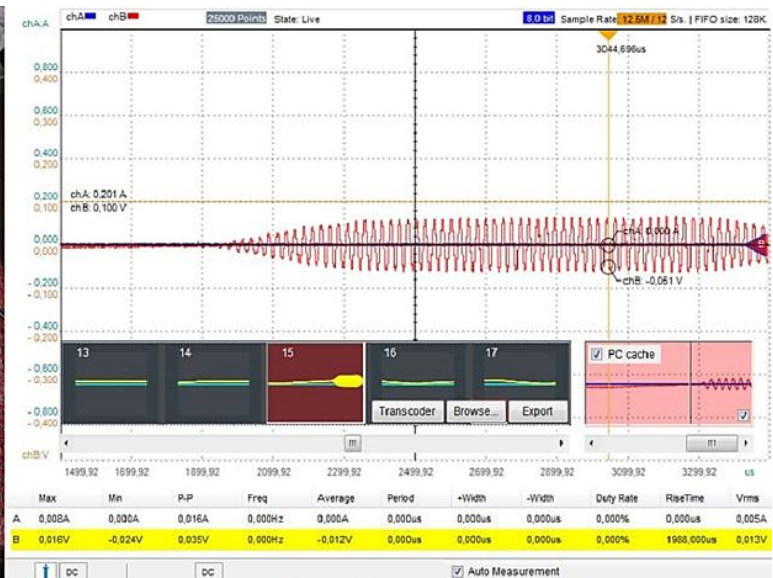


Рис. 4. Проходження імпульсного ультразвукового сигналу з частотою 40 кГц через папір для друку, обрахована поверхнева щільність паперу за амплітудою хвиль $m_s = 86,6 \text{ г/м}^2$, а також визначення параметра руйнівним методом за допомогою вагів $m_s = 82,3 \text{ г/м}^2$

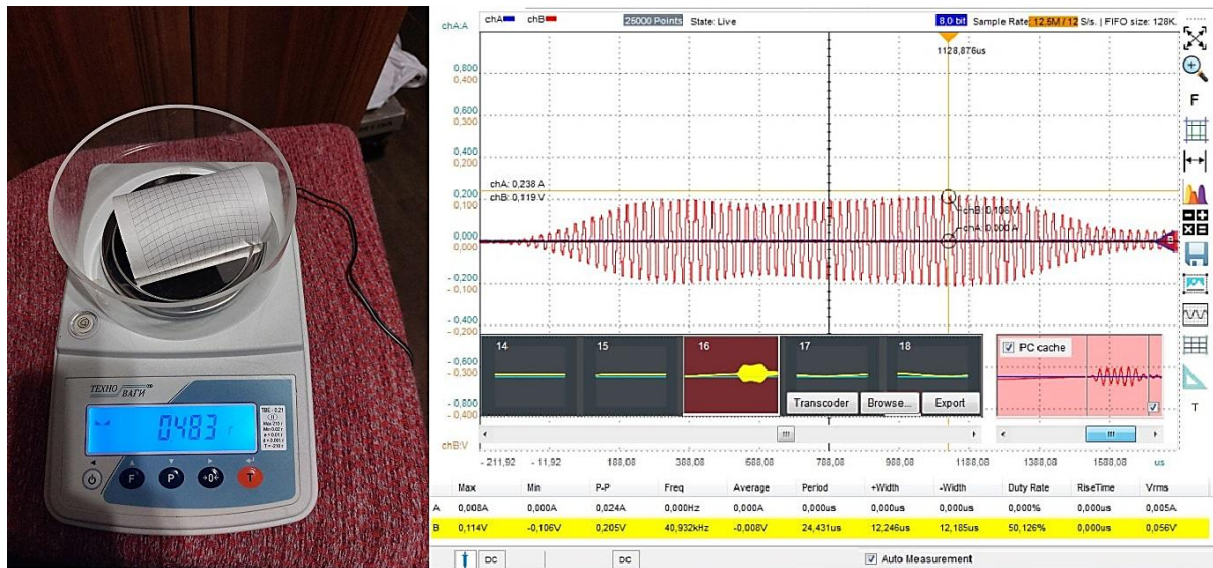


Рис. 5. Проходження імпульсного ультразвукового сигналу з частотою 40 кГц через папір для самописця, обрахована поверхнева щільність паперу за амплітудою хвиль $t_s = 41,6 \text{ г/м}^2$, а також визначення параметра руйнівним методом за допомогою вагів $t_s = 48,3 \text{ г/м}^2$

