Київський національний університет технологій та дизайну Міністерство освіти і науки України

Черкаський державний технологічний університет Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова

праця на правах рукопису

## БАРИЛКО СЕРГІЙ ВІТАЛІЙОВИЧ

УДК 677.017

## **ДИСЕРТАЦІЯ**

# МЕТОДОЛОГІЯ ПОБУДОВИ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕКСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Спеціальність 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

## Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_С.В. Барилко

Науковий консультант: Здоренко Валерій Георгійович доктор технічних наук, професор

Черкаси – 2021

#### АНОТАЦІЯ

## Барилко С. В. Методологія побудови комп'ютеризованих систем контролю технологічних параметрів текстильних матеріалів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.05 — комп'ютерні системи та компоненти. — Київський національний університет технологій та дизайну, Київ, 2020.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науковоприкладної проблеми розробки методології побудови і практичної реалізації комп'ютеризованих систем безконтактного контролю технологічних параметрів текстильних матеріалів шляхом використання ультразвукових методів, оскільки існуючі методи та засоби не дозволяють проводити оперативний контроль в процесі виробництва.

Проаналізовано існуючі контактні та руйнівні методи та засоби контролю, які застосовуються для визначення технологічних параметрів текстильних матеріалів на виробництві. Показано, що фактичне значення технологічних параметрів визначається руйнівними та контактними методами з вирізанням зразків та їх зважуванням, які не дають можливості проводити оперативний технологічний контроль в процесі виробництва полотен. Показано принцип роботи деяких вимірювальних засобів неруйнівного контролю різних параметрів текстильних матеріалів. Доведено, що такі методи та засоби уцілому мають ряд недоліків, які пов'язані із складністю реалізації, високою вартістю, необхідністю корегування складових блоків, забезпеченням правильної експлуатації, утилізації та захисту обслуговуючого персоналу.

Обґрунтовано вибір ультразвукових методів та засобів контролю технологічних параметрів текстильних матеріалів, які, в свою чергу, мають високу точність, прості в реалізації, експлуатації у порівнянні з аналогами та відносно недорогі. Наведено методи та засоби, які експериментально застосовувались для контролю різних параметрів текстильних матеріалів із використанням амплітудного та фазового методів.

Отримала розвиток теорія розповсюдження ультразвукових хвиль в різних середовищах із наскрізними порами різного розміру, до яких можна віднести одношарові та двошарові матеріали, що дало можливість обґрунтувати нові підходи до розробки методів безконтактного контролю їхніх технологічних параметрів та наявності розшарувань у їхній структурі.

Отримано залежності, які описують проходження імпульсного ультразвукового сигналу крізь тканини з різною фазовою будовою, одношарові та двошарові матеріали з різним розміром пор, що дозволило аналітично визначити загальну товщину та поверхневу густину цих матеріалів.

Вперше отримано залежності, які описують відбиття імпульсного ультразвукового сигналу від тканин з різною фазовою будовою, одношарових та двошарових матеріалів з різним розміром пор, що дало можливість пов'язати їх із загальною товщиною та поверхневою густиною таких матеріалів.

Отримано залежності, які описують зміну фазових зсувів ультразвукових хвиль, які проходять крізь матеріали з різним розміром пор, а також хвиль, які відбиваються від таких матеріалів.

Отримано залежності, які описують амплітудні співвідношення ультразвукових хвиль, що проходять крізь матеріали із різними порами, та амплітудні співвідношення ультразвукових хвиль, які відбиваються від таких матеріалів, при врахуванні згасання хвиль в самому матеріалі. Це дозволило показати вплив згасання хвиль в матеріалах з різною структурою та пористістю, а також спростити вирази для аналітичного визначення технологічних параметрів таких матеріалів.

Удосконалено математичні моделі, які описують вплив дефекту та його розміру в структурі двошарових матеріалів із прошарками текстильних матеріалів малої товщини на зміну амплітудних та фазових параметрів зондуючих ультразвукових хвиль. Проаналізовано розповсюдження та відбиття ультразвукових хвиль від текстильного двошарового матеріалу з щільним верхнім шаром, який спирається на жорстку поверхню направляючої у процесі безконтактного контролю. Отримані амплітудні залежності відбитих хвиль для цього випадку.

Одержано залежності зміни швидкості розповсюдження ультразвукових хвиль в текстильних матеріалах з різною лінійною густиною від їхнього натягу при повздовжньому прозвучуванні волокон. Доведено, що із збільшенням натягу текстильного матеріалу швидкість розповсюдження хвиль в ньому збільшується, а при однаковому натязі із збільшенням лінійної густини матеріалу швидкість коливань, навпаки, зменшується. Отримано залежності модуля повздовжнього проходження ультразвукових хвиль текстильного матеріалу від натягу та від його лінійної густини, де для першого випадку залежність зростає, а для другого – спадає.

Розроблено безконтактний амплітудний метод контролю натягу ниток основи та сили прибою нитки утоку на ткацькому верстаті в процесі ткацтва та безконтактний амплітудний метод контролю поверхневої густини текстильних матеріалів. Наведено результати досліджень безконтактного визначення натягу ниток основи, які дадуть можливість зменшити їх обривність у процесі тканин. Зазначене дає можливість проводити вироблення оперативний параметрів на виробництві тканин з різною структурою моніторинг та пористістю. Також розроблено структурну схему та описано принцип дії комп'ютеризованої скануючої системи тканин в процесі виробництва. Така система дає можливість оперативно проводити контроль натягу ниток основи та самої тканини для забезпечення технологічного впливу на ткацьке обладнання, що робить можливим дотримувати поверхневу густину матеріалу в заданих межах. Показано, що знаючи натяг ниток основи, можна безконтактно визначати фактичне значення поверхневої густини самої тканини при її виробленні з врахуванням натягу полотна матеріалу. Зазначене дає можливість з більшою точністю виключити вплив зміни пористості та об'ємної щільності тканини на результат отриманих значень параметру.

Розроблено структурну схему та показаний принцип дії комп'ютеризованої системи сканування текстильної волоконної маси та визначення натягу ниток на трикотажних машинах. Для цієї системи застосовуються два режима її роботи. Перший режим роботи пов'язаний із визначенням поверхневої густини текстильної волоконної маси. Другий режим роботи пов'язаний з визначенням натягу ниток на трикотажних машинах. Зазначене досягається за допомогою переключення різних блоків з безконтактними датчиками, в залежності від технологічного процесу та поставленої задачі на виробництві.

Розроблено безконтактний амплітудно-фазовий метод контролю поверхневої густини тканих полотен, який повинен мати більшу чутливість до контрольованого параметру у порівнянні зі звичайним амплітудним. Також розроблено структурну схему та описаний принцип дії комп'ютеризованої системи сканування текстильної волоконної маси та текстильних полотен з визначенням їхньої поверхневої густини фазовим та амплітудно-фазовим ультразвуковими методами.

Розроблено безконтактний амплітудно-частотний метод контролю зміни пористості текстильних матеріалів, який за допомогою зміни частоти коливань дозволяє визначати невідомий параметр. Додатково розроблено структурну схему та описано принцип роботи ультразвукової комп'ютеризованої системи зміни пористості текстильних полотен. лля визначення Запропоновану ультразвукову комп'ютеризовану систему можна використовувати для контролю пористості фільтрувальних тканин, нерівномірної а також полотна 3 невідповідним розміром пор та інших дефектів у ньому.

Розроблено ультразвуковий безконтактний метод контролю зміни об'ємної щільності текстильних матеріалів, який дозволяє додатково враховувати вплив натягу самого полотна. Також розроблено структурну схему та показаний принцип дії ультразвукової комп'ютеризованої системи визначення об'ємної щільності текстильних полотен з виключенням впливу зміни натягу матеріалу на технологічному обладнанні в процесі виробництва. Запропоновано структурні схеми безконтактних комп'ютеризованих систем сканування полотен, які дозволяють визначати різні технологічні параметри текстильних матеріалів на виробництві.

Створено зразок безконтактної комп'ютеризованої системи сканування текстильних полотен з можливістю визначення їхньої пористості у першому режимі її роботи, а при застосуванні додаткових датчиків, у другому її режимі зондування матеріалу, можна визначати натяг ниток з великою лінійною густиною y хвилеводі. Також був створений зразок безконтактної комп'ютеризованої системи сканування текстильних полотен з можливістю визначення їхньої пористості та поверхневої густини текстильних полотен, яка визначати значення контрольованих дає змогу оперативно параметрів безпосередньо на технологічному обладнанні в процесі виробництва. Додатково може враховуватися натяг полотна на текстильних машинах за необхідності корегування показів вимірюваних значень технологічних параметрів.

Розроблено програмне забезпечення керування рухом платформ 3 ультразвуковими датчиками за певним алгоритмом та подальшою обробкою вимірювальної інформації отриманої із комп'ютеризованих систем, які забезпечують безперервне сканування текстильних полотен. Створена програма зберігає масив вимірювальної інформації про величини напруг з датчиків у різних стандартних додатках MS Office при безперервному скануванні текстильного полотна в процесі його виробництва. Програмне забезпечення дає датчиків частоту опитування в процесі сканування змогу виставляти текстильного полотна.

Ключові слова: безконтактний контроль, технологічні параметри, текстильні матеріали, ультразвуковий метод, комп'ютеризована система контролю.

За матеріалами дисертації опубліковано 32 роботи, 2 статті у журналах, що індексуються у Scopus, 16 наукових статей у фахових виданнях України, 2 патенти, співавтор 1 колективної монографії, опубліковано 11 тез доповідей на конференціях.

#### ABSTRACT

# Barylko S.V. Methodology of construction of computerized systems of control of technological parameters of textile materials. – Manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences, specialty 05.13.05 – Computer Systems and Components. – Kyiv National University of Technologies and Design, Kyiv, 2020.

The dissertation is devoted to the decision of an actual scientific and applied problem of development of methodology of construction and practical realization of computerized systems of contactless control of technological parameters of textile materials by use of ultrasonic methods because the existing methods and tools do not allow for such operational control in the production process.

The existing contact and destructive methods and means of control used to determine the technological parameters of textile materials in production are analyzed. It is shown that the actual value of technological parameters is determined by destructive and contact methods with cutting samples and weighing them, which do not allow for operational technological control in the production of canvases. The principle of operation of some measuring instruments of non-destructive testing of various parameters of textile materials is shown. It is proved that such methods and tools in general have a number of disadvantages, which are associated with the complexity of implementation, high cost, the need to adjust the components, ensuring proper operation, disposal and protection of maintenance personnel.

The choice of ultrasonic methods and means of control of technological parameters of textile materials is substantiated, which, in turn, have high accuracy, are easy to implement, operate in comparison with analogues and are relatively inexpensive.

Methods and means that were experimentally used to control various parameters of textile materials using amplitude and phase methods are presented.

The theory of propagation of ultrasonic waves in different media with through pores of different sizes, which include single-layer and double-layer materials, was developed, which made it possible to justify new approaches to developing methods of contactless control of their technological parameters and the presence of bundles in their structure.

Dependences describing the passage of a pulsed ultrasonic signal through tissues with different phase structure, single-layer and two-layer materials with different pore sizes were obtained, which allowed to analytically determine the total thickness and basis weight of these materials.

For the first time, dependences describing the reflection of a pulsed ultrasound signal from fabrics with different phase structure, single-layer and double-layer materials with different pore sizes were obtained, which made it possible to relate them to the total thickness and basis weight of such materials.

Dependences are described that describe the change of phase shifts of ultrasonic waves that pass through materials with different pore sizes, as well as waves that are reflected from such materials.

Dependences are obtained that describe the amplitude ratios of ultrasonic waves passing through materials with different pores and the amplitude ratios of ultrasonic waves reflected from such materials, taking into account the attenuation of waves in the material itself. This allowed to show the effect of wave attenuation in materials with different structure and porosity, as well as to simplify expressions for analytical determination of technological parameters of such materials.

Mathematical models that describe the influence of the defect and its size in the structure of two-layer materials with layers of textile materials of small thickness on the change of amplitude and phase parameters of probing ultrasonic waves have been improved.

The propagation and reflection of ultrasonic waves from a textile two-layer material with a dense upper layer, which rests on the rigid surface of the guide in the process of contactless control, is analyzed. The amplitude dependences of the reflected waves for this case are obtained.

The dependences of the change in the speed of propagation of ultrasonic waves in textile materials with different linear densities on their tension during the longitudinal sounding of fibers are obtained. It is proved that with increasing tension of a textile material the speed of wave propagation in it increases, and at the same tension with increasing linear density of material the speed of oscillations, on the contrary, decreases. The dependences of the modulus of longitudinal transmission of ultrasonic waves of a textile material on the tension and on its linear density are obtained, where for the first case the dependence increases and for the second case decreases.

The non-contact amplitude method of control of tension of warp threads and surf force of weft thread on a loom in the process of weaving and non-contact amplitude method of control of basis weight of textile materials are developed. The results of studies of non-contact determination of the tension of the warp threads, which will reduce their discontinuity in the process of fabric production, are presented. This makes it possible to quickly monitor the parameters in the production of fabrics with different structure and porosity. The structural scheme and the principle of operation of the computerized scanning system of fabrics in the process of production are also developed. This system makes it possible to quickly control the tension of the warp threads and the fabric itself to ensure the technological impact on the weaving equipment, which makes it possible to maintain the basis weight of the material within specified limits. It is shown that knowing the tension of the warp threads, it is possible to contactlessly determine the actual value of the basis weight of the fabric itself during its production, taking into account the tension of the fabric. This makes it possible to more accurately exclude the influence of changes in the porosity and bulk density of the fabric on the result of the obtained values of the parameter.

The structural scheme and the principle of operation of the computerized system of scanning of textile fiber mass and definition of tension of threads on knitting machines are developed. Two modes of its operation are applied to this system. The first mode of operation is associated with determining the basis weight of the textile fiber mass. The second mode of operation is associated with determining the tension of the threads on knitting machines. This is achieved by switching different units with contactless sensors, depending on the process and the task at work. A non-contact amplitude-phase method of controlling the basis weight of woven fabrics has been developed, which should have a greater sensitivity to the controlled parameter in comparison with the usual amplitude one. The structural scheme and the principle of operation of the computerized system of scanning of textile fiber mass and textile cloths with determination of their basis weight by phase and amplitude-phase ultrasonic methods are also developed.

A non-contact amplitude-frequency method for controlling the change in the porosity of textile materials has been developed, which allows to determine an unknown parameter by changing the frequency of oscillations. In addition, a block diagram has been developed and the principle of operation of an ultrasonic computerized system for determining the change in the porosity of textile fabrics has been described. The proposed computerized ultrasonic system can be used to control the uneven porosity of the filter cloth, as well as the fabric with the wrong pore size and other defects in it.

An ultrasonic non-contact method for controlling the change in bulk density of textile materials has been developed, which allows to take into account the influence of the tension of the fabric itself. Also the structural scheme and the principle of action of the ultrasonic computerized system of definition of volume density of textile cloths with an exception of influence of change of tension of material on the technological equipment in the course of production is shown.

Structural schemes of contactless computerized scanning systems of cloths which allow to define various technological parameters of textile materials on manufacture are offered.

A sample of a non-contact computerized system for scanning textile fabrics with the ability to determine their porosity in the first mode of its operation, and with the use of additional sensors in the second mode of sounding the material, you can determine the tension of threads with high linear density in the waveguide. A sample of a contactless computerized system for scanning textile fabrics with the ability to determine their porosity and basis weight of textile fabrics, which allows you to quickly determine the values of controlled parameters directly on the process equipment during production. Additionally, the tension of the canvas on textile machines can be taken into account if it is necessary to adjust the readings of the measured values of technological parameters.

Software for controlling the movement of platforms with ultrasonic sensors according to a certain algorithm and further processing of measurement information obtained from computerized systems that provide continuous scanning of textile fabrics. The created program stores an array of measuring information about the values of voltages from sensors in various standard MS Office applications during continuous scanning of the textile fabric in the process of its production. The software allows you to set the frequency of the sensors during the scanning of the textile fabric.

Keywords: non-contact control, technological parameters, textile materials, ultrasonic method, computerized control system.

According to the materials of the dissertation 32 works were published, 2 articles in journals indexed in Scopus, 16 scientific articles in professional editions of Ukraine, 2 patents, co-author of 1 collective monograph, published 11 theses reports at conferences.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

#### Статті у журналах, які індексуються у Scopus

1. Zdorenko V, Kyzymchuk O, Barylko S, et al (2018). The use of ultrasonic method for determining the basis weight of textile materials, *The Journal of The Textile Institute*, 109, P. 410-418 (*наукова публікація у виданні Scopus, віднесеному до другого квартилю Q2, прирівнюється до трьох публікацій у фахових виданнях*). Особистий внесок: розробка ультразвукового методу контролю поверхневої густини тканин з однаковими відстанями між нитками.

2. Barylko S, Zdorenko V, Kyzymchuk O, et al (2019). Adaptive ultrasonic method for controlling the basis weight of knitted fabrics, *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 14, P. 1-7 (*наукова публікація у виданні Scopus, віднесеному* до третього квартилю Q3, прирівнюється до двох публікацій у фахових

виданнях). Особистий внесок: розробка адаптивного ультразвукового методу контролю поверхневої густини текстильних полотен із різною структурою та пористістю.

#### Статті у фахових виданнях України

3. Здоренко В.Г., Барилко С.В. Контроль технологічних параметрів тканини за допомогою ультразвукового адаптивного пристрою. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2013. № 3. С. 7–11. Особистий внесок: розробка методу та структури ультразвукового адаптивного пристрою контролю технологічних параметрів тканини.

4. Здоренко В.Г., Барилко С.В., Чорноморченко В.К., Защепкіна Н.М. Дослідження згасання амплітуд ультразвукових хвиль при контролі тканин з різною поверхневою щільністю. Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. 2013. № 3 (71). С. 24–29. Особистий внесок: отримання основних виразів для ультразвукових хвиль, які взаємодіють з різними тканинами з врахуванням згасання їхньої амплітуди.

5. Здоренко В.Г., Барилко С.В., Кисельов В.Б. Дослідження згасання ультразвукових хвиль при безконтактному контролі товщини полімерного покриття текстильних матеріалів. Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. 2014. № 4 (78). С. 169–177. Особистий внесок: отримання основних виразів для ультразвукових хвиль, які взаємодіють з полімерним покриттям текстильного матеріалу з врахуванням згасання амплітуди.

6. Здоренко В.Г., Барилко С.В., Дяченко А.С. Технологічний контроль пористості текстильних матеріалів із складною структурою. Вісник Херсонського національного технічного університету. 2017. № 1. С. 105–112. Особистий внесок: розробка амплітудно-частотного методу контролю пористості різних текстильних матеріалів.

7. Здоренко В.Г., Барилко С.В., Барилко О.В. Технологічний контроль текстильних матеріалів. *Метрологія та прилади*. 2017. № 5. С. 86–88. *Особистий* 

внесок: розробка безконтактного методу для контролю однорідності пористої структури текстильних матеріалів.

8. Здоренко В.Г., Барилко С.В., Лісовець С.М., Зенкін А.С. Удосконалення акустичного безконтактного контролю матеріалів зі складною внутрішньою структурою. *Метрологія та прилади*. 2018. № 3. С. 47–51. *Особистий внесок:* удосконалення методу ультразвукового контролю наявності розшарувань композиційних текстильних матеріалів.

9. Здоренко В.Г., Барилко С.В., Барилко О.В., Лісовець С.М., Лебедюк Т.В. Дослідження застосування ультразвукового безконтактного методу визначення технологічних параметрів для процесу ткацтва. *Вісник Херсонського* національного технічного університету. 2018. № 4(67). С. 152–161. Особистий внесок: розробка безконтактного методу визначення технологічних параметрів для процесу ткацтва.

10. Барилко С.В., Лісовець С.М., Головата І.В. Ультразвуковий метод визначення об'ємної щільності текстильних матеріалів. Вісник інженерної академії України. 2018. № 2. С. 116–121. Особистий внесок: розробка ультразвукового методу визначення об'ємної щільності текстильних матеріалів.

11. Здоренко В.Г., Лісовець С.М., Барилко С.В., Яненко О.П. Моделювання роботи електроакустичного тракту з об'єктом дослідження. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. 2018. № 2. С. 117–121. Особистий внесок: постановка завдання та запропонована ідея зондування текстильних зразків трикотажу для можливості їх безконтактного контролю.

12. Здоренко В.Г., Барилко С.В., Лісовець С.М., Шипко Д.О., Дерій Ю.О. Застосування фазового і амплітудно-фазового акустичних методів для автоматизованого контролювання поверхневої щільності текстильних матеріалів. *Стандартизація, сертифікація, якість.* 2019. № 2(114). С. 86–94. *Особистий внесок: розробка ультразвукового амплітудно-фазового методу контролю текстильних матеріалів.*  13. Лісовець С.М., Барилко С.В., Зенкін А.С., Здоренко В.Г. Контроль поверхневої густини текстильних матеріалів шляхом використання автоматизованої сканувальної системи. *Метрологія та прилади*. 2019. № 5(79). С. 52–55. *Особистий внесок: постановка завдання та запропонована ідея сканування текстильних матеріалів для проведення безперервного контролю*.

14. Здоренко В.Г., Барилко С.В., Лісовець С.М., Шипко Д.О. Дослідження проходження ультразвукових хвиль крізь двошаровий матеріал із складною структурою при контролі його технологічних параметрів. Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. 2020. № 1. С. 50–62. Особистий внесок: проведення досліджень та аналізу проходження ультразвукових хвиль крізь двошаровий матеріал із складною структурою при контролі його технологічних параметрів.

15. Здоренко В.Г., Барилко С.В., Лісовець С.М., Шипко Д.О., Василенко В.М. Відбиття ультразвукових хвиль від двошарового пакету текстильних матеріалів зі щільним верхнім шаром. Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. 2020. № 2. С. 62–70. Особистий внесок: проведення досліджень та аналізу відбиття ультразвукових хвиль від двошарового пакету текстильних матеріалів зі щільним верхнім шаром.

16. Здоренко В.Г., Барилко С.В., Лісовець С.М., Шипко Д.О. Дослідження згасання ультразвукових хвиль при їх проходженні та відбитті від одношарових матеріалів з порами різного розміру. Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. 2020. № 3. С. 99–111. Особистий внесок: проведення досліджень та аналізу згасання ультразвукових хвиль при їх проходженні та відбитті від одношарових матеріалів з порами різного розміру.

Здоренко В.Г., Барилко С.В., Лісовець С.М., Шипко Д.О., Василенко В.М., Палій Б.М. Дослідження відбиття ультразвукових хвиль від одношарових текстильних полотен та двошарових текстильних пакетів із різним розміром пор. Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. 2020. №
С. 104–114. Особистий внесок: проведення досліджень та аналізу відбиття

ультразвукових хвиль від одношарових текстильних полотен та двошарових текстильних пакетів із різним розміром пор.

18. Здоренко В.Г., Барилко С.В., Лісовець С.М., Шипко Д.О. Застосування ультразвукового пристрою для визначення поверхневої густини текстильної волоконної маси. Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. 2020. № 5. С. 68–74. Особистий внесок: розробка методу та структури ультразвукового пристрою для визначення поверхневої густини текстильної волоконної маси.

#### Патенти України

19. Пат. 84211 Україна, МПК G01N33/36, G01N29/00. Ультразвуковий пристрій для вимірювання поверхневої щільності текстильних матеріалів. Скрипник Ю.О., Здоренко В.Г., Барилко С.В.; заявник та патентовласник Київський національний університет технологій та дизайну, № u201305479; заявл. 29.04.2013; опубл. 10.10.2013. Бюл. № 19. Особистий внесок: отримання основних виразів для амплітудних співвідношень ультразвукових хвиль, які взаємодіють з текстильними матеріалами.

20. Пат. 132500 Україна, МПК G01N33/36, G01N29/00. Ультразвуковий спосіб визначення об'ємної щільності текстильних матеріалів. Здоренко В.Г., Барилко С.В., Барилко О.В., Лісовець С.М.; заявник та патентовласник Київський національний університет технологій та дизайну, № и201305479; заявл. 11.10.2018; опубл. 25.02.2019. Бюл. № 4. Особистий внесок: отримання основних виразів залежностей амплітудних співвідношень ультразвукових хвиль від об'ємної щільності текстильних матеріалів.

#### Колективні монографії

21. Zashchepksna N., Zdorenko V., Barylko S. Application of a ultrasonic method for quality assurance of materials. *Study of problems in modern science: new technologies in engineering, advanced management, efficiency of social institutions. Bydgoszcz.* 2015. P. 450–466 (*розділ колективної монографії, який прирівнюється до однієї публікації у фаховому журналі*). Особистий внесок: отримання основних виразів амплітудних співвідношень ультразвукових хвиль,

які проходять крізь пористі матеріали малої товщини, та ультразвукових хвиль, що відбиваються від таких матеріалів із врахуванням їх згасання.

#### Опубліковані праці апробаційного характеру

22. Здоренко В.Г., Барилко С.В., Защепкіна Н.М. Визначення товщини текстильного матеріалу ультразвуковим амплітудним методом: тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції наукової молоді та студентів. *М*-во освіти і науки України, КНУТД. Євпаторія, 2013. С. 24–26. Особистий внесок: розробка амплітудного методу визначення товщини текстильного матеріалу.

23. Здоренко В.Г., Барилко С.В. Безконтактний метод контролю пористості текстильних матеріалів: тези доповідей III Міжнародної науковопрактичної конференції. *М-во освіти і науки України, ХНТУ*. Херсон, 2017. С. 98–99. Особистий внесок: розробка безконтактного амплітудного методу визначення пористості текстильного матеріалу.

24. Здоренко В.Г., Барилко С.В. Безконтактний метод виявлення дефектів в матеріалах: тези доповідей І Міжнародної науково-практичної конференції "Мехатронні системи: інновації та інжиніринг". *М-во освіти і науки України, КНУТД*. Київ, 2017. С. 124–125. Особистий внесок: удосконалення амплітудного методу виявлення дефектів в різних матеріалах.

25. Лісовець С.М., Барилко С.В. Контроль властивостей тканинних і трикотажних матеріалів амплітудно-фазовими акустичними методами: тези Міжнародної науково-практичної конференції доповідей Π "Мехатронні системи: інновації та інжиніринг". М-во освіти і науки України, КНУТД. Київ, 2018. С. 70. Особистий внесок: постановка завдання та запропонований приниип амплітудно-фазового контролю властивостей тканинних i трикотажних матеріалів.

26. Барилко С.В., Здоренко В.Г., Лісовець С.М. Технологічний контроль натягу ниток основи безконтактним методом: тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих вчених. *М-во освіти і науки України, ХНТУ.* Херсон, 2018. С. 32–34. *Особистий внесок:* 

розробка безконтактного амплітудного методу контролю натягу ниток основи на технологічному обладнанні.

27. Barylko S., Zdorenko V., Kyzymchuk O., Lisovets S., Melnyk L., Barylko O. Non-contact method for fabric basis weight measurement: *Abstract of 49th IFKT International Congress, Textile Research Institute*. Łódź, Poland, 2018. P. 15. *Особистий внесок: аналіз можливості застосування безконтактного методу контролю поверхневої густини текстильних полотен*.

28. Barylko S., Zdorenko V., Kyzymchuk O., Lisovets S., Melnyk L., Barylko O. Control of the fabric porosity by non-contact method: *IEEE Ukraine Student, Young Professional and Women in Engineering Congress*. Kyiv, Ukraine, 2018. P. 48–52. Особистий внесок: аналіз можливості застосування безконтактного методу контролю зміни пористості текстильних полотен.

C.B., 29. Барилко Лісовець C.M., Шипко Д.О. Застосування безконтактного ультразвукового методу для автоматизованого контролю технологічних параметрів текстильних матеріалів: тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих вчених "Молодь – науці і виробництву – 2019: Інноваційні технології легкої промисловості". М-во освіти і науки України, ХНТУ. Херсон, 2019. С. 26–27. Особистий внесок: розробка структури комп'ютеризованої системи для автоматизованого сканування та контролю технологічних параметрів текстильних матеріалів.

30. Барилко С.В. Визначення натягу ниток безконтактним ультразвуковим методом для застосування в текстильній промисловості: тези доповідей III Міжнародної науково-практичної конференції "Мехатронні системи: інновації та інжиніринг". *М-во освіти і науки України, КНУТД*. Київ, 2019. С. 15 – 21.

31. Здоренко В.Г., Защепкіна Н.М., Барилко С.В., Палій Б.М. Дослідження відбиття ультразвукових хвиль від двошарового текстильного пакету: тези доповідей XXI Міжнародної конференції з математичного моделювання. *М-во освіти і науки України, ХНТУ*. Херсон, 2020. С. 94. Особистий внесок: отримання виразу залежності амплітудного співвідношення відбитих ультразвукових хвиль від їхньої частоти.

32. Здоренко В.Г., Барилко С.В., Зленко О.О. Застосування ультразвукової комп'ютеризованої системи для контролю поверхневої густини текстильних матеріалів: тези доповідей І Всеукраїнської конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених "Інноватика в освіті, науці та бізнесі: виклики та можливості". *М-во освіти і науки України, КНУТД*. Київ, 2020. С. 237–244. *Особистий внесок: проведення теоретичних та експериментальних досліджень з безконтактного визначення поверхневої густини текстильних матеріалів та розробка для цієї мети експериментальної комп'ютеризованої системи*.

# 3MICT

АНОТАЦІЯ2
ABSTRACT7
Список опублікованих праць за темою дисертації11
3MICT19
ВСТУП24
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ
КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕКСТИЛЬНИХ
МАТЕРІАЛІВ
1.1. Огляд існуючих руйнівних методів та засобів контролю технологічних
параметрів текстильних матеріалів
1.2. Огляд неруйнівних методів контролю та аналіз можливості їх
застосування для технологічних параметрів текстильних матеріалів40
1.3. Огляд засобів неруйнівного контролю текстильних матеріалів для
застосування в легкій промисловості49
1.4. Огляд методів та засобів ультразвукового контролю текстильних
матеріалів для застосування в легкій промисловості
1.5. Основні залежності імпульсних ультразвукових перетворювачів для
зондування текстильних матеріалів67
Висновки до розділу 172
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА СТРУКТУРИ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ
КОНТРОЛЮ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ
ХВИЛЬ В РІЗНИХ МАТЕРІАЛАХ75
2.1. Розробка узагальненої структури комп'ютеризованої системи для
безконтактного ультразвукового контролю технологічних параметрів
текстильних матеріалів76
2.2. Дослідження проходження імпульсного ультразвукового сигналу крізь
двошарові композиційні, одношарові, текстильні матеріали з наскрізними
порами та без них

2.3. Дослідження відбиття імпульсного ультразвукового сигналу від двошарових композиційних, одношарових, текстильних матеріалів з наскрізними порами та 2.4. Згасання імпульсного ультразвукового сигналу при проходженні та відбитті хвиль від двошарових композиційних, одношарових, текстильних матеріалів з наскрізними порами та без них......125 Висновки до розділу 2......145 РОЗДІЛ З. ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ З РІЗНИМИ ТЕКСТИЛЬНИМИ МАТЕРІАЛАМИ ПРИ БЕЗКОНТАКТНОМУ 3.1. Відбивання ультразвукових хвиль від композиту малої товщини при їхньому нормальному падінні з визначенням дефектів в структурі матеріалу......146 3.2. Проходження і відбивання ультразвукових хвиль від композиції шарів рідких розплавів полімерів, їх розчинів та від шарів текстилю з визначенням неоднорідностей в структурі композиту малої товщини......153 3.3. Дослідження відбивання ультразвукових хвиль від композиції шарів текстилю, які рухаються по направляючій опорі, та взаємодія коливань у ЗАСТОСУВАННЯ БЕЗКОНТАКТНИХ МЕТОДІВ РОЗДІЛ 4. ДЛЯ КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕКСТИЛЬНИХ 4.1. Розробка та застосування ультразвукового амплітудного методу для визначення натягу ниток основи та сили прибою ниток утоку в процесі ткацтва 4.2. Розробка та застосування ультразвукового амплітудного методу для визначення натягу ниток на текстильних в'язальних машинах в процесі 

4.3. Розробка опорного амплітудного методу визначення натягу ниток з великою РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ ТА МЕТОДІВ РОЗДІЛ 5. ПОБУДОВИ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ 5.1. Розробка комп'ютеризованої системи безконтактного контролю 5.2. Розробка комп'ютеризованої системи сканування текстильної волоконної 5.3. Розробка комп'ютеризованої системи сканування текстильних матеріалів з визначенням їхньої поверхневої густини фазовим та амплітудно-фазовим 5.4. Розробка ультразвукової комп'ютеризованої системи контролю об'ємної 5.5. Розробка ультразвукової комп'ютеризованої системи контролю зміни РОЗДІЛ 6. РОЗРОБКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ЗРАЗКІВ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИХ СИСТЕМ ТА БЕЗКОНТАКТНИЙ КОНТРОЛЬ 6.1. Розробка експериментального зразка скануючої комп'ютеризованої системи текстильних полотен для контролю їхньої пористості та натягу ниток з великою 6.2. Розробка експериментального зразка комп'ютеризованої системи для контролю поверхневої густини та пористості текстильних матеріалів на 6.3. Безконтактний контроль пористості та поверхневої густини текстильних 

21

6.4. Безконтактне вимірювання натягу ниток з великою лінійною густиною за
допомогою експериментальних ультразвукових засобів із використанням
хвилеводів
6.5. Безконтактне вимірювання натягу зразків трикотажного полотна за
допомогою амплітуди ультразвукових хвиль, які пройшли крізь текстильний
матеріал404
6.6. Оцінка вірогідності контролю поверхневої густини, пористості текстильних
матеріалів та оцінка вірогідності контролю натягу ниток з великою лінійною
густиною
Висновки до розділу 6426
ОСНОВНІ ВИСНОВКИ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ РОБОТИ
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ432
ДОДАТКИ471
Додаток А. ДОСЛІДЖУВАНІ ЗРАЗКИ ТКАНИН472
Додаток Б. РОЗРАХУНКИ В СИСТЕМІ МАТНСАD476
Б.1. Розрахунок значень комплексних коефіцієнів проходження W та відбиття V
для двошарових матеріалів без пор476
Б.2. Розрахунок амплітуди та визначення часу затримки імпульсного
ультразвукового сигналу, що пройшов контрольований матеріал, та сигналу,
який відбився від його поверхні477
Б.З. Розрахунок амплітудних параметрів ультразвукових хвиль, які
розповсюджуються у хвилеводі з текстильним матеріалом всередині, та хвиль,
що відбиваються від текстилю при контролі натягу ниток основи на ткацькому
верстаті
Б.4. Розрахунок амплітудних параметрів ультразвукових хвиль, які взаємодіють з
текстильною ниткою при дії на неї натягу482
Додаток В. ПРОЕКТУВАННЯ СКАНУЮЧИХ СИСТЕМ ТЕКСТИЛЬНИХ
ПОЛОТЕН

Додаток Д. ВИГОТОВЛЕННЯ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ ДЛЯ СКАНУЮЧИХ
СИСТЕМ ТЕКСТИЛЬНИХ ПОЛОТЕН ЗА ДОПОМОГОЮ ВЕРСТАТА З
ЧПК
Д.1. Керування верстатом з ЧПК при фрезеруванні плат
Д.2. Частина створеного G-code контурів доріжок плат
Додаток Ж. КОПІЇ ПАТЕНТІВ УКРАЇНИ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ523
Ж.1. Копія патенту України на корисну модель № 84211 "Ультразвуковий
пристрій для вимірювання поверхневої щільності текстильних матеріалів"523
Ж.2. Копія патенту України на корисну модель № 132500 "Ультразвуковий
спосіб визначення об'ємної щільності текстильних матеріалів"
Додаток З. КОПІЇ АКТІВ ВПРОВАДЖЕННЯ ТА АПРОБАЦІЇ РЕЗУЛЬТАТІВ
ДОКТОРСЬКОЇ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ526
3.1. Копія акту про апробацію результатів докторської дисертаційної роботи в
процесі виробництва
3.2. Копія акту впровадження результатів докторської дисертаційної роботи у
навчальний процес

23

#### ВСТУП

Актуальність теми. Однією з найважливіших задач, які актуальні для підприємств легкої промисловості, є забезпечення виробничого процесу виготовлення текстильних матеріалів із використанням систем оперативного контролю їх технологічних параметрів для забезпечення якісних характеристик конкурентноздатної продукції. Текстильні матеріали мають широкий спектр застосування. Вони використовуються для виготовлення різних елементів одягу, побутового текстилю, тканин та трикотажу технічного призначення, тощо. Сучасні прилади та системи контролю не дають можливості використовувати безперервний контроль технологічних параметрів в процесі виробництва, а в основному застосовується лабораторний контроль взятих зразків текстильного матеріалу. Це не дозволяє забезпечувати оперативне реагування на зміну величини технологічного параметру, який може виходити за регламентовані межі, в процесі виробництва контрольованого матеріалу, що знижує якість готової продукції та збільшує кількість браку і використаних енергоресурсів. Для практичної реалізації оперативного і безперервного моніторингу якості текстильних матеріалів необхідно розробити методологію побудови сучасних комп'ютеризованих контролю технологічних параметрів систем ïχ i3 використанням ультразвукових безконтактних методів прозвучування матеріалу із складною структурою. Для вирішення цього завдання спочатку необхідно отримати аналітичні залежності, які пов'язуватимуть технологічні параметри текстильних матеріалів із інформативними параметрами ультразвукових хвиль. Потім враховуючи отримані залежності потрібно розробити безконтактні методи контролю для різних технологічних параметрів текстильних матеріалів. Далі на основі отриманих методів можна вже розробляти різні комп'ютеризовані від технологічного параметру, необхілно системи В залежності який Комп'ютеризовані контролювати. системи технологічних для контролю параметрів в процесі виробництва повинні одночасною оброблювати декілька інформативних параметрів ультразвукових хвиль, що надходять на приймаючі

перетворювачі для можливості врахування складної структури текстильного матеріалу. Такі системи необхідні для забезпечення можливості жорсткого дотримання основних технологічних параметрів впродовж процесів виготовлення продукції, які впливають як на споживчі властивості текстильних матеріалів, так і на їх фізико-механічні характеристики, у встановлених межах. І це є актуальним завданням.

