

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-77-34>

УДК 621.373

ЗДОРЕНКО Валерій

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
<https://orcid.org/0000-0001-6508-4290>
alzd123@meta.ua

МАТЯШ Олександр

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
<https://orcid.org/0009-0000-8366-2066>
matasaleksandr97@gmail.com

АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ В ПОЛІМЕРНОМУ ПОКРИТТІ НА МЕТАЛЕВІЙ ПЛАСТИНЦІ

В роботі проаналізовано та отримано залежності для модулів комплексних коефіцієнтів проходження та відбиття ультразвукових хвиль від двошарового матеріалу – полімерного покриття на металевій пластинці. Розглянуто можливість застосування ультразвукових хвиль для визначення товщини полімерного покриття на металевій пластинці малої товщини. Застосування інформативних параметрів хвиль для контролю товщини полімерного покриття дозволить оперативно визначати зазначений параметр в процесі нанесення плівки на металеву пластинку. Це дозволить вдосконалити технологічний процес нанесення полімерного покриття на металеву основу.

Ключові слова: модулі комплексних коефіцієнтів проходження та відбиття, акустичний опір, полімерне покриття, товщина матеріалу, металева пластинка.

ZDORENKO Valeriy, MATIASH Oleksandr

National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

ANALYSIS OF THE PROPAGATION PROCESS OF ULTRASONIC WAVES IN A POLYMER COATING ON A METAL PLATE

The paper analyzed and obtained dependencies for the modules of the complex coefficients of transmission and reflection of ultrasonic waves from a two-layer material - a polymer coating on a metal plate. The possibility of using ultrasonic waves to determine the thickness of the polymer coating on a thin metal plate is considered. The use of informative parameters of the waves to control the thickness of the polymer coating will allow to quickly determine the specified parameter in the process of applying the film to the metal plate. This will improve the technological process of applying a polymer coating to a metal base.

Today, in many industries, a polymer coating of thin metal products is used to protect the metal base from negative environmental factors that can affect the integrity of the material and destroy it. At the same time, measurement of the thickness of the coating can be carried out by contact and destructive methods, which makes operational control during the technological process of applying a polymer coating on a metal base impossible. This, in turn, means that the quality of such a coating will depend on the given technical parameters of the technological equipment for applying a polymer coating on a metal base without the ability to control and regulate the current value of the application thickness. Therefore, it is necessary to analyze and investigate the possibility of using new methods and means of measuring the thickness of a polymer coating on a metal base to ensure operational control of this parameter in production.

In order to quickly determine the thickness of the polymer coating, it is necessary to take into account that the ultrasonic signal passing through the two-layer material is a superposition of signals. Without a coating, most of the ultrasonic waves pass through the thin metal plate, in which case the total attenuation of the ultrasonic signal will be less than the attenuation of ultrasonic waves in such a material with a polymer coating. Based on the above, it is necessary to determine how different the amplitude of the ultrasonic signal that passed or reflected from the controlled coating material on the metal plate and the material without such coating is different.

Key words: modules of complex transmission and reflection coefficients, acoustic resistance, polymer coating, material thickness, metal plate.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Сьогодні в багатьох галузях промисловості застосовується полімерне покриття металевих виробів малої товщини для забезпечення захисту металевої основи від негативних факторів навколишнього середовища, що можуть впливати на цілісність матеріалу та руйнувати його. При цьому вимірювання товщини покриття можна здійснювати контактними та руйнівними методами, що робить неможливим оперативний контроль в ході технологічного процесу нанесення полімерного покриття [1-3] на металеву основу. Це, в свою чергу, означає, що якість такого покриття буде залежати від заданих технічних параметрів технологічного обладнання для нанесення полімерного покриття на металеву основу без можливості контролювати та регулювати поточне значення товщини нанесення. Тому необхідно проаналізувати та дослідити можливість застосування нових методів та засобів вимірювань товщини

полімерного покриття на металевій основі для забезпечення оперативного контролю цього параметру на виробництві.

Для того, щоб оперативно визначити товщину полімерного покриття, необхідно враховувати, що ультразвуковий сигнал, який проходить крізь двошаровий матеріал представляє собою суперпозицію сигналів [4]. Без покриття більша частина ультразвукових хвиль проходить скрізь металеву пластинку малої товщини, і в такому випадку загальне згасання ультразвукового сигналу буде меншим ніж згасання ультразвукових хвиль в такому матеріалі із полімерним покриттям. Виходячи з наведеного, необхідно визначити наскільки відрізняється амплітуда ультразвукового сигналу, який пройшов або відбився від контрольованого матеріалу покриття на металевій пластинці та матеріалу без такого покриття.