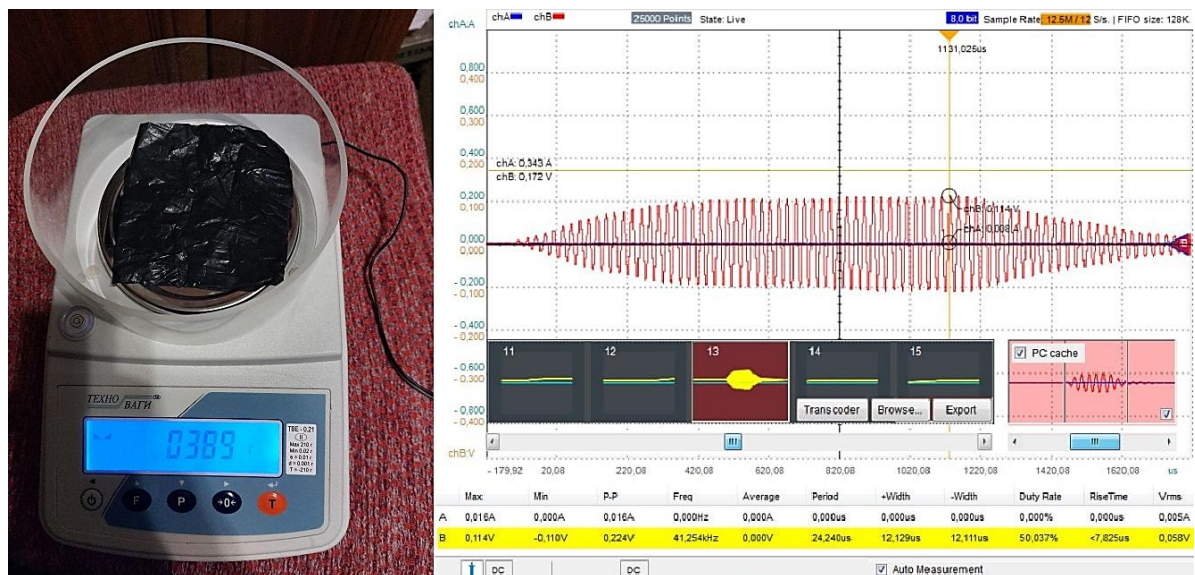


Рис. 6. Проходження імпульсного ультразвукового сигналу з частотою 40 кГц через плівку для пакування, обрахована поверхнева щільність плівки за амплітудою хвиль $t_s = 38,6 \text{ г/м}^2$, а також визначення параметра руйнівним методом за допомогою вагів $t_s = 38,9 \text{ г/м}^2$

У результаті досліджень були отримані експериментальні осцилограми та створена комп'ютеризована інформаційно-вимірювальна система, які підтвердили доцільність використання безконтактного ультразвукового методу для вимірювання поверхневої щільності t_s різних матеріалів з метою оперативного контролю цього параметра під час виробництва рулонів полотна на технологічному обладнанні.

Якщо показати отримані результати у вигляді графіка (рис. 7), то можна сказати, що отримані експериментальні дані підтверджують теоретичні залежності (1), (2) на практиці і дають можливість подальшої реалізації безконтактного методу вимірювання поверхневої щільності на виробництві.

Завдяки можливості безконтактного вимірювання ультразвуковий метод може широко застосовуватися у виробничих процесах, особливо для контролю тонких матеріалів.