Одними з таких параметрів є поверхнева густина та пористість текстильного матеріалу. На величину зміни цих параметрів впливає також регулювання натягу ниток текстильного матеріалу на технологічному обладнанні в процесі виробництва.

можливості контролю основних технологічних параметрів Для текстильних матеріалів із застосуванням сучасних комп'ютеризованих систем необхідно використовувати технічні комплекси з можливістю оперативного визначення необхідних значень в режимі реального часу. Для процесу виробництва важливим є регулювання заданої поверхневої густини та забезпечення однорідності структури текстильного матеріалу, зважаючи на фактичне значення контрольованого параметру. При дотриманні необхідної величини пористості з певним допуском її значень забезпечуються належні експлуатаційні характеристики для різних текстильних метеріалів. Визначаючи фактичне значення пористості для готових текстильних полотен, можна забезпечувати оптимальну витрату спеціальних речовин для їх обробки та фарбування.

Контроль поверхневої густини та пористості текстильного полотна з врахуванням натягу ниток необхідно проводити із використанням комп'ютеризованих систем, застосовуючи безконтактні методи, оскільки тільки вони дають можливість оперативно реагувати на зміну величини цих параметрів безпосередньо в процесі самого виробництва.

Таким чином, здійснюючи постійний оперативний контроль поверхневої густини та пористості текстильних матеріалів з врахуванням їх натягу із використанням сучасних комп'ютеризованих систем, можна отримувати готову продукцію високої якості з мінімальними витратами сировини. Такий оперативний контроль дасть можливість забезпечувати задану формостійкість, жорсткість, теплозахисні властивості різних полотен, а також є важливим та актуальним для виробництва таких текстильних матеріалів. Це, у свою чергу, дасть змогу підвищити економічну ефективність текстильної продукції на ринку.

Питання безконтактного контролю поверхневої густини, пористості та натягу ниток на технологічному обладнанні, які напряму впливають на якість різних текстильних матеріалів, досліджували такі вчені: Скрипник Ю.О., Здоренко В.Г., Костюков А.Ф., Бобров П.М., Волосніков Ф.К., Козубенко В.А., Калінін В.А., Калінін Ц.І., Шляхтенко П.Г., Сокова Г.Г., Костін С.Л., Тернова Т.І., Колганов В.І., Комаров О.Б., Єрмолов І.М., Якунін М.А. та інші. В роботах вчених розглянуті методи та засоби, за допомогою яких можна визначати поверхневу густину, пористість, натяг та інші параметри для різних текстильних матеріалів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота кафедрі комп'ютерно-інтегрованих виконувалась на технологій та вимірювальної техніки і на кафедрі технології та дизайну текстильних матеріалів Київського національного університету технологій та дизайну (КНУТД), у межах програм науково-дослідних робіт КНУТД: "Створення ультразвукових методів та засобів контролю технологічних параметрів тканин", номер держреєстрації №0117U000739, та "Акустичний контроль властивостей трикотажних матеріалів із застосуванням елементів обчислювальної техніки", номер держреєстрації №0117U000740, у виконанні якої здобувач брав безпосередню участь в якості відповідального виконавця.

Мета і завдання дослідження. *Метою* дослідження є підвищення ефективності комп'ютеризованих систем для контролю технологічних параметрів текстильних матеріалів в процесі виробництва шляхом використання ультразвукових методів.

Для досягнення вказаної мети необхідно розв'язати такі завдання:

 провести аналіз сучасних методів та засобів контролю технологічних параметрів текстильних матеріалів;

– розробити математичні моделі ультразвукового поля для проходження хвиль крізь текстильні матеріали та моделі поля для відбиття хвиль від них, які дадуть можливість створити нові та удосконалити існуючі методи контролю технологічних параметрів цих матеріалів;

 розробити математичні моделі згасання амплітуди ультразвукових хвиль, що взаємодіють із складною структурою текстильних матеріалів, які дадуть можливість визначати частоту хвиль для різного діапазону контрольованих технологічних параметрів;

 розробити методи побудови та структури комп'ютеризованих систем контролю технологічних параметрів текстильних матеріалів із врахуванням їхніх особливостей;

зразки комп'ютеризованих створити експериментальні систем безконтактного контролю пористості, поверхневої густини та натягу матеріалів, дасть можливість проводити текстильних ЩО оперативний моніторинг технологічних параметрів в режимі реального часу.

*Об'єкт дослідження* – процес оперативного контролю технологічних параметрів текстильних матеріалів.

*Предмет дослідження* – моделі та методи побудови комп'ютеризованих систем контролю технологічних параметрів текстильних матеріалів.

Методи дослідження. Дослідження базуються на основних положеннях: теорії розповсюдження ультразвукових хвиль в однорідному середовищі і в багатошаровому середовищі із складною структурою; математичного моделювання; диференціального та інтегрального обчислення; математичної статистики; технології ткацького та трикотажного виробництв; проектування та створення комп'ютеризованих систем контролю.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в розробці методологічних основ побудови комп'ютеризованих систем контролю

технологічних параметрів текстильних матеріалів в процесі виробництва шляхом подальшого розвитку теорії розповсюдження ультразвукових хвиль.

А саме наукова новизна полягає у тому, що:

– удосконалено математичні моделі ультразвукового поля в матеріалах із складною структурою, що дозволило обґрунтувати використання в якості інформативних параметрів амплітуду, фазу та частоту ультразвукових коливань для контролю технологічних параметрів текстильних матеріалів;

вперше отримано математичні моделі згасання ультразвукових хвиль
в пористих текстильних матеріалах, що дало можливість проводити їх контроль
із зміною частоти хвиль для вибору товщини або поверхневої густини таких
матеріалів;

– вперше теоретично обґрунтовано та розроблено безконтактний амплітудний метод контролю натягу ниток та амплітудний ультразвуковий метод контролю поверхневої густини текстильних матеріалів, що дало можливість проводити оперативний моніторинг цих технологічних параметрів із використанням комп'ютеризованих систем;

вперше теоретично обґрунтовано та розроблено ультразвуковий амплітудно-фазовий густини метод контролю поверхневої текстильних матеріалів з врахуванням їх пористості із використанням комп'ютеризованої системи, ЩО дало можливість виключити вплив зміни структури контрольованого матеріалу;

– вперше розроблено безконтактний амплітудно-частотний метод контролю зміни пористості текстильних матеріалів із використанням комп'ютеризованої системи, застосування якого дозволило визначати розмір пор в текстильних матеріалах різного призначення;

– теоретично доведено доцільність використання та вдосконалено ультразвуковий безконтактний метод контролю зміни об'ємної щільності текстильних матеріалів із врахуванням впливу натягу самого полотна, що дозволило додатково визначати зміну товщини текстильних матеріалів із складною структурою.

#### Практичне значення отриманих результатів полягає у тому, що:

 запропоновано структурні схеми безконтактних комп'ютеризованих систем для контролю технологічних параметрів текстильних матеріалів в процесі виробництва, що дозволило реалізувати їх на практиці;

 розроблено ультразвукову комп'ютеризовану систему контролю текстильних матеріалів, що дало можливість визначати їх пористість та натяг ниток для підвищення ефективності роботи технологічного обладнання;

– розроблено ультразвукову комп'ютеризовану систему, яка дає змогу оперативно контролювати пористість та поверхневу густину текстильних матеріалів безпосередньо на технологічному обладнанні в процесі виробництва;

– розроблено програмне забезпечення комп'ютеризованих систем контролю технологічних параметрів текстильних матеріалів, яке дає можливість оброблювати отримані значення напруг з перетворювачів системи та подальшою обробкою із зберіганням вимірювальної інформації у стандартних додатках MS Office в режимі реального часу;

 результати проведених теоретичних та експериментальних досліджень знайшли практичне впровадження у навчальний процес на кафедрі комп'ютерно-інтегрованих технологій та вимірювальної техніки Київського національного університету технологій та дизайну;

 отримані результати досліджень сприяють підвищенню ефективності та модернізації існуючої системи контролю поверхневої густини готового полотна на ПРАТ ТФ "РОЗА".

Особистий внесок здобувача. Усі наукові результати дисертаційної роботи автор отримав самостійно. У друкованих працях, публікованих у співавторстві, здобувачеві належать: [1, 2, 3, 6, 7, 9, 10, 12, 18, 22, 23, 25, 26, 27, 28, 29, 30] – розробка ультразвукових методів контролю технологічних параметрів текстильних матеріалів; [4, 5, 31] – отримання основних виразів для

ультразвукових хвиль, які взаємодіють з різними текстильними матеріалами з врахуванням згасання їхньої амплітуди; [8] – удосконалення методу ультразвукового контролю наявності розшарувань композиційних текстильних матеріалів; [11, 13] – постановка завдання та запропонована ідея контролю різних текстильних матеріалів для можливості їх безконтактного контролю; [14, 15, 16, 17, 32] – дослідження та аналіз взаємодії ультразвукових хвиль з текстильним матеріалом із складною структурою; [19, 20, 21] – отримання основних виразів для амплітудних співвідношень ультразвукових хвиль, які взаємодіють з текстильними матеріалами, та пов'язання їх з технологічними параметрами; [24] – удосконалення амплітудного методу виявлення дефектів в різних матеріалах.

З робіт, що опубліковані у співавторстві, у дисертаційній роботі використовуються виключно результати, отримані особисто здобувачем.

Апробація результатів дисертації. Отримані у дисертаційній роботі результати доповідались на таких наукових конференціях: Міжнародній науково-практичній конференції наукової молоді та студентів (м. Євпаторія, 2013р.); III Міжнародній науково-практичній конференції "Сучасний стан легкої і текстильної промисловості: інновації, ефективність, екологічність" (м. Херсон, 2017р.); І Міжнародній науково-практичній конференції "Мехатронні системи: інновації та інжиніринг" (м. Київ, 2017р.); II Міжнародній науково-практичній конференції "Мехатронні системи: інновації та інжиніринг" (м. Київ, 2018р.); Міжнародній науково-практичній конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених "Молодь – науці і виробництву – 2018: Інноваційні технології легкої промисловості" (м. Херсон, 2018р.); Textile Research Institute, 49th IFKT International Congress (Łódź, Poland, 2018); IEEE Ukraine Student, Young Professional and Women in Engineering Congress (Kyiv, Ukraine, 2018); III Міжнародній науково-практичній конференції "Мехатронні системи: інновації та інжиніринг" (м. Київ, 2019р.); Міжнародній науково-практичній конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених "Молодь – науці і виробництву – 2019: Інноваційні технології легкої промисловості" (м. Херсон, 2019р.); ХХІ Міжнародна конференція з математичного моделювання (м. Херсон, 2020р.); І Всеукраїнська конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених "Інноватика в освіті, науці та бізнесі: виклики та можливості" (м. Київ, 2020р.).

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 32 роботи, в тому числі: 2 статті у журналах, що індексуються у наукометричній базі Scopus (при чому одна у виданні віднесеному до другого квартилю Q2, що прирівнюється до трьох публікацій, а ще одна - у виданні віднесеному до третього квартилю Q3, що прирівнюється до двох публікацій у фахових виданнях України), 16 наукових статей у фахових виданнях України, 2 патенти на корисну модель, 1 колективна монографія (розділ якої прирівнюється до однієї статті у фаховому виданні України), 11 тез доповідей на конференціях різних рівнів.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Основна частина дисертації містить 272 сторінки друкованого тексту, 122 рисунка, 8 таблиць. Обсяг анотації двома мовами складає 10 сторінок. Повний обсяг дисертації викладено на 527 сторінках, у тому числі список використаних джерел із 428 найменувань на 39 сторінках та 6 додатків на 57 сторінках. Автор висловлює велику вдячність науковому керівнику д.т.н., професору Здоренку Валерію Георгійовичу за допомогу у виконанні дисертаційної роботи.

#### РОЗДІЛ 1

# АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕКСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Сьогодні контроль на виробництві потребує значного фінансування. Досвід провідних країн світу показує, що прибуток та стабільність підприємства на ринку, залежить в першу чергу від стабільності рівня якості його продукції, а кожна грошова одиниця, витрачена на це, забезпечить зменшення збитків від браку і компенсується в декілька разів.

Для підтримання зростання попиту на продукцію легкої промисловості України виробнику слід постійно розширювати асортимент продукції та прагнути до підвищення її якості. Це позитивно вплине на конкурентоздатність вітчизняних товарів і допоможе їм зайняти належне місце в долі світового експорту.

Для розвитку легкої промисловості, виробникам необхідно слідкувати за високою якістю матеріалів [33 - 47], з яких виготовляється продукція, адже якість сировини відображається на зовнішньому вигляді готових виробів. Несвоєчасне виявлення дефектів текстильного матеріалу призводить до зниження його сортності. Це, в свою чергу, спричиняє зменшення вартості текстильних полотен. Для цього потрібно проводити контроль всіх технологічних процесів виробництва текстильних матеріалів.

Існують різні технічні засоби, а також методи для оцінки фізикомеханічних параметрів текстильних матеріалів [48 - 89], які мають відповідати регламентованим вимогам, в залежності від їх призначення.

На сьогоднішній день більшість методів вимірювання і діагностики якості текстилю є застарілими. Для підвищення ефективності контролю текстильних матеріалів слід застосовувати сучасні методи на виробництві, що призведе до зменшення числа дефектів полотен та покращить якість готової продукції.

Якщо застосовувати сучасну автоматизовану систему контролю текстильних матеріалів за їхніми технологічними параметрами, то вона

дозволить знизити собівартість текстильних матеріалів, а також відсоток їхнього браку отриманого під час виробництва. Впровадження системи автоматизованого контролю текстильних матеріалів на виробництві дасть змогу вивільнити частину персоналу від рутинних операцій, що пов'язані з контролем технологічних параметрів. Це призведе до зниження вартості готової продукції та до можливого підвищення попиту споживача на неї.

Сучасні системи автоматизації на виробництві повинні бути гнучкими (перепрограмування системи для внесення змін), універсальними (застосування з мінімальними змінами в різних сферах промисловості), чутливими (реагування на зміну умов, перелаштовуючи порядок дій), економічно вигідними.

Для перевірки вихідної текстильної продукції на підприємствах легкої промисловості використовуються методи її контролю, які можуть бути руйнівними або неруйнівними. Руйнівні методи контролю призводять до незворотного руйнування матеріалу, а також вони є дуже трудомісткими та досить коштовними. В той час неруйнівні методи контролю залишають можливість для подальшого використання об'єкта досліджень без пошкоджень його структури та цілісності, що зможе зменшити вартість операцій діагностики самого матеріалу.

# 1.1. Огляд існуючих руйнівних методів та засобів контролю технологічних параметрів текстильних матеріалів

В легкій промисловості для вимірювання лінійних розмірів, лінійної густини ниток, пряжі та поверхневої густини текстильних полотен застосовується метод вибору проб [421]. Для контролю якості тканини з рулону беруться точкові проби, від кожної з яких, в свою чергу, відбирають елементарні проби для проведення конкретних випробувань. Відбір точкових проб спричиняє незручності, призводить до порушення цілісності полотна, його псування, завдаючи таким чином матеріальних збитків підприємству.

Число точкових проб, що відбираються для тканини залежить від розміру партії на виробництві. Якщо загальна довжина тканини в партії не перевищує 5000 м, тоді відбирають три шматки; при довжині більше 5000 м додатково відбирають по одному шматку від кожних наступних 5000 м. Кожну точкову пробу відрізають від відібраного з партії шматка з будь-якого місця, крім кінців.

Для лабораторного визначення показників структури і властивостей матеріалу з точкової проби вирізають елементарні проби. Форму, розміри і кількість елементарних проб визначають за відповідними стандартами для видів випробувань або за пропонованими методиками.

При розміщенні елементарних проб на точковій пробі дотримуються наступних правил:

- елементарні проби розташовують, відступаючи від кромки або поздовжнього згину полотна на 50 мм; елементарні проби у формі прямокутників або смужок, як правило, повинні розташовуватися строго в зазначеному напрямку (по нитках основи або утоку, уздовж петельних стовпчиків або рядів, уздовж або поперек полотна, під певним кутом до повздовжнього напряму);

- в елементарних пробах одного виду, призначених для визначення механічних (розтягнення, згин, тертя) і фізичних (капілярність, електризуємість і т. д.) властивостей, не повинні розташовуватися в напрямку випробування одні і ті ж нитки, стовпчики, ряди, іншими словами, проби в напрямку випробування не повинні бути продовженням одна одної;

- в елементарних пробах одного виду, які використовуються для оцінки усадки, стирання, фізичних властивостей (поглинальної здатності, проникності, теплофізичних, оптичних), не повинні проходити одні й ті ж нитки, стовпчики або ряди;

- в полотнах з великим раппортом переплетення елементарні проби розміщують окремо на кожній ділянці рапорту, які характеризуються своєю щільністю, видом переплетення, видом нитки і товщиною.

До геометричних параметрів відносять товщину, ширину і довжину тканини. Товщина тканин,  $b_{m\kappa}$ , мм - це відстань між ділянками тканин, які найбільше виступають з лицьової та зворотньої сторони. Товщина тканин змінюється в межах від 0,1 до 7 мм і визначає призначення матеріалів, висоту настилу при розкрої, витрату швейних ниток, клас машини і методи обробки.

Довжина тканини,  $L_{m\kappa}$ , мм - це відстань між кінцями шматка тканини. Довжина тканини в шматку залежить від виду тканини і її поверхневої густини. Довжина шматка пальтової тканини, драпу і ватину дорівнює 25 - 30 м, вовняної тканини для суконь 40 - 60 м, шовкової 60 - 80 м, бавовняної 70 - 100 м, трикотажного полотна 25 - 40 м. Чим більша довжина шматка, тим легше розрахувати його для настилу з мінімальною кількістю кінцевих нераціональних залишків.

Ширина,  $B_{m\kappa}$ , мм - це відстань між двома крайками тканини. Ширина тканин змінюється від 60 до 250 см. При розкрої деталей швейних виробів різних видів не всі ширини забезпечують отримання мінімальних межлекальних відходів. Не всі ширини є раціональними. Розроблено рекомендації щодо вироблення тканин номінальної ширини, і відхилення середньої фактичної ширини від спроектованої і затвердженої стандартом не повинні перевищувати наступних значень, см: при ширині тканини до 70 ± 1; до 100 ± 1,5; до 150 ± 2; 170 ± 2,5; більше 170 ± 3; для всіх тканин, крім тканин із синтетичних і крепових ниток і тканин з вмістом в утоку фасонної пряжі, допустиме відхилення 2,5 см.

До характеристик структури тканини відносяться: щільність по основі і утоку, заповнення (лінійне, поверхневе, об'ємне) і наповнення тканини, заповнення по масі, загальна пористість, коефіцієнт зв'язності і характер опорної поверхні.

Щільністю тканини по основі  $\Pi_o$  і по утоку  $\Pi_y$  називається абсолютне число ниток, що припадають на 100 мм тканини в напрямку основи або утоку.

Кожна тканина відповідно до вимог стандарту повинна мати встановлене число основних і уточних ниток на довжині (ширині) 100 мм. При недотриманні регламентованої щільності змінюються маса, міцність, зносостійкість тканини, що призводить до зниження її сортності та браку. Тому дуже важливо, щоб кожна тканина мала встановлену для неї стандартну щільність. Наприклад, регламентовані для вовняних і напіввовняних тканин відхилення по щільності (ГОСТ 5012 - 66) не повинні перевищувати: по основі - 2%, по утоку - 3%.

Товщина ниток тканини характеризується лінійною густиною  $T_{o,y}$ , текс, і розрахунковим діаметром, мм

$$T_{o,y} = \frac{m_{o,y}}{L_m},$$
 (1.1)

де  $m_{o,y}$  – маса, мг, нитки (пряжі) основи або утоку тканини довжиною  $L_m = 1$ м.

Лінійне заповнення тканини по основі  $E_o$  і по утоку  $E_y$ ,%, показує, яка частина довжини тканини уздовж основи або утоку зайнята поперечниками паралельно лежачих ниток, без урахування їх переплетення з нитками перпендикулярної системи.

Лінійне заповнення визначається як відношення фактичної кількості ниток основи  $\Pi_o$  або утоку  $\Pi_y$ , розташованих на довжині L, до максимально можливого числа ниток  $\Pi_{max}$  того ж діаметру d, які теоретично можуть бути розташовані без проміжків, зрушень і зминань на аналогічній довжині, за формулами:

$$E_o = A_H \sqrt{T} \Pi_o / 31,6, \quad E_y = A_H \sqrt{T} \Pi_y / 31,6,$$
 (1.2)

де  $A_{\mu}$  – коефіцієнт залежить від природи волокна.

Залежно від призначення тканини лінійне заповнення її може змінюватися від 25 до 150%. Якщо лінійне заповнення тканини більше максимальної щільності, тобто більше 100%, нитки або сплющуються, приймаючи еліптичну форму, або розташовуються із зсувом на різній висоті.

Поверхневе заповнення,  $E_{nob}$ ,%, показує, яка частина тканини заповнена нитками обох систем з урахуванням їх переплетення і накладення однієї на іншу, і характеризується відношенням площі тканини, заповненої проекціями ниток основи і утоку, до всієї площі тканини.
Так як, переплітаючись між собою, нитки основи і утоку накладаються одна на іншу, то площа їх проекцій менше площі, займаної кожної зі складових окремо. Поверхневе заповнення розраховують за формулою:

$$E_{nog} = E_o + E_v - 0.01 \cdot E_o E_v.$$
(1.3)

Знаючи поверхневе заповнення тканини, можна визначити її поверхневу пористість *R<sub>nos</sub>*,%, що показує відношення площі наскрізних пор до площі всієї тканини:

$$R_{no\theta} = 100 - E_{no\theta}.$$
 (1.4)

Об'ємне заповнення  $E_v$ ,% показує, яку частину обсягу тканини становить обсяг ниток основи і утоку. Об'ємне заповнення може бути виражено як відношення об'ємної маси тканини до об'ємної маси ниток:

$$E_{v} = 100\delta_{m\kappa} / \delta_{H}, \qquad (1.5)$$

де  $\delta_{m\kappa}$  і  $\delta_{\mu}$  – об'ємна маса ниток і тканини, мг/мм<sup>3</sup>.

$$\delta_m = \left( m_s \cdot 10^{-3} \right) / b_{m\kappa} , \qquad (1.6)$$

де *b<sub>тк</sub>* – товщина тканини, мм;

*m<sub>s</sub>* – поверхнева густина тканини, г/м<sup>2</sup>.

Об'ємну масу нитки  $\delta_{\mu}$  визначають по табличним даним в залежності від природи волокон.

Заповнення по масі тканини  $E_{m\kappa}$ ,%, визначається відношенням маси ниток до маси, яку міг би мати матеріал за умови повної відсутності пор як між нитками, так і всередині ниток між волокнами і макромолекулами і розраховується за формулою:

$$E_{m\kappa} = 100 \delta_{m\kappa} / \gamma, \qquad (1.7)$$

де γ – щільність речовини волокон, мг/мм<sup>3</sup>, вибирають по табличним значенням. Загальна пористість тканини, *P*<sub>o mκ</sub>,%, характеризує частку всіх проміжків між нитками, всередині ниток і волокон:

$$P_{OMK} = 100 \left( 1 - \delta_{MK} / \gamma \right) = 100 - E_{MK} . \tag{1.8}$$

Загальна пористість тканин коливається від 50 до 95%. Лінійна густина тканини  $m_L$ , г/м, - маса 1 м довжини тканини при її фактичній ширині - може бути визначена шляхом перерахунку маси точкової проби  $m_{np}$ , г, довжиною  $L_{m\kappa}$ , мм, за формулою:

$$m_L = m_{np} \cdot 10^3 / L_{m\kappa}. \tag{1.9}$$

Поверхнева густина тканини  $m_s$ , г/м<sup>2</sup> - це маса одиниці площі тканини, тобто одного квадратного метра тканини.

Поверхневу густину тканини визначають шляхом перерахунку маси точкової проби довжиною  $L_{m\kappa}$ , мм, і шириною  $B_{m\kappa}$ , мм, на площу 1 м<sup>2</sup> за формулою:

$$m_s = m_{np} \cdot 10^6 / (L_{m\kappa} \cdot B_{m\kappa}). \tag{1.10}$$

Поверхневу густину також розраховують по структурним показниками тканини:

$$m_{sp} = 0.01 \cdot \left( \Pi_o \Pi_o + \Pi_y \Pi_y \right) \eta, \qquad (1.11)$$

де *η* - коефіцієнт, що враховує зміну маси тканини в процесі її вироблення і обробки.

За даними проф. Н. А. Архангельського, коефіцієнт *η* залежить від виду тканини і його можна визначити за табличними значеннями.

Відхилення  $\delta_{m_{sp}}$  значень поверхневої густини, отриманих експериментальним  $m_s$  і розрахунковим  $m_{sp}$  методами, не повинно перевищувати 2%. Це відхилення можна подати, тоді так:

$$\delta_{m_{sp}} = \frac{\left(m_s - m_{sp}\right)}{m_{sp}} \cdot 100\%, \tag{1.12}$$

Внаслідок гігроскопічності текстильних волокон і ниток поверхнева густина тканини фактична і розрахункова можуть відрізнятися, тому поверхневу густину тканини визначають при нормованій вологості. Для трикотажних полотен вираз (1.12) є також справедливим, тільки для розрахункового параметру *m<sub>sp</sub>* залежність буде своя, яка враховуватиме переплетення безпосередньо контрольованого матеріалу.

Засоби, які використовуються при вимірюванні геометричних лінійних розмірів та показників структури тканини з подальшим визначенням її поверхневої густини такі:

- товщиноміри індикаторного типу TP-10 з похибкою 0,01 мм;
- лінійка з похибкою до 1 мм;
- мірильний стіл;
- ваги з похибкою до 0,001 г для зважування проб тканини;
- оптичний мікроскоп ИПТ-1 полегшує підрахунок кількості ниток;
- ваги з похибкою 0,1 мг для зважування проб ниток;
- оптичний прилад ПМ-4 для визначення ступеню рівномірного заповнення поверхні матеріалу нитками та волокнами.

Засоби, які використовуються при вимірюванні геометричних лінійних розмірів та показників структури трикотажних полотен з подальшим визначенням їхньої поверхневої густини такі:

- товщиноміри з похибкою 0,01 мм при вимірювальному тиску не більше
   10 Па;
- вимірювач кута перекосу петельних рядів з похибко не більше 1<sup>0</sup>;
- лінійка з похибкою до 1 мм;
- мірильний стіл;
- ваги з похибкою до 0,001 г для зважування проб тканини;
- стійка та вантаж для розпрямлення ниток при вимірі їх довжини;
- ваги з похибкою 0,1 мг для зважування проб ниток.

Виходячи з наведеного можна зробити висновок, що проводити оперативний контроль основних технологічних параметрів текстильних полотен за допомогою контактних руйнівних методів та засобів є наразі неможливим.

Використовуються методи із використанням ручної праці брак може бути пропущений для контрольованих полотен, що не дає можливості отримати якісну продукцію виході. Більшість існуючих на методів контролю технологічних параметрів текстильних матеріалів допускають відбір зразків для випробувань на заключному етапі виробництва, при цьому виправити недоліки браку вже не можна. Відбір проб для випробувань є руйнівним, що може знижувати сортність самого полотна, з якого відбираються проби. При цьому підприємства текстильної промисловості змушені постійно оновлювати та вдосконалювати свою технологічну базу. Постійно підвищується швидкість випуску продукції, змінюється асортимент. Тому є необхідність [90 - 162] в оперативному контролі якості сировини та готової продукції.

# 1.2. Огляд неруйнівних методів контролю та аналіз можливості їх застосування для технологічних параметрів текстильних матеріалів

Неруйнівні методи контролю не потребують вирізання зразків, руйнування готових виробів, таким чином призводять до зменшення матеріальних затрат. Для контролю технологічних параметрів текстильних матеріалів можна застосовувати такі неруйнівні методи: ємнісні, радіоізотопні, оптичні, радіохвильові, пневматичні, фотоелектричні та ультразвукові. Класифікація основних неруйнівних методів контролю, які можна застосовувати як безконтактно, так і контактно для текстильних матеріалів, наведена на рис.1.1.

Розглянемо опис зазначених методів [278] далі у роботі, а потім проведемо короткий аналіз робіт учених, які пов'язані з розробкою сучасних методів контролю різних технологічних параметрів текстильних матеріалів.

В основу *радіохвильового методу* покладено залежність коефіцієнта відбиття високочастотного електромагнітного поля від діаметрів контрольованих спеціальних волокон (з електропровідними складовими) при відомій електропровідності останніх до приймача з подальшою обробкою сигналу. Прилади, основані на цьому методі, можуть мати дуже високу чутливість.



Рис.1.1. Класифікація основних методів неруйнівного контролю, які можна використовувати для текстильних матеріалів

Ця обставина дозволяє використовувати їх для контролю діаметра тонких (10...200 мкм) і надтонких (менше 10 мкм) електропровідних волокон.

Пневматичний метод [144, 346, 402] оснований на вимірюванні змінного тиску газу, що обтікає контрольоване волокно. До переваг даного методу відносять нечутливість до фізико-механічних властивостей контрольованого волокна, впливу сильних електромагнітних полів, а також можливість контролювати волокна з перетином будь-якої форми. До недоліків методу слід віднести похибку при зміні умов навколишнього середовища і низьку швидкодію.

*Смнісний метод* відноситься до електричних методів контролю. На даний час він є одним із найперспективніших методів контролю діаметра тонких, але лише провідних спеціальних волокон. Часто при контролі цим способом використовують перетворювачі, виконані у вигляді круглого полого циліндра, який утворює з розташованим співвісно контрольованим волокном вимірювальний конденсатор.

Радіоізотопний метод [347] контролю діаметра волокон або визначення лінійної густини текстильної стрічки базується на взаємодії радіоізотопного Лінійна густина стрічки випромінювання з контрольованим матеріалом. визначається по розсіюванню чи поглинанню випромінювання контрольованим матеріалом. Метод має переваги: незалежність похибки від умов навколишнього середовища і можливість контролювати волоконну масу значної товщини. Проте цей метод не застосовується для контролю при невиконанні всіх заходів безпеки лля обслуговуючого персоналу, a також джерело радіоізотопного випромінювання може втрачати свою активність з часом.

Найбільш ефективними є *оптичні безконтактні методи*, що характеризуються значною різноманітністю. Загальна тенденція їх розвитку обумовлена вимогою значного підвищення точності – це зменшення довжини хвилі випромінювання, зондуючого вимірюваний об'єкт чи матеріал і перехід до видимих хвиль. Радіохвильові й ультразвукові методи, які оперують з радіо- й акустичними хвилями більшої довжини, ніж оптичні, характеризуються меншою точністю вимірювань.