З безконтактних перетворювачів [5-8], які можна використовувати для вимірювання товщини полімерної плівки в процесі виробництва, які є безпечними для людини та простими у налагоджуванні є ультразвукові перетворювачі. Безконтактні ультразвукові перетворювачі, прилади та системи, які можна використовувати для визначення товщини полімерного покриття матеріалу, є перспективними для отримання інформації про значення товщини покриття в кожній точці контрольованого матеріалу в процесі його виробництва. Це дозволить, у свою чергу, забезпечувати якісні характеристики готової продукції на досить високому рівні та вдосконалити у подальшому технологічне обладнання для різних процесів з нанесення полімерного покриття на металеву поверхню.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є проведення аналізу можливості застосування амплітуди ультразвукових хвиль для вимірювання товщини полімерного покриття на металевій пластинці в процесі виробництва.

Виклад основного матеріалу

Металева пластинка з полімерним покриттям є двошаровим матеріалом з різних складових за щільністю та швидкістю розповсюдження ультразвукових хвиль.

Розглянемо проходження плоскої ультразвукової хвилі скрізь контрольований двошаровий матеріал (рис.1) при її нормальному падінні із середовища (повітря) з акустичним опором Z_1 . Сам матеріал полімерного покриття з товщиною шару h_1 , що має акустичний опір Z_2 , другий шар є матеріалом металеві пластинки з товщиною h_2 , що має акустичний опір Z_3 , останній шар спирається на повітряне середовище з акустичним опором Z_1 .

Амплітудне співвідношення ультразвукової хвилі, яка проходить контрольований матеріал, до ультразвукової хвилі, що падає на нього, можна подати модулем комплексного коефіцієнта проходження крізь двошаровий матеріал металеві пластинки з полімерним покриттям. Такий модуль можна поати для двошарового матеріалу наступним виразом [2, 3]:

$$|W| = \sqrt{\frac{(D(D-C) + F(F-E))^2 + (D \cdot E - C \cdot F)^2}{(D^2 + F^2)^2}}, \quad (1)$$

де

$$C = Z_3 \cdot (Z_2^2 \cdot Z_3 \cdot \operatorname{tg}(K_2 h_1) + Z_2 \cdot Z_3^2 \cdot \operatorname{tg}(K_3 h_2)) - Z_1 \cdot (Z_1 Z_3^2 \cdot \operatorname{tg}(K_2 h_1) + Z_1 Z_2 Z_3 \cdot \operatorname{tg}(K_3 h_2)); \quad (2)$$

$$D = Z_3 \cdot (Z_2^2 \cdot Z_3 \cdot \operatorname{tg}(K_2 h_1) + Z_2 \cdot Z_3^2 \cdot \operatorname{tg}(K_3 h_2)) + Z_1 \cdot (Z_1 Z_3^2 \cdot \operatorname{tg}(K_2 h_1) + Z_1 Z_2 Z_3 \cdot \operatorname{tg}(K_3 h_2));$$

$$E = Z_3 \cdot (Z_1 Z_2 Z_3 - Z_1 Z_3^2 \cdot \operatorname{tg}(K_2 h_1) \operatorname{tg}(K_3 h_2)) - \\ - Z_1 \cdot (Z_2 Z_3^2 - Z_2^2 Z_3 \cdot \operatorname{tg}(K_2 h_1) \operatorname{tg}(K_3 h_2));$$

$$F = Z_3 \cdot (Z_1 Z_2 Z_3 - Z_1 Z_3^2 \cdot \operatorname{tg}(K_2 h_1) \operatorname{tg}(K_3 h_2)) + \\ + Z_1 \cdot (Z_2 Z_3^2 - Z_2^2 Z_3 \cdot \operatorname{tg}(K_2 h_1) \operatorname{tg}(K_3 h_2)),$$

де K_2 – хвильове число полімерного покриття; K_3 – хвильове число матеріалу пластинки.

Амплітудне співвідношення ультразвукової хвилі, яка відбивається від контрольованого матеріалу, до хвилі, яка падає на нього, для ультразвукового сигналу можна подати модулем комплексного коефіцієнта відбиття від двошарового матеріалу металевої пластинки з полімерним покриттям. Такий модуль комплексного коефіцієнту відбиття для двошарового матеріалу відповідно до залежності (1) та враховуючи (2) можна подати наступним виразом:

$$|V| = \sqrt{\frac{(C \cdot D + E \cdot F)^2 + (D \cdot E - C \cdot F)^2}{(D^2 + F^2)^2}}. \quad (3)$$

Використовуючи отримані залежності (1) та (3) можна проаналізувати проходження та відбиття ультразвукових хвиль від двошарового матеріалу.