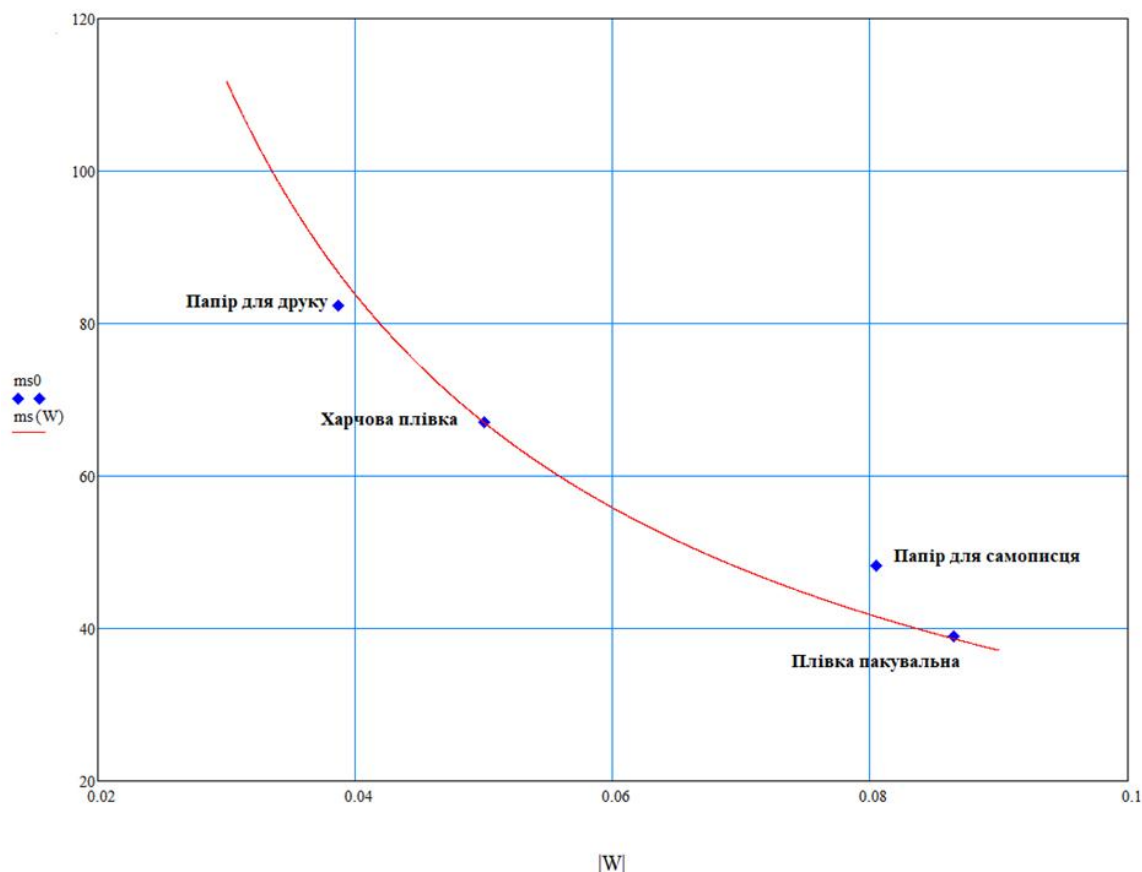


Рис. 7. Порівняльний графік отриманих експериментальних значень поверхневої щільності m_s , g/m^2 безконтактним методом із значеннями ms_0 , g/m^2 параметра цих матеріалів, які отримані методом вирізання і зважування зразків, від $|W_\beta|$

Висновки з цього дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі. Запропонований безконтактний ультразвуковий метод вимірювання поверхневої щільності плівки та паперу дає можливість проводити безперервний моніторинг технологічного параметра в процесі виробництва. Крім того, відсутність необхідності налаштування під конкретний матеріал плівки чи паперовий матеріал робить ультразвуковий метод безеталонним, що дає можливість використовувати його як для оперативного контролю різних матеріалів у промислових умовах, так і для вимірювань у повсякденному житті. Проведені дослідження показали, що отримані експериментальні дані відповідають теоретичним розрахункам, що підтверджує можливість застосування ультразвукового методу вимірювання та контролю поверхневої щільності матеріалів на практиці.