Останнім часом було розроблено велику кількість безконтактних оптичних методів, які базуються на різних оптичних явищах. До них відносяться інтерференція й дифракція плоскої хвилі, що падає на однорідний чи неоднорідний діелектричний циліндр, рефракція вузького зондуючого пучка, випромінювання при проходженні пучка через діелектричний циліндр, його відбиття від торця та ін. Методи контролю реалізуються різними способами, що використовують як інтегральні перетворення (Фу'рє, Радона, Абеля), так і рішення диференційних рівнянь теорії дифракції на діелектричному циліндрі. Всі оптичні методи, в свою чергу, можна розділити на дві групи: руйнівного і неруйнівного контролю.

В схемах, що реалізуються на основі методів неруйнівного контролю, зондуючі випромінювання направляються перпендикулярно оптичній осі волокна чи під певним кутом. Ці методи розповсюджуються на контроль заготовок волокна, волокон складних некругових перетинів, як плавнонеоднорідних, так і ступінчато-неоднорідних (багатошарових). Методи неруйнівного контролю застосовуються в основному для оцінок діаметрів серцевини й оболонки волокна, ступені еліптичності його поперечного перерізу, шороховатості зовнішньої поверхні, а також визначення закону зміни показника заломлення матеріалу волокна по його перерізу.

Оптичні властивості волокон контролюються по результатам аналізу:

- діаграм розсіяння плоскої хвилі в передній і задній полусферах волокна;
- степені фокусування падаючої хвилі циліндричною серцевиною волокна;
- картини поля інтерференційним мікроскопом;
- голографічного зображення поля волокна;
- картини дифракції хвилі на волокні.

Велика кількість оптичних методів ускладнює вибір кращого з них для конкретних умов вимірювань і контрольованого матеріалу. Оптичні методи

контролю порівнюють і класифікують для встановлення меж їх застосування та для того, щоб мати змогу вибрати оптимальний метод для різних умов використання. Всі методи класифікуються по типу опромінюючого сигналу і зони реєстрації інформаційного сигналу.

Процес неруйнівного вимірювання геометрооптичних характеристик об'єкта складається з трьох стадій: формування опромінюючого сигналу, його взаємодія з об'єктом вимірювання і формування зони реєстрації інформаційного сигналу. По типу опромінюючого пучка методи можна розділити на два класи: ті, які використовують вузький пучок (в порівнянні з геометричними розмірами поперечного перерізу об'єкта) і широкий пучок, розмір якого на порядок чи більше перевищує діаметр вимірюваного об'єкта. Реєстрацію інформаційного сигналу можна здійснювати в двох областях – ближній чи дальній зоні площини зображення. В основу сучасних вимірювальних приладів покладені різні методи вимірювання характеристик волокон.

Одним із перспективних методів контролю форми поперечного перерізу полотна є дифракційний метод [129]. До його переваг можна віднести високу точність, невеликий час дії, локальність вимірювань (можливість контролювати волокна навіть по маленьким ділянкам), відсутність необхідності фіксації в просторі й можливість отримання від контрольного датчика сигналу зворотного зв'язку, призначеного для впливу на технологічний процес розтягнення волокна.

*Дифракційний метод* вимірювань придатний також для вимірювань форми поперечного перерізу і профілю показника заломлення некруглих волокон, капілярів і їхніх заготовок (штабиків), а також ступеню ексцентриситету оболонки і серцевини в процесі виготовлення двошарового волокна.

Реалізація дифракційного методу на практиці досить слабка. Це можна пояснити вищою в порівнянні з інтерференційними і голографічними методами складністю вирішення задач дифракції. Виведені точні формули для оперативного отримання картин розсіювання в дальній зоні дозволили суттєво підвищити точність дифракційних вимірювань за рахунок переходу до балансних схем порівняння з еталонними чи калібрувальними графіками.

Ультразвуковий метод полягає в зондуванні контрольованого матеріалу безперервним або імпульсним сигналом та за зміною його параметрів амплітуди, фази, часу затримки в товщини матеріалу визначенні різних його технологічних Ультразвукові параметрів. методи можуть бути або контактними безконтактними. Для текстильних матеріалів малої лоцільно товшини застосовувати саме безконтактні ультразвукові перетворювачі.

Порівняння автоматизованих методів контролю тканин показує, що найнеобхіднішим і найвигіднішим є застосування недорогих методів, придатних для контролю відразу кількох технологічних параметрів текстильних матеріалів.

У роботі [256], для контролю порушень структури текстильних матеріалів, розроблено ряд пристроїв контролю оптичними методами, до складу кожного з яких входить інтерфейс, що дозволяє оцифровувати і вводити інформаційний сигнал з оптичних датчиків до ПК. Автором досліджений взаємозв'язок між оптичними характеристиками тканин і їхніми структурними параметрами, внаслідок чого отримані математичні моделі. У роботі автор використовує методи відбиття і пропускання світового потоку досліджуваним матеріалом.

Комаровим О. Б. [247] продовжено розвиток та вдосконалення теорії комп'ютерного розпізнавання параметрів структури тканин. Ним запропонований автоматизований метод визначення параметрів будови і дефектів тканин за допомогою планшетного сканера та спеціально розробленого програмного забезпечення, яке здатне відтворювати зображення тканини по графічній моделі та моделювати зображення тканин різних переплетінь.

Розробкою неруйнівних методів контролю структурних параметрів текстильних матеріалів займався професор Шляхтенко П. Г. [327, 411, 412]. Запропонований ним метод базується на аналізі дифракційних картин Фраунгофера, побудованих на комп'ютері із застосуванням програм двовимірного перетворення Фур'є мікрозображення поверхні матеріалу, що досліджується, при його освітленні гаусовим пучком монохроматичного світла. Після пропускання крізь тканину паралельного пучка світла довжиною хвилі  $\lambda$  перпендикулярно до поверхні, аналізують симетрію і взаємне розташування

основних максимумів на дифракційній картині. За результатами аналізу визначають ширину і довжину рапорта, величину лінійного заповнення по основі, появу локальних потовщень основи й утка, порушення переплетінь. Низька універсальність і висока складність є основними недоліками цього методу.

Був розроблений метод комп'ютерної фотограмметрії [326, 374, 375, 376] для досліджень тканин. Для отримання характеристик тканини одна і та ж її ділянка фотографується під різними кутами. Зображення тканини обробляється на комп'ютері за допомогою алгоритма, що дозволяє визначати опорні точки елементів нитки в двох площинах, після чого, за допомогою формул, вираховують їхні характеристики. До недоліків даного методу можна віднести чіткості зображення досліджуваної великі вимоги ділянки, ДО на інформативність якої до того ж впливає відбивальна здатність тканини, яка, в свою чергу, залежить від природи волокна ниток, їх фарбування, способу отримання. Також, використовуючи фотограмметричний метод контролю, необхідно враховувати нерівномірність ворсистості пряжі по лінійній густині.

Відома розробка безконтактного способу аналізу структури тканини [324] для визначення поверхневої густини тканини, її фазової побудови, коефіцієнтів лінійного й поверхневого заповнення, уробітку ниток основи й утоку, запропоновано вдосконалення існуючого фотограмметричного неруйнівного методу контролю. Суть розробки заключається у використанні відеозображення ділянки тканини, отриманого за допомогою двох відеокамер. Отримані таким чином зображення відтворюють на моніторі комп'ютера, де й проводиться їх обробка. Цей метод дає можливість досліджувати структуру тканини під час її руху.

Розробці та застосуванню методів аналізу та контролю якості текстильних матеріалів присвячена робота Тернової Т. І. [387], де уточнена матаматична модель тканини, що враховує технологію її виробництва й апаратурні особливості автоматичних систем контроля. На основі уточненої математичної моделі автор використовує еластичний еталон, що дозволяє враховувати й

контролювати такі змінні параметри як розтяг, стиснення й перекос. У роботі також вдосконалений метод компенсації інформаційних потоків від еталона й контрольованої тканини, що дозволяє мінімізувати часові затрати системи автоматичного розпізнавання дефектів. Автором запропонований метод знаходження дефектів тканини за допомогою модифікованого перетворення Радона. Растровий сигнал сканування, отриманий від контрольованого об'єкта за допомогою оптичних датчиків має малий коефіцієнт співвідношення "сигнал-шум", через що сигнал дефекта на фоні сигналу, отриманого від структури тканини, складно виділити. Запропонований метод дозволяє підвищити значення коефіцієнта співвідношення "сигнал-шум" в декілька разів, що мінімізує ймовірність пропуску дефекта автоматизованими системами.

Спроба розробки технології і методів виявлення зовнішніх пороків текстильних матеріалів із застосуванням локальних бінарних шаблонів і вейвлетаналізу була зроблена Якуніним М.А. [420]. У роботі показано алгоритм пошуку дефектної області за допомогою локальних бінарних шаблонів, а також, на основі досягнень прикладної математики, розроблений метод класифікації пороків тканини за допомогою вейвлет-функції Габора.

Так для фільтрації зображень тканини обраний алгоритм, оснований на локальних бінарних шаблонах, а для аналізу отриманого бінарного коду використовувалась математична статистика — розподіл хі-квадрат. Локальні бінарні шаблони представляють собою опис зображення (середовища) навколо пікселя в двоїчній формі. Значення пікселів порівнюють з центральним пікселем. В результаті отримують восьми розрядний бінарний код, який описує середовище пікселя. Застосування вейвлет-функції Габора, яка є основою методу визначення дефектів тканини, необхідне для очищення зображення від шуму. Шумом вважають все, що не є дефектом. Функції Габора знаходяться в просторовій і частотній області і мають вигляд плоскої хвилі з хвильовим вектором. Результат перетворення залежить від сорока наборів вейвлет-коефіцієнтів, які отримують для зображення бездефектного відрізка тканини (зразка) і для дефектної області.

Пошук дефектів зводиться до пошуку перепадів значень яскравості в цифровій матриці зображення, де сорок – це бездефектна зона, а будь-яке значення, відмінне від сорок – це зона з дефектом.

Кожен дефект є областю з відомою яскравістю дефектних пікселів. Координати цих пікселів дозволяють встановити розміри дефекта, орієнтацію ниток сітки тканини дефектної зони в просторі.

Недоліки даного методу заключаються в складності правильної інтерпретації отриманих даних. Для того щоб вирішити це питання розроблені методи аналізу коефіцієнтів вейвлет-розкладу.

Отже, на сьогоднішній день широко використовуються прилади контролю, що базуються на оптичних методах та працюють на основі контролю світла, яке проходить крізь тканину і відбивається від неї.

Принцип оптичного сканування поверхні тканини, закладений в них, є базовим для всіх сучасних методів цифрової обробки зображень тканини. Проте до недоліків оптоелектричних приладів контролю можна віднести неточність вимірювань, яка пов'язана з чутливістю приладів до кольору і складності структури тканини.

Не дивлячись на те, що розробки безконтактних методів автоматизованого контролю технологічних параметрів текстильних матеріалів та їх дефектів ведуться досить давно, на практиці оцінка цих параметрів здійснюється недосконалими технічними засобами, які не здатні контролювати відразу декілька показників якості текстилю.

Наприклад, контроль зовнішнього вигляду тканини здійснюється здебільшого людиною-оператором. Результати такого контролю є суб'єктивними, а також неточними внаслідок швидкої втомлюваності оператора із-за виконання ним одноманітної роботи.

Тому існує необхідність створення надійних, простих, доступних, швидких, ефективних методів та засобів автоматизованого контролю технологічних параметрів текстильних матеріалів, що не вимагають підвищених заходів безпеки. На сьогоднішній день кожен метод направлений на контроль якогось одного технологічного параметра полотна, внаслідок чого виникає проблема одночасного застосування великої кількості складних методів при контролі відразу кількох показників якості текстилю.

### 1.3. Огляд засобів неруйнівного контролю текстильних матеріалів для застосування в легкій промисловості

Багато вимірювальних засобів, які можна застосовувати для визначення різних параметрів текстильних матеріалів, у своїй основі мають схеми вимірювання геометричних і оптичних характеристик неоднорідних оптичних волокон. *Балансна схема порівняння волокна* є одною із таких, що вимірюється з ортогонально розташованим еталонним. Розглянемо принцип дії такої системи.

Взаємно перпендикулярне положення контрольованого й еталонного оптичних волокон є більш перспективним і забезпечує отримання двох дифракційних картин (еталонного й контрольованого волокон), що не взаємодіють між собою. Еталонне й контрольоване оптичне волокно при цьому опромінюються однією й тією ж ділянкою лазерного пучка. Дві отримані в передній напівсфері картини порівнюються між собою суміщенням їх дифракційних мінімумів одного порядку. Діаметр контрольованого оптичного волокна оцінюється шляхом порівняння відстаней від центра результуючої картини хрестовидної форми в дальній зоні до відповідних мінімумів двох утворюючих її парціальних картин лінійної форми – еталонної й контрольованої. В якості еталонної шкали при контролі використовують дифракційні мітки (по мінімумах). Їх отримують від еталонного оптичного волокна такого ж типу, що й партія контрольованих волокон. Відстань між мітками пов'язана з діаметром волокна.

Схема приладу [278] з фотоприймачами для реєстрації положення мінімумів дифракційної картини представлена на рис.1.2,а. Випромінювання від когерентного джерела 1 формується колімаційною системою 2 в плоский пучок з рівномірним амплітудно-фазовим розподілом, переріз якого (4 мм) суттєво перевищує діаметр контрольованого оптичного волокна (50...250 мкм). Колімаційна оптична система складається з мікрооб'єктів 3, 5. В якості просторового частотного фільтра використовується точкова діафрагма 4, розташована в загальній фокальній площині мікрооб'єктивів. Діафрагма 6 формує прямокутний по осям Х та У розподіл поля в зоні контролю, де взаємноперпендикулярно розташовуються два оптичні волокна (еталонне 7 та волокно, яке контролюється 8). Контрольоване оптичне волокно розташовується вертикально, а еталонне – горизонтально так, що проекція їх перетину знаходиться в центрі блока реєстрації 10. При цьому за допомогою проекційної оптичної системи 9 формуються дві взаємно перпендикулярні дифракційні картини (від еталонного і контрольованого оптичного волокна), які не затіняють одна одну. Точність вимірювання суттєво залежить від способу реєстрації дифракційного розподілу, що інформує про вимірюваний діаметр. При цьому оцінюються два варіанти реєстрації: інтенсивність дифракційного поля в кількох вибраних фіксованих точках, а також відстань між мінімумами одного порядку дифракційної картини. Для діаметрів 50...250 мкм оптимальним є спосіб реєстрації розмірів дифракційної картини в її центральній зоні; вони змінюються при зміні діаметру контрольованого оптичного волокна.

У процесі досліджень в областях нульового й першого дифракційних мінімумів еталонного волокна фотоприймачі 11 встановлюються по схемі, зображеній на рис.1.2,6. По заданому рівню інтенсивності, що складає 0,01 інтенсивності максимуму  $I_{max}/I_0$  центральної пелюстки дифракційної картини для еталонного оптичного волокна, сформовані концентричні окружності в областях  $\Delta 1$ ,  $\Delta 2$ ,  $\Delta 3$  перших, других і третіх мінімумів еталонної картини. Вони визначають діапазон змін діаметрів контрольованих оптичних волокон. Положення мінімумів картин від контрольованого й еталонного волокон

Сигнал неузгодженості від фотоприймачів 11 характеризує степінь відхилення положення мінімумів горизонтальної картини (контрольованого волокна) відносно вертикальної.



a



Рис. 1.2. Оцінювання діаметра волокна за двома дифракційними картинами:

 а – схема ортогонального розташування еталонного й контрольованого оптичного волокна; б – схема розташування фотоприймачів Сигнал неузгодженості поступає в блок обробки інформації 12 для перерахунку й видачі результатів вимірювань. Отже, діаметр контрольованого волокна оцінюється по відстані між першими і другими мінімумами його горизонтальної дифракційної картини. Зміщення положення мінімумів в сторону центра (до максимуму нульового порядку вертикальної картини) для еталонного волокна свідчить про те, що діаметр контрольованого оптичного волокна перевищує діаметр еталонного, відхилення мінімумів від центру вертикальної картини – про його зменшення в порівнянні з еталонним.

Точність вимірювань залежить від двох факторів: похибки в визначенні діаметру еталонного оптичного волокна (того ж типу, що й контрольоване) якимось іншим незалежним методом; точності порівняння відстаней між відповідними мінімумами картини від контрольованого й еталонного оптичного волокна.

Розглянемо засіб із *схемою дифракційного контролю* [278] з підтримкою стабільності діаметру розтягнутого волокна.

В якості еталонного волокна в модифікованій схемі запропоновано використовувати полотно тієї ж партії, що й контрольоване, таке, що пройшло перемотку і відповідає ортогонально вимірюваній ділянці розтягнутого волокна. Така схема забезпечує підтримку стабільності діаметра оптичного волокна при технологічному процесі його розтягнення з фільєри механізму розтягування, а також підвищення точності й надійності контролю.

Відхилення величини діаметра на контрольованій ділянці волокна від його еталонної ділянки визначається в цій схемі по відхиленню положення мінімумів дифракційної картини контрольованої ділянки волокна, що виготовляється з еталонного. Схема приладу контролю зовнішнього діаметру оптичного волокна в промислових умовах розтягнення представлена на рис.1.3,а.

Випромінювання від лазеру 1 формується оптичною системою 2 в конічний пучок, що сходиться. За нею розташовується оптична система передавання 4, що забезпечує отримання однакового масштабу дифракційних картин від еталонної 3 і контрольованої 5 ділянок оптичного волокна, що розтягується. Блок перемотки 12 змінює напрям намотування волокна таким чином, що еталонна ділянка оптичного волокна розташовується горизонтально, а контрольована - вертикально. Приймаюча оптична система 6 формує дві ортогонально розташовані дифракційні картини від еталонної й контрольованої ділянок оптичного волокна, які не затіняють одна одну. Положення мінімумів картин реєструються блоком реєстрації 7. Сигнал неузгодженості від фотоприймачів блока реєстрації характеризує степінь відхилення положення мінімумів картини контрольованої ділянки оптичного волокна відносно еталонної. Для перерахунку й видачі даних про результати вимірювань контрольованого оптичного волокна сигнал неузгодженості подається в блок обробки сигналу 8, а потім в блок зворотнього зв'язку 9 і блок регулювання фільєри 10, що змінює величину фільєри 11 механізму розтягування.

Отже, діаметр контрольованого оптичного волокна оцінюється по відстані між мінімумами одного порядку в горизонтально розташованій картині. Відхилення положення мінімумів відповідних порядків в сторону центру (до мінімумів нульового порядку дифракційної картини від еталонної частини волокна) свідчить про те, що діаметр контрольованої ділянки оптичного волокна більше еталонного, а відхилення мінімумів від центру картини еталонної частини оптичного волокна – про його зменшення. Отримані результати у вигляді аналогового сигналу слугують для керування технологічним режимом розтягнення. Прилад контролю і підтримки стабільності діаметру розтягнутого оптичного волокна має високу вібростійкість і точність контролю, а також стабільність роботи.

Також для контролю текстильних волокон може застосовуватися засіб та *метод відбиття світлового потоку* [278]. Засіб працює за інтенсивністю світлового потоку, відбитого торцем волокна чи заготовки при падінні на нього коллімірованного світлового пучка, паралельно оптичній осі волокна (рис.1.3,б). Торець вимірюваного волокна 6 переміщується по відношенню до фокального п'ятна, а зондуюче і відбиваюче випромінювання реєструється двома нерухомими приймачами 2.





В

Рис. 1.3. Оптичні засоби вимірювання параметрів волокон матеріалу: а – схема приладу вимірювання з підтримкою стабільності розтягнутого волокна; б – схема вимірювання параметрів оптичного волокна методом відбиття світлового потоку по балансній схемі; в – схема вимірювання параметрів оптичного волокна методом ближньої зони

Призма 3 і чвертьхвильова пластинка 4 слугують для збору відбитого переднім i випромінювання, торцем волокна виключення випромінювання, відбитого іншими поверхнями. Для усунення відбиття від дальнього торця він поміщається в імерсійну рідину, що зменшує похибку вимірювань на порядок. Вимірювання потужності відбитого потоку відносно потужності падаючого потоку, що характеризує розподіл коефіцієнта відбиття, вимірюється диференційним підсилювачем. Промінь лазера 1 фокусується на торці волокна за допомогою лінзи 5, що створює пучок опромінення з діаметром, який не перевищує 0,5 мкм, тобто знаходиться на межі дифракційного розширення.

Коефіцієнт відбиття при освітленні відбиваючої поверхні під прямим кутом визначається відношенням потужності відбитого світла до потужності падаючого світла так:

$$\frac{P_r}{P_{ri}} = \left(\frac{(n_q(r) - 1)}{(n_q(r) + 1)}\right)^2,$$
(1.13)

де  $n_q(r)$  – показник заломлення на відстані r від оптичної вісі.

Також з оптичних засобів ще розглянемо ті, які базуються на *методі* ближнього поля [278].

У методі ближнього поля використовується така особливість світла: потужність, що переноситься всіма модами оптичного волокна через дану точку поперечного перерізу, пропорційна різниці показників заломлення серцевини в цій точці і оболонки при умові рівномірного розподілу потужності випромінювання в межах апертури оптичного волокна. Використання некогерентного джерела світла, наприклад, світловипромінюючого діода, впритул притиснутого до торця волокна, забезпечує однакове збудження всіх мод. Методом геометричної оптики з врахуванням умови відсічки направлених мод можна вивести співвідношення між розподілом інтенсивності світла в ближній зоні і профілем показника заломлення. В один з торців волокна вводиться світло від некогерентного джерела, наприклад, світловипромінюючого діода 1 і за допомогою гарно сфокусованого мікроскопа 2 визначається щільність потоку в ближній зоні у іншого торця (3 – приймач випромінювання на схемі). Джерело світла повинне мати постійну по перерізу волокна інтенсивність випромінювання, що задовольняє закон Ламберта.

Робота системи сканування полотна описана в [422], де зазначалось про *ємнісні датчики*, які можна використовувати для контролю поверхневої густини *m*<sub>s</sub> тканини. Такий датчик показаний на рис.1.4,а.

Це паралельно-пластинчастий конденсатор. Ємність конденсатора паралельної пластини визначається із відомого виразу так:

$$C = 0,089 \cdot \frac{S_{nn} \varepsilon_0}{d}, \qquad (1.14)$$

де С – ємність плоского конденсатора;

S<sub>пл.</sub> – площа пластин конденсатора;

*Е*<sub>0</sub> – діелектрична проникність повітряного середовища;

*d* – відстань між пластинами.

Автори описують, що пропускаючи тканину між пластинами конденсатора (рис.1.4,а), значення у діелектричної проникності повітряного середовища будуть змінюватися, а ємність, у свою чергу, також буде мінятися відповідно. Роблячи це, встановлюється взаємозв'язок між ємністю C та поверхневою густиною  $m_s$ .

Якщо використовувати засоби на поглинання енергії випромінювання, то при використанні ступеня ослаблення γ щільності потоку енергії, який пропорційний поверхневій густині *m<sub>s</sub>* тканини, можна визначати необхідний технологічний параметр для полотна так:

$$m_s = \gamma = \frac{\Delta m_\kappa}{\Delta S}, \qquad (1.15)$$



Рис. 1.4. Неруйнівні засоби контролю поверхневої густини *m<sub>s</sub>* тканини:

а – вимірювання поверхневої густини *m<sub>s</sub>* тканини ємнісним датчиком;

б – вимірювання поверхневої густини *m<sub>s</sub>* тканини радіометричним датчиком

де  $\Delta m_{\kappa}$  – маса контрольованої тканини на ділянці контролю;

 $\Delta S$  – площа ділянки контролю.

Компанія BST ProControl GmbH пропонує таку систему [422] радіометричного поглинання із задаючою напругою менше 5 кВ, такі системи не потребують дозволу для використання в Німеччині. Датчик підходить для вимірювання від 50 до 1000 г/м<sup>2</sup> із роздільною здатністю 0,1 г/м<sup>2</sup> і точність 0,3 г/м<sup>2</sup>. Показано встановлення датчика на ткацькому верстаті (рис.1.4,б).

Функціональність датчика була перевірена на саржевій бавовняній тканині 3/1. Ткацька машина працювала зі швидкістю 700 об/хв під час вимірювання поверхневої густини датчиком.

Необхідно також розглянути сучасний стан засобів контролю та регулювання натягу пряжі при подачі її на текстильну машину в процесі виробництва полотен. На рис.1.5,а показано рух пряжі при подачі її на круглов'язальну машину з корегуванням її натягу за допомогою контактного нитконатягувача без можливості визначення його значення. Сучасні наявні засоби визначення натягу текстильних матеріалів в основному є контактними (рис.1.5,6), які базуються на тензорезистивних елементах перетворення вимірювальної інформації. Проблема таких засобів полягає у тому, що коли текстильний матеріал подається на ділянку, де стоїть такий датчик, через пристрій подачі з роликами, тертя об які при значній швидкості нитки може призвести до її обриву. Також слід зазначити, що контакт самого датчика з поверхнею нитки або пряжі текстильного матеріалу може вносити досить суттєвий вплив на покази виміряних величин натягу.

Проводяться дослідження із симуляцією циклічних навантажень на різні види пряжі, нитки за допомогою спеціальних стендів із використанням мікропроцесорної техніки [423] як показано на рис.1.5,6. Можна побачити, що до таких випробувальних стендів входить контактний вимірювач натягу, пристрій подачі матеріалу до самого датчика, блок керування кроковим двигуном, який відтворює зміну натягу в залежності від закладеного алгоритму керуючої програми на ПК.





Шлях пряжі на круглов'язальній машині



Рис. 1.5. Контроль та регулювання натягу пряжі існуючими засобами на виробництві:

 а – шлях подачі пряжі до круглов'язальної машини та корегування її натягу;
 б – дослідження визначення зміни натягу вуглецевих волокон контактним цифровим засобом Такі досліди показують, що оперативно вимірювати натяг текстильного матеріалу на великих швидкостях руху за допомогою контактних датчиків є досить складною задачею.

Тому застосування безконтактних вимірювальних датчиків, джерело випромінювання яких не потрібно корегувати з часом, а також які є безпечними для життя та здоров'я людини, дозволить проводити оперативне вимірювання значень натягу пряжі або нитки на великих швидкостях руху при подачі їх на технологічне обладнання. Найкраще для безконтактного контролю натягу ниток підходить саме ультразвуковий метод, який простий в реалізації та надійний.

Проаналізувавши усі методи та засоби для контролю різних технологічних параметрів текстильних матеріалів можна остаточно зробити висновок, що доцільно застосовувати ультразвукові вимірювальні прилади. Такі засоби досить точні, прості в реалізації та в експлуатації, мало коштують у порівнянні з аналогами та безпечні для людини, тому далі будемо розглядати їх.

# 1.4. Огляд методів та засобів ультразвукового контролю текстильних матеріалів для застосування в легкій промисловості

Найбільш мобільним, оперативним та безпечним для людини і, таким чином, найперспективнішим є ультразвуковий метод автоматизованого контролю технологічних параметрів текстильних матеріалів.

У середині XX століття були розроблені основні моделі, які сьогодні складають традиційну теорію ультразвукового контролю [203 - 209]. Колгановим В. І. [245] розроблений ультразвуковий безконтактний метод і програмноапаратні засоби автоматизованого контролю цілісності виробів з полімерних композиційних матеріалів. Проте і зараз ці методи не є поширеними.

Класифікація параметрів текстильних матеріалів, які можна контролювати безконтактними ультразвуковими методами та науково-технічна проблема, яку необхідно вирішити для можливості застосування таких методів на виробництві із використанням сучасних комп'ютеризованих систем, наведені на рис.1.6.

### ПАРАМЕТРИ ТЕКСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ, ЯКІ МОЖНА КОНТРОЛЮВАТИ БЕЗКОНТАКТНИМИ МЕТОДАМИ



### НАУКОВО-ТЕХНІЧНА ПРОБЛЕМА



Рис. 1.6. Параметри текстильних матеріалів, для яких можна застосовувати безконтактні ультразвукові методи контролю та науково-технічна проблема, яку для цього необхідно вирішити В роботі Костюкова А.Ф. [257 - 260] розглянутий амплітудний метод контролю параметрів текстильної волоконної маси та показаний коефіцієнт проходження ультразвукового сигналу через багатошарову впорядковану волоконну систему, який виражений наступним рівнянням:

$$B_{SH} = \prod_{i=1}^{M_{H}} \left( 1 + \frac{P_{i \, pacc}}{M_{H} - 1} + \sum_{j=i-1}^{M_{H} - 1} \prod_{l=1}^{M_{H}} \prod_{l=1}^{M_{H}} \left( 1 + \frac{P_{l \, pacc}}{M_{H} - 1} + \sum_{j=l-1}^{M_{H} - 1} P_{j \, pacc} + \sum_{j=l-1}^{M_{H} - 1} P_{j \, pacc} + \sum_{j=l-1}^{M_{H} - 1} P_{j \, pacc} \right), \quad (1.16)$$

$$P_{pacc} = \sqrt{\frac{2}{\pi k R_0}} \cdot e^{ikR_0 - \frac{i\pi}{4}} \cdot (2N_6 + 1) \cdot \sum_{m = -\infty}^{\infty} C_m \cdot e^{im\theta}; P_{omp} = -\frac{kS_L}{2} \cdot \cos\theta \cdot e^{ikR_0 - i\frac{\pi}{4}},$$

Де *B<sub>SH</sub>* – імовірнісний коефіцієнт проходження;

- *M<sub>H</sub>* математичне очікування маси одиничного волокна;
  - *k* хвильової коефіцієнт;

 $2N_{e}+1$  – число волокон в шарі;

- т цілочисельний номер відбиваючого волокна;
- 1-цілочисельний номер шару волокна;

 $S_L = 2dN_e - площа опромінюваної поверхні волокон решітки;$ 

- *R*<sub>o</sub> відстань від площини решітки до точки спостереження (прийому);
- С<sub>т</sub> коефіцієнти, що враховують можливі взаємодії між волокнами в результаті множинних відображень;

heta – кут до нормалі на площину решітки, під яким падає акустична хвиля;

*P*<sub>0</sub>, *P*<sub>*pacc*</sub>, *P*'<sub>*pacc*</sub> та *P*<sub>*omp*</sub> – відповідно амплітуди тиску падаючої, розсіяної, зворотній тиск, що створюється розсіяною і відбитою хвилями.

З виразів (1.16) випливає, що амплітуда сигналу, що пройшов через досліджуваний зразок, знаходиться у вираженій нелінійній (експоненціальній) залежності від кількості волокон на шляху поширення ультразвукової (УЗ) хвилі.

На рис 1.7 показані запропоновані моделі розповсюдження УЗ - сигналу в текстильній волоконній масі в процесі акустичного контролю.





Рис. 1.7. Моделі розповсюдження ультразвукового сигналу в текстильній волоконній масі в процесі акустичного контролю, які запропоновані Костюковим А.Ф.:

В

а – схема відбиття та накладання УЗ - сигналу у волоконній масі; б – схема проходження УЗ - сигналу крізь волоконну масу; в – модель впливу поверхневої густини та обємної щільності волоконнї маси на амплітуду та фазу УЗ - сигналу

У роботі [424] був запропонований інший засіб контролю текстильного матеріалу. Відомо, що ультразвукові коливання з деякою швидкістю проходять в різних середовищах. Тому контрольно-вимірювальні прилади, які засновані на швидкості розповсюдження УЗ коливань, знаходять застосування для контролю параметрів технологічних процесів на виробництві. Швидкість ультразвуку в волоконних середовищах залежить від об'ємної щільності матеріалу. Залежність швидкості від щільності матеріалу може бути визначена, якщо відомо кількість волокон в заданому при прозвучуванні обсязі. У датчику сталість обсягу забезпечувалася постійним поперечним перерізом форми каналу і постійної довгої прозвучуваної ділянки. Але, контролюючи стрічку в формуючому каналі, відповідний неможливо встановити точно ділянку продукту, якимось Неможливо також забезпечити повторність конкретними показаннями. вимірювань, так як виріб може деформуватися, витягатися і при цьому змінювати розташування волокон по перетину продукту.

Для проведення багаторазових вимірювань, підтвердження повторюваності результатів виготовлявся контрольний зразок, що представляє собою відрізок стрічки певної довжини і відомої маси. З метою збереження структури і маси волокна при багаторазових випробуваннях зразок розміщувався в шаблоні. Шаблон має форму паралелепіпеда з бічними стінками, частина якого виготовлена з тонких сіток і сталевих пластин відповідно. Одна з сіток може відкидатися для заміни випробовуваних зразків. Вибір розмірів стінок може бути довільним. Але так як швидкість поширення ультразвуку залежить від об'ємної щільності матеріалу, а характеристикою виробу є лінійна густина, поперечний переріз, який має стрічка в шаблоні, доцільно встановити таким, щоб було найбільш просто переводити одні параметри в інші. Тому поперечний перетин шаблону вибрано рівним 1 см<sup>2</sup>, а розміри сторін, зберігаючи нормальне співвідношення розмірів поперечника виробів 2: 1, встановлені 14,14 мм і 7,07 мм.



a



Рис. 1.8. Ультразвуковий контроль волоконних стрічок:

а – залежність фази сигналу приймача від лінійної густини волоконної стрічки (лінія 1 – бавовняна стрічкова стрічка, лінія 2 – бавовняна чесальна стрічка, лінія 3 – лавсанова) та залежність швидкості звуку від густини матеріалу (1 - для чистої бавовни стрічок, 2 - для чистого лавсану чисельних стрічок);
б – блок-схема установки для визначення швидкості звуку в волоконній масі Для зручності введення і виведення зразка із зони контролю конструкція закріплена на стрижні з поперечними розмірами, рівними поперечним розмірам шаблону. Точна орієнтація зразка, щодо осі УЗ пучка досягається тим, що до бічних стінок додана злегка вигнута форма.

Швидкість ультразвуку в волоконному середовищі найбільш просто виміряти фазовим методом. Знаючи швидкість звуку в повітрі при нормальних умовах, можна зафіксувати значення фази сигналу приймача при відсутності в УЗ пучку матеріалу, а потім, поміщаючи в поле зразок з відомими параметрами, відзначати зрушення фази щодо цього фіксованого значення.

Залежність швидкості звуку від густини матеріалу представлена у вигляді графіков, зображених на рис.1.8,а. Вісь абсцис показана в масштабах лінійної густини і об'ємної щільності.

В результаті експериментальних досліджень встановлено також, що при стисненні контрольного зразка в напрямку прозвучування фаза прийнятого сигналу залишається постійною, тобто в умовах постійної маси зразку фаза, яка пройшла хвилі залежить тільки від кількості волокна в стовпці прозвучаного матеріалу і не залежить від висоти цього стовпчика. Тому точність вимірювання (рис.1.8.,б) фази УЗ коливань не залежить від деформації продукту в напрямку поширення хвилі, а також від характеру розподілу волоконної структури уздовж даного напрямку.