Отримавши аналітичні залежності для ультразвукових хвиль можна дослідити різні двошарові матеріали на взаємодію з цими хвилями. Через зміну амплітудних співвідношень ультразвукових хвиль можна показати їх взаємодію із самим матеріалом, який може мати різну структуру та складові шари з різними акустичними опорами. Також використовуючи отримані залежності можна проаналізувати проходження ультразвукових хвиль крізь двошаровий матеріал, що дозволить змоделювати роботу вимірювальних каналів безконтактних приладів для матеріалів з різним нанесеним покриттям.

Для моделювання процесу взаємодії ультразвукових хвиль з контрольованим двошаровим матеріалом в MathCAD розглянемо суцільну тонку пластинку металу, яка вкрита полімерним шаром плівки. Розповсюдження у цьому двошаровому матеріалі ультразвукової хвилі можна визначити як суперпозицію складових коливань, що відбиваються і проходять відповідні межі середовищ полімеру, пластинки металу та повітря, що наведено на рис.1.

На рис.2 показано амплітудні співвідношення $|W|$ та $|V|$ ультразвукових хвиль. Ці співвідношення наведені в залежності від товщини матеріалу h для кожного шару. Показаний зріз при $h = 4$ мкм для значень амплітудних співвідношень на рис.2. Модулі комплексних коефіцієнтів проходження хвиль $|W|$ для металевої пластинки з полімерним покриттям показано на рис.3. Вони порівнюються з аналогічним параметром тільки для одного шару металевої пластинки без плівки. Показано зміну амплітудних співвідношень ультразвукових хвиль з акустичним опором першого шару плівки при $Z_2 = 1939360 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, з акустичним опором другого шару металевої пластинки при $Z_3 = 62532000 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, при цьому, акустичний опір повітря $Z_1 = Z_4 = 422 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, частота ультразвукових хвиль дорівнює 75 кГц .

Проаналізуємо процес проходження ультразвукових хвиль крізь двошаровий матеріал в MathCAD. Окремо для порівняння часткового впливу товщин кожного із шарів двошарового матеріалу на згасання амплітуди ультразвукових хвиль побудуємо залежності модулів комплексних коефіцієнтів проходження та відбиття ультразвукових хвиль. Для шару полімерного матеріалу ці залежності модулів будуть більш пологими, якщо порівнювати їх з такими залежностями для пластинки металу, що пов'язано із значною різницею в акустичних опорах цих матеріалів. При певному співвідношенні малих товщин цих матеріалів можна отримати рівномірний розподіл за енергією хвиль, які проходять крізь двошаровий матеріал, та хвиль, що відбиваються від нього.

Також можливий випадок, коли буде відбуватися рівномірний розподіл за енергією хвиль, які взаємодіють із кожним шаром такого матеріалу. Це можна отримати, якщо товщина самої металевої основи буде значно меншою від товщини шару полімерного матеріалу.

Для можливості застосування безконтактного методу вимірювання товщини полімерного покриття на пластинці металу, необхідно спочатку проаналізувати як саме буде змінюватися амплітуда ультразвукових

хвиль при проходженні та відбитті хвиль від кожного із шарів контрольованого матеріалу окремо, при розташуванні їх в повітряному середовищі, а вже потім розглянути комплексну взаємодію двох шарів матеріалу на амплітуду ультразвукових хвиль, які проходять або відбиваються від нього.