Список використаної літератури:

1. Здоренко В.Г. Дослідження похибки розрахункового методу визначення поверхневої щільності тканин / В.Г. Здоренко, С.В. Барилко // Вісник КНУТД. – 2013. – № 2 (70). – С. 16–21.
2. Карпов Ю.О. ТОЕ. Електромагнітне поле : підручник / Ю.О. Карпов, Ю.Г. Ведміцький, В.В. Кухарчук. – Херсон : ОЛДІ-ПЛЮС, 2014. – 392 с.
3. Gloy Y.-S. Non Destructive Testing of Fabric Weight in the Weaving Process / Y.-S. Gloy, T.Gries, G.Spies // 13th International Symposium on Nondestructive Characterization of Materials (NDCMXIII), May 20–24. – Le Mans, France [Electronic resource]. – Access mode : https://www.ndt.net/article/ndcm2013/content/papers/46_Gloy_Rev1.pdf.
4. Здоренко В.Г. ослідження проходження імпульсного ультразвукового сигналу крізь тканину при контролі поверхневої щільності / В.Г. Здоренко, С.В. Барилко // Вісник ХНУ. – 2013. – № 3. – С. 90–96.
5. Barylko S. Adaptive ultrasonic method for controlling the basis weight of knitted fabrics / S.Barylko, V.Zdorenko, O.Kyzymchuk // Journal of Engineered Fibers and Fabrics. – 2019. – Vol. 14. – P. 1–7 [Electronic resource]. – Access mode : <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1558925019889615>.
6. Development of a Computerized Control System Structure and Study of Ultrasonic Wave Propagation in Various Textile Materials / V.Zdorenko, S.Barylko, N.Zashchepkina and other // Studies in Systems, Decision and Control. – 2023. – Vol. 460. – P. 33–82.

7. Research on the Interaction of Ultrasonic Waves with Various Textile Materials in the Process of Non-contact Control / V.Zdorenko, S.Barylko, N.Zashchepkina and other // *Studies in Systems, Decision and Control*. – 2023. – Vol. 460. – P. 83–124.
8. Application of Non-contact Methods to Control the Technological Parameters of Textile Materials in the Production Process / V.Zdorenko, S.Barylko, N.Zashchepkina and other // *Studies in Systems, Decision and Control*. – 2023. – Vol. 460. – P. 125–165.
9. Design of the Models and Methods of Constructing Computerized Control Systems of Technological Parameters of Textile Materials / V.Zdorenko, S.Barylko, N.Zashchepkina and other // *Studies in Systems, Decision and Control*. – 2023. – Vol. 460. – P. 167–214.
10. Development of Experimental Samples of Computerized Systems and Non-contact Control Over Technological Parameters of Textile / V.Zdorenko, S.Barylko, N.Zashchepkina and other // *Studies in Systems, Decision and Control*. – 2023. – Vol. 460. – P. 215–289.
11. Застосування ультразвукового пристрою для визначення поверхневої густини текстильної волоконної маси / В.Г. Здоренко, С.В. Барилко, С.М. Лісовець, Д.О. Шупко // *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. – 2020. – № 5 (150). – С. 67–73.

References:

1. Zdorenko, V.G. and Barylko, S.V. (2013), «Doslidzhennia pokhybky rozrakhunkovoho metodu vyznachennia poverkhnevoi shchilnosti tkanyn», *Visnyk KNUiD*, No. 2 (70), pp. 16–21.
2. Karpov, Yu.O., Vedmitskyi, Yu.H. and Kukharchuk, V.V. (2014), *TOE. Elektromagnitne pole*, pidruchnyk, OLDI-PLiUS, Kherson, 392 p.
3. Gloy, Y.-S., Gries, T. and Spies, G. (2013), «Non Destructive Testing of Fabric Weight in the Weaving Process», *13th International Symposium on Nondestructive Characterization of Materials (NDCMXIII)*, 20–24 May, Le Mans, France, [Online], available at: https://www.ndt.net/article/ndcm2013/content/papers/46_Gloy_Rev1.pdf
4. Zdorenko, V.G. and Barylko, S.V. (2013), «Doslidzhennia prokhozhdennia impulsnoho ultrazvukovoho syhnalu kriz tkanynu pry kontroli poverkhnevoi shchilnosti», *Visnyk KhNU*, No. 3, pp. 90–96.
5. Barylko, S., Zdorenko, V. and Kyzymchuk, O. (2019), «Adaptive ultrasonic method for controlling the basis weight of knitted fabrics», *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, Vol. 14, pp. 1–7.
6. Zdorenko, V., Barylko, S., Zashchepkina, N. et al. (2023), «Development of a Computerized Control System Structure and Study of Ultrasonic Wave Propagation in Various Textile Materials», *Studies in Systems, Decision and Control*, Vol. 460, pp. 33–82.
7. Zdorenko, V., Barylko, S., Zashchepkina, N. et al. (2023), «Research on the Interaction of Ultrasonic Waves with Various Textile Materials in the Process of Non-contact Control», *Studies in Systems, Decision and Control*, Vol. 460, pp. 83–124.
8. Zdorenko, V., Barylko, S., Zashchepkina, N. et al. (2023), «Application of Non-contact Methods to Control the Technological Parameters of Textile Materials in the Production Process», *Studies in Systems, Decision and Control*, Vol. 460, pp. 125–165.
9. Zdorenko, V., Barylko, S., Zashchepkina, N. et al. (2023), «Design of the Models and Methods of Constructing Computerized Control Systems of Technological Parameters of Textile Materials», *Studies in Systems, Decision and Control*, Vol. 460, pp. 167–214.
10. Zdorenko, V., Barylko, S., Zashchepkina, N. et al. (2023), «Development of Experimental Samples of Computerized Systems and Non-contact Control Over Technological Parameters of Textile», *Studies in Systems, Decision and Control*, Vol. 460, pp. 215–289.
11. Zdorenko, V.H., Barylko, S.V., Lisovets, S.M. and Shypko, D.O. (2020), «Zastosuvannia ultrazvukovoho prystroiu dlia vyznachennia poverkhnevoi hustyny tekstylnoi volokonnoi masy», *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dizainu*, No. 5 (150), pp. 67–73.

Барилко Сергій Віталійович – доктор технічних наук, професор Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

<https://orcid.org/0000-0002-2785-5784>.

Наукові інтереси:

- приладобудування;
- вимірювальна техніка;
- комп'ютеризовані системи.

E-mail: sergiibarylko347@gmail.com.

Дашенко Володимир Дмитрович – аспірант Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

<https://orcid.org/0009-0000-9298-2993>.

Наукові інтереси:

- приладобудування;
- вимірювальна техніка;
- комп'ютеризовані системи.

E-mail: apph.dvd@gmail.com.

Barylko S.V., Dashchenko V.D.

Experimental measurement of area density of film and paper using the ultrasonic method

Today to measure and control the area density of film and paper materials during production, a contact and destructive method is used. However, this approach does not allow for continuous real-time monitoring of the parameter. To address this issue, a prototype of a computerized system was developed, and a non-contact ultrasonic method for measuring the area density of materials was proposed. This method enables real-time monitoring of the parameter at relatively low cost compared to existing analogs. To model and develop a prototype of an information-measuring system for determining the area density of film and paper materials, key relationships of ultrasonic wave amplitudes interacting with the material were presented. An algorithm for the measurement procedures was developed, followed by calculations to determine the area density parameter. Additionally, experiments using the contact destructive method and electronic scales were carried out to obtain comparative results. In the non-contact ultrasonic method, the film or paper material was exposed to ultrasonic waves, and the area density value was determined by the ratio of the amplitude of the wave that passed through the material to the amplitude of the incident wave.

Keywords: area density; paper material; film; ultrasonic measurement method; modeling; computerized information and measurement system.

Стаття надійшла до редакції 25.08.2025.