Так як фаза при зменшенні обсягу, займаного волокном, залишається постійною, а довжина шляху, який проходить звук в середовищі, зменшується, то, відповідно, знижується швидкість звуку. Нерегулярність волоконної структури можна розглядати з точки зору нерівномірності стиснення матеріалу в обсязі, який він займає і, внаслідок цього, становиться за доцільне введення в розрахунок співвідношення для швидкості звуку параметра, що характеризує ступінь стиснення волокна.

Проведений аналіз показав, що сьогодні існує необхідність в ультразвуковому контролі текстильних матеріалів, а для подібних вимірювань необхідно розраховувати різні параметри датчиків, що буде наведено далі. 1.5. Основні залежності імпульсних ультразвукових перетворювачів для зондування текстильних матеріалів

Для того, щоб описати роботу безконтактних перетворювачів ультразвукових хвиль, які можна використовувати для зондування різних текстильних матеріалів, необхідно розглянути роботу кристалів, яка залежить від зміни величини вільної енергії таких перетворювачів.

Зміна величини вільної енергії при ізотермічному стисненні кристалу є квадратичною функцією тензора деформації. Ця функція має не два, а більше число незалежних коефіцієнтів.

Загальний вид величини *F* за вільною енергією деформованого кристалу можна подати так:

$$F = \frac{1}{2} \lambda_{iklm} u_{ik} u_{lm}, \qquad (1.17)$$

де  $\lambda_{iklm}$  – тензор модулів пружності;

*и<sub>ik</sub>*, *и<sub>lm</sub>* – тензори деформації.

Відповідно до виразу (1.17) для величини *F* залежність тензора напруг  $\sigma_{ik}$  від тензора деформації  $u_{ik}$  має в кристалах вид:

$$\sigma_{ik} = \frac{\partial F}{\partial u_{ik}} = \lambda_{iklm} u_{lm}.$$
(1.18)

Наявність тієї чи іншої симетрії кристалу приводить до появи залежностей між різними компонентами тензору  $\lambda_{iklm}$ .

Розглянемо ці співвідношення [425] для деяких типів кристалів, що відносяться до п'єзоелектриків.

Оскільки до п'єзоелектриків можна віднести кристали, ромбічної системи класу  $D_2$ , тетрагональної системи класів  $D_{2d}$ ,  $D_4$ , ромбоедричної системи класу  $D_3$ . Тоді для ромбічної системи класу  $D_2$  вираз для величини F за вільною енергією має вид:

$$F = \frac{1}{2}\lambda_{xxxx}u_{xx}^{2} + \frac{1}{2}\lambda_{yyyy}u_{yy}^{2} + \frac{1}{2}\lambda_{zzzz}u_{zz}^{2} + \lambda_{xxyy}u_{xx}u_{yy} + \lambda_{xxzz}u_{xx}u_{zz} + \lambda_{yyzz}u_{yy}u_{zz} + 2\lambda_{xyxy}u_{xy}^{2} + 2\lambda_{xzxz}u_{xz}^{2} + 2\lambda_{yzyz}u_{yz}^{2},$$
(1.19)

де  $\lambda_{xxxx}$ ,  $\lambda_{yyyy}$ ,  $\lambda_{zzzz}$ ,  $\lambda_{xxyy}$ ,  $\lambda_{xxzz}$ ,  $\lambda_{yyzz}$ ,  $\lambda_{xyxy}$ ,  $\lambda_{xzxz}$ ,  $\lambda_{yzyz}$  – компоненти тензору модулів пружності;

*u<sub>xx</sub>*, *u<sub>yy</sub>*, *u<sub>zz</sub>*, *u<sub>xy</sub>*, *u<sub>xz</sub>*, *u<sub>yz</sub>* – компоненти тензорів деформації.

Для тетрагональної системи класів  $D_{2d}$ ,  $D_4$  вираз для величини *F* за вільною енергією має вид:

$$F = \frac{1}{2} \lambda_{xxxx} \left( u_{xx}^2 + u_{yy}^2 \right) + \frac{1}{2} \lambda_{zzzz} u_{zz}^2 + \lambda_{xxzz} \left( u_{xx} u_{zz} + u_{yy} u_{zz} \right) + \lambda_{xxyy} u_{xx} u_{yy} + 2 \lambda_{xyxy} u_{xy}^2 + 2 \lambda_{xzxz} \left( u_{xz}^2 + u_{yz}^2 \right)$$
(1.20)

Для ромбоедричної системи класу  $D_3$  вираз для величини *F* за вільною енергією має вид:

$$F = \frac{1}{2}\lambda_{zzzz} u_{zz}^{2} + 2\lambda_{\xi\eta\xi\eta} (u_{xx} + u_{yy})^{2} + \lambda_{\xi\xi\eta\eta} ((u_{xx} - u_{yy})^{2} + 4u_{xy}^{2}) + 2\lambda_{\xi\etazz} (u_{xx} + u_{yy}) u_{zz} + 4\lambda_{\xiz\etaz} (u_{xz}^{2} + u_{yz}^{2}) + 4\lambda_{\xi\xi\xiz} ((u_{xx} - u_{yy}) u_{xz} - 2u_{xy} u_{yz})$$
(1.21)

де  $\lambda_{\xi\eta\xi\eta}, \lambda_{\xi\xi\eta\eta}, \lambda_{\xi\etaz}, \lambda_{\xiz\etaz}, \lambda_{\xi\xi\xiz}$  – компоненти тензору модулів пружності.

Наведені залежності (1.17-1.21) дають змогу уточнити модель поля, що може створюватися імпульсними п'єзоперетворювачами з певних типів кристалів.

Математичні коефіцієнти перетворення та характеристики поля повністю визначаються рішенням хвильових рівнянь п'єзопластини та лінії затримки середовищ. Також необхідно враховувати рівняння електростатики. Повне вирішення задачі знаходиться із системи рівнянь з початковими та граничними умовами [147, 425]:

$$\frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k} = \rho \frac{\partial^2 \xi_i}{\partial t^2},\tag{1.22}$$

$$\sigma_{ik} = \lambda_{iklm} u_{lm} - e_{lik} E_l, \qquad (1.23)$$

$$\frac{\partial D_i}{\partial x_i} = 0, \quad \frac{\partial \varphi_e}{\partial x_i} = -E_i, \tag{1.24}$$

$$D_i = \varepsilon_0 \varepsilon_{ik} E_k + e_{ikl} u_{lm}. \tag{1.25}$$

де *ξ<sub>i</sub>*, *E<sub>i</sub>*, *D<sub>i</sub>* – компоненти векторів механічного зміщення в пружній хвилі, напруженості електричного поля та електричної індукції відповідно;

- *x*<sub>*k*</sub> декартові координати;
- *ρ* щільність середовища;
- $\varphi_e$  потенціал електричного поля;

 $\varepsilon_0 \varepsilon_{ik}$  – тензор діелектричної проникності;

*e*<sub>*ikl*</sub> – тензори п'єзоелектричних постійних.

Вид коефіцієнтів перетворення п'єзопластини може бути знайдений з врахуванням електричних навантажень та приймаючи до уваги пружні модулі та поляризацію в напрямку однієї із координат, а також симетрію п'єзокераміки:

$$C_{11}\frac{\partial^{2}\xi_{1}}{\partial x^{2}} + \frac{C_{66}}{2}\frac{\partial^{2}\xi_{1}}{\partial y^{2}} + \frac{C_{55}}{2}\frac{\partial^{2}\xi_{1}}{\partial z^{2}} + C_{12}\frac{\partial^{2}\xi_{2}}{\partial x\partial y} + \frac{C_{66}}{2}\frac{\partial^{2}\xi_{2}}{\partial x\partial y} + C_{13}\frac{\partial^{2}\xi_{3}}{\partial x\partial z} + \frac{C_{55}}{2}\frac{\partial^{2}\xi_{3}}{\partial x\partial z} - \rho\frac{\partial^{2}\xi_{1}}{\partial t^{2}} = e_{31}\frac{\partial E_{3}}{\partial x} + e_{15}\frac{\partial E_{1}}{\partial z},$$
(1.26)

(1.27)

$$\frac{C_{66}}{2} \frac{\partial^{2} \xi_{2}}{\partial x^{2}} + C_{11} \frac{\partial^{2} \xi_{2}}{\partial y^{2}} + \frac{C_{44}}{2} \frac{\partial^{2} \xi_{2}}{\partial z^{2}} + \frac{C_{66}}{2} \frac{\partial^{2} \xi_{1}}{\partial x \partial y} + C_{12} \frac{\partial^{2} \xi_{1}}{\partial x \partial y} + \frac{C_{44}}{2} \frac{\partial^{2} \xi_{3}}{\partial y \partial z} + C_{13} \frac{\partial^{2} \xi_{3}}{\partial y \partial z} + C_{13} \frac{\partial^{2} \xi_{3}}{\partial y \partial z} - \rho \frac{\partial^{2} \xi_{2}}{\partial t^{2}} = e_{31} \frac{\partial E_{3}}{\partial y} + e_{15} \frac{\partial E_{2}}{\partial z}, \qquad (1.28)$$

$$\frac{C_{55}}{2} \frac{\partial^{2} \xi_{3}}{\partial x^{2}} + \frac{C_{44}}{2} \frac{\partial^{2} \xi_{3}}{\partial y^{2}} + C_{33} \frac{\partial^{2} \xi_{3}}{\partial z^{2}} + C_{13} \frac{\partial^{2} \xi_{1}}{\partial x \partial z} + \frac{C_{55}}{2} \frac{\partial^{2} \xi_{1}}{\partial x \partial z} + \frac{C_{44}}{2} \frac{\partial^{2} \xi_{2}}{\partial y \partial z} + C_{13} \frac{\partial^{2} \xi_{2}}{\partial y \partial z} + C_{13} \frac{\partial^{2} \xi_{2}}{\partial z \partial z} + C_{13} \frac{\partial^{2} \xi_{1}}{\partial x \partial z} + C_{13} \frac{\partial^{2} \xi_{1}}{\partial x \partial z} + C_{13} \frac{\partial^{2} \xi_{2}}{\partial y \partial z} + C_{13} \frac{\partial^{2} \xi_{2}}{\partial y \partial z} + C_{13} \frac{\partial^{2} \xi_{2}}{\partial y \partial z} + C_{13} \frac{\partial^{2} \xi_{2}}{\partial z \partial z} + C_{13} \frac{\partial^{2} \xi_{2}}{\partial y \partial z} + C_{13} \frac{\partial^{2} \xi_{2}}{\partial y \partial z} + C_{13} \frac{\partial^{2} \xi_{3}}{\partial z \partial$$

де C<sub>11</sub>, C<sub>12</sub>, C<sub>13</sub>, C<sub>33</sub>, C<sub>44</sub>, C<sub>55</sub>, C<sub>66</sub> – пружні постійні;

 $e_{15}, e_{31}, e_{33}$  – п'єзоелектричні коефіцієнти.

При використанні одномірного наближення у випадку однорідної поляризації [147, 425] можна використати наступні вирази:

$$\rho c^2 = C_{11} + \frac{e_{33}^2}{\varepsilon_0 \varepsilon},\tag{1.30}$$

$$Dl = e_{33}(\xi_l - \xi_0) + \varepsilon_0 \varepsilon U_n, \qquad (1.31)$$

де с – швидкість розповсюдження хвилі в середовищі;

*l* – товщина п'єзопластини;

 $\xi_0$  – початкове зміщення п'єзопластини;

 $\xi_l$  – кінцеве зміщення п'єзопластини.

З останньої залежності можна визначити напругу на п'єзоперетворювачі в загальному вигляді:

$$U_n = \frac{Dl - e_{33}(\xi_l - \xi_0)}{\varepsilon_0 \varepsilon}.$$
(1.32)

Струм *I*<sup>2</sup> електричних імпульсів, що генеруються, а потім випромінюються за допомогою п'єзопластини можна показати тоді так:

$$I_{\mathcal{Z}} = \frac{e_{33}S_n}{l} \cdot \frac{\partial(\xi_l - \xi_0)}{\partial t} - \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S_n}{l} \cdot \frac{\partial U_n}{\partial t} + (Y_3 + Y_2)U_n, \qquad (1.33)$$

де S<sub>n</sub> – площа випромінюючої поверхні п'єзопластини;

 $Y_3, Y_2$  – провідності загального електричного ланцюга включення

п'єзоперетворювача та генератора відповідно.

В режимі прийому коливань перетворювачем, якщо прийняти плоскою падаючу хвилю, яка росповсюджується перпендикулярно до поверхні п'єзопластини, то наступні параметри для неї та напругу, яка створюється перетворювачем, можна подати так:

$$\Delta_0 = 1 - V_{n\partial} V_{nH} \cdot e^{-2j\frac{\omega l}{c_n}}, \qquad (1.34)$$

$$\Delta_{1} = \frac{\beta_{k} c_{n}}{\omega l} \cdot \left(1 - e^{-j\frac{\omega l}{c_{n}}}\right) \left(2 + V_{n\partial} V_{nH} - \left(V_{n\partial} + V_{nH} + 2V_{n\partial} V_{nH}\right) \cdot e^{-j\frac{\omega l}{c_{n}}}\right), \quad (1.35)$$

$$U_{n}(\omega) = \sigma(\omega) \frac{e_{33}S_{n}}{l} \cdot \frac{1+V_{nH}}{Z_{n}} \cdot \frac{\left(1-e^{-j\frac{\omega l}{c_{n}}}\right)\left(1-V_{n\partial} \cdot e^{-j\frac{\omega l}{c_{n}}}\right)}{(\Delta_{0} - \Delta_{1})(Y_{3} + Y_{n})},$$
(1.36)

де  $\beta_k$  – коефіцієнт передачі;

 $V_{n\partial}$  – коефіцієнт відбиття на межі п'єзопластина – демпфер;

- V<sub>nн</sub> коефіцієнт відбиття на межі п'єзопластина акустичне навантаження;
  - $c_n$  швидкість розповсюдження хвилі в пластині;
  - *w* колова частота хвиль;
  - $Z_n$  акустичний опір п'єзопластини;
  - *Y<sub>n</sub>* електрична провідність п'єзопластини;

 $\sigma(\omega)$  – залежність механічної напруги від колової частоти.

Наведені рівняння можна використовувати для розрахунку електричного поля для ультразвукових перетворювачів імпульсного сигналу, які можна використовувати для опромінення різних текстильних матеріалів. Також отримані залежності можна використовувати для отримання моделі звукового поля коливань в процесі проходження ними текстильного матеріалу або відбиття хвиль від нього, що дозволить реалізувати на практиці оперативне зондування текстильних полотен для визначення різних технологічних параметрів під час їхнього виробництва.

#### Висновки до розділу 1

1. Проаналізовано існуючі контактні та руйнівні методи та засоби контролю, які застосовуються для визначення технологічних параметрів текстильних матеріалів на виробництвах текстильних полотен. Показано, що фактичне значення технологічних параметрів визначається усіма тими методами та засобами, що існували і раніше багато років, з вирізанням зразків та їх зважуванням. Такі методи є досить високовартісними, трудомісткими і не дають можливості проводити оперативний технологічний контроль в процесі виробництва полотен.

2. Проведений аналіз показав, що існують сучасні розробки скануючих систем та неруйнівні методи та засоби контролю різних параметрів текстильних матеріалів, які можна буде з більшою ефективністю використовувати на виробництві.

3. Показано принцип роботи деяких вимірювальних засобів неруйнівного контролю різних параметрів текстильних матеріалів. Проте такі методи та засоби уцілому мають ряд недоліків, які пов'язані із складністю реалізації, високою ціною, необхідністю корегувати джерела радіоактивного випромінювання, забезпечувати їх правильну експлуатацію та утилізацію, а також забезпечувати захист обслуговуючого персоналу.
4. Обґрунтовано вибір ультразвукових методів та засобів контролю технологічних параметрів текстильних матеріалів у поєднанні їх із сучасними комп'ютеризованими системами. Такі засоби контролю досить точні, прості в реалізації, експлуатації у порівнянні з аналогами та відносно недорогі. Наведені методи та засоби, які експериментально застосовувались для контролю різних параметрів текстильних матеріалів із використанням амплітудного, фазового та часового методів.

5. Наведено основні залежності для ультразвукових перетворювачів безконтактних засобів, які можна буде використовувати для контролю технологічних параметрів текстильних матеріалів.

## Вибір мети та постановка завдань досліджень

Виконаний огляд існуючих і перспективних методів і засобів контролю технологічних параметрів текстильних матеріалів показав, що з усіх методів найбільше своїми характеристиками і можливостями за підходять ультразвукові. Це пов'язано з багатьма факторами, але в основному з тими, які роблять можливим у великих обсягах та при відносно невеликих затратах налагодити масове виробництво ультразвукових засобів та систем із необхідною точністю вимірювань технологічних параметрів. Це необхідно для забезпечення модернізації існуючого обладнання на текстильних та інших виробництвах із використанням комп'ютеризованих систем, де є в цьому потреба. Це забезпечить підвищення якісних характеристик готової продукції застосування оперативного та внесення відповідних через контролю коригувань у виробничий процес. Такі прилади та системи досить точні, прості в реалізації та експлуатації у порівнянні з більш дорогими аналогами.

Для більшості галузей промисловості процеси контролю та вимірювання необхідних параметрів виробів, які мають відносно просту структуру давно є автоматизованими та виконуються з досить високою точністю та ефективністю. Процеси відповідального контролю та вимірювань різних технологічних параметрів на різних текстильних виробництвах проводяться із використанням ручної праці із великими трудозатратами. Це пояснюється рядом проблем, які виникають при розробці більш ефективних засобів контролю параметрів текстильних полотен. Оскільки тільки за допомогою безконтактних засобів у поєднанні з комп'ютеризованими системами можливо проводити оперативний контроль, то необхідно доповнити теорію взаємодії ультразвукового випромінювання із складною структурою текстильних полотен. В основному з цим раніше з'являлися труднощі, які були пов'язані з недостатнім розвитком теорії та практики застосування таких систем.

Отже, для створення високотехнологічних безконтактних засобів та комп'ютеризованих систем контролю параметрів різних текстильних полотен, беручи до уваги зазначене вище, враховуючи мету дисертаційної роботи, необхідно виконати наступні узагальнені задачі:

 проаналізувати фізичні основи взаємодії ультразвукового випромінювання з різними текстильними матеріалами із суцільною та пористою структурою;

– розробити безконтактний амплітудний метод визначення натягу ниток із використанням спеціалізованих хвилеводів із прямокутним перерізом;

 – розробити безконтактний амплітудний метод визначення поверхневої густини та пористості текстильних полотен із врахуванням їхнього натягу;

 розробити інші безконтактні методи та зразки комп'ютеризованих систем контролю технологічних параметрів текстильних полотен з врахуванням їхньої складної просторової структури;

провести експериментальні безконтактні виміри та порівняльний аналіз між вимірюваними значеннями технологічних параметрів текстильних полотен, отриманими за допомогою ультразвукових зразків комп'ютеризованих систем та із значеннями параметрів при застосуванні існуючих контактних методів.

## **РОЗДІЛ 2**

## РОЗРОБКА СТРУКТУРИ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ В РІЗНИХ МАТЕРІАЛАХ

Оперативний контроль матеріалів для різного технічного призначення за їхніми технологічними параметрами, до яких можна віднести: поверхневу густину різних полотен; лінійну густину текстильних стрічок та параметри, що впливають безпосередньо на якість готової продукції, можна проводити за допомогою безперервного випромінювання ультразвукових хвиль. Також такий використовуючи контроль можна проводити імпульсне ультразвукове випромінювання. Зазначене доцільне та можливе при використанні безконтактних датчиків, що є однією з основних умов для застосування оперативного моніторингу на виробництві при первинному зборі вимірювальної інформації.

При використанні безперервного випромінювання можуть відбуватися явища накладання перевідбитих хвиль від поверхонь датчиків та контрольованого матеріалу, розігріву п'єзокераміки, яка може втрачати свої робочі характеристики та можливості. Також можуть відбуватися й інші небажані негативні процеси при зондуванні листів, полотен або стрічок. Це ускладнює обробку вимірювального сигналу, тому доцільно застосовувати саме імпульсне випромінювання ультразвукових хвиль для подібного контролю.

Різні матеріали, технологічні параметри яких необхідно контролювати імпульсним випромінюванням, можуть складатися з одного, двох або більше шарів. В них можуть бути пори, що докорінно змінюють характер сигналу, який проходить крізь такий матеріал. В основному для вирішення цієї проблеми необхідно проводити додаткову обробку вимірювального сигналу та застосовувати нові методи отримання інформативних параметрів зондуючих хвиль. Це дасть можливість тільки у комплексі [163 - 277] спростити цю задачу. Тому сьогодні у світі не існує розвинутого напрямку безконтактного визначення

технологічних параметрів текстильних та інших матеріалів. Дослідження взаємодії імпульсного випромінювання з різними матеріалами як із одношаровими, так із багатошаровими, в яких можуть бути наявні пори, дадуть можливість розробити нові методи контролю технологічних параметрів. Ці методи будуть призначені для подібних матеріалів з порами включаючи і текстильні. Такі дослідження є актуальними для легкої промисловості у цілому.

Оскільки сучасні матеріали можуть мати різну композицію шарів в своєму складі, то спочатку розглянемо випадки проходження ультразвукового сигналу крізь крізь них. Слід зазначити, що для створення сучасних матеріалів може використовуватися комбінація складових шарів з порами та без них. Тоді при розрахунку амплітуди ультразвукових хвиль, які проходять крізь матеріал або відбиваються від нього, необхідно враховувати розсіювання сигналу та його можливе згасання в такому матеріалі. Проте, спочатку необхідно розробити комп'ютеризовану систему для проведення досліджень взаємодії ультразвукових хвиль з пористою структурою матеріалу та контролю їх параметрів.

## 2.1. Розробка узагальненої структури комп'ютеризованої системи для безконтактного ультразвукового контролю технологічних параметрів текстильних матеріалів

Для можливості використання ультразвукових хвиль при безконтактному контролі технологічних параметрів текстильних матеріалів необхідно розробити універсальну структуру для комп'ютеризованої системи, яка дозволить оброблювати інформацію про інформативні параметри ультразвукових хвиль, що взаємодіятимуть із самим матеріалом. Також для реалізації поставленого завдання необхідно провести глибокий аналіз впливу самих технологічних параметрів різних матеріалів на інформативні параметри ультразвукових хвиль.

Виходячи з поставленого завдання розглянемо узагальнену структуру комп'ютеризованої системи, яку можна брати за основу для контролю різних технологічних параметрів текстильних матеріалів. Зазначена структура узагальненої системи для оперативного контролю показана на рис.2.1.



Рис. 2.1. Узагальнена структурна схема комп'ютеризованої системи оперативного контролю технологічних параметрів текстильних матеріалів

Як побачити з можна рис. 2.1 узагальнена структурна схема комп'ютеризованої системи оперативного контролю технологічних параметрів текстильних матеріалів складається з основних структурних частин. До таких складових можна віднести: генератор ультразвукових зондуючих коливань, який можна регулювати як за зовнішнім керуючим сигналом, так і за допомогою налаштування частоти коливань; блок підсилення потужності ручного електричних коливань i3 заданим діапазоном частот; випромінюючі п'єзоперетворювачі електричних коливань в ультразвукові хвилі; приймаючі п'єзоперетворювачі ультразвукових хвиль в електричні коливання; блок регульованого підсилення прийнятих електричних коливань; блок амплітудних та фазових детекторів прийнятих коливань, які застосовуються в залежності від методу контролю параметру; мікропроцесорна система обробки прийнятих сигналів та керування двигунами для переміщення скануючих платформ за заданим алгоритмом вздовж матеріалу; силова частина керування двигунами для платформ i3 безконтактними УЗ переміщення скануючих датчиками; перетворювач логічних рівнів сигналів; персональний комп'ютер з різними програмними модулями для обробки вимірювальної інформації та задання керуючого алгоритму сканування текстильних полотен.

Розроблена структура комп'ютеризованої системи є універсальною для реалізації безконтактного контролю для багатьох технологічних параметрів текстильних матеріалів із наявними наскрізними порами.

Принцип її роботи можна описати наступним чином. Ультразвукові коливання, які створюються генератором, частота яких може регулюватися з персонального комп'ютера при умові наявності спеціального мікропроцесорного блока спряження в самому генераторі, надходять на блок підсилення потужності. Там вони підсилюються для кращої роботи випромінюючих п'єзоперетворювачів, які випромінюють ультразвукові хвилі з певною заданою частотою на контрольований текстильний матеріал. Після відповідної взаємодії ультразвукових хвиль із матеріалом їхні інформативні параметри (амплітуда, фазовий зсув, швидкість розповсюдження) зазнають певних змін, які в

подальшому визначаються системою, та за якими розраховуються і самі технологічні параметри для різних матеріалів за певними аналітичними залежностями. Якщо описати цей процес більш детально, то ультразвукові хвилі після взаємодії з контрольованим текстильним матеріалом надходять до приймаючих п'єзоперетворювачів, які перетворюють їх в електричні коливання. Далі електричні коливання підсилюються за допомогою блоку регульованого підсилення та потрапляють до блоку амплітудних та фазових детекторів коливань, які застосовуються в залежності від методу визначення технологічного параметру матеріалу. Після цього перетворений сигнал з детекторів системи надходить до мікропроцесорної системи обробки даних, де перетворюється в цифровий код, який через перетворювач логічних рівнів сигналів надходить до персонального комп'ютера. Там за допомогою розроблениих програмних модулів зберігаються коди, що характеризують рівні інформативних параметрів прийнятих ультразвукових хвиль та їх зміну до баз даних в стандартних додатках MS Office. Із цих збережених баз даних інший програмний модуль бере дані про отримані різні інформативні параметри ультразвукових хвиль, які відносяться до одного часу опитування датчиків безконтактною системою, та розраховує значення технологічного параметру аналітичною за певною залежністю. Далі визначається середнє значення технологічного параметру для певної точки контрольованого текстильного полотна, що сканується за допомогою рухомих платформ з ультразвуковими датчиками. Платформи спеціальних розміщуватися конструкціях, механічно можуть на які переміщуються за допомогою відповідних двигунів. Такі приводи можуть керуватися, в свою чергу, за допомогою силової частина схеми, яка запускається в роботу мікропроцесорною системою за автономним алгоритмом сканування матеріалу або за зміненим алгоритмом сканування, який задається безпосередньо від оператора з персонального комп'ютера загальної системи.

Окремо для підвищення чутливості ультразвукових датчиків до текстильного матеріалу можна використовувати певні пристрої введення

ультразвукових хвиль, а також різні концентруючі поверхні загального ультразвукового сигналу.

Для ефективної роботи запропонованої комп'ютеризованої системи контролю необхідно отримати уточнені моделі взаємодії ультразвукових хвиль з різними матеріалами при наявних наскрізних порах та із складною просторовою структурою. Також необхідно проаналізувати чим вони відрізняються від моделей, які описують взаємодію хвиль з одношаровими суцільними матеріалами. Тільки провівши глибокий аналіз такої взаємодії і зрозумівши механізм впливу різних технологічних параметрів матеріалів на інформативні параметри ультразвукових хвиль можна спростити задачу безконтактного контролю текстильних полотен в процесі їх виробництва.

Тому далі розглянемо розповсюдження імпульсного ультразвукового сигналу в різних матеріалах як з порами із складною просторовою структурою, так і в суцільних простих за своєю структурою матеріалах.

2.2. Дослідження проходження імпульсного ультразвукового сигналу крізь двошарові композиційні, одношарові, текстильні матеріали з наскрізними порами та без них

Найпростішим випадком композиційного матеріалу є двошаровий. Така композиція з різних складових матеріалів за щільністю та швидкістю розповсюдження хвиль в їхньому середовищі представляє собою різні межі для проходження ультразвукових коливань.

Розглянемо проходження плоскої ультразвукової хвилі крізь контрольований двошаровий матеріал (рис. 2.2,а) при її нормальному падінні із середовища (повітря) з акустичним опором  $Z_1$  ( $Z_1 = \rho_1 c_1$ , де  $\rho_1 c_1 - o6$ 'ємна щільність середовища та швидкість розповсюдження в ньому ультразвукової хвилі). Сам матеріал суцільний без пор з товщиною першого шару  $h_1$ , що має акустичний опір  $Z_2$  ( $Z_2 = \rho_2 c_2$ , де  $\rho_2 c_2 - o6$ 'ємна щільність складового першого шару матеріалу та швидкість розповсюдження в його середовищі

ультразвукової хвилі відповідно), другий шар матеріалу з товщиною шару  $h_2$ , що має акустичний опір  $Z_3$  ( $Z_3 = \rho_3 c_3$ , де  $\rho_3 c_3$  – об'ємна щільність складового другого шару матеріалу та швидкість розповсюдження в його середовищі ультразвукової хвилі відповідно), останній шар спирається на середовище з акустичним опором  $Z_4$ .

Ультразвуковий імпульсний сигнал у вигляді функції зміни тиску в хвилі  $P_{1xe}(t')$ , що пройшов контрольований двошаровий суцільний матеріал з врахуванням часу t' розповсюдження хвилі, може бути показаний наступним чином:

$$P_{1x6.}(t') = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} W(\omega) S(\omega) \cdot e^{j\omega t'} d\omega, \qquad (2.1)$$

де  $S(\omega)$  – спектральна щільність падаючого ультразвукового сигналу;

W(ω) – комплексний коефіцієнт проходження ультразвукових хвиль в матеріалі з врахуванням згасання.

Комплексний коефіцієнт проходження ультразвукових хвиль крізь двошаровий матеріал при  $Z_2 > Z_1$ ,  $Z_3 > Z_1$ ,  $Z_2 > Z_4$ ,  $Z_3 > Z_4$  можна подати так:

$$W(\omega) = \frac{y\left(\left(\frac{\omega b}{c_{2}} + j\alpha_{23.}\right) \cdot h_{1} + \left(\frac{\omega b}{c_{3}} + j\alpha_{33.}\right) \cdot h_{2}\right)}{1 - \left(1 - \left(1 - V_{21}V_{34}\right)\left(1 + V_{23}\right)\left(1 + V_{32.}\right)\right) \cdot e^{2j\left(\left(\frac{\omega b}{c_{2}} + j\alpha_{23.}\right) \cdot h_{1} + \left(\frac{\omega b}{c_{3}} + j\alpha_{33.}\right) \cdot h_{2}\right)}, (2.2)$$

- де W i V відповідні коефіцієнти проходження і відбиття хвиль на межах відповідних середовищ (перший індекс позначає середовище, з якого падає хвиля, а другий – середовище, в яке проходить, або, від якого відбивається хвиля);
  - *b* = ω/ω<sub>0</sub> коефіцієнт відношення несучої колової частоти та колової частоти заповнення імпульсного сигналу;

 $\alpha_{2_{3.}}, \alpha_{3_{3.}}$  – коефіцієнт згасання ультразвукових хвиль у першому та другому

шарах матеріалу відповідно.

Якщо взяти матеріал, в якому  $h_1 = h_2$  або  $h_1 \approx h_2$  (випадки, які часто можуть зустрічатися на практиці), тоді вираз (2.2) можна показати тоді так:

$$W(\omega) = \frac{W_{12}W_{23}W_{34} \cdot e^{j\left(\frac{\omega b}{c_{23}} + j\alpha_{3}\right)} \cdot (h_1 + h_2)}{1 - (1 - (1 - V_{21}V_{34})(1 + V_{23})(1 + V_{32})) \cdot e^{2j\left(\frac{\omega b}{c_{23}} + j\alpha_{3}\right)} \cdot (h_1 + h_2)}, \qquad (2.3)$$

де  $\alpha_{3.}$  – загальний коефіцієнт згасання ультразвукових хвиль у матеріалі;  $c_{23} = (c_2 + c_3)/2$  – середня швидкість розповсюдження ультразвукової хвилі в матеріалі.

Вираз (2.3) можна записати ще як суму геометричної прогресії у наступному вигляді:

$$W(\omega) = W_{12}W_{23}W_{34} \sum_{N=0}^{\infty} (1 - (1 - V_{21}V_{34})(1 + V_{23})(1 + V_{32}))^N \times (2.4)$$
$$- (2N+1)\left(-j\frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_{3.}\right) \cdot (h_1 + h_2),$$

де N – кількість перевідбивань хвиль, що дорівнює 0, 1, 2, 3, ...,  $\infty$ .