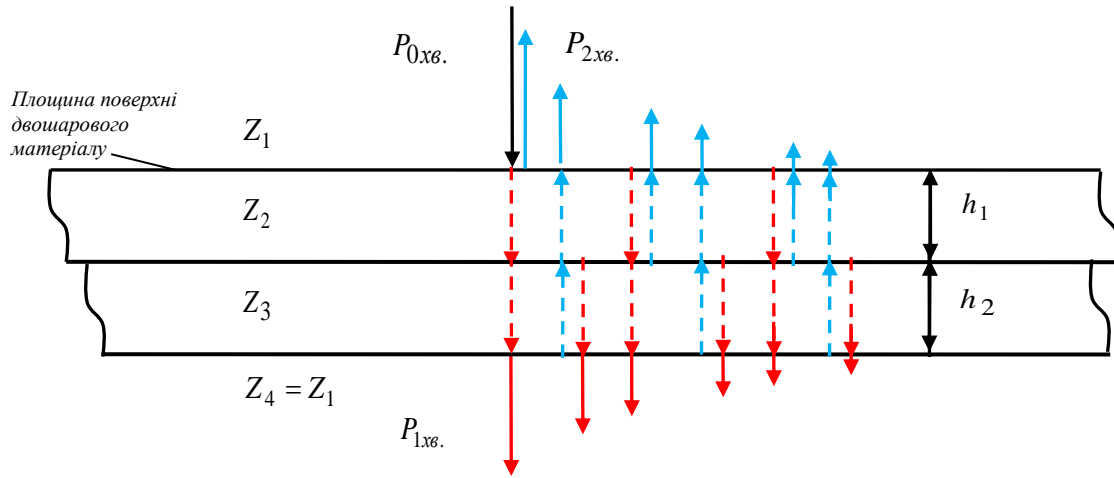


Рис. 1. Проходження ультразвукових хвиль крізь двошаровий матеріал полімерної плівки з товщиною h_1 та металеві пластинки з товщиною h_2 у повітряному середовищі

На рис.4,а показана поверхня, яка побудована за залежністю (1) для модуля комплексного коефіцієнта проходження ультразвукових хвиль від товщин складових шарів матеріалу, а на рис. 4,б наводиться поверхня, яка побудована за залежністю (3) для модуля комплексного коефіцієнта відбиття ультразвукових хвиль від товщин складових шарів матеріалу.

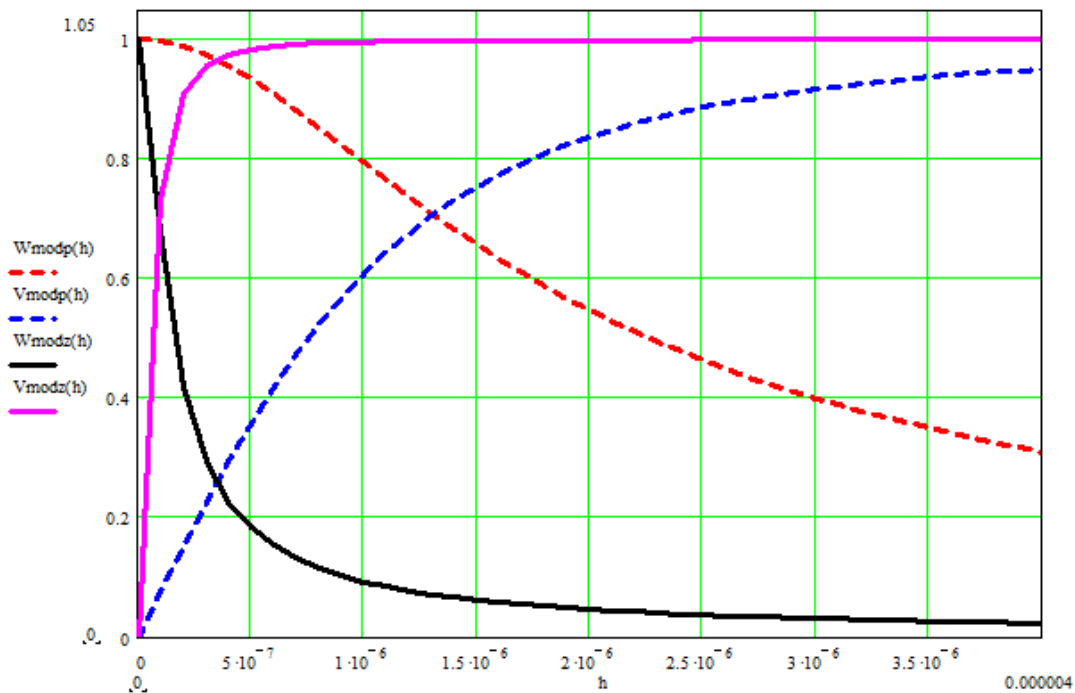


Рис. 2 – Залежності зміни модулів $|W|$, $|V|$ хвиль від товщини h плівки та від товщини h металеві пластинки, окремо розташованих одна від одної в повітряному середовищі (зріз на товщині 4 мкм):

- - - - залежність модуля $|W|$ комплексного коефіцієнта проходження хвиль крізь полімерну плівку в повітрі від товщини h , м;
- - - - залежність модуля $|V|$ комплексного коефіцієнта відбиття хвиль від полімерної плівки в повітряному середовищі від товщини h , м;