Відповідні значення для *W* і *V* можна записати як:

$$W_{12} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2}, \qquad V_{12} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}, W_{21} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}, \qquad V_{21} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}, W_{23} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_3}, \qquad V_{23} = \frac{Z_2 - Z_3}{Z_2 + Z_3}, \qquad (2.5) W_{32} = \frac{2Z_3}{Z_2 + Z_3}, \qquad V_{32} = \frac{Z_3 - Z_2}{Z_3 + Z_2}, W_{34} = \frac{2Z_3}{Z_3 + Z_4}, \qquad V_{34} = \frac{Z_3 - Z_4}{Z_3 + Z_4},$$

тоді, зробивши підстановку залежності (2.5) в (2.4), комплексний коефіцієнт проходження можна показати тоді так:

$$W(\omega) = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} \cdot \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_3} \cdot \frac{2Z_3}{Z_3 + Z_4} \times \sum_{N=0}^{\infty} \left( 1 - \left( 1 - \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \cdot \frac{Z_3 - Z_4}{Z_3 + Z_4} \right) \left( 1 + \frac{Z_2 - Z_3}{Z_2 + Z_3} \right) \left( 1 + \frac{Z_3 - Z_2}{Z_3 + Z_2} \right) \right)^N \times$$

$$(2.6)$$

$$= -(2N+1) \left( -j \frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_{3.} \right) \cdot (h_1 + h_2)$$

$$= 0,$$

після деяких перетворень вираз (2.6) можна подати так:

$$W(\omega) = \frac{4}{1 + \frac{Z_1}{2Z_2} + \frac{Z_1}{2Z_3} + \frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_2}{2Z_3} + \frac{Z_3}{2Z_1} + \frac{Z_3}{2Z_2}} \times \sum_{N=0}^{\infty} \left( 1 - \left( 1 - \frac{Z_2 Z_3 - Z_2 Z_1 - Z_1 Z_3 + Z_1^2}{Z_2 Z_3 + Z_2 Z_1 + Z_1 Z_3 + Z_1^2} \right) \left( 1 + \frac{Z_2 - Z_3}{Z_2 + Z_3} \right) \left( 1 + \frac{Z_3 - Z_2}{Z_3 + Z_2} \right) \right)^N \times (2.7)$$

$$= -(2N+1) \left( -j \frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_{3.} \right) \cdot (h_1 + h_2) + e^{-(2N+1) \left( -j \frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_{3.} \right)} + e^{-(2N+1) \left( -j \frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_{3.} \right)} + e^{-(2N+1) \left( -j \frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_{3.} \right)} + e^{-(2N+1) \left( -j \frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_{3.} \right)} + e^{-(2N+1) \left( -j \frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_{3.} \right)} + e^{-(2N+1) \left( -j \frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_{3.} \right)} + e^{-(2N+1) \left( -j \frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_{3.} \right)} + e^{-(2N+1) \left( -j \frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_{3.} \right)} + e^{-(2N+1) \left( -j \frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_{3.} \right)} + e^{-(2N+1) \left( -j \frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_{3.} \right)} + e^{-(2N+1) \left( -j \frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_{3.} \right)} + e^{-(2N+1) \left( -j \frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_{3.} \right)} + e^{-(2N+1) \left( -j \frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_{3.} \right)} + e^{-(2N+1) \left( -j \frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_{3.} \right)} + e^{-(2N+1) \left( -j \frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_{3.} \right)} + e^{-(2N+1) \left( -j \frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_{3.} \right)} + e^{-(2N+1) \left( -j \frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_{3.} \right)} + e^{-(2N+1) \left( -j \frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_{3.} \right)} + e^{-(2N+1) \left( -j \frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_{3.} \right)} + e^{-(2N+1) \left( -j \frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_{3.} \right)} + e^{-(2N+1) \left( -j \frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_{3.} \right)} + e^{-(2N+1) \left( -j \frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_{3.} \right)} + e^{-(2N+1) \left( -j \frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_{3.} \right)} + e^{-(2N+1) \left( -j \frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_{3.} \right)} + e^{-(2N+1) \left( -j \frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_{3.} \right)} + e^{-(2N+1) \left( -j \frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_{3.} \right)} + e^{-(2N+1) \left( -j \frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_{3.} \right)} + e^{-(2N+1) \left( -j \frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_{3.} \right)} + e^{-(2N+1) \left( -j \frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_{3.} \right)} + e^{-(2N+1) \left( -j \frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_{3.} \right)} + e^{-(2N+1) \left( -j \frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_{3.} \right)} + e^{-(2N+1) \left( -j \frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_{3.} \right)} + e^{-(2N+1) \left( -j \frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_{3.} \right)} + e^{-(2N+1) \left( -j \frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_{3.} \right)} + e^{-(2N+1) \left( -j \frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_{3.} \right)} + e^{-(2N+1) \left( -j \frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_{3.} \right)}$$

якщо враховувати значну нерівність акустичних опорів  $Z_1 << Z_2$  та  $Z_1 << Z_3$ , то вираз (2.7) можна привести до виду:

$$W(\omega) = \frac{4}{1 + \frac{Z_2}{2Z_3} + \frac{Z_3}{2Z_2} + \frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_3}{2Z_1}} \times \sum_{N=0}^{\infty} \left(1 - \left(1 - \frac{Z_2(Z_3 - Z_1) + Z_1(Z_1 - Z_3)}{Z_2(Z_3 + Z_1) + Z_1(Z_1 + Z_3)}\right) \left(1 + \frac{Z_2 - Z_3}{Z_2 + Z_3}\right) \left(1 + \frac{Z_3 - Z_2}{Z_3 + Z_2}\right)\right)^N \times (2.8)$$
$$= -(2N+1) \left(-j\frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_{3.}\right) \cdot (h_1 + h_2),$$

тоді, зробивши підстановку залежності (2.8) в (2.1), ультразвуковий імпульсний сигнал можна показати як:

$$P_{1x6.}(t') = \frac{4}{1 + \frac{Z_2}{2Z_3} + \frac{Z_3}{2Z_2} + \frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_3}{2Z_1}} \times \times \sum_{N=0}^{\infty} \left(1 - \left(1 - \frac{Z_2(Z_3 - Z_1) + Z_1(Z_1 - Z_3)}{Z_2(Z_3 + Z_1) + Z_1(Z_1 + Z_3)}\right) \left(1 + \frac{Z_2 - Z_3}{Z_2 + Z_3}\right) \left(1 + \frac{Z_3 - Z_2}{Z_3 + Z_2}\right)\right)^N \times (2.9)$$

$$\times \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) \cdot e^{-(2N+1)\left(-j\frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_{3.}\right) \cdot (h_1 + h_2)} \cdot e^{-j\omega t} d\omega,$$

де *t* – поточний час.

Спектральну щільність такого сигналу можна подати як:

$$S(\omega) = \frac{P_{0x_{\theta}}\tau_0\sqrt{\pi}}{2\ln\sqrt{2}} \cdot e^{-\left(\frac{(\omega-\omega_0)\tau_0}{4\ln\sqrt{2}}\right)^2}, \qquad (2.10)$$

де  $P_{0xe}$  – тиск у падаючій ультразвуковій хвилі на поверхню матеріалу;

 $\tau_0$  – тривалість імпульсу;

 $\omega_0$  – колова частота заповнення імпульсного сигналу.

Підставивши вираз (2.10) в (2.9) запишемо імпульсний сигнал тоді так:

$$P_{1x6.}(t') = \frac{4}{1 + \frac{Z_2}{2Z_3} + \frac{Z_3}{2Z_2} + \frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_3}{2Z_1}} \times \times \sum_{N=0}^{\infty} \left(1 - \left(1 - \frac{Z_2(Z_3 - Z_1) + Z_1(Z_1 - Z_3)}{Z_2(Z_3 + Z_1) + Z_1(Z_1 + Z_3)}\right) \left(1 + \frac{Z_2 - Z_3}{Z_2 + Z_3}\right) \left(1 + \frac{Z_3 - Z_2}{Z_3 + Z_2}\right)\right)^N \times (2.11) \times \frac{P_{0x6.}\tau_0}{4\sqrt{\pi}\ln\sqrt{2}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\left(\frac{(\omega - \omega_0)\tau_0}{4\ln\sqrt{2}}\right)^2 - (2N+1)\left(-j\frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_{3.}\right) \cdot (h_1 + h_2) - j\omega t}} d\omega.$$

Проведемо перетворення виразу (2.11) в показнику експоненти, яке можна подати як:

$$-\left(\frac{(\omega-\omega_{0})\tau_{0}}{4ln\sqrt{2}}\right)^{2} - (2N+1)\left(-j\frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_{3}\right) \cdot (h_{1}+h_{2}) - j\omega t =$$

$$= -\left(\frac{(\omega-\omega_{0})\tau_{0}}{4ln\sqrt{2}}\right)^{2} + j(2N+1)\frac{\omega b(h_{1}+h_{2})}{c_{23}} - \alpha_{3}(2N+1)(h_{1}+h_{2}) - j\omega t =$$

$$= \frac{-\tau_{0}^{2}\omega^{2} + 2\omega_{0}\omega\tau_{0}^{2} - \omega_{0}^{2}\tau_{0}^{2}}{(4ln\sqrt{2})^{2}} + j\frac{\omega b(2N+1)(h_{1}+h_{2})}{c_{23}} - (2.12)$$

$$-\alpha_{3}(2N+1)(h_{1}+h_{2}) - j\omega t = -\left(\frac{\tau_{0}}{4ln\sqrt{2}}\right)^{2}\omega^{2} +$$

$$+\left(j\left(\frac{b(2N+1)(h_{1}+h_{2})}{c_{23}} - t\right) + \frac{2\omega_{0}\tau_{0}^{2}}{(4ln\sqrt{2})^{2}}\right)\omega - \left(\frac{\omega_{0}\tau_{0}}{4ln\sqrt{2}}\right)^{2} - \alpha_{3}(2N+1)(h_{1}+h_{2}).$$

Провівши перетворення та підставивши вираз (2.12) в (2.11), ультразвуковий імпульсний сигнал після проходження двошарового матеріалу можна показати як:

$$P_{1xe.}(t') = \frac{4}{1 + \frac{Z_2}{2Z_3} + \frac{Z_3}{2Z_2} + \frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_3}{2Z_1}} \times \sum_{N=0}^{\infty} \left( 1 - \left( 1 - \frac{Z_2(Z_3 - Z_1) + Z_1(Z_1 - Z_3)}{Z_2(Z_3 + Z_1) + Z_1(Z_1 + Z_3)} \right) \left( 1 + \frac{Z_2 - Z_3}{Z_2 + Z_3} \right) \left( 1 + \frac{Z_3 - Z_2}{Z_3 + Z_2} \right) \right)^N \times$$
(2.13)  
$$\times \frac{P_{0xe.}\tau_0}{4\sqrt{\pi} \ln\sqrt{2}} \cdot e^{-\left(\frac{\omega_0\tau_0}{4\ln\sqrt{2}}\right)^2 - \alpha_{3.}(2N+1)(h_1 + h_2)} \times \\\times \frac{\rho_{0xe.}\tau_0}{4\sqrt{\pi} \ln\sqrt{2}} \cdot e^{-\left(\frac{\omega_0\tau_0}{4\ln\sqrt{2}}\right)^2 - \alpha_{3.}(2N+1)(h_1 + h_2)} \times \\\times \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\left(\frac{\tau_0}{4\ln\sqrt{2}}\right)^2 \omega^2 + \left(j\left(\frac{b(2N+1)(h_1 + h_2)}{c_{23}} - t\right) + \frac{2\omega_0\tau_0^2}{(4\ln\sqrt{2})^2}\right) \omega}{d\omega}} d\omega.$$

Визначивши інтеграл в (2.13), запишемо цей вираз у вигляді дійсної  $ReP_{1x6.}(t')$  та уявної  $ImP_{1x6.}(t')$  частини імпульсного ультразвукового сигналу, що пройшов крізь контрольований двошаровий матеріал у такому вигляді:

$$P_{1xe.}(t') = Re P_{1xe.}(t') + j Im P_{1xe.}(t') = P_{0xe.} \cdot \frac{4}{1 + \frac{1}{2} \left( \frac{Z_2}{Z_3} + \frac{Z_3}{Z_2} + \frac{Z_2 + Z_3}{Z_1} \right)} \times \sum_{N=0}^{\infty} \left( 1 - \left( 1 - \frac{Z_2 (Z_3 - Z_1) + Z_1 (Z_1 - Z_3)}{Z_2 (Z_3 + Z_1) + Z_1 (Z_1 + Z_3)} \right) \left( 1 + \frac{Z_2 - Z_3}{Z_2 + Z_3} \right) \left( 1 + \frac{Z_3 - Z_2}{Z_3 + Z_2} \right) \right)^N \times \left( cos \left( \omega_0 \left( \frac{(h_1 + h_2)}{c_{23}} b(2N + 1) - t \right) \right) + j sin \left( \omega_0 \left( \frac{(h_1 + h_2)}{c_{23}} b(2N + 1) - t \right) \right) \right) \right) \right) \times \left( 2.14 \right) \times exp \left( - \frac{\left( \frac{(h_1 + h_2)}{c_{23}} b(2N + 1) - t \right)^2}{\left( \frac{\tau_0}{h_2} \right)^2} - \alpha_{3.} (2N + 1)(h_1 + h_2) \right).$$

Із залежності (2.14) виділимо дійсну частину  $ReP_{1xe}(t')$  та подамо її у вигляді величини тиску у хвилі, яка пройшла двошаровий матеріал:

$$Re P_{1xe.}(t') = P_{0xe.} \cdot \frac{4}{1 + \frac{1}{2} \left( \frac{Z_2}{Z_3} + \frac{Z_3}{Z_2} + \frac{Z_2 + Z_3}{Z_1} \right)^{\times}} \times \sum_{N=0}^{\infty} \left( 1 - \left( 1 - \frac{Z_2 (Z_3 - Z_1) + Z_1 (Z_1 - Z_3)}{Z_2 (Z_3 + Z_1) + Z_1 (Z_1 + Z_3)} \right) \left( 1 + \frac{Z_2 - Z_3}{Z_2 + Z_3} \right) \left( 1 + \frac{Z_3 - Z_2}{Z_3 + Z_2} \right) \right)^N \times$$
(2.15)  
$$\times cos \left( \omega_0 \left( \frac{(h_1 + h_2)}{c_{23}} b(2N + 1) - t \right) \right) \times \left( \frac{(h_1 + h_2)}{c_{23}} b(2N + 1) - t \right) \right) \times \left( \frac{(h_1 + h_2)}{c_{23}} b(2N + 1) - t \right)^2 - \alpha_{3.} (2N + 1)(h_1 + h_2) \right).$$

Можна отримати із залежності (2.14) уявну частину  $Im P_{1xe}(t')$  імпульсного ультразвукового сигналу та показати її так:

$$Im P_{1xe.}(t') = P_{0xe.} \cdot \frac{4}{1 + \frac{1}{2} \left( \frac{Z_2}{Z_3} + \frac{Z_3}{Z_2} + \frac{Z_2 + Z_3}{Z_1} \right)^{\times}} \times \sum_{N=0}^{\infty} \left( 1 - \left( 1 - \frac{Z_2(Z_3 - Z_1) + Z_1(Z_1 - Z_3)}{Z_2(Z_3 + Z_1) + Z_1(Z_1 + Z_3)} \right) \left( 1 + \frac{Z_2 - Z_3}{Z_2 + Z_3} \right) \left( 1 + \frac{Z_3 - Z_2}{Z_3 + Z_2} \right) \right)^N \times$$
(2.16)  
$$\times sin \left( \omega_0 \left( \frac{(h_1 + h_2)}{c_{23}} b(2N + 1) - t \right) \right) \times \left( \frac{(h_1 + h_2)}{c_{23}} b(2N + 1) - t \right) \right) \times \left( \frac{(h_1 + h_2)}{c_{23}} b(2N + 1) - t \right)^2 - \alpha_3 (2N + 1)(h_1 + h_2) \right).$$

Одиничну амплітуду падаючої ультразвукової хвилі на поверхню двошарового матеріалу можна подати як:

$$A_0(t) = e^{-\left(\frac{t\ln 2}{\tau_0}\right)^2} \cdot \cos(\omega_0 t).$$
(2.17)

Ми розглядаємо ультразвуковий імпульсний сигнал дзвіноподібної форми, який часто застосовується при зондуванні різних матеріалів, зміна фазового зсуву якого може впливати на детектування пікового значення амплітуд хвиль, яке пов'язане із зміною часових затримок необхідних для налаштування селекторів інформаційних сигналів вимірювальних каналів. Амплітуду хвилі такого імпульсного сигналу, який пройшов два шари матеріалу у відносних одиницях відповідно до залежності (2.17) та (2.15) з врахуванням часової затримками хвиль в середовищах складових матеріалу (затримка в середовищі матеріалу, при проходженні та відбитті сигналу від контрольованого зразка, враховується вже у виразах самих комплексних коефіцієнтів проходження та відбиття хвиль) можна представити як:

$$A_{W}(t') = 2\left(\frac{Z_{1}}{Z_{1}+Z_{2}} \cdot \frac{Z_{2}}{Z_{2}+Z_{3}} \cdot \frac{Z_{3}}{Z_{3}+Z_{4}}\right) \times \\ \times \sum_{N=0}^{\infty} \left(1 - \left(1 - \frac{Z_{2}-Z_{1}}{Z_{2}+Z_{1}} \cdot \frac{Z_{3}-Z_{4}}{Z_{3}+Z_{4}}\right) \left(1 + \frac{Z_{2}-Z_{3}}{Z_{2}+Z_{3}}\right) \left(1 + \frac{Z_{3}-Z_{2}}{Z_{3}+Z_{2}}\right)\right)^{N} \times$$

$$\times \cos\left(\omega_{0} \left(\frac{(h_{1}+h_{2})}{c_{23}}b(2N+1) - t\right)\right) \times \\ \left(\frac{(h_{1}+h_{2})}{c_{23}}b(2N+1) - t\right)^{2} - \alpha_{3}(2N+1)(h_{1}+h_{2}) \\ \left(\frac{\tau_{0}}{\ln 2}\right)^{2} - \alpha_{3}(2N+1)(h_{1}+h_{2}) \right).$$

$$(2.18)$$

Фазовий зсув ультразвукового імпульсного сигналу, що пройшов контрольований двошаровий матеріал без пор, можна подати у вигляді:

$$\varphi_{W} = \operatorname{arctg} \frac{\sum_{N=0}^{\infty} V_{L}^{N} \cdot \exp(Y) \sin\left(\omega_{0} \left(\frac{(h_{1}+h_{2})}{c_{23}} b(2N+1) - t\right)\right)}{\sum_{N=0}^{\infty} V_{L}^{N} \cdot \exp(Y) \cos\left(\omega_{0} \left(\frac{(h_{1}+h_{2})}{c_{23}} b(2N+1) - t\right)\right)},$$
(2.19)

де

$$V_L = 1 - \left(1 - \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \cdot \frac{Z_3 - Z_4}{Z_3 + Z_4}\right) \left(1 + \frac{Z_2 - Z_3}{Z_2 + Z_3}\right) \left(1 + \frac{Z_3 - Z_2}{Z_3 + Z_2}\right),$$

$$Y = -\frac{\left(\frac{(h_1 + h_2)}{c_{23}}b(2N+1) - t\right)^2}{\left(\frac{\tau_0}{\ln 2}\right)^2} - \alpha_{3.}(2N+1)(h_1 + h_2)$$

Якщо в двошаровому матеріалі (рис. 2.2,б) наявні пори (за їх загальний об'єм та форму відповідає величина *cosv*, де *v* – кут між напрямом розповсюдження ультразвукових хвиль, які проходять крізь пори, і поверхнею двошарового матеріалу), то вираз (2.18) можна подати наступним чином:

$$A_{Wp}(t') = 2 \left( \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \cdot \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} \cdot \frac{Z_3}{Z_3 + Z_4} \right) \times \\ \times \sum_{N=0}^{\infty} V_L^N \cdot \cos \left( \omega_0 \left( \frac{(h_1 + h_2) \cos v}{c_{23}} b(2N + 1) - t \right) \right) \times \\ \times exp \left( - \frac{\left( \frac{(h_1 + h_2) \cos v}{c_{23}} b(2N + 1) - t \right)^2}{\left( \frac{Z_2}{Z_2} - \alpha_{3.} (2N + 1)(h_1 + h_2) \cos v \right)} \right).$$
(2.20)

Фазовий зсув такого ультразвукового імпульсного сигналу, що пройшов контрольований двошаровий матеріал з порами, можна показати у вигляді:

$$\varphi_{Wp} = \operatorname{arctg} \frac{\sum_{N=0}^{\infty} V_L^N \cdot \exp(Y_V) \sin\left(\omega_0 \left(\frac{(h_1 + h_2) \cos v}{c_{23}} b(2N+1) - t\right)\right)}{\sum_{N=0}^{\infty} V_L^N \cdot \exp(Y_V) \cos\left(\omega_0 \left(\frac{(h_1 + h_2) \cos v}{c_{23}} b(2N+1) - t\right)\right)}, \quad (2.21)$$

де

$$Y_{\nu} = -\frac{\left(\frac{(h_1 + h_2)cos\nu}{c_{23}}b(2N+1) - t\right)^2}{\left(\frac{\tau_0}{\ln 2}\right)^2} - \alpha_{3.}(2N+1)(h_1 + h_2)cos\nu.$$

Розглянемо проходження імпульсного ультразвукового сигналу крізь одношаровий матеріал з товщиною  $h_1$  та з акустичним опором  $Z_2$  при наявності наскрізних пор в ньому (рис. 2.2,в). При чому, матеріал помістили в повітряне середовище  $Z_1 = Z_4$ , тоді для амплітуди імпульсного ультразвукового сигналу, провівши аналогічні перетворення виразів для цього випадку, можна отримати наступну залежність:

$$A_{Wp}(t') = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \sum_{N=0}^{\infty} \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}\right)^{2N} \times \cos\left(\omega_0 \left(\frac{h_1 b(2N+1)cosv}{c_2} - t\right)\right) \cdot exp\left(-\frac{\left(\frac{h_1 b(2N+1)cosv}{c_2} - t\right)^2}{\left(\frac{\tau_0}{\ln 2}\right)^2} - \alpha_{3.}(2N+1)h_1 \cos v\right) (2.22)$$

Розглянемо ультразвуковий імпульсний сигнал, що пройшов контрольовану одношарову тканину (рис. 2.3,а,б та рис. 2.4,а) з середньою товщиною в межах від двох до трьох середніх умовних діаметрів нитки основи та утоку з параметром cosv в межах  $\frac{3}{4} > cosv > 0$ . Залежність для такого сигналу можна подати так:

$$P_{1x6.}(t') = P_{1x6.}\left(\frac{\pi d_{oy}}{4c_2} - t\right) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} W_{\alpha\beta}(\omega) S(\omega) \cdot e^{j\omega \left(\frac{\pi d_{oy}}{4c_2} - t\right)} d\omega, \qquad (2.23)$$

де  $t' = \frac{\pi d_{oy}}{4c_2} - t$  – час, що враховує часткову затримку ультразвукового сигналу в

структурі цього матеріалу для даного випадку, що пов'язано із фазовою будовою тканини.

Час t' не враховується у виразі комплексного коефіцієнту проходження крізь ткані полотна (так як для матеріалу плоского шару), де задається

еквівалентна товщина одношарової тканини, яка чисельно дорівнює перерізам нитки основи та нитки утоку при їхньому зминанні. Ця товщина вказує на час затримки саме у волокнах ниток, де відбувається згасання сигналу. Тому в залежності (2.23) враховується  $\frac{\pi d_{oy}}{4c_2} - t$ , що пов'язано із фазовою будовою тканини.

Вираз (2.23) можна наближено використовувати і для нетканих текстильних матеріалів.

Комплексний коефіцієнт проходження через такі матеріали можна представити тоді так:

$$W_{\alpha\beta}(\omega) = \frac{W_{12}W_{21} \cdot e^{j\left(\frac{\omega b}{c_2} + j\alpha_{3.}\right) \cdot d_{oy}\frac{\pi}{4}cosv}}{1 - V_{21}V_{21} \cdot e^{2j\left(\frac{\omega b}{c_2} + j\alpha_{3.}\right) \cdot d_{oy}\frac{\pi}{4}cosv}},$$
(2.24)

або

$$W_{\alpha\beta}(\omega) = \frac{\frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \cdot e^{\left(j\frac{\omega b}{c_2} - \alpha_{3.}\right) \cdot d_{oy}\frac{\pi}{4}\cos\nu}}{1 - \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}\right)^2 \cdot e^{2\left(j\frac{\omega b}{c_2} - \alpha_{3.}\right) \cdot d_{oy}\frac{\pi}{4}\cos\nu}}.$$
(2.25)

Враховуючи залежності (2.23) та (2.25), аналогічно до попередньо розглянутих випадків, можна отримати залежність для амплітуди імпульсного ультразвукового сигналу у часі, який пройшов одношарову тканину з параметром cosv в межах  $\frac{3}{4} > cosv > 0$ . Цей сигнал, пов'язавши його з товщиною через умовні діаметри ниток основи та утоку матеріалу, можна представити в такому вигляді:

$$A_{W\alpha}(t') = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \sum_{N=0}^{\infty} \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}\right)^{2N} \cdot \cos\left(\omega_0 \left(\frac{\pi d_{oy}(b(2N+1)cosv+1)}{4c_2} - t\right)\right) \times \\ \times \exp\left(-\frac{\left(\frac{\pi d_{oy}(b(2N+1)cosv+1)}{4c_2} - t\right)^2}{\left(\frac{\pi d_{oy}(b(2N+1)cosv+1)}{\ln 2}\right)^2} - \frac{\alpha_{3.}(2N+1)\pi d_{oy}cosv}{4}\right).$$
(2.26)

Якщо розглянути проходження ультразвукового імпульсного сигналу через контрольовану дуже щільну одношарову тканину майже без пор (рис. 2.4,б) з середньою товщиною, що наближається до двох середніх умовних діаметрів нитки основи та утоку (присутнє зминання ниток) з параметром cosv в межах  $1 > cosv > \frac{3}{4}$ , то амплітуду такого імпульсного ультразвукового сигналу можна подати як:

$$A_{W\beta}(t') = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \sum_{N=0}^{\infty} \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}\right)^{2N} \cdot \cos\left(\omega_0 \left(\frac{\pi d_{oy} b(2N+1)cosv}{4c_2} - t\right)\right) \times \exp\left(-\frac{\left(\frac{\pi d_{oy} b(2N+1)cosv}{4c_2} - t\right)^2}{\left(\frac{\pi d_{oy} b(2N+1)cosv}{\ln 2}\right)^2} - \frac{\alpha_3(2N+1)\pi d_{oy}cosv}{4}\right).$$
(2.27)

Якщо записати вираз (2.23), при товщині в межах від двох до трьох середніх діаметрів нитки основи та утоку з параметром cosv в межах  $\frac{3}{4} > cosv > 0$ , пов'язавши його з поверхневою густиною  $m_s$  контрольованої тканини та коефіцієнтом K зміни розмірів пор відносно еталонного зразку, ця залежність буде мати вид:

$$P_{1xe.}(t') = P_{1xe.}\left(\frac{Km_s}{\pi Z_2} - t\right) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} W_{\alpha\beta}(\omega) S(\omega) \cdot e^{j\omega\left(\frac{Km_s}{\pi Z_2} - t\right)} d\omega, \quad (2.28)$$

де  $t' = \frac{Km_s}{\pi Z_2} - t$  – час, що враховує часткову затримку ультразвукового сигналу в

структурі цього матеріалу для даного випадку, що пов'язано із фазовою будовою тканини, який виражений через поверхневу густину *m<sub>s</sub>*.

Пов'язавши вираз (2.25) з поверхневою густиною *m<sub>s</sub>* контрольованої тканини, комплексний коефіцієнт проходження можна представити як:

$$W_{\alpha\beta}(\omega) = \frac{\frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \cdot e^{\left(j\frac{\omega b}{c_2} - \alpha_{3.}\right) \cdot \frac{Km_s \cos\nu}{\pi\rho_2}}}{1 - \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}\right)^2 \cdot e^{2\left(j\frac{\omega b}{c_2} - \alpha_{3.}\right) \cdot \frac{Km_s \cos\nu}{\pi\rho_2}},$$
(2.29)

тоді амплітуду ультразвукового імпульсного сигналу, який представлений виразом (2.26), можна подати через поверхневу густину *m<sub>s</sub>* у вигляді:

$$A_{W\alpha}(t') = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \sum_{N=0}^{\infty} \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}\right)^{2N} \cdot \cos\left(\omega_0 \left(\frac{K m_s \left(b(2N+1)\cos \nu + 1\right)}{\pi Z_2} - t\right)\right) \times \exp\left(-\frac{\left(\frac{Km_s \left(b(2N+1)\cos \nu + 1\right)}{\pi Z_2} - t\right)^2}{\left(\frac{\pi Z_2}{\ln 2}\right)^2} - \frac{\alpha_{3.}(2N+1) K m_s \cos \nu}{\pi \rho_2}\right).$$
(2.30)

Якщо розглянути проходження ультразвукового імпульсного сигналу через контрольовану щільну тканину з середньою товщиною, що наближається до двох середніх діаметрів нитки основи та утоку з параметром cosv в межах  $1 > cosv > \frac{3}{4}$ , то вираз (2.27), враховуючи поверхневу густину  $m_s$ , можна подати так:

$$A_{W\beta}(t') = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \sum_{N=0}^{\infty} \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)^{2N} \cdot \cos\left(\omega_0 \left( \frac{K \, m_s \, b \, (2N+1) \cos v}{\pi \, Z_2} - t \right) \right) \times \\ \times \exp\left( -\frac{\left( \frac{K m_s \, b \, (2N+1) \cos v}{\pi \, Z_2} - t \right)^2}{\left( \frac{\pi Z_2}{\ln 2} \right)^2} - \frac{\alpha_{3.} \, (2N+1) K \, m_s \cos v}{\pi \, \rho_2} \right).$$
(2.31)

Отже, провівши дослідження імпульсного ультразвукового сигналу, який проходить крізь різні складові шари матеріалів із різною структурою, можна зробити висновок, що результуюча амплітуда таких хвиль в основному залежить від щільності, товщини та структури самого контрольованого матеріалу.

Різниця величини амплітудних співвідношень ультразвукових хвиль, що взаємодіють між різними матеріалами з різною структурою, залежить також і від властивостей матеріалів, які зумовлені і їхньою мікроструктурою. Цей параметр може впливати на коефіцієнт згасання, який може значно змінюватися. Якщо, наприклад, в матеріалі наявні маленькі бульбашки повітря, то в порівнянні із суцільним матеріалом коефіцієнт проходження може значно зменшуватися. Це пояснюється тим, що частина ультразвукової енергії розсіюється та нагріває сам матеріал зсередини. Мікроструктура матеріалу може збільшувати внутрішнє відбиття ультразвукових хвиль.

Якщо порівнювати двошарові та одношарові суцільні матеріали та матеріали із наявними наскрізними порами, то виходить, що частина ультразвукових хвиль, які проходять крізь пори, значно впливає на результуючий сигнал у порівнянні з частиною хвиль, що проходять крізь сам матеріал.

На рис. 2.5 – рис. 2.12 показані залежності, що демонструють суттєву різницю між амплітудними співвідношеннями ультразвукових хвиль, що пройшли крізь суцільний матеріал, до хвиль, які тільки падають на нього, та між такими амплітудними співвідношеннями хвиль для матеріалів з порами, що були розглянуті раніше у роботі.



a







Рис. 2.2. Проходження ультразвукових хвиль крізь різні матеріали: а – двошаровий матеріал без пор; б – двошаровий матеріал з наскрізними порами; в – одношаровий матеріал з наскрізними порами



a



Рис. 2.3. Проходження ультразвукових хвиль крізь тканину з різною фазовою будовою при параметрові cosv, який знаходиться в межах  $\frac{3}{4} > cosv > 0$ :

а – одношарова тканина з товщиною в три середні діаметри нитки основи та
 утоку; б – одношарова тканина з товщиною в два середні діаметри нитки основи



a



Рис. 2.4. Проходження ультразвукових хвиль крізь щільну одношарову тканину майже без пор з різною фазовою будовою:

а – одношарова тканина з товщиною в три умовні середні діаметри нитки основи та утоку (присутнє зминання ниток) з параметром cosv в межах  $\frac{3}{4} > cosv > 0$ ;

б – одношарова тканина з середньою товщиною, що наближається до двох умовних середніх діаметрів ниток основи та утоку (присутнє зминання ниток) з

параметром 
$$cosv$$
 в межах  $1 > cosv > \frac{3}{4}$ 

За допомогою ультразвукових хвиль, які проходять крізь композитний або текстильний матеріал, можна контролювати його поверхневу густину, якщо структура самого матеріалу однорідна та суцільна. Товщина матеріалу повинна бути такою, щоб ультразвукові хвилі могли проходити крізь нього з амплітудою, яка дозволить зафіксувати вимірювальний сигнал детектором. Тому доцільно контролювати одношарові та двошарові матеріали з малою товщиною. Якщо в матеріалі з'являються наскрізні пори та збільшується його товщина, більша частина ультразвукових хвиль проходить крізь повітря в наскрізних порах. Тому на результуючий сигнал амплітуди хвиль на детекторі впливають саме пори. При збільшенні кількості шарів матеріалу з порами, крізь який проходять ультразвукові хвилі, може відбуватися явище внутрішнього розсіювання енергії коливань (залежить від товщини пакету матеріалу та від розміру пор кожного шару). Враховуючи наведене вище, необхідно вибирати одношарові або двошарові матеріали з малою товщиною для контролю їхніх технологічних параметрів за допомогою безконтактних ультразвукових датчиків. Також необхідно додатково визначати розміри самих пор матеріалу та враховувати їх при розрахунках технологічних параметрів різних текстильних матеріалів.

Саме для визначення зміни розмірів пор в матеріалі необхідно використовувати амплітуду ультразвукових хвиль, що відбилися від його поверхні. Вимірювання додаткового інформаційного параметру дасть змогу проводити адаптивний ультразвуковий контроль в режимі реального часу.

Проаналізувавши зазначене вище, можна прийти до висновку, що потрібно отримати залежності також і для відбитого сигналу від контрольованого матеріалу. Це дасть змогу проводити оперативний контроль різних матеріалів на виробництві використовуючи хвилі, що відбиваються від їхньої поверхні для визначення наявності та розміру наскрізних пор в їхніх структурах, а хвилі, які проходять крізь пори та самі матеріали, можна використовувати, вже з врахуванням розмірів пор, при визначенні поверхневої густини. Тому доцільно далі у роботі провести дослідження відбиття імпульсного ультразвукового сигналу від різних матеріалів з різною структурою та пористістю. 2.3. Дослідження відбиття імпульсного ультразвукового сигналу від двошарових композиційних, одношарових, текстильних матеріалів з наскрізними порами та без них

Для того, щоб провести повне дослідження взаємодії імпульсного ультразвукового сигналу з різними текстильними та композиційними матеріалами, необхідно розглянути відбиття хвиль пакету сигналу від різних матеріалів та їх складових шарів.

Тиск в імпульсному ультразвуковому сигналі, що відбився від двошарового матеріалу, у загальному вигляді можна показати так:

$$P_{2x6.}(t') = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} V(\omega) S(\omega) \cdot e^{j\omega t'} d\omega, \qquad (2.32)$$

де  $V(\omega)$  – комплексний коефіцієнт відбиття ультразвукових хвиль від матеріалу з врахуванням згасання.

Комплексний коефіцієнт відбиття ультразвукових хвиль від двошарового матеріалу, в якому  $h_1 = h_2$  або  $h_1 \approx h_2$ , можна подати так:

$$V(\omega) = \frac{\sqrt{V_L} - \sqrt{V_L} \cdot e^{2j\left(\frac{\omega b}{c_{23}} + j\alpha_{3.}\right) \cdot (h_1 + h_2)}}{2j\left(\frac{\omega b}{c_{23}} + j\alpha_{3.}\right) \cdot (h_1 + h_2)}, \qquad (2.33)$$

або можна записати цей вираз ще як суму геометричної прогресії складових хвиль, які падають та відбиваються від поверхні контрольованого матеріалу, що складається із двох різних шарів, ще як:

$$V(\omega) = \left( \sqrt{V_L} - \sqrt{V_L} \cdot e^{-2\left(-j\frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_{3.}\right) \cdot (h_1 + h_2)} \right) \times$$

$$\times \sum_{N=0}^{\infty} V_L^N \cdot e^{-2N\left(-j\frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_{3.}\right) \cdot (h_1 + h_2)} .$$

$$(2.34)$$

Залежність (2.34) для зручності при подальших перетвореннях покажемо у вигляді:

$$V(\omega) = \sqrt{V_L} \cdot \sum_{N=0}^{\infty} V_L^N \cdot e^{-2N\left(-j\frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_{3.}\right) \cdot (h_1 + h_2)} - \sqrt{V_L} \cdot \sum_{N=0}^{\infty} V_L^N \cdot e^{-(2N+2)\left(-j\frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_{3.}\right) \cdot (h_1 + h_2)}.$$

$$(2.35)$$

Зробивши підстановку виразу (2.35) в (2.32) ультразвуковий імпульсний сигнал, що відбився від двошарового матеріалу, можна подати як:

$$P_{2xe.}(t') = \sqrt{V_L} \cdot \sum_{N=0}^{\infty} V_L^N \cdot \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) \cdot e^{-2N\left(-j\frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_{3.}\right) \cdot (h_1 + h_2)} \cdot e^{-j\omega t} d\omega - \sqrt{V_L} \cdot \sum_{N=0}^{\infty} V_L^N \cdot \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) \cdot e^{-(2N+2)\left(-j\frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_{3.}\right) \cdot (h_1 + h_2)} \cdot e^{-j\omega t} d\omega,$$

$$(2.36)$$

тоді підставивши залежність для спектральної щільності (2.10) в (2.36) для імпульсного ультразвукового сигналу, комплексний тиск у хвилях, що відбиваються від двох шарів матеріалу, можна представити так:

$$P_{2xe.}(t') = \sqrt{V_L} \cdot \sum_{N=0}^{\infty} V_L^N \cdot \frac{P_{0xe.}\tau_0}{4\sqrt{\pi}\ln\sqrt{2}} \times \sum_{N=0}^{\infty} e^{-\left(\frac{(\omega-\omega_0)\tau_0}{4\ln\sqrt{2}}\right)^2 - 2N\left(-j\frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_{3.}\right) \cdot (h_1 + h_2) - j\omega t} d\omega - \sqrt{V_L} \cdot \sum_{N=0}^{\infty} V_L^N \times \frac{P_0\tau_0}{4\sqrt{\pi}\ln\sqrt{2}} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\left(\frac{(\omega-\omega_0)\tau_0}{4\ln\sqrt{2}}\right)^2 - (2N+2)\left(-j\frac{\omega b}{c_{23}} + \alpha_{3.}\right) \cdot (h_1 + h_2) - j\omega t} d\omega,$$

$$(2.37)$$

провівши перетворення у першому та у другому показниках експонент виразу (2.37) результат перетворень можна показати наступним чином:

$$-\left(\frac{\tau_{0}}{4\ln\sqrt{2}}\right)^{2}\omega^{2} + \left(j\left(\frac{2Nb(h_{1}+h_{2})}{c_{23}}-t\right) + \frac{2\omega_{0}\tau_{0}^{2}}{(4\ln\sqrt{2})^{2}}\right)\omega - (2.38)$$
$$-\left(\frac{\omega_{0}\tau_{0}}{4\ln\sqrt{2}}\right)^{2} - \alpha_{3.}2N(h_{1}+h_{2}),$$
$$-\left(\frac{\tau_{0}}{4\ln\sqrt{2}}\right)^{2}\omega^{2} + \left(j\left(\frac{b(2N+2)(h_{1}+h_{2})}{c_{23}}-t\right) + \frac{2\omega_{0}\tau_{0}^{2}}{(4\ln\sqrt{2})^{2}}\right)\omega - (2.39)$$
$$-\left(\frac{\omega_{0}\tau_{0}}{4\ln\sqrt{2}}\right)^{2} - \alpha_{3.}(2N+2)(h_{1}+h_{2}),$$

з врахуванням хвиль, що можна показати підінтегральними виразами, один з яких характеризує комплексне відбиття від межі двошарового матеріалу, а інший характеризує відбиття хвилі з подвійним її проходженням його товщини, зважаючи на (2.38) та (2.39) залежність (2.37), можна подати тоді ще так:

$$P_{2x6.}(t') = \sqrt{V_L} \cdot \sum_{N=0}^{\infty} V_L^N \cdot \frac{P_{0x6.}\tau_0}{4\sqrt{\pi} \ln \sqrt{2}} \cdot \left( e^{-\left(\frac{\omega_0\tau_0}{4\ln\sqrt{2}}\right)^2 - \alpha_{3.} 2N(h_1 + h_2)} \times \right) \times \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\left(\frac{\tau_0}{4\ln\sqrt{2}}\right)^2 \omega^2 + \left(j\left(\frac{2Nb(h_1 + h_2)}{c_{23}} - t\right) + \frac{2\omega_0\tau_0^2}{(4\ln\sqrt{2})^2}\right)\omega} d\omega - \right)} d\omega - (2.40)$$
$$- e^{-\left(\frac{\omega_0\tau_0}{4\ln\sqrt{2}}\right)^2 - \alpha_{3.}(2N+2)(h_1 + h_2)} \times \left(\int_{-\infty}^{\infty} e^{-\left(\frac{\tau_0}{4\ln\sqrt{2}}\right)^2 \omega^2 + \left(j\left(\frac{b(2N+2)(h_1 + h_2)}{c_{23}} - t\right) + \frac{2\omega_0\tau_0^2}{(4\ln\sqrt{2})^2}\right)\omega} d\omega}\right)} d\omega - \left(\int_{-\infty}^{\infty} e^{-\left(\frac{\tau_0}{4\ln\sqrt{2}}\right)^2 \omega^2 + \left(j\left(\frac{b(2N+2)(h_1 + h_2)}{c_{23}} - t\right) + \frac{2\omega_0\tau_0^2}{(4\ln\sqrt{2})^2}\right)\omega} d\omega}\right)} d\omega$$

Взявши інтеграли в (2.40), представимо тоді цей вираз як:

$$P_{2x6.}(t') = \sqrt{V_L} \cdot \sum_{N=0}^{\infty} V_L^N \cdot \frac{P_{0x6.}\tau_0}{4\sqrt{\pi}\ln\sqrt{2}} \times \left( exp \left( -\left(\frac{\omega_0\tau_0}{4\ln\sqrt{2}}\right)^2 - \alpha_{3.} 2N(h_1 + h_2) \right) \cdot \frac{4\sqrt{\pi}\ln\sqrt{2}}{\tau_0} \times exp \left( \frac{\left( j \left(\frac{2Nb(h_1 + h_2)}{c_{23}} - t \right) + \frac{2\omega_0\tau_0^2}{(4\ln\sqrt{2})^2} \right)^2}{\left(\frac{\tau_0}{\ln2}\right)^2} - exp \left( -\left(\frac{\omega_0\tau_0}{4\ln\sqrt{2}}\right)^2 - \alpha_{3.} (2N + 2)(h_1 + h_2) \right) \cdot \frac{4\sqrt{\pi}\ln\sqrt{2}}{\tau_0} \times exp \left( \frac{\left( j \left(\frac{b(2N + 2)(h_1 + h_2)}{c_{23}} - t \right) + \frac{2\omega_0\tau_0^2}{(4\ln\sqrt{2})^2} \right)^2}{\left(\frac{\pi_0}{\ln2}\right)^2} \right) \right), \qquad (2.41)$$

зробивши перетворення, для зручності виділення дійсної та уявної частини, імпульсний ультразвуковий сигнал, що відбився від такого матеріалу, можна показати як:

$$P_{2x6.}(t') = Re P_{2x6.}(t') + j Im P_{2x6.}(t') = P_{0x6.} \cdot \sqrt{V_L} \cdot \sum_{N=0}^{\infty} V_L^N \times \\ \times \left( \left( \cos \left( \omega_0 \left( \frac{2Nb(h_1 + h_2)}{c_{23}} - t \right) \right) + j \sin \left( \omega_0 \left( \frac{2Nb(h_1 + h_2)}{c_{23}} - t \right) \right) \right) \right) \times \\ \times exp \left( - \frac{\left( \frac{2Nb(h_1 + h_2)}{c_{23}} - t \right)^2}{\left( \frac{\tau_0}{ln2} \right)^2} - \alpha_{3.} 2N(h_1 + h_2) \right) -$$
(2.42)  
$$\cdot \left( \cos \left( \omega_0 \left( \frac{b(2N+2)(h_1 + h_2)}{c_{23}} - t \right) \right) + j \sin \left( \omega_0 \left( \frac{b(2N+2)(h_1 + h_2)}{c_{23}} - t \right) \right) \right) \right) \times \\ \times exp \left( - \frac{\left( \frac{b(2N+2)(h_1 + h_2)}{c_{23}} - t \right)^2}{\left( \frac{\tau_0}{ln2} \right)^2} - \alpha_{3.} (2N+2)(h_1 + h_2) \right) \right).$$

З отриманого виразу (2.42) для комплексного представлення тиску в хвилях імпульсного ультразвукового сигналу, який відбився від двошарового матеріалу, можна окремо отримати дійсну частину  $ReP_{2x6.}(t')$  та уявну частину  $ImP_{2x6.}(t')$ . Оскільки вимірюється тільки дійсна частина тиску у хвилі  $ReP_{2x6.}(t')$ , а уявна частина  $ImP_{2x6.}(t')$  використовується для визначення фазового зсуву  $\varphi_V$  сигналу, то подамо їх окремими виразами. Дійсну частину  $ReP_{2x6.}(t')$  у величинах тиску покажемо тоді так:

$$Re P_{2xe.}(t') = P_{0xe.} \cdot \sqrt{V_L} \cdot \sum_{N=0}^{\infty} V_L^N \cdot \left( \cos\left(\omega_0 \left(\frac{2Nb(h_1 + h_2)}{c_{23}} - t\right)\right) \times exp\left( -\frac{\left(\frac{2Nb(h_1 + h_2)}{c_{23}} - t\right)^2}{\left(\frac{\tau_0}{h_2}\right)^2} - \alpha_{3.} 2N(h_1 + h_2) \right) - \cos\left(\omega_0 \left(\frac{b(2N+2)(h_1 + h_2)}{c_{23}} - t\right)\right) \times exp\left( -\frac{\left(\frac{b(2N+2)(h_1 + h_2)}{c_{23}} - t\right)^2}{\left(\frac{\tau_0}{h_2}\right)^2} - \alpha_{3.} (2N+2)(h_1 + h_2) \right) \right).$$

$$(2.43)$$

Уявну частину *ImP*<sub>2xe</sub>(*t'*) імпульсного ультразвукового сигналу подамо тоді наступним чином:

$$Im P_{2xe.}(t') = P_{0xe.} \cdot \sqrt{V_L} \cdot \sum_{N=0}^{\infty} V_L^N \cdot \left( sin \left( \omega_0 \left( \frac{2Nb(h_1 + h_2)}{c_{23}} - t \right) \right) \right) \times exp \left( -\frac{\left( \frac{2Nb(h_1 + h_2)}{c_{23}} - t \right)^2}{\left( \frac{\tau_0}{ln2} \right)^2} - \alpha_{3.} 2N(h_1 + h_2) \right) - \frac{1}{c_{23}} - sin \left( \omega_0 \left( \frac{b(2N + 2)(h_1 + h_2)}{c_{23}} - t \right) \right) \right) \times exp \left( -\frac{\left( \frac{b(2N + 2)(h_1 + h_2)}{c_{23}} - t \right)^2}{\left( \frac{\tau_0}{ln2} \right)^2} - \alpha_{3.} (2N + 2)(h_1 + h_2) \right) \right).$$

$$(2.44)$$

Амплітуду хвилі такого імпульсного сигналу, відбитого від матеріалу у відносних одиницях відповідно до залежності (2.17) та (2.43) з врахуванням часової затримками хвиль в середовищах складових матеріалу, покажемо так:

$$A_{V}(t') = \sqrt{V_{L}} \cdot \sum_{N=0}^{\infty} V_{L}^{N} \cdot \left( \cos\left(\omega_{0}\left(\frac{2Nb(h_{1}+h_{2})}{c_{23}}-t\right)\right) \times \left(\frac{1}{c_{23}} - t\right)^{2} - \alpha_{3} \cdot 2N(h_{1}+h_{2})\right) \right)$$

$$\times exp\left(-\frac{\left(\frac{2Nb(h_{1}+h_{2})}{c_{23}}-t\right)^{2}}{\left(\frac{\tau_{0}}{h_{2}}\right)^{2}} - \alpha_{3} \cdot 2N(h_{1}+h_{2})\right) \right)$$

$$\times exp\left(-\frac{\left(\frac{b(2N+2)(h_{1}+h_{2})}{c_{23}}-t\right)^{2}}{\left(\frac{\tau_{0}}{h_{2}}\right)^{2}} - \alpha_{3} \cdot (2N+2)(h_{1}+h_{2})\right) \right).$$

$$(2.45)$$

Фазовий зсув ультразвукового імпульсного сигналу, що відбився від такої композиції шарів матеріалу без пор, можна подати у вигляді:

$$\varphi_{V} = \operatorname{arctg} \frac{\sum_{N=0}^{\infty} V_{L}^{N} \cdot (\exp(Y_{1}) \sin(\omega_{0} Y_{3}) - \exp(Y_{2}) \sin(\omega_{0} Y_{4}))}{\sum_{N=0}^{\infty} V_{L}^{N} \cdot (\exp(Y_{1}) \cos(\omega_{0} Y_{3}) - \exp(Y_{2}) \cos(\omega_{0} Y_{4}))}, \qquad (2.46)$$

де

$$Y_{1} = -\frac{\left(\frac{2Nb(h_{1} + h_{2})}{c_{23}} - t\right)^{2}}{\left(\frac{\tau_{0}}{\ln 2}\right)^{2}} - \alpha_{3.} 2N(h_{1} + h_{2}),$$

$$Y_{2} = -\frac{\left(\frac{b(2N+2)(h_{1}+h_{2})}{c_{23}}-t\right)^{2}}{\left(\frac{\tau_{0}}{ln2}\right)^{2}} - \alpha_{3}(2N+2)(h_{1}+h_{2}),$$

$$Y_{3} = \frac{2Nb(h_{1} + h_{2})}{c_{23}} - t, \ Y_{4} = \frac{b(2N+2)(h_{1} + h_{2})}{c_{23}} - t.$$

Амплітуду хвилі імпульсного сигналу, відбитого від двох шарів матеріалу, у відносних одиницях з врахуванням наскрізних пор в середовищах складових матеріалу (рис. 2.5) покажемо так:

$$A_{Vp}(t') = \sqrt{V_L} \cdot \sum_{N=0}^{\infty} V_L^N \cdot \left( \cos\left(\omega_0 \left(\frac{2Nb(h_1 + h_2)\cos v}{c_{23}} - t\right)\right) \times \left(\frac{2Nb(h_1 + h_2)\cos v}{c_{23}} - t\right)^2 - \alpha_{3.} 2N(h_1 + h_2)\cos v\right) \right)$$

$$\times exp\left( -\frac{\left(\frac{2Nb(h_1 + h_2)\cos v}{(h_1 + h_2)^2} - \alpha_{3.} 2N(h_1 + h_2)\cos v\right)}{\left(\frac{\tau_0}{h_2}\right)^2} - \alpha_{3.} (2N + 2)(h_1 + h_2)\cos v\right) \right).$$

$$\times exp\left( -\frac{\left(\frac{b(2N + 2)(h_1 + h_2)\cos v}{c_{23}} - t\right)^2}{\left(\frac{\tau_0}{h_2}\right)^2} - \alpha_{3.} (2N + 2)(h_1 + h_2)\cos v\right) \right).$$

$$(2.47)$$

Фазовий зсув  $\varphi_{Vp}$  для такого ультразвукового сигналу, який відбився від пористого двошарового матеріалу, можна подати залежністю (2.46), але величини, що входять до самого виразу, подамо для цього випадку як:

$$Y_{1} = -\frac{\left(\frac{2Nb(h_{1} + h_{2})cosv}{c_{23}} - t\right)^{2}}{\left(\frac{\tau_{0}}{ln2}\right)^{2}} - \alpha_{3.} 2N(h_{1} + h_{2})cosv,$$
$$\frac{\left(\frac{\tau_{0}}{ln2}\right)^{2}}{c_{23}} - t\right)^{2}}{Y_{2}} = -\frac{\left(\frac{b(2N+2)(h_{1} + h_{2})cosv}{c_{23}} - t\right)^{2}}{\left(\frac{\tau_{0}}{ln2}\right)^{2}} - \alpha_{3.} (2N+2)(h_{1} + h_{2})cosv,$$

$$Y_{3} = \frac{2Nb(h_{1} + h_{2})cosv}{c_{23}} - t, \ Y_{4} = \frac{b(2N+2)(h_{1} + h_{2})cosv}{c_{23}} - t.$$

Розглянемо також відбиття імпульсного ультразвукового сигналу від одношарового матеріалу з товщиною  $h_1$  та з акустичним опором  $Z_2$ , відповідно до того як було описано вище для хвиль, які пройшли крізь два шари матеріалу (рис.2.6,а,б). При чому вважаємо, що матеріал помістили в повітряне середовище  $Z_1 = Z_4$ , тоді для амплітуди імпульсного ультразвукового сигналу, провівши аналогічні перетворення виразів для цього випадку, можна отримати наступну залежність:

$$V(\omega) = \frac{V_{21} - V_{21} \cdot e^{2j\left(\frac{\omega b}{c_2} + j\alpha_{3.}\right) \cdot h_1}}{2j\left(\frac{\omega b}{c_2} + j\alpha_{3.}\right) \cdot h_1},$$
(2.48)

або

$$V(\omega) = \frac{\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} - \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \cdot e^{-2\left(-j\frac{\omega b}{c_2} + \alpha_{3.}\right) \cdot h_1}}{1 - \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}\right)^2 \cdot e^{-2\left(-j\frac{\omega b}{c_2} + \alpha_{3.}\right) \cdot h_1}},$$

$$V(\omega) = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} - \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \cdot e^{-2\left(-j\frac{\omega b}{c_2} + \alpha_{3.}\right) \cdot h_1}\right) \times$$

$$\times \sum_{N=0}^{\infty} \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}\right)^{2N} \cdot e^{-2N\left(-j\frac{\omega b}{c_2} + \alpha_{3.}\right) \cdot h_1},$$
(2.49)

для зручності подальших перетворень вираз (2.49) покажемо у вигляді:

$$V(\omega) = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \cdot \sum_{N=0}^{\infty} \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}\right)^{2N} \cdot e^{-2N\left(-j\frac{\omega b}{c_2} + \alpha_{3.}\right) \cdot h_1} - \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \cdot \sum_{N=0}^{\infty} \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}\right)^{2N} \cdot e^{-(2N+2)\left(-j\frac{\omega b}{c_2} + \alpha_{3.}\right) \cdot h_1},$$
(2.50)

тоді виконавши аналогічні перетворення для цього випадку, але одразу враховуючи наскрізні пори в матеріалі (рис.2.7 – рис.2.9), отримаємо наступний вираз для амплітуди відбитої хвилі імпульсного сигналу:

$$\begin{aligned} A_{Vp}(t') &= \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \sum_{N=0}^{\infty} \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)^{2N} \cdot \left( \cos \left( \omega_0 \left( \frac{2Nb \, h_1 \cos v}{c_2} - t \right) \right) \right) \times \\ &\times exp \left( - \frac{\left( \frac{2Nb \, h_1 \cos v}{c_2} - t \right)^2}{\left( \frac{\tau_0}{ln2} \right)^2} - \alpha_{3.} \, 2N \, h_1 \cos v \right) - \\ &- \cos \left( \omega_0 \left( \frac{b(2N+2)h_1 \cos v}{c_2} - t \right) \right) \times \\ &\times exp \left( - \frac{\left( \frac{b(2N+2)h_1 \cos v}{c_2} - t \right)^2}{\left( \frac{\tau_0}{ln2} \right)^2} - \alpha_{3.} \, (2N+2)h_1 \cos v \right) \right). \end{aligned}$$
(2.51)
Так як і для залежності (2.23) отримаємо вираз для імпульсного відбитого сигналу від контрольованої одношарової тканини (рис. 2.10) з середньою товщиною в межах від двох до трьох середніх діаметрів нитки основи та утоку з параметром cosv в межах  $\frac{3}{4} > cosv > 0$ . Залежність для такого сигналу можна подати так:

$$P_{2x6.}(t') = P_{2x6.}\left(\frac{\pi d_{oy}}{4c_2} - t\right) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} V_{\alpha\beta}(\omega) S(\omega) \cdot e^{j\omega \left(\frac{\pi d_{oy}}{4c_2} - t\right)} d\omega.$$
(2.52)

Комплексний коефіцієнт відбиття від такої тканини можна представити тоді у вигляді:

$$V_{\alpha\beta}(\omega) = \frac{\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} - \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \cdot e^{2\left(j\frac{\omega b}{c_2} - \alpha_{3.}\right) \cdot d_{oy}\frac{\pi}{4}cosv}}{1 - \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}\right)^2 \cdot e^{2\left(j\frac{\omega b}{c_2} - \alpha_{3.}\right) \cdot d_{oy}\frac{\pi}{4}cosv}}.$$
(2.53)

Беручи до уваги залежності (2.52) та (2.53), аналогічно до попередньо розглянутих випадків, можна отримати вираз для амплітуди імпульсного ультразвукового сигналу, який відбився від тканини, пов'язавши його з товщиною через діаметри ниток основи та утоку матеріалу. Також слід зазначити, що для цього випадку, враховується фазова будова тканини, яка і вносить додатково свій вплив на параметр cosv при однакових параметрах хвиль ультразвукового падаючого сигналу. Це і дає у підсумку додаткову часову затримку ультразвукового імпульсу в порівнянні із затримкою в одношаровому матеріалі. Такий імпульсний сигнал розповсюджується у неоднорідному (можлива наявність наскрізних пор та пористості всередині між волокнами ниток тканини) текстильному матеріалі, тому при відбитті його від ниток вираз для амплітуди у відносних одиницях можна показати так:

$$A_{V\alpha}(t') = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \sum_{N=0}^{\infty} \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)^{2N} \cdot \left( \cos\left(\omega_0 \left( \frac{\pi d_{oy}(2Nb \cos v + 1)}{4c_2} - t \right) \right) \times \right) \right) \times exp \left( -\frac{\left( \frac{\pi d_{oy}(2Nb \cos v + 1)}{4c_2} - t \right)^2}{\left( \frac{\tau_0}{\ln 2} \right)^2} - \frac{\alpha_{3.} 2N \pi d_{oy} \cos v}{4} \right) - \frac{\cos\left(\omega_0 \left( \frac{\pi d_{oy}(b(2N + 2)\cos v + 1)}{4c_2} - t \right) \right) \times \right)}{\left( \frac{\pi d_{oy}(b(2N + 2)\cos v + 1)}{4c_2} - t \right)^2} - \frac{\alpha_{3.}(2N + 2)\pi d_{oy} \cos v}{4} \right) \right).$$

$$\times exp \left( -\frac{\left( \frac{\pi d_{oy}(b(2N + 2)\cos v + 1)}{4c_2} - t \right)^2}{\left( \frac{\tau_0}{\ln 2} \right)^2} - \frac{\alpha_{3.}(2N + 2)\pi d_{oy} \cos v}{4} \right) \right).$$

$$(2.54)$$

Для контрольованої тканини з параметром *cosv* в межах 1>*cosv* >  $\frac{3}{4}$  амплітуду відбитого імпульсного сигналу можна подати як:

$$A_{V\beta}(t') = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \sum_{N=0}^{\infty} \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)^{2N} \cdot \left( \cos\left( \omega_0 \left( \frac{\pi \, d_{oy} \, 2Nb \, \cos v}{4c_2} - t \right) \right) \times \right) \right) \times exp\left( -\frac{\left( \frac{\pi \, d_{oy} \, 2Nb \, \cos v}{4c_2} - t \right)^2}{\left( \frac{\tau_0}{\ln 2} \right)^2} - \frac{\alpha_{3.} \, 2N \, \pi \, d_{oy} \cos v}{4} \right) - cos\left( \omega_0 \left( \frac{\pi \, d_{oy} \, b(2N+2)\cos v}{4c_2} - t \right) \right) \times \right) \times exp\left( -\frac{\left( \frac{\pi \, d_{oy} \, b(2N+2)\cos v}{4c_2} - t \right)^2}{\left( \frac{\pi \, d_{oy} \, b(2N+2)\cos v}{4c_2} - t \right)^2} - \frac{\alpha_{3.} \, (2N+2)\pi \, d_{oy} \cos v}{4} \right) \right).$$

$$(2.55)$$

Якщо записати вираз (2.52) для відбитого імпульсного сигналу, при товщині в межах від двох до трьох середніх діаметрів нитки основи та утоку з параметром cosv в межах  $\frac{3}{4} > cosv > 0$ , пов'язавши його з поверхневою густиною  $m_s$  контрольованої тканини (рис.2.11 та рис.2.12), тоді цю залежність можна показати у наступному вигляді:

$$P_{2x6.}(t') = P_{2x6.}\left(\frac{Km_s}{\pi Z_2} - t\right) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} V_{\alpha\beta}(\omega)S(\omega) \cdot e^{j\omega\left(\frac{Km_s}{\pi Z_2} - t\right)} d\omega. \quad (2.56)$$

Комплексний коефіцієнт відбиття від такої тканини, враховуючи залежність (2.53), та пов'язавши його з поверхневою густиною *m<sub>s</sub>* контрольованої тканини, можна представити так:

$$V_{\alpha\beta}(\omega) = \frac{\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} - \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \cdot e^{2\left(j\frac{\omega b}{c_2} - \alpha_{3.}\right) \cdot \frac{Km_s \cos v}{\pi \rho_2}}}{1 - \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}\right)^2 \cdot e^{2\left(j\frac{\omega b}{c_2} - \alpha_{3.}\right) \cdot \frac{Km_s \cos v}{\pi \rho_2}}}.$$
(2.57)

Враховуючі залежності (2.54), (2.56) та (2.57) можна отримати вираз для амплітуди імпульсного ультразвукового сигналу, який відбився від полотна матеріалу, пов'язавши його з поверхневою густиною  $m_s$  контрольованої тканини. Відбитий імпульсний ультразвуковий сигнал необхідно застосовувати для визначення загальної пористості текстильного полотна, структура якого може давати додаткове розсіювання ультразвукового сигналу, що може впливати на загальний прийом та обробку результуючого сигналу, тому необхідно мати це на увазі використовуючи відносні виміри амплітуд ультразвукових хвиль, які взаємодіють з полотном тканини. Сам вираз для амплітуди відбитого імпульсного ультразвукового сигналу у відносних одиницях можна показати як:

$$A_{V\alpha}(t') = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \sum_{N=0}^{\infty} \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)^{2N} \cdot \left( \cos\left( \omega_0 \left( \frac{K m_s (2Nb \cos v + 1)}{\pi Z_2} - t \right) \right) \times \right) \right) \\ \times exp \left( - \frac{\left( \frac{K m_s (2Nb \cos v + 1)}{\pi Z_2} - t \right)^2}{\left( \frac{\tau_0}{\ln 2} \right)^2} - \frac{\alpha_{3.} 2N K m_s \cos v}{\pi \rho_2} \right) - \\ - \cos \left( \omega_0 \left( \frac{K m_s (b(2N + 2)\cos v + 1)}{\pi Z_2} - t \right) \right) \times \right) \right) \\ \times exp \left( - \frac{\left( \frac{K m_s (b(2N + 2)\cos v + 1)}{\pi Z_2} - t \right)^2}{\left( \frac{\tau_0}{\ln 2} \right)^2} - \frac{\alpha_{3.} (2N + 2)K m_s \cos v}{\pi \rho_2} \right) \right).$$
(2.58)

Для контрольованої тканини з параметром cosv в межах  $1 > cosv > \frac{3}{4}$  вираз (2.55), пов'язавши амплітуду відбитого імпульсного сигналу з поверхневою густиною  $m_s$ , можна подати так:

$$A_{V\beta}(t') = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \sum_{N=0}^{\infty} \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)^{2N} \cdot \left( \cos\left( \omega_0 \left( \frac{K m_s 2Nb \cos v}{\pi Z_2} - t \right) \right) \times \right) \right) \times exp \left( -\frac{\left( \frac{K m_s 2Nb \cos v}{\pi Z_2} - t \right)^2}{\left( \frac{\tau_0}{\ln 2} \right)^2} - \frac{\alpha_{3.} 2N K m_s \cos v}{\pi \rho_2} \right) - \cos\left( \omega_0 \left( \frac{K m_s b(2N+2)\cos v}{\pi Z_2} - t \right) \right) \times \right) \times exp \left( -\frac{\left( \frac{K m_s b(2N+2)\cos v}{\pi Z_2} - t \right)^2}{\left( \frac{\tau_0}{\ln 2} \right)^2} - \frac{\alpha_{3.} (2N+2)K m_s \cos v}{\pi \rho_2} \right) \right).$$

$$(2.59)$$

Отримавши аналітичні залежності для ультразвукових хвиль можна дослідити різні одношарові та двошарові композитні та текстильні матеріали на взаємодію з ними. Через зміну амплітудних співвідношень ультразвукових хвиль (модуів комплексних коефіцієнтів хвиль) та через фазовий зсув або часову затримку сигналу, можна показати таку взаємодію коливань із самим матеріалом, який може мати різну структуру.

Залежність для зміни амплітуд ультразвукових хвиль у пакеті імпульсного сигналу за часом при загальній товщині двох шарів до 2 мм, якщо акустичні опори двох шарів наближаються один до одного, можна представити виразом для одношарового матеріалу для спрощення розрахунків при побудові математичної моделі. Можливість використання виразів одношарових матеріалів для двох шарів композиту частіше на практиці можна застосовувати саме для різних текстильних матеріалів. Це можна пояснити структурою різних текстильних матеріалів, яка може впливати більше на проходження ультразвукових хвиль ніж сам матеріал. Волокна ниток текстильного матеріалу, а також положення самих ниток в його структурі, можуть вносити додаткове розсіювання ультразвукових хвиль. Тому у невеликому діапазоні частоти ультразвукових коливань, у якому можна проводити безконтактний контроль матеріалів необхідно лля різних i3 складною структурою, підбирати співвідношення довжини ультразвукової хвилі до відстані діаметру нитки та пори текстильного полотна разом. Чим більше це співвідношення, тим більше структура текстильного матеріалу буде наближатися до плоского шару. Якщо розглянути суцільний матеріал в якому зроблені тільки наскрізні пори, то додаткове розсіювання (як від волокон текстильного матеріалу та від його структури) може не відбуватися. Саме такий випадок розглянутий далі для двошарового матеріалу з наскрізними порами. За допомогою отриманих виразів на рис.2.5 показано зміну амплітуд  $A_{0}$ ,  $A_{Wp}$ ,  $A_{Vp}$  пакетів ультразвукових хвиль у відносних одиницях за час t з врахуванням фазового зсуву для двошарового пористого матеріалу товщиною кожного шару в 10 мкм.



Рис. 2.5. Зміна амплітуд  $A_{0, A_{Wp}}$ ,  $A_{Vp}$  пакетів ультразвукових хвиль у відносних одиницях за час t, c для двошарового пористого матеріалу загальною h = 20 мкм

- амплітуда A<sub>0</sub> ультразвукових хвиль, що падають на матеріал; - амплітуда A<sub>Wp</sub> ультразвукових хвиль, що проходять матеріал; - - - - - - - - амплітуда A<sub>Vp</sub> ультразвукових хвиль, що відбиваються від матеріалу З рис. 2.5 видно, що для загальної товщини матеріалу в 20 мкм амплітуда хвиль, які проходять крізь нього значна за рахунок наскрізних пор. Якщо прозвучувати суцільний одношаровий матеріал із значно меншою товщиною, то амплітуда ультразвукових хвиль, які проходять крізь нього, беде меншою у порівнянні з матеріалом з порами. На рис. 2.6,а показано зміну амплітуд  $A_0$ ,  $A_W$ ,  $A_V$  пакетів ультразвукових хвиль у відносних одиницях за час t з врахуванням фазового зсуву для одношарової тонкої суцільної плівки в 1 мкм, акустичний опір плівки  $Z_2 = 1893728\kappa_2 \cdot m^{-2} \cdot c^{-1}$ . На рис. 2.6,6 показано амплітудні співвідношення (модулі комплексних коефіцієнтів |W| та |V|) хвиль одна, яка пройшла або відбилася від матеріалу плівки, до другої, що падає на поверхню самого матеріалу, в залежності від його товщини h. Також на рис. 2.6,6 показаний зріз значень амплітудних співвідношень, які відповідають піковим значенням амплітуд  $A_W$ ,  $A_V$  пакетів ультразвукових хвиль у відносних одиницях на рис. 2.6,а.

Продемонстрований приклад дозволяє побачити наскільки суцільний матеріал може відрізнятися від пористого у своїй здатності пропускати ультразвукові коливання. Тому за отриманими у роботі виразами було показано на рис. 2.7,а,б зміну амплітуд  $A_0$ ,  $A_{Wp}$ ,  $A_{Vp}$  із фазовим зсувом ультразвукових хвиль, що проходили або відбивались від різних матеріалів з порами, при яких cosv = 0,002. На рис. 2.7,а показано хвилю, яка пройшла крізь пористий матеріал. Вона є трохи більшою за хвилю, що відбилася від матеріалу, а на рис.2.7,б навпаки, наведено таку ж хвилю, але вже з меншою амплітудою, яка взаємодіяла з іншим матеріалом. На рис. 2.8 показано залежності модулів  $|W_p|$ ,  $|V_p|$  комплексних коефіцієнтів проходження та відбиття хвиль від товщини h

 $|V_p|$  комплексних коефіцієнтів проходження та відбиття хвиль від товщини *h* полімерного матеріалу з порами із cosv = 0,002, а також зрізи значень амплітудних співвідношень, які відповідають піковим значенням амплітуд  $A_{Wp}$ ,  $A_{Vp}$  пакетів ультразвукових хвиль у відносних одиницях на рис. 2.7, а, б.



Рис.2.6. Зміна амплітуд  $A_{0,} A_W, A_V$  для тонкої плівки в 1мкм та модулів|W|, |V|: а – зміна амплітуд  $A_{0,} A_W, A_V$  зондуючих хвиль для тонкої плівки з h = 1мкм; б – залежності зміни модулів|W|, |V|хвиль від товщини h плівки (зріз на 1 мкм)



Рис. 2.7. Зміна амплітуд  $A_{0, A_{Wp}}$ ,  $A_{Vp}$  для матеріалів з порами із cosv = 0,002а – зміна амплітуд зондуючих хвиль для полімерного матеріалу з h = 0,6 мм; б – зміна амплітуд зондуючих хвиль для полімерного матеріалу з h = 0,8 мм



проходження та відбиття хвиль від товщини h полімерного матеріалу з порами із cosv = 0,002 (зріз на h = 0,6 мм та h = 0,8 мм)

Такі самі параметри ультразвукових хвиль та зріз значень амплітудних співвідношень, але вже для більш товстішого матеріалу h = 1 см при cosv = 0,002 продемонстровано на рис. 2.9, а, б.