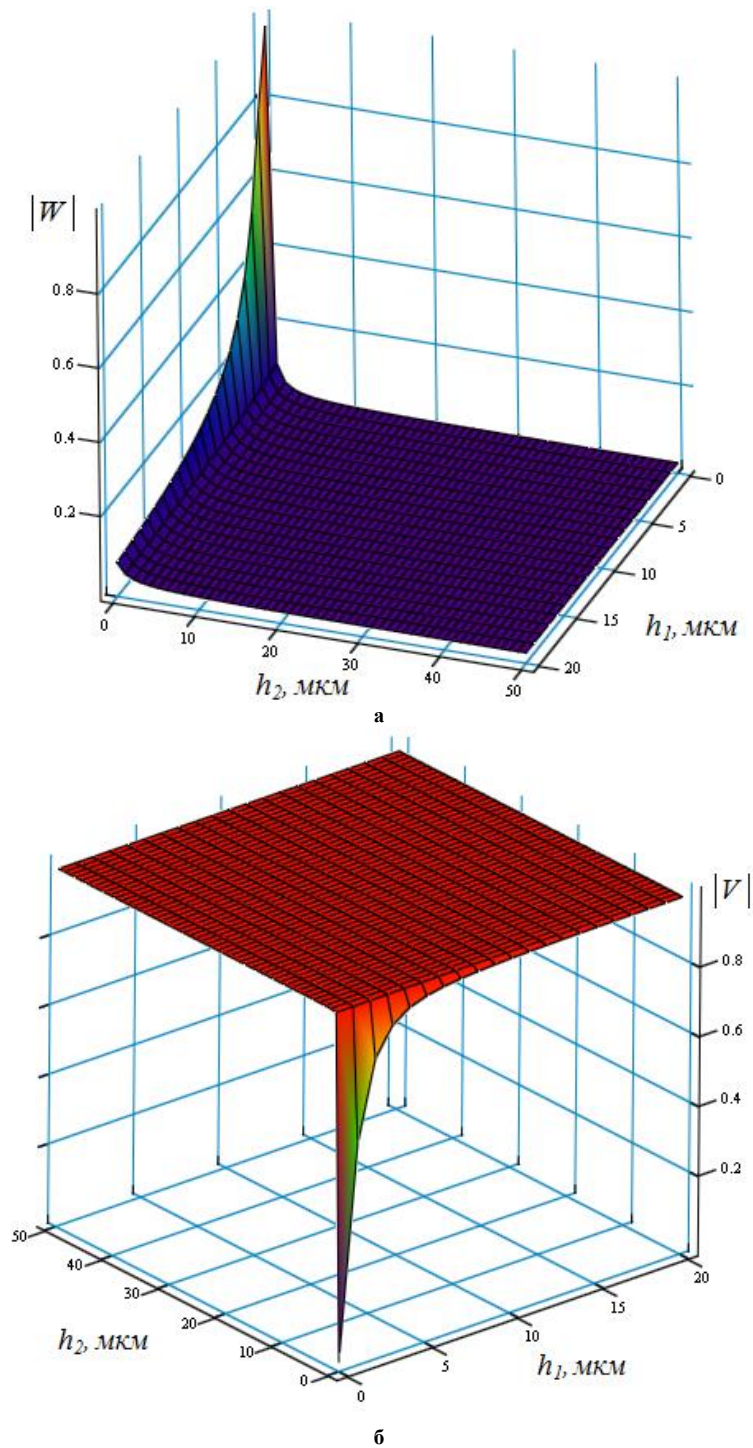


Рис. 4 – Залежності модулів $|W|$, $|V|$ комплексних коефіцієнтів проходження та відбиття ультразвукових хвиль від товщин h_1 , h_2 складових шарів матеріалу металевій пластинки з полімерним покриттям:

а – залежність модуля $|W|$ комплексного коефіцієнта проходження хвиль від товщин шарів полімерної плівки h_1 , мкм та пластинки металу h_2 , мкм;

б – залежність модуля $|V|$ комплексного коефіцієнта відбиття хвиль від товщин шарів полімерної плівки h_1 , мкм та пластинки металу h_2 , мкм

З отриманих графіків та поверхонь можна зробити висновок, що для безконтактного вимірювання товщини полімерного покриття на металевій очнові доцільно застосовувати амплітуду ультразвукових хвиль, які проходять крізь двошаровий матеріал плівки та металу. Це зумовлено аналітичним виразом для

модуля $|W|$ комплексного коефіцієнта проходження в визначених діапазонах товщин двошарового матеріалу.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Проведені дослідження дозволяють проаналізувати, які інформативні параметри ультразвукових хвиль можна застосовувати при вимірюванні товщини полімерного покриття на металевій основі. Знаючи аналітичні вирази для модулів $|W|$ та $|V|$ можна визначити параметр, який доцільно застосовувати для отримання для визначення товщини полімерного покриття на металевій основі.