Використовуючи вирази, які дають змогу представити залежність амплітудних співвідношень  $|W_{\alpha\beta_{3.}}|$ ,  $|V_{\alpha\beta_{3.}}|$  ультразвукових хвиль та їхніх коефіцієнтів проходження  $|W_{\alpha\beta_{3.}}|^2$  та відбиття  $|V_{\alpha\beta_{3.}}|^2$  за енергією безпосередньо від суми діаметрів ниток основи та утоку  $d_{oy}$ , можна проаналізувати вплив товщини ниток та структури різних тканин на процес проходження та відбиття хвиль від текстильних полотен з врахуванням згасання самого сигналу.

На рис. 2.10 показано залежності модулів без згасання  $|W_{\alpha\beta}|$ ,  $|V_{\alpha\beta}|$  $(\alpha_{3.} = 0)$ , із згасанням $|W_{\alpha\beta_{3.}}|$ ,  $|V_{\alpha\beta_{3.}}|$   $(\alpha_{3.} = 15 \ m^{-1})$  та їхніх коефіцієнтів за енергією без згасання $|W_{\alpha\beta}|^2$ ,  $|V_{\alpha\beta}|^2$   $(\alpha_{3.} = 0)$ , із згасанням $|W_{\alpha\beta_{3.}}|^2$ ,  $|V_{\alpha\beta_{3.}}|^2$  $(\alpha_{3.} = 15 \ m^{-1})$  від суми діаметрів нитки основи та утоку  $d_{oy}$  тканини при cosv = 0,0147. 3 рис. 2.10 можна побачити, що згасання вносить похибку менше 2% до амплітудних співвідношень  $|W_{\alpha\beta_{3.}}|$  та  $|V_{\alpha\beta_{3.}}|$  ультразвукових хвиль. Розподіл за енергією по точках показує, що енергія при проходженні та відбитті хвиль для цього випадку буде однакова у точці із значенням  $d_{oy} = 2,9 \cdot 10^{-4} \ mbox{ м.}$ Зазначене можна використати для спрощення побудови спеціальних приладів безконтактного контролю товщини тканин з різною структурою.

Оскільки головним технологічним параметром для текстильної промисловості є поверхнева густина  $m_s$  матеріалів, то очевидно, що вирази для амплітудних співвідношень, які пов'язані з нею, доцільно використовувати на практиці з врахуванням параметру cosv, який має великий вплив в залежності від структури самого матеріалу, що показано на рис. 2.11 та рис. 2.12.



Рис. 2.9. Зміна амплітуд  $A_{0,} A_{Wp}$ ,  $A_{Vp}$  для матеріалу в 1см та модулів $|W_p|$ ,  $|V_p|$ : а – зміна амплітуд  $A_{0,} A_{Wp}$ ,  $A_{Vp}$  зондуючих хвиль для матеріалу з h = 1см, з порами при cosv = 0,002; б – залежності зміни модулів $|W_p|$ ,  $|V_p|$  хвиль від товщини h матеріалу з порами при cosv = 0,002 (зріз на h = 1 см)



Рис. 2.10. Залежність модулів без згасання  $|W_{\alpha\beta}|$ ,  $|V_{\alpha\beta}|$  ( $\alpha_{3.} = 0$ ), із згасанням  $|W_{\alpha\beta_{3.}}|$ ,  $|V_{\alpha\beta_{3.}}|$  ( $\alpha_{3.} = 15 \ m^{-1}$ ) та їхніх коефіцієнтів за енергією без згасання  $|W_{\alpha\beta}|^2$ ,  $|V_{\alpha\beta}|^2$  ( $\alpha_{3.} = 0$ ), із згасанням  $|W_{\alpha\beta_{3.}}|^2$ ,  $|V_{\alpha\beta_{3.}}|^2$  ( $\alpha_{3.} = 15 \ m^{-1}$ ) від суми діаметрів нитки основи та утоку  $d_{oy}$  тканини при cosv = 0,0147



Рис. 2.11. Залежність модулів комплексних коефіцієнтів проходження  $|W_{\alpha\beta}|$  та відбиття  $|V_{\alpha\beta}|$  ультразвукових хвиль від поверхневої густини  $m_s$ ,  $c/m^2$  тканин при різних значеннях *cosv* 



Рис. 2.12. Залежність коефіцієнтів проходження  $|W_{\alpha\beta}|^2$  та відбиття  $|V_{\alpha\beta}|^2$  за енергією для ультразвукових хвиль від поверхневої густини  $m_s$ ,  $c/m^2$  тканин при різних значеннях cosv

Проведений аналіз показав, що отримані вирази для імпульсних ультразвукових сигналів, які можуть взаємодіяти з матеріалами з різною структурою, можна використати для створення нових методів та засобів неруйнівного безконтактного контролю технологічних параметрів текстильних матеріалів.

Залежності амплітудних співвідношень ультразвукових хвиль від товщини одношарових, двошарових матеріалів з порами та без них можна використати для створення нових методів та засобів контролю цього параметру для різних композитних матеріалів широкого застосування. Залежності амплітудних співвідношень ультразвукових хвиль, де товщина текстильного матеріалу виражена через суму умовних діаметрів нитки основи та утоку тканини, дадуть змогу визначати товщину тканини з врахуванням деформації ниток, пористості та фазової її будови. Поверхнева густина текстильних матеріалів може визначатися за допомогою виразів отриманих в роботі, що враховують також і яка може контролюватися безперервно в структуру полотна, процесі виробництва за допомогою ультразвукових хвиль, що пройшли крізь матеріал та хвиль, які відбилися від нього.

При скільки цьому залишається питання на впливає згасання ультразвукових хвиль на їхні амплітудні співвідношення при проходженні та відбитті їх від зазначених раніше матеріалів. Це може вплинути на точність приладів, побудова базуватиметься яких на залежностях взаємодії ультразвукових хвиль із складною структурою різних композитних та текстильних матеріалів. Тому потрібно окремо розглянути питання згасання ультразвукових хвиль у їх частотному діапазоні, який підходить ЛЛЯ безконтактного контролю, в порівнянні з товщинами або поверхневою густиною розглянутих раніше матеріалів з різною структурою.

Зазначене дозволить створювати складні у комплексі та універсальні прилади безконтактного контролю різних технологічних параметрів для матеріалів широкого вжитку у текстильній промисловості.

2.4. Згасання імпульсного ультразвукового сигналу при проходженні та відбитті хвиль від двошарових композиційних, одношарових, текстильних матеріалів з наскрізними порами та без них

Дослідження згасання імпульсного ультразвукового сигналу при проходженні та відбитті хвиль під час їхньої взаємодії з різними контрольованими матеріалами є важливою задачею, вирішення якої дозволить поліпшити методи та точність безконтактних приладів, які застосовуватимуть для визначення основних технологічних параметрів композитних та текстильних матеріалів.

Для того, щоб провести детальний аналіз впливу згасання на амплітудні співвідношення ультразвукових хвиль, що пройшли двошаровий матеріал, до хвиль, які тільки падають на нього, потрібно спочатку комплексний коефіцієнт проходження коливань  $W(\omega)$  розкласти на дійсну та уявну його частини так:

$$W(\omega) = ReW(\omega) + j ImW(\omega), \qquad (2.60)$$

де

$$ReW(\omega) = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \cdot \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} \cdot \frac{Z_3}{Z_3 + Z_4} \cdot \sum_{N=0}^{\infty} V_L{}^N \cdot cos\left((2N+1)\frac{\omega b(h_1 + h_2)}{c_{23}}\right) \times (2.61)$$
$$\times e^{-\alpha_3 \cdot (2N+1)(h_1 + h_2)},$$

$$Im W(\omega) = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \cdot \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} \cdot \frac{Z_3}{Z_3 + Z_4} \cdot \sum_{N=0}^{\infty} V_L^N \cdot sin\left((2N+1)\frac{\omega b(h_1 + h_2)}{c_{23}}\right) \times$$
(2.62)

$$\times e^{-\alpha_{3.}(2N+1)(h_1+h_2)}$$

тоді сам модуль  $|W(\omega)|$  або амплітудне співвідношення ультразвукових хвиль при  $h_1 \approx h_2$  покажемо як:

$$W(\omega) | = \sqrt{ReW(\omega)^2 + ImW(\omega)^2}, \qquad (2.63)$$

або

$$|W(\omega)| = \left( \left( \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \cdot \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} \cdot \frac{Z_3}{Z_3 + Z_4} \right)^2 \cdot \left( \left( \sum_{N=0}^{\infty} V_L^N \cdot \cos\left((2N+1)\frac{\omega b(h_1 + h_2)}{c_{23}}\right) \times e^{-\alpha_3} \cdot (2N+1)(h_1 + h_2)} \right)^2 + \left( \sum_{N=0}^{\infty} V_L^N \cdot \sin\left((2N+1)\frac{\omega b(h_1 + h_2)}{c_{23}}\right) \times e^{-\alpha_3} \cdot (2N+1)(h_1 + h_2)} \right)^2 \right) \right)^{\frac{1}{2}}.$$
(2.64)

Якщо такий матеріал розглядати з наскрізними порами, тоді залежність (2.64) запишемо так:

$$\left| W_{p}(\omega) \right| = \left( \left( \frac{Z_{1}}{Z_{1} + Z_{2}} \cdot \frac{Z_{2}}{Z_{2} + Z_{3}} \cdot \frac{Z_{3}}{Z_{3} + Z_{4}} \right)^{2} \times \left( \left( \sum_{N=0}^{\infty} V_{L}^{N} \cdot \cos\left( (2N+1) \frac{\omega b(h_{1}+h_{2}) \cos v}{c_{23}} \right) \cdot e^{-\alpha_{3}} (2N+1)(h_{1}+h_{2}) \cos v}{c_{23}} \right)^{2} + \left( \sum_{N=0}^{\infty} V_{L}^{N} \cdot \sin\left( (2N+1) \frac{\omega b(h_{1}+h_{2}) \cos v}{c_{23}} \right) \cdot e^{-\alpha_{3}} (2N+1)(h_{1}+h_{2}) \cos v}{c_{23}} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

$$(2.65)$$

Для знаходження такої залежності амплітудних співвідношень хвиль від колової частоти  $\omega$  з врахуванням згасання  $\alpha_{3.}$  для одношарового матеріалу з наскрізними порами, які можна охарактеризувати за допомогою параметру cosv, що відображає проходження частини звукової енергії через пори, треба записати наступні рівності  $ReW_p(\omega)$  та  $ImW_p(\omega)$  для цього випадку як:

$$Re W_{p}(\omega) = \frac{4Z_{1}Z_{2}}{(Z_{1}+Z_{2})^{2}} \cdot \sum_{N=0}^{\infty} \left(\frac{Z_{2}-Z_{1}}{Z_{1}+Z_{2}}\right)^{2N} \cdot \cos\left((2N+1)\frac{\omega b h_{1} \cos v}{c_{2}}\right) \times$$
(2.66)  
$$\times e^{-\alpha_{3}} (2N+1)h_{1} \cos v,$$
$$Im W_{p}(\omega) = \frac{4Z_{1}Z_{2}}{(Z_{1}+Z_{2})^{2}} \cdot \sum_{N=0}^{\infty} \left(\frac{Z_{2}-Z_{1}}{Z_{1}+Z_{2}}\right)^{2N} \cdot \sin\left((2N+1)\frac{\omega b h_{1} \cos v}{c_{2}}\right) \times$$
(2.67)  
$$\times e^{-\alpha_{3}} (2N+1)h_{1} \cos v,$$

тоді отримаємо модуль  $|W_p(\omega)|$  для одношарового матеріалу з порами у такому вигляді:

$$\left| W_{p}(\omega) \right| = \left( \left( \frac{4Z_{1}Z_{2}}{(Z_{1}+Z_{2})^{2}} \right)^{2} \cdot \left( \left( \sum_{N=0}^{\infty} \left( \frac{Z_{2}-Z_{1}}{Z_{1}+Z_{2}} \right)^{2N} \cdot \cos\left( (2N+1) \frac{\omega b h_{1} \cos \nu}{c_{2}} \right) \times \right) \right) \right)^{2} \times e^{-\alpha_{3}} (2N+1)h_{1} \cos \nu + \left( \sum_{N=0}^{\infty} \left( \frac{Z_{2}-Z_{1}}{Z_{1}+Z_{2}} \right)^{2N} \cdot \sin\left( (2N+1) \frac{\omega b h_{1} \cos \nu}{c_{2}} \right) \times \right) \right)^{2} \times e^{-\alpha_{3}} (2N+1)h_{1} \cos \nu + \left( \sum_{N=0}^{\infty} \left( \frac{Z_{2}-Z_{1}}{Z_{1}+Z_{2}} \right)^{2N} \cdot \sin\left( (2N+1) \frac{\omega b h_{1} \cos \nu}{c_{2}} \right) \times \right) \right)^{2}$$

$$\times e^{-\alpha_{3}} (2N+1)h_{1} \cos \nu + \left( \sum_{N=0}^{\infty} \left( \frac{Z_{2}-Z_{1}}{Z_{1}+Z_{2}} \right)^{2N} \cdot \sin\left( (2N+1) \frac{\omega b h_{1} \cos \nu}{c_{2}} \right) \times \right)$$

Якщо записувати модуль комплексного коефіцієнта проходження  $|W_{\alpha\beta}(\omega)|$  для тканини з різною деформацією ниток та з фазовою будовою із умовною товщиною, яку можна представити сумою діаметру нитки основи та утоку  $d_{oy}$ , то його можна показати у такому вигляді:

$$W_{\alpha\beta}(\omega) \Big| = \left( \left( \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \right)^2 \cdot \left( \left( \sum_{N=0}^{\infty} \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)^{2N} \cdot \cos\left( (2N+1) \frac{\omega \, b \, \pi \, d_{oy} \cos \nu}{4 \, c_2} \right) \times \right)^2 \right)^2 \times e^{-\alpha_{3.}(2N+1) \frac{\pi \, d_{oy} \cos \nu}{4}} + \left( \sum_{N=0}^{\infty} \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)^{2N} \cdot \sin\left( (2N+1) \frac{\omega \, b \, \pi \, d_{oy} \cos \nu}{4 \, c_2} \right) \times \right)^2 \times e^{-\alpha_{3.}(2N+1) \frac{\pi \, d_{oy} \cos \nu}{4}} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}.$$
(2.69)

Вираз (2.69) пов'язавши його з поверхневою густиною *m<sub>s</sub>* самого текстильного полотна можна подати як:

$$\left| W_{\alpha\beta} \left( \omega \right) \right| = \left( \left( \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \right)^2 \cdot \left( \left( \sum_{N=0}^{\infty} \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)^{2N} \cdot \cos\left((2N+1) \frac{K m_s \omega b \cos v}{\pi Z_2} \right) \times \right)^2 \right)^2 + \left( \sum_{N=0}^{\infty} \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)^{2N} \cdot \sin\left((2N+1) \frac{K m_s \omega b \cos v}{\pi Z_2} \right) \times \right)^2 \right)^2 + \left( \sum_{N=0}^{\infty} \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)^{2N} \cdot \sin\left((2N+1) \frac{K m_s \omega b \cos v}{\pi Z_2} \right) \times \right)^2 \right)^2 \right)^2 \left( 2.70 \right)^2 + \left( \sum_{N=0}^{\infty} \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)^{2N} \cdot \left( 2N + 1 \right) \frac{K m_s \omega b \cos v}{\pi Z_2} \right) \times \right)^2 \right)^2 \left( 2.70 \right)^2 + \left( \sum_{N=0}^{\infty} \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)^{2N} \cdot \left( 2N + 1 \right) \frac{K m_s \omega b \cos v}{\pi Z_2} \right) \times \right)^2 \right)^2 \left( 2.70 \right)^2 + \left( \sum_{N=0}^{\infty} \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \right)^2 \left( 2N + 1 \right)^2 \left( \sum_{N=0}^{\infty} \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \right)^2 \right)^2 \right)^2 \right)^2 \left( \sum_{N=0}^{\infty} \left( \sum$$

Для того, щоб провести детальний аналіз впливу згасання на амплітудні співвідношення ультразвукових хвиль, що відбилися від двошарового матеріалу, до хвиль, які тільки падають на нього, потрібно спочатку комплексний коефіцієнт відбиття коливань  $V(\omega)$  розкласти на дійсну та уявну його частини, відповідно як для наведених у роботі виразів (2.60), (2.61), (2.62) для коефіцієнта проходження  $W(\omega)$ , та показати ці залежності у наступному вигляді так:

$$V(\omega) = ReV(\omega) + j ImV(\omega), \qquad (2.71)$$

де

$$Re V(\omega) = \sqrt{V_L} \cdot \left( \sum_{N=0}^{\infty} V_L^N \cdot \cos\left(2N \frac{\omega b(h_1 + h_2)}{c_{23}}\right) \cdot e^{-\alpha_{3.} 2N(h_1 + h_2)} - \sum_{N=0}^{\infty} V_L^N \cdot \cos\left((2N + 2) \frac{\omega b(h_1 + h_2)}{c_{23}}\right) \cdot e^{-\alpha_{3.} (2N + 2)(h_1 + h_2)} \right),$$
(2.72)

$$Im V(\omega) = \sqrt{V_L} \cdot \left( \sum_{N=0}^{\infty} V_L^N \cdot sin\left( 2N \frac{\omega b(h_1 + h_2)}{c_{23}} \right) \cdot e^{-\alpha_{3.} 2N(h_1 + h_2)} - \sum_{N=0}^{\infty} V_L^N \cdot sin\left( (2N + 2) \frac{\omega b(h_1 + h_2)}{c_{23}} \right) \cdot e^{-\alpha_{3.} (2N + 2)(h_1 + h_2)} \right),$$
(2.73)

тоді сам модуль комплексного коефіцієнту відбиття  $|V(\omega)|$  для двошарового матеріалу при  $h_1 \approx h_2$  запишемо як:

$$V(\omega) | = \sqrt{ReV(\omega)^2 + ImV(\omega)^2}, \qquad (2.74)$$

або

$$|V(\omega)| = \left( V_L \cdot \left( \left( \sum_{N=0}^{\infty} V_L^N \cdot \left( \cos\left( 2N \frac{\omega b(h_1 + h_2)}{c_{23}} \right) \cdot e^{-\alpha_{3.} 2N(h_1 + h_2)} - \cos\left( (2N + 2) \frac{\omega b(h_1 + h_2)}{c_{23}} \right) \cdot e^{-\alpha_{3.} (2N + 2)(h_1 + h_2)} \right) \right)^2 + \left( \sum_{N=0}^{\infty} V_L^N \cdot \left( \sin\left( 2N \frac{\omega b(h_1 + h_2)}{c_{23}} \right) \cdot e^{-\alpha_{3.} 2N(h_1 + h_2)} - \cos\left( (2N + 2) \frac{\omega b(h_1 + h_2)}{c_{23}} \right) \cdot e^{-\alpha_{3.} (2N + 2)(h_1 + h_2)} \right)^2 \right) \right)^{\frac{1}{2}}.$$

$$(2.75)$$

Якщо в такому матеріалі присутні пори, тоді враховуючи зміну параметру cosv, який залежить від величини проходження хвиль крізь пори, можна

представити модуль відбиття  $|V_p(\omega)|$  ультразвукових хвиль від такого матеріалу тоді так:

$$\left| V_{p}(\omega) \right| = \left( V_{L} \cdot \left( \left( \sum_{N=0}^{\infty} V_{L}^{N} \cdot \left( \cos\left( 2N \frac{\omega b(h_{1}+h_{2})\cos v}{c_{23}} \right) \cdot e^{-\alpha_{3}} \frac{2N(h_{1}+h_{2})\cos v}{c_{23}} \right) - \cos\left( (2N+2) \frac{\omega b(h_{1}+h_{2})\cos v}{c_{23}} \right) \cdot e^{-\alpha_{3}} \frac{(2N+2)(h_{1}+h_{2})\cos v}{c_{23}} \right) \right)^{2} + \left( \sum_{N=0}^{\infty} V_{L}^{N} \cdot \left( \sin\left( 2N \frac{\omega b(h_{1}+h_{2})\cos v}{c_{23}} \right) \cdot e^{-\alpha_{3}} \frac{2N(h_{1}+h_{2})\cos v}{c_{23}} - \sin\left( (2N+2) \frac{\omega b(h_{1}+h_{2})\cos v}{c_{23}} \right) \cdot e^{-\alpha_{3}} \frac{(2N+2)(h_{1}+h_{2})\cos v}{c_{23}} \right) \right)^{2} \right) \right)^{\frac{1}{2}}.$$

$$(2.76)$$

Покажемо залежності амплітудних співвідношень хвиль від їхньої колової частоти  $\omega$  з врахуванням згасання  $\alpha_{3}$  для одношарового матеріалу з наскрізними порами та складові рівності  $ReV_p(\omega)$  та  $ImV_p(\omega)$  для цього випадку як:

$$ReV_{p}(\omega) = \frac{Z_{2} - Z_{1}}{Z_{1} + Z_{2}} \cdot \left(\sum_{N=0}^{\infty} \left(\frac{Z_{2} - Z_{1}}{Z_{1} + Z_{2}}\right)^{2N} \cdot \cos\left(2N\frac{\omega b h_{1} \cos \nu}{c_{2}}\right) \cdot e^{-\alpha_{3}} \cdot 2N h_{1} \cos \nu - \sum_{N=0}^{\infty} \left(\frac{Z_{2} - Z_{1}}{Z_{1} + Z_{2}}\right)^{2N} \cdot \cos\left((2N + 2)\frac{\omega b h_{1} \cos \nu}{c_{2}}\right) \cdot e^{-\alpha_{3}} \cdot (2N + 2)h_{1} \cos \nu \right),$$

$$ImV_{p}(\omega) = \frac{Z_{2} - Z_{1}}{Z_{1} + Z_{2}} \cdot \left(\sum_{N=0}^{\infty} \left(\frac{Z_{2} - Z_{1}}{Z_{1} + Z_{2}}\right)^{2N} \cdot \sin\left(2N\frac{\omega b h_{1} \cos \nu}{c_{2}}\right) \cdot e^{-\alpha_{3}} \cdot 2N h_{1} \cos \nu - \left(2.78\right)\right)$$

$$-\sum_{N=0}^{\infty} \left(\frac{Z_{2} - Z_{1}}{Z_{1} + Z_{2}}\right)^{2N} \cdot \sin\left((2N + 2)\frac{\omega b h_{1} \cos \nu}{c_{2}}\right) \cdot e^{-\alpha_{3}} \cdot (2N + 2)h_{1} \cos \nu - \left(2.78\right)$$

тоді

$$\begin{aligned} |V_{p}(\omega)| &= \left( \left( \frac{Z_{2} - Z_{1}}{Z_{1} + Z_{2}} \right)^{2} \cdot \left( \left( \sum_{N=0}^{\infty} \left( \frac{Z_{2} - Z_{1}}{Z_{1} + Z_{2}} \right)^{2N} \cdot \left( \cos\left( 2N \frac{\omega b h_{1} \cos v}{c_{2}} \right) \times \right) \right) \\ &\times e^{-\alpha_{3} \cdot 2N h_{1} \cos v} - \cos\left( (2N+2) \frac{\omega b h_{1} \cos v}{c_{2}} \right) \times \\ &\times e^{-\alpha_{3} \cdot (2N+2)h_{1} \cos v} \right) \right)^{2} + \\ &+ \left( \sum_{N=0}^{\infty} \left( \frac{Z_{2} - Z_{1}}{Z_{1} + Z_{2}} \right)^{2N} \cdot \left( \sin\left( 2N \frac{\omega b h_{1} \cos v}{c_{2}} \right) \cdot e^{-\alpha_{3} \cdot 2N h_{1} \cos v} - \right) \\ &- \sin\left( (2N+2) \frac{\omega b h_{1} \cos v}{c_{2}} \right) \cdot e^{-\alpha_{3} \cdot (2N+2)h_{1} \cos v} \right) \right)^{2} \right) \right)^{\frac{1}{2}}. \end{aligned}$$

$$(2.79)$$

Якщо пов'язати модуль комплексного коефіцієнта відбиття  $|V_{\alpha\beta}(\omega)|$  для тканини із умовною товщиною  $d_{oy}$ , то його можна показати у такому вигляді:

$$\left| V_{\alpha\beta} \left( \omega \right) \right| = \left( \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \cdot \left( \left( \sum_{N=0}^{\infty} \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)^{2N} \cdot \left( \cos\left( 2N \frac{\omega b \pi d_{oy} \cos \nu}{4c_2} \right) \times e^{-\alpha_{3.} 2N \frac{\pi d_{oy} \cos \nu}{4}} - \cos\left( (2N + 2) \frac{\omega b \pi d_{oy} \cos \nu}{4c_2} \right) \times e^{-\alpha_{3.} (2N + 2) \frac{\pi d_{oy} \cos \nu}{4}} \right) \right)^2 +$$

$$\times e^{-\alpha_{3.} (2N + 2) \frac{\pi d_{oy} \cos \nu}{4}} \right) \right)^2 +$$

$$(2.80)$$

$$+\left(\sum_{N=0}^{\infty} \left(\frac{Z_2-Z_1}{Z_1+Z_2}\right)^{2N} \cdot \left(\sin\left(2N\frac{\omega b \pi d_{oy} \cos v}{4c_2}\right) \cdot e^{-\alpha_3 2N} \frac{\pi d_{oy} \cos v}{4} - \sin\left((2N+2)\frac{\omega b \pi d_{oy} \cos v}{4c_2}\right) \cdot e^{-\alpha_3 (2N+2)\frac{\pi d_{oy} \cos v}{4}}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}}.$$

Вираз (2.80) можна пов'язати з поверхневою густиною *m<sub>s</sub>* самого текстильного полотна та подати як:

$$\left| V_{\alpha\beta} \left( \omega \right) \right| = \left( \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \cdot \left( \left( \sum_{N=0}^{\infty} \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)^{2N} \cdot \left( \cos\left( 2N \frac{K m_s \, \omega \, b \, \cos v}{\pi \, Z_2} \right) \times \right) \right) \right) \right)$$

$$\times e^{-\alpha_{3.} 2N \frac{K m_s \cos v}{\pi \, \rho_2}} - \cos\left( (2N + 2) \frac{K m_s \, \omega \, b \, \cos v}{\pi \, Z_2} \right) \times \left( \sum_{k=0}^{\infty} \left( 2N + 2 \right) \frac{K m_s \cos v}{\pi \, \rho_2} \right) \right)^2 + (2.81)$$

$$+\left(\sum_{N=0}^{\infty} \left(\frac{Z_2-Z_1}{Z_1+Z_2}\right)^{2N} \cdot \left(\sin\left(2N\frac{Km_s\,\omega\,b\,\cos\nu}{\pi\,Z_2}\right) \cdot e^{-\alpha_{3.}\,2N\frac{Km_s\,\cos\nu}{\pi\,\rho_2}} - \sin\left((2N+2)\frac{Km_s\,\omega\,b\,\cos\nu}{\pi\,Z_2}\right) \cdot e^{-\alpha_{3.}\,(2N+2)\frac{Km_s\,\cos\nu}{\pi\,\rho_2}}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}}.$$

Отримавши основні вирази для амплітудних співвідношень з врахуванням згасання для ультразвукових хвиль, що пройшли матеріал, та які відбилися від нього, до хвиль, що тільки падають на його поверхню, можна проаналізувати вплив цього згасання на амплітудну похибку (відносну зміну їх амплітуд), що спричинена ним.

У загальному вигляді ці відносні зміни для амплітуд хвиль, що пройшли, та які відбилися від матеріалу, можна представити так:

$$\delta_{|W(\omega)|} = \frac{|W(\omega)| - |W(\omega)|_0}{|W(\omega)|_0} \cdot 100\%, \qquad (2.82)$$

та

$$\delta_{|V(\omega)|} = \frac{|V(\omega)| - |V(\omega)|_0}{|V(\omega)|_0} \cdot 100\%, \qquad (2.83)$$

де  $\delta_{|W(\omega)|}$  – відносна зміна модуля комплексного коефіцієнту проходження ультразвукових хвиль, яка спричинена згасанням;

$$\delta_{|V(\omega)|}$$
 – відносна зміна модуля комплексного коефіцієнту відбиття

ультразвукових хвиль, яка спричинена згасанням;  
$$|W(\omega)|_0, |V(\omega)|_0$$
 – модулі комплексних коефіцієнтів проходження та відбиття без врахування згасання хвиль в матеріалі ( $\alpha_2 = 0$ ).

Приведемо два випадки (для різних за структурою матеріалів) відносних змін амплітуд хвиль, використовуючи отриманні вирази для модулів комплексних коефіцієнтів проходження та відбиття коливань, підставляючи їх до загальних формул (2.82) та (2.83). Позначення самих модулів  $|W(\omega)|$  та  $|V(\omega)|$ відповідних коефіцієнтів із переходом запису колової частоти  $\omega$  до f покажемо просто як |W| і |V|, а величини  $\delta |W(\omega)|$ ,  $\delta |V(\omega)|$  подамо як  $\delta |W|$  і  $\delta |V|$ .

Відносні зміни амплітуд хвиль, що спричиняються згасанням сигналів, для одношарових матеріалів з порами після спрощення складових виразів із переходом від колової частоти  $\omega$  до f можна подати так:

$$\delta_{|W|} = \left( |W| \sqrt{1 + \left(\frac{\pi f \rho_2 h_1 \cos \nu}{Z_1}\right)^2} - 1 \right) \cdot 100\%, \tag{2.84}$$

$$\delta_{|V|} = \left( |V| \sqrt{1 + \left(\frac{Z_1}{\pi f \,\rho_2 \,h_1 \cos \nu}\right)^2} - 1 \right) \cdot 100\%.$$
 (2.85)

Відносні зміни амплітуд хвиль, що спричиняються згасанням сигналів, для тканин, які пов'язані з умовною товщиною  $d_{oy}$ , після спрощення складових виразів із переходом від колової частоти  $\omega$  до f можна подати так:

$$\delta_{|W|} = \left( |W| \sqrt{1 + \left(\frac{\pi^2 f \rho_2 d_{oy} \cos \nu}{4Z_1}\right)^2} - 1 \right) \cdot 100\%, \qquad (2.86)$$
$$\delta_{|V|} = \left( |V| \sqrt{1 + \left(\frac{4Z_1}{\pi^2 f \rho_2 d_{oy} \cos \nu}\right)^2} - 1 \right) \cdot 100\%. \qquad (2.87)$$

Відносні зміни амплітуд хвиль, що спричиняються згасанням сигналів, для текстильних полотен, враховуючи залежності (2.86) та (2.87) пов'язавши їх з поверхневою густиною  $m_s$ , після спрощення складових виразів із переходом від колової частоти  $\omega$  до f можна подати так:

$$\delta_{|W|} = \left( |W| \sqrt{1 + \left(\frac{K m_s f \cos \nu}{Z_1}\right)^2} - 1 \right) \cdot 100\%,$$
(2.88)

та

$$\delta_{|V|} = \left( |V| \sqrt{1 + \left(\frac{Z_1}{K m_s f \cos v}\right)^2} - 1 \right) \cdot 100\%, \qquad (2.89)$$

На рис. 2.13 показано як впливає параметр згасання  $\alpha_{3.}$  (за піками кривих при  $\alpha_{3.} = 0$  та  $\alpha_{3.} = 15 \, M^{-1}$ ) ультразвукових хвиль на їхні амплітудні співвідношення |W|, |V| в залежності від зміни частоти f коливань в контрольованому матеріалі (від зміни довжини хвилі  $\lambda_2$  в матеріалі з порами). Зміну згасання амплітуди від частоти хвиль краще визначати за параметром співвідношення товщини матеріалу до довжини хвилі  $h_1/\lambda_2$  для матеріалів з плоским шаром та за параметром  $m_s/(\rho_2\lambda_2)$  для текстильних матеріалів. На рис.2.13 – рис.2.16 показано як змінюється згасання амплітуди хвиль при зміні їх частоти в матеріалі полімерного плоского шару з малими порами, що може застосовуватися в композитах, а на рис. 2.17 – рис.2.20 показано як змінюється згасання у текстильному матеріалі з наскрізними порами.



Рис. 2.13. Залежності модулів |W|, |V| для полімерного матеріалу з малими порами від параметру  $h_1 / \lambda_2$  (при  $\alpha_{3.} = 0$  та  $\alpha_{3.} = 15 \, \text{m}^{-1}$ )



Рис. 2.14. Залежності модулів |W|, |V| для полімерного матеріалу з малими порами від параметрів  $h_1/\lambda_2$  та згасання  $\alpha_3$ :

а – зміна модуля |W| від параметрів  $h_1/\lambda_2$  та  $\alpha_{_{3.}}$ ; б – зміна модуля |V| від параметрів  $h_1/\lambda_2$  та  $\alpha_{_{3.}}$ 



Рис. 2.15. Залежності відносних змін модулів комплексних коефіцієнтів проходження  $\delta_{|W|}$  та відбиття  $\delta_{|V|}$  для полімерного матеріалу з малими порами від параметру  $h_1/\lambda_2$ 



Рис. 2.16. Залежності відносних змін модулів комплексних коефіцієнтів проходження  $\delta_{|W|}$  та відбиття  $\delta_{|V|}$  для полімерного матеріалу з малими порами від параметрів  $h_1/\lambda_2$  та  $\alpha_3$ .

Як видно з наведених залежностей (рис.2.13 – рис.2.16) при малих порах в полімерному матеріалі проходження ультразвукових хвиль наближається до проходження коливань в суцільному матеріалі. Це відбувається, тому що хвилі, які проходять крізь малі пори, менше впливають на результуючий сигнал ніж ті, що проходять крізь пори в текстильному матеріалі (при певному співвідношенні розмірів наскрізних пор та довжини ультразвукових хвиль). Частина ультразвукових хвиль, яка проходить крізь полімерний матеріал зазнає значного згасання (у порівнянні з текстильним полотном), тому що він не має міжволоконної пористості в своїй структурі, так як текстильні полотна. Також треба зазначити, що умовна товщина текстильного шару може значно переважати товщину полімерного матеріалу в композиті, через який можна пропускати ультразвукові хвилі в процесі безконтактного контролю. Це зумовлено меншим згасанням ультразвукових коливань в шарі текстилю.