Література

1. Криночкін Р. В. Пристрій вимірювального контролю товщини металевих і полімерних плівок / Криночкін Р. В., Осадчук О. В. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – № 4. – С. 90-93.
2. Здоренко В.Г. Підвищення достовірності визначення швидкості розповсюдження акустичних коливань в листових матеріалах // Здоренко В.Г., Барилко С.В., Лісовець С.М., Ківа І.Л. - Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського. Технічні науки. - том 33 (72), №4, 2022. - С. 86 -91.
3. Ультразвуковий безконтактний контроль товщини полімерних плівок / В.С.Єременко, Н.М. Защепкіна, В.Г.Здоренко, С.В.Барилко // Тези ІХ Міжнародної науково-практичної конференції «Датчики, прилади та системи» – 20-24 вересня 2021.- Черкаси. – ЧДТУ. – С.24 -26.
4. Шабатура Ю.В. Дослідження вимірювальних перетворювачів діелектричного покриття металевих поверхонь з часовим представленням інформації / Ю.В. Шабатура, К.В. Овчинников // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Автоматика, вимірювання та керування. №551. – Л., 2006. – С. 63-69
5. Пат. №26546 Україна, МПК G01B 5/00. Спосіб вимірювання товщини діелектричних покриттів на металевих поверхнях / Шабатура Ю.В., Овчинников К.В.; Заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № 2000131736/09; заявл. 18.02.2007; опубл. 25.09.2007, Бюл. № 15. – 4 с.: іл.
6. Шабатура Ю.В. Інформаційно-вимірювальна система для визначення товщини діелектричного покриття на металевій поверхні / Ю.В. Шабатура, М.В. Чорний, К.В. Овчинников // Системи управління, навігації та зв'язку. Випуск 2(10), Київ, 2009 р.- С. 101–106.

References

1. Krynochkin R. V. Prystrii vymiriuvalnogo kontroliu tovshchyny metalevykh i polimernykh plivok / Krynochkin R. V., Osadchuk O. V. // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. – 2010. – № 4. – S. 90-93.
2. Zdorenko V.H. Pidvyshchennia dostovirnosti vyznachennia shvydkosti rozpovsiudzhennia akustychnykh kolyvan v lystovykh materialakh // Zdorenko V.H., Barylko S.V., Lisovets S.M., Kiva I.L.. - Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu im. V.I. Vernadskoho. Tekhnichni nauky. - tom 33 (72), №4, 2022. - S. 86 -91.
3. Ultrazvukovi bezkontaktni kontrol tovshchyny polimernykh plivok / V.S.Ieremenko, N.M. Zashchepkina, V.H.Zdorenko, S.V.Barylko // Tezy IX Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Datchyky, prylady ta systemy» – 20-24 veresnia 2021.- Cherkasy. – ChDTU. – S.24 -26.
4. Shabatura Yu.V. Doslidzhennia vymiriuvalnykh peretvoriuvachiv dielektrychnoho pokryttia metalevykh poverkhon z chasovym predstavleniam informatsii / Yu.V. Shabatura, K.V. Ovchynnykov // Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika». Avtomatyka, vymiriuvannia ta keruvannia. №551. – L., 2006. – S. 63-69
5. Pat. №26546 Ukraina, MPK G01B 5/00. Sposib vymiriuvannia tovshchyny dielektrychnykh pokryt na metalevykh poverkhniakh / Shabatura Yu.V., Ovchynnykov K.V.; Zaiavnyk ta patentovlasnyk Vinnytskyi natsionalnyi tekhnichniy universytet. – № 2000131736/09; zaiavl. 18.02.2007; opubl. 25.09.2007, Biul. № 15. – 4 s.: il.
6. Shabatura Yu.V. Informatsiino-vymiriuvalna sistema dlia vyznachennia tovshchyny dielektrychnoho pokryttia na metalevii poverkhni / Yu.V. Shabatura, M.V. Chornyi, K.V. Ovchynnykov // Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku. Vypusk 2(10), Kyiv, 2009 r.- S. 101–106.