Згасання відбитих ультразвукових хвиль значно менше впливає на зміну величини модуля комплексного коефіцієнта відбиття  $\delta_{|V|}$  ніж на зміну величини модуля комплексного коефіцієнта проходження  $\delta_{|W|}$  хвиль крізь полімерний матеріал (рис. 2.15, рис. 2.16). Якщо порівнювати ці показники відносних змін модулів комплексних коефіцієнтів ультразвукових хвиль з аналогічними для текстильних полотен, то різниця між  $\delta_{|W|}$  та  $\delta_{|V|}$  для таких одношарових матеріалів буде незначна, а їх величина буде значно меншою за ці показники для полімерних матеріалів. Тому можна зробити висновок, що згасанням ультразвукових хвиль, при поперечному прозвучуванні текстильних можна знехтувати (рис. 2.17, рис. 2.18). Середня полотен швидкість розповсюдження ультразвукових хвиль, при такому прозвучуванні текстильного одношарового матеріалу, буде наближатися до швидкості розповсюдження звукових хвиль у повітрі, оскільки більша частина коливань проходить саме крізь нього, оминаючи самі нитки матеріалу. Для матеріалів з різною внутрішньою структурою швидкість розповсюдження хвиль може змінюватись.



Рис. 2.17. Залежності модулів |W|, |V| для текстильних матеріалів від параметру  $m_s / (\rho_2 \lambda_2)$  із згасанням ( $\alpha_{3.} = 15 \, m^{-1}$ ) та без нього ( $\alpha_{3.} = 0$ ) в діапазоні контролю полотен



Рис. 2.18. Залежності модулів |W|, |V| для текстильних матеріалів від параметрів  $m_s / (\rho_2 \lambda_2)$  та згасання  $\alpha_{_{3.}}$  в діапазоні контролю полотен



Рис. 2.19. Залежності відносних змін модулів комплексних коефіцієнтів проходження  $\delta_{|W|}$  та відбиття  $\delta_{|V|}$  для текстильних матеріалів від параметру  $m_s / (\rho_2 \lambda_2)$  в діапазоні контролю полотен



б

Рис. 2.20. Залежності відносних змін модулів комплексних коефіцієнтів проходження  $\delta_{|W|}$  та відбиття  $\delta_{|V|}$  для текстильних матеріалів від параметрів

 $m_s / (\rho_2 \lambda_2)$  та  $\alpha_s$ : а – залежність відносної зміни  $\delta_{|W|}$  від параметрів  $m_s / (\rho_2 \lambda_2)$  та  $\alpha_s$ ; б – залежність відносної зміни  $\delta_{|V|}$  від параметрів  $m_s / (\rho_2 \lambda_2)$  та  $\alpha_s$ .

Як видно з рис.2.19 та рис.2.20 для полотен, що в основному виробляються вітчизняними текстильними підприємствами, згасання ультразвукових хвиль, які можуть застосовуватися для поперечного прозвучування такого текстилю, буде незначним і ним можна знехтувати. Це можна пояснити тим, що хоч згасання хвиль в самих волокнах текстильних матеріалів може бути  $\alpha_{3.} = 15 \, M^{-1}$ , але зважаючи, що більша частина коливань огинають нитки з волокнами текстильного матеріалу і проходять крізь наскрізні пори, то цим згасанням для результуючого ультразвукового сигналу можна знехтувати. Тому пік згасання амплітуди ультразвукових хвиль, що взаємодіють з текстильними матеріалами, припадає на пологу частину залежностей модулів |W|, |V| для текстильних матеріалів від параметрів  $m_s/(
ho_2\lambda_2)$  та згасання  $\alpha_{_{3.}}$  в діапазоні контролю полотен (рис. 2.18, рис. 2.19, рис. 2.20). Показано, що таке згасання мало впливає на зміну амплітуд хвиль, яка не перевищує 1% за модулем для текстильних полотен, тоді як згасання для одношарових полімерних матеріалів з малими порами може суттєво впливати на зміну амплітуд хвиль, яка може перевищувати 60 % за модулем.

Проаналізувавши згасання ультразвукових хвиль в різних матеріалах можна зробити висновок, що діапазон частот цих коливань та діапазон поверхневої густини полотен, які застосовуються для безконтактного контролю різних параметрів, можуть бути більшими за такі діапазони для тонких одношарових матеріалів, що використовуються для композитів. Така відмінність між матеріалами пояснюється внутрішньою структурою матеріалів, яка може впливати на здатність частини хвиль огинати сам матеріал, якщо співвідношення довжини хвилі та наскрізної пори не є явно вираженим.

Проведені дослідження показали, що можна використовувати малопотужні датчики для визначення різних технологічних параметрів текстильних матеріалів без врахування самого згасання, оскільки більша частина ультразвукових хвиль проходить крізь самі пори полотна. Для підсилення чутливості вимірювального каналу доцільно застосовувати хвилеводи для окремих ниток та стрічок.
## Висновки до розділу 2

1. Розроблено узагальнену структуру комп'ютеризованої системи для безконтактного ультразвукового контролю технологічних параметрів матеріалів.

 Проаналізовано проходження імпульсного ультразвукового сигналу крізь двошарові, одношарові матеріали з наскрізними порами та без них, а також проходження хвиль крізь тканини з різною фазовою будовою та порами.

3. Отримано залежності амплітудних співвідношеннь ультразвукових хвиль, які пройшли матеріал, до хвиль, що тільки падають на нього, від товщин плоских шарів композиційних матеріалів з порами, від умовних товщин тканин з різною фазовою будовою, порами та від поверхневої густини цих тканин.

4. Проведено аналіз відбиття імпульсного ультразвукового сигналу від двошарових, одношарових матеріалів з наскрізними порами та без них, а також відбиття хвиль від тканин з різною фазовою будовою та порами.

5. Одержано залежності амплітудних співвідношеннь ультразвукових хвиль, які відбиваються від матеріалу, до хвиль, що тільки падають на нього, від товщин плоских шарів композиційних матеріалів з порами, від умовних товщин тканин з різною фазовою будовою, порами та від поверхневої густини цих тканин.

6. Отримано залежності фазового зсуву хвиль, які проходять крізь різні двошарові матеріали з наскрізними порами та без них, а також фазового зсуву хвиль, що відбиваються від цих матеріалів, відносно фази падаючої хвилі.

7. Наведено залежності відносних змін модулів комплексних коефіцієнтів проходження  $\delta_{|W|}$  та відбиття  $\delta_{|V|}$  для текстильних матеріалів від параметрів  $m_s / (\rho_2 \lambda_2)$  та  $\alpha_{3.}$ , а також для полімерного матеріалу з малими порами від параметрів  $h_1 / \lambda_2$  та  $\alpha_{3.}$ . Доведено, що параметром згасання  $\alpha_{3.}$  для текстильного матеріалу можна знехтувати при поперечному його прозвучуванні. При цьому амплітудна похибка спричинена згасанням не перевищує 1%. Для полімерного матеріалу з малими порами від вибору значення співвідношення  $h_1 / \lambda_2$ .

## РОЗДІЛ З

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ З РІЗНИМИ ТЕКСТИЛЬНИМИ МАТЕРІАЛАМИ ПРИ БЕЗКОНТАКТНОМУ КОНТРОЛІ

Сьогодні існує багато різноманітних технологічних об'єктів, в основу яких можуть входити різні матеріали. Одними із таких матеріалів є композити. До основних параметрів цих матеріалів можна віднести їх товщину, при умові виключення наявності дефектів у їхній структурі. У свою чергу, дефекти можуть призвести до різного ступеню руйнації матеріалу. Такі дефекти у деталях, агрегатах і виробах можуть впливати на їхню витривалість до деформації форми при навантаженнях, втомлену міцність матеріалу та ремонтопридатність виробу. Для вчасного виявлення прихованих дефектів необхідно застосовувати сучасні методи неруйнівного контролю на всіх етапах життєвого циклу виробу з композитних матеріалів.

Метою дослідження відбивання ультразвукових хвиль від композиту з шарами текстильних матеріалів малої товщини є розробка безконтактного методу виявлення дефектів у їхній структурі. Цей метод дозволить забезпечити оперативний контроль композиційного текстильного матеріалу (КТМ).

## 3.1. Відбивання ультразвукових хвиль від композиту малої товщини при їхньому нормальному падінні з визначенням дефектів в структурі матеріалу

Для визначення розшарування або інших дефектів у матеріалах за допомогою безконтактного методу, необхідно детально розглянути відбиття ультразвукових хвиль від граничних середовищ, що взаємодіють з ними.

Процес відбиття ультразвуку спочатку будемо розглядати, враховуючи нормальне падіння хвиль відносно об'єкту контролю. Для того, щоб описати відбиття хвиль від матеріалу, в якому присутні дефекти, спочатку потрібно провести аналогічний опис для матеріалу, в якому вони відсутні. Також необхідно враховувати згасання хвиль у шарах КТМ, виходячи з проведеного аналізу описаного у цій роботі раніше.

На амплітуду ультразвукових хвиль, які входять у пакети імпульсних сигналів, менше впливають їхні перевідбивання та накладання як при безперервному випромінюванні коливань, що може вплинути на результуючий сигнал. Тому імпульсний ультразвуковий сигнал доцільно застосовувати при безконтактному ультразвуковому контролі різних матеріалів. Амплітуду ультразвукової хвилі, яка відбивається від матеріалу, в якому відсутні дефекти, можна показати через модуль комплексного коефіцієнта відбиття. Сам коефіцієнт можна подати у наступному вигляді:

$$V_e = ReV_e + j ImV_e$$
,

$$\begin{split} V_{e} &= \left[ \left( \left( ch \, \alpha_{3,}h + \left( \frac{Z_{2}}{2Z_{1}} + \frac{Z_{1}}{2Z_{2}} \right) \cdot sh \, \alpha_{3,}h \right) \cdot cos \frac{\omega h}{c_{2}} \right)^{2} + \left( \left( sh \, \alpha_{3,}h + \left( \frac{Z_{2}}{2Z_{1}} + \frac{Z_{1}}{2Z_{2}} \right) \cdot sh \, \alpha_{3,}h \right) \cdot cos \frac{\omega h}{c_{2}} \right)^{2} + \left( \left( sh \, \alpha_{3,}h + \left( \frac{Z_{2}}{2Z_{1}} + \frac{Z_{1}}{2Z_{2}} \right) \cdot sh \, \alpha_{3,}h \right) \cdot cos \frac{\omega h}{c_{2}} \right)^{2} \\ &\times \left[ \left( \left( ch \, \alpha_{3,}h + \left( \frac{Z_{2}}{2Z_{1}} + \frac{Z_{1}}{2Z_{2}} \right) \cdot sh \, \alpha_{3,}h \right) \cdot cos \frac{\omega h}{c_{2}} \right)^{2} + \left( \left( sh \, \alpha_{3,}h + \left( \frac{Z_{2}}{2Z_{1}} + \frac{Z_{1}}{2Z_{2}} \right) \cdot ch \, \alpha_{3,}h \right) \cdot sin \frac{\omega h}{c_{2}} \right)^{2} \right)^{-1} - j \left( \left( sh \, \alpha_{3,}h + \left( \frac{Z_{2}}{2Z_{1}} + \frac{Z_{1}}{2Z_{2}} \right) \cdot ch \, \alpha_{3,}h \right) \times sin \frac{\omega h}{c_{2}} \right)^{2} + \left( \left( sh \, \alpha_{3,}h + \left( \frac{Z_{2}}{2Z_{1}} + \frac{Z_{1}}{2Z_{2}} \right) \cdot sh \, \alpha_{3,}h \right) \cdot cos \frac{\omega h}{c_{2}} \right)^{2} + \left( \left( sh \, \alpha_{3,}h + \left( \frac{Z_{2}}{2Z_{1}} + \frac{Z_{1}}{2Z_{2}} \right) \cdot sh \, \alpha_{3,}h \right) \cdot cos \frac{\omega h}{c_{2}} \right)^{2} + \left( \left( sh \, \alpha_{3,}h + \left( \frac{Z_{2}}{2Z_{1}} + \frac{Z_{1}}{2Z_{2}} \right) \cdot sh \, \alpha_{3,}h \right) \cdot cos \frac{\omega h}{c_{2}} \right)^{2} + \left( \left( sh \, \alpha_{3,}h + \left( \frac{Z_{2}}{2Z_{1}} + \frac{Z_{1}}{2Z_{2}} \right) \cdot ch \, \alpha_{3,}h \right) \cdot cos \frac{\omega h}{c_{2}} \right)^{2} \right)^{-1} \right], \end{split}$$

де  $ReV_e$ ,  $ImV_e$  – дійсна та уявна частини комплексного коефіцієнту відбиття  $V_e$  для матеріалу без дефекту (еталонного). Модуль комплексного коефіцієнта відбиття в загальному вигляді можна записати так:

$$|V_{e}| = \sqrt{ReV_{e}^{2} + ImV_{e}^{2}},$$

$$|V_{e}| = \left(1 + \left(1 - \left(ch \alpha_{3.}h + \left(\frac{Z_{2}}{2Z_{1}} + \frac{Z_{1}}{2Z_{2}}\right) \cdot sh \alpha_{3.}h\right) \cdot 2\cos\frac{\omega h}{c_{2}}\right) \times \left(\left(ch \alpha_{3.}h + \left(\frac{Z_{2}}{2Z_{1}} + \frac{Z_{1}}{2Z_{2}}\right) \cdot sh \alpha_{3.}h\right) \cdot \cos\frac{\omega h}{c_{2}}\right)^{2} + \left((sh \alpha_{3.}h + \left(\frac{Z_{2}}{2Z_{1}} + \frac{Z_{1}}{2Z_{2}}\right) \cdot ch \alpha_{3.}h\right) \cdot sin\frac{\omega h}{c_{2}}\right)^{2}\right)^{-1}\right)^{\frac{1}{2}},$$

$$(3.2)$$

при  $\alpha_{3.} = 0$  та  $Z_1 / Z_2 \ll 1$  вираз (3.2) можна спростити до наступного:

$$|V_e| = \sqrt{1 + \frac{1 - 2 \cdot \cos\frac{\omega h}{c_2}}{\left(\cos\frac{\omega h}{c_2}\right)^2 + \left(\frac{Z_2}{2Z_1} \cdot \sin\frac{\omega h}{c_2}\right)^2}}.$$
(3.3)

Для більшості матеріалів  $\omega h/c_2 \ll 1$ , тоді вираз (3.3) можна записати у вигляді:

$$|V_e| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2Z_1c_2}{Z_2\omega h}\right)^2}},$$
(3.4)

де для цього випадку:

*h* – загальна товщина композитного матеріалу;

Z<sub>1</sub> – акустичний опір навколишнього середовища;

Z<sub>2</sub> – акустичний опір композитного матеріалу;

c<sub>2</sub> – швидкість розповсюдження ультразвукової хвилі в матеріалі.

З виразу (3.4) також можна визначати товщину самого еталонного матеріалу (для тонких матеріалів) за необхідності. Відбиття хвиль від КТМ, в якому може бути дефект, що представляє собою тонкий шар повітря, можна описати за допомогою вхідного акустичного опору  $Z_{ex}^{(4)}$  для чотирьох середовищ [123].

$$Z_{6x.}^{(4)} = (Z_{1}Z_{2}Z_{3} - Z_{1}Z_{3}^{2}tgK_{2}h_{1}tgK_{3}h_{2} - Z_{1}Z_{3}Z_{4}tgK_{2}h_{1}tgK_{4}h_{3} - Z_{1}Z_{2}Z_{4}tgK_{3}h_{2}tgK_{4}h_{3} - j(Z_{2}^{2}Z_{3}tgK_{2}h_{1} + Z_{2}Z_{3}^{2}tgK_{3}h_{2} + Z_{2}Z_{3}Z_{4} \times tgK_{4}h_{3} - Z_{2}^{2}Z_{4}tgK_{2}h_{1}tgK_{3}h_{2}tgK_{4}h_{3}))\cdot (Z_{2}Z_{3}Z_{4} - Z_{2}^{2}Z_{4}tgK_{2}h_{1}tgK_{3}h_{2} - Z_{2}^{2}Z_{3}tgK_{2}h_{1}tgK_{3}h_{2} - Z_{2}^{2}Z_{3}tgK_{2}h_{1}tgK_{4}h_{3} - Z_{2}Z_{3}^{2}tgK_{3}h_{2}tgK_{4}h_{3} - j(Z_{1}Z_{3}Z_{4}tgK_{2}h_{1} + Z_{1}Z_{2} \times Z_{4}tgK_{3}h_{2} + Z_{1}Z_{2}Z_{3}tgK_{4}h_{3} - Z_{1}Z_{3}^{2}tgK_{2}h_{1}tgK_{3}h_{2}tgK_{4}h_{3}))^{-1} \cdot Z_{4},$$

$$(3.5)$$

де для цього випадку:

*h*<sub>l</sub> – товщина матеріалу до дефекту;

h<sub>2</sub> – товщина дефекту в матеріалі;

h<sub>3</sub> – товщина шару матеріалу, який знаходиться вище дефекту;

Z<sub>2</sub> – акустичний опір матеріалу до дефекту;

- Z<sub>3</sub> акустичний опір прошарку дефекту;
- Z<sub>4</sub> акустичний опір шару матеріалу, який знаходиться вище дефекту;

*К*<sub>2</sub> – хвильове число для шару матеріалу до дефекту;

К3 – хвильове число для прошарку дефекту;

*К*<sub>4</sub> – хвильове число для шару матеріалу, який знаходиться вище дефекту.

Тоді комплексний коефіцієнт відбиття [123] можна показати так:

$$V_{\partial e\phi} = \frac{Z_{ex}^{(4)} - Z_1}{Z_{ex}^{(4)} + Z_1}.$$
(3.6)

За зміною амплітуди ультразвукових хвиль, які відбилися від КТМ з наявним дефектом (часто розшарування у вигляді повітряного зазору), відносно еталонного КТМ без дефектів можна визначити наявність небажаних неоднорідностей в композитному матеріалі.

Для визначення пікової амплітуди та фази імпульсного ультразвукового сигналу, що відбився від КТМ з дефектом, відносно амплітуди та фази ультразвукового імпульсного сигналу, який відбився від еталонного зразка КТМ, необхідно з виразу (3.6) виділити дійсну  $ReV_{\partial e\phi}$ . та уявну  $ImV_{\partial e\phi}$ . частини. За

амплітудними співвідношеннями (модулями  $|V_e|$ ,  $|V_{\partial e\phi}|$ , які пов'язані з піковими амплітудами хвиль) та фазою ультразвукових коливань, що взаємодіють з контрольованими матеріалами можна підвищувати чутливість вимірювальної системи до наявності дефекту в самому КТМ. Покажемо відповідні перетворення для подальшого розкладання виразу (3.6) на дійсну  $ReV_{\partial e\phi}$  та уявну  $ImV_{\partial e\phi}$  частини нижче:

$$\begin{split} V_{\partial e \phi} &= \left( Z_4 \cdot \left( Z_2^2 Z_3 t_g K_2 h_1 + Z_2 Z_3^2 t_g K_3 h_2 + Z_2 Z_3 Z_4 t_g K_4 h_3 - Z_2^2 Z_4 \times x t_g K_2 h_1 t_g K_3 h_2 t_g K_4 h_3 \right) + j \left( Z_4 \cdot \left( Z_1 Z_2 Z_3 - Z_1 Z_3^2 t_g K_2 h_1 t_g K_3 h_2 - Z_1 Z_3 Z_4 t_g K_2 h_1 t_g K_4 h_3 - Z_1 Z_2 Z_4 t_g K_3 h_2 t_g K_4 h_3 \right) - Z_1 \cdot \left( Z_2 Z_3 Z_4 - Z_2^2 Z_3 t_g K_2 h_1 t_g K_4 h_3 - Z_2 Z_3^2 t_g K_3 h_2 t_g K_4 h_3 \right) \right) \\ &- Z_1 \cdot \left( Z_1 Z_3 Z_4 t_g K_2 h_1 + Z_1 Z_2 Z_4 t_g K_3 h_2 + Z_1 Z_2 Z_3 t_g K_4 h_3 - Z_1 Z_3^2 t_g K_2 h_1 t_g K_3 h_2 t_g K_4 h_3 \right) \right) \cdot \left( Z_4 \cdot \left( Z_2^2 Z_3 t_g K_2 h_1 + Z_2 Z_3^2 t_g K_3 h_2 + Z_2 Z_3^2 t_g K_2 h_1 t_g K_3 h_2 T_g Z_4 t_g K_4 h_3 \right) + j \left( Z_4 \cdot \left( Z_1 Z_2 Z_3 - Z_1 Z_3^2 t_g K_2 h_1 t_g K_3 h_2 - Z_1 Z_3 Z_4 t_g K_2 h_1 t_g K_4 h_3 - Z_1 Z_2 Z_4 t_g K_3 h_2 t_g K_4 h_3 \right) \right) + Z_1 \cdot \left( Z_1 Z_3 Z_4 t_g K_2 h_1 t_g K_3 h_2 - Z_2^2 Z_3 t_g K_2 h_1 t_g K_4 h_3 - Z_1 Z_2^2 Z_4 t_g K_3 h_2 t_g K_4 h_3 \right) \right) + Z_1 \cdot \left( Z_1 Z_3 Z_4 t_g K_2 h_1 t_g K_3 h_2 - Z_2^2 Z_3 t_g K_2 h_1 t_g K_4 h_3 - Z_2 Z_3^2 t_g K_2 h_1 t_g K_4 h_3 - Z_2 Z_3^2 t_g K_3 h_2 t_g K_4 h_3 \right) \right) + Z_1 \cdot \left( Z_1 Z_3 Z_4 t_g K_2 h_1 t_g K_3 h_2 t_g K_4 h_3 \right) \right) + Z_1 \cdot \left( Z_1 Z_3 Z_4 t_g K_2 h_1 + Z_1 Z_2 Z_4 t_g K_3 h_2 t_g K_4 h_3 \right) + Z_1 \cdot \left( Z_1 Z_3 Z_4 t_g K_2 h_1 t_g K_3 h_2 t_g K_4 h_3 \right) \right) \right) \right) \right) \left( Z_1 + Z_1 Z_2 Z_3 t_g K_4 h_3 \right) + Z_1 \cdot \left( Z_1 Z_3 Z_4 t_g K_2 h_1 t_g K_4 h_3 - Z_1 Z_2 Z_4 t_g K_3 h_2 t_g K_4 h_3 \right) \right) + Z_1 \cdot \left( Z_1 Z_3 Z_4 t_g K_2 h_1 t_g K_4 h_3 - Z_1 Z_2 Z_4 t_g K_3 h_2 t_g K_4 h_3 \right) + Z_1 \cdot \left( Z_1 Z_3 Z_4 t_g K_2 h_1 t_g K_3 h_2 t_g K_4 h_3 \right) \right) \right) \left( Z_1 + Z_2 Z_3 t_g K_4 h_3 \right) \right) \left( Z_1 + Z_1 Z_2 Z_3 t_g K_4 h_3 \right) \right) \left( Z_1 + Z_1 Z_2 Z_3 t_g K_4 h_3 \right) \right) \left( Z_1 + Z_1 Z_2 Z_3 t_g K_2 h_1 t_g K_4 h_3 \right) \right) \left( Z_1 + Z_1 Z_2 Z_3 t_g K_4 h_3 \right) \right) \left( Z_1 + Z_1 Z_2 Z_3 t_g K_4 h_3 \right) \right) \left( Z_1 + Z_1 Z_2 Z_3 t_g K_4 h_3 \right) \right) \left( Z_1 + Z_1 Z_2 Z_3 t_g K_4 h_3 \right) \right) \left( Z_1 + Z_1 Z_2 Z_3 t_g K_4 h_3 \right) \right) \left( Z_1 + Z_1 Z_2 Z_3 t_g K_4 h_3 \right) \right) \left( Z_1 + Z_1 Z_2 Z_3 t_g K_4 h_3 \right) \right) \left( Z_1 + Z_1$$

якщо зробити заміну та деякі математичні перетворення, тоді:

$$\begin{split} A &= Z_4 \cdot \left( Z_2^2 Z_3 tg K_2 h_1 + Z_2 Z_3^2 tg K_3 h_2 + Z_2 Z_3 Z_4 tg K_4 h_3 - Z_2^2 Z_4 \times tg K_2 h_1 tg K_3 h_2 tg K_4 h_3 \right) - Z_1 \cdot \left( Z_1 Z_3 Z_4 tg K_2 h_1 + Z_1 Z_2 Z_4 tg K_3 h_2 + Z_1 Z_2 Z_3 tg K_4 h_3 - Z_1 Z_3^2 tg K_2 h_1 tg K_3 h_2 tg K_4 h_3 \right); \\ B &= Z_4 \cdot \left( Z_2^2 Z_3 tg K_2 h_1 + Z_2 Z_3^2 tg K_3 h_2 + Z_2 Z_3 Z_4 tg K_4 h_3 - Z_2^2 Z_4 \times tg K_2 h_1 tg K_3 h_2 tg K_4 h_3 \right) + Z_1 \cdot \left( Z_1 Z_3 Z_4 tg K_2 h_1 + Z_1 Z_2 Z_4 tg K_3 h_2 + Z_1 Z_2 Z_3 tg K_4 h_3 - Z_1 Z_3^2 tg K_2 h_1 tg K_3 h_2 tg K_4 h_3 \right); \end{split}$$
(3.8)  

$$C &= Z_4 \cdot \left( Z_1 Z_2 Z_3 - Z_1 Z_3^2 tg K_2 h_1 tg K_3 h_2 - Z_1 Z_3 Z_4 tg K_2 h_1 tg K_4 h_3 - Z_1 Z_2 Z_4 tg K_3 h_2 tg K_4 h_3 \right) - Z_1 \cdot \left( Z_2 Z_3 Z_4 - Z_2^2 Z_4 tg K_2 h_1 tg K_3 h_2 - Z_1 Z_2 Z_4 tg K_3 h_2 tg K_4 h_3 \right) - Z_1 \cdot \left( Z_2 Z_3 Z_4 - Z_2^2 Z_4 tg K_2 h_1 tg K_3 h_2 - Z_2^2 Z_3 tg K_2 h_1 tg K_4 h_3 - Z_2 Z_3^2 tg K_3 h_2 tg K_4 h_3 \right); \end{split}$$

$$D = Z_4 \cdot (Z_1 Z_2 Z_3 - Z_1 Z_3^2 tgK_2 h_1 tgK_3 h_2 - Z_1 Z_3 Z_4 tgK_2 h_1 tgK_4 h_3 - Z_1 Z_2 Z_4 tgK_3 h_2 tgK_4 h_3) + Z_1 \cdot (Z_2 Z_3 Z_4 - Z_2^2 Z_4 tgK_2 h_1 tgK_3 h_2 - Z_2^2 Z_3 tgK_2 h_1 tgK_4 h_3 - Z_2 Z_3^2 tgK_3 h_2 tgK_4 h_3),$$

звідки

$$V_{\partial e\phi} = \frac{A \cdot B + C \cdot D + j(B \cdot C - A \cdot D)}{B^2 + D^2} = \frac{A \cdot B + C \cdot D}{B^2 + D^2} + j\frac{B \cdot C - A \cdot D}{B^2 + D^2},$$
(3.9)

а сам модуль можна представити тоді так:

$$\left| V_{\partial e \phi} \right| = \sqrt{\frac{\left( A \cdot B + C \cdot D \right)^2 + \left( B \cdot C - A \cdot D \right)^2}{\left( B^2 + D^2 \right)^2}}.$$
 (3.10)

Тепер, коли вирази (3.1), (3.4) для коефіцієнтів  $V_e$ ,  $V_{\partial e\phi}$ . та (3.9), (3.10) для величин  $|V_e|$ ,  $|V_{\partial e\phi}|$  отримані, можна визначити різницю пікових амплітуд через відносні показники модулів та фазовий зсув зондуючих хвиль у КТМ, що контролюється, відносно сигналу в еталонному КТМ за модулями і фазами  $\varphi_e$ ,  $\varphi_{\partial e\phi}$  цих сигналів. Ці величини можна подати так:

$$\Delta |V| = |V_{\partial e \phi}| - |V_e|, \qquad (3.11)$$

$$\Delta \varphi = \varphi_{\partial e \phi} - \varphi_e, \qquad (3.12)$$

де (якщо враховувати згасання  $\alpha_{3.}$  в матеріалі)

$$\varphi_{e} = \operatorname{arctg}\left(-\left(\operatorname{sh} \alpha_{3.}h + \left(\frac{Z_{2}}{2Z_{1}} + \frac{Z_{1}}{2Z_{2}}\right) \cdot \operatorname{ch} \alpha_{3.}h\right) \cdot \operatorname{sin} \frac{\omega h}{c_{2}} \times \left(\left(\left(\operatorname{ch} \alpha_{3.}h + \left(\frac{Z_{2}}{2Z_{1}} + \frac{Z_{1}}{2Z_{2}}\right) \cdot \operatorname{sh} \alpha_{3.}h\right) \cdot \cos \frac{\omega h}{c_{2}}\right)^{2} + \left(\left(\operatorname{sh} \alpha_{3.}h + \left(\frac{Z_{2}}{2Z_{1}} + \frac{Z_{1}}{2Z_{1}}\right) + \frac{Z_{1}}{2Z_{2}}\right) \cdot \operatorname{ch} \alpha_{3.}h\right) \cdot \left(\operatorname{ch} \alpha_{3.}h + \left(\frac{Z_{2}}{2Z_{1}} + \frac{Z_{1}}{2Z_{2}}\right) \cdot \operatorname{sh} \alpha_{3.}h\right) \cdot \cos \frac{\omega h}{c_{2}}\right)^{-1}\right),$$

$$(3.13)$$

при  $\alpha_{3.} = 0$  та  $Z_1 / Z_2 <<1$  вираз (3.13) можна спростити до наступного:

$$\varphi_{e} = \operatorname{arctg}\left(\frac{-\frac{Z_{2}}{2Z_{1}} \cdot \sin\frac{\omega h}{c_{2}}}{\left(\cos\frac{\omega h}{c_{2}}\right)^{2} + \left(\frac{Z_{2}}{2Z_{1}} \cdot \sin\frac{\omega h}{c_{2}}\right)^{2} - \cos\frac{\omega h}{c_{2}}}\right),$$
(3.14)

а вираз для матеріалу з дефектом можна представити тоді як:

$$\varphi_{\partial e\phi} = \operatorname{arctg}\left(\frac{B \cdot C - A \cdot D}{A \cdot B + C \cdot D}\right). \tag{3.15}$$

Для того, щоб визначати наявність дефекту в КТМ, необхідно проводити контроль різних текстильних шарів композиту, використовуючи два параметра ультразвукових хвиль: амплітуду та фазовий зсув. Це дасть можливість збільшити чутливість вимірювальної системи з використанням опорного та вимірювального сигналів. Збільшення різниці між амплітудами цих сигналів та їх фазового зсуву буде свідчати про збільшення розмірів самого дефекту в структурі контрольованого КТМ. Це означатиме, що в його товщині може відбуватися розшарування матеріалу, яке можливо зафіксувати за допомогою порівняння інформаційних параметрів опорного та вимірювального сигналів

На базі проведених досліджень можливо реалізувати метод контролю КТМ з текстильними прошарками матеріалу, які є складовими його частинами. Для цього необхідно застосовувати роздільно-суміщені перетворювачі ультразвукових хвиль для детектування коливань з певною затримкою у часі при їх нормальному падінні та відбиванні.

Зазначене ускладнює практичну реалізацію цього методу, тому потрібно додатково дослідити взаємодію ультразвукових хвиль з КТМ, коли вони розповсюджуються під кутом до його поверхні, в процесі виробництва.

Як було розглянуто раніше, практична реалізація методу контролю КТМ в процесі його виробництва (процес нанесення рідких розплавів полімеру або його розчинів на текстильні шари композиту) на наявність неоднорідностей в його структурі може бути ускладнена з технічної точки зору. Зазначене пов'язане з нормальним падінням ультразвукової хвилі. Тому покажемо можливість безконтактного ультразвукового контролю КТМ в процесі його вироблення, якщо зважити на те, що це випадок при падінні хвилі під кутом до поверхні самого матеріалу. Під час падіння хвиля відбивається від матеріалу або проходить, в основному, крізь середовища рідких розчинів або розплавів різних полімерів та інших складових речовин. Це відбувається при оперативному контролі самого КТМ. Також хвиля розповсюджується в середовищах повітряних проміжків пор у текстильних шарах, так як більшість хвиль огинають нитки текстильного матеріалу. Тому будемо розглядати цей процес як взаємодію ультразвукових коливань із рідкими та газоподібними середовищами. При цьому приймемо текстильні прошарки композиту, для яких виконується маловиражене співвідношення довжини зондуючої хвилі до розмірів пор між їх нитками або між їх міжволоконними відстанями.

Спочатку покажемо вирази комплексного коефіцієнту проходження хвиль матеріалу та його модуля, при їхньому нормальному падінні. Це потрібно для подальшого порівняння та отримання кінцевих залежностей для ультразвукових коливань, які падають під кутом до матеріалу. Самі вирази для проходження хвилі при її нормальному падінні на еталонний матеріал запишемо так:

$$W = ReW + jImW = \frac{W_{12}W_{21} \cdot e^{jK_2h}}{1 - V_{21}V_{21} \cdot e^{2jK_2h}},$$
(3.16)

$$\left|W\right| = \sqrt{ReW^2 + ImW^2} \,. \tag{3.17}$$

Залежності (3.16), (3.17) для комплексного коефіцієнту проходження та його модуля з врахуванням вже падіння хвилі під кутом можна подати як:

$$W_{\theta} = ReW_{\theta} + j ImW_{\theta} = \frac{W_{\theta 12}W_{\theta 21} \cdot e^{jK_{2}h}}{1 - V_{\theta 21}V_{\theta 21} \cdot e^{2jK_{2}h}},$$
(3.18)

$$\left|W_{\theta}\right| = \sqrt{ReW_{\theta}^{2} + ImW_{\theta}^{2}}, \qquad (3.19)$$

де  $ReW_{\theta}$ ,  $jImW_{\theta}$  — дійсна та уявна частини комплексного коефіцієнту проходження хвилі під певним кутом падіння  $\theta$ .

Можна записати отриманий вираз (3.19) із застосуванням залежності для модуля коефіцієнту проходження (3.17) та через кут проходження хвилі крізь матеріал  $\theta_2$  ще так:

$$\left|W_{\theta}\right| = \sqrt{ReW^2 + ImW^2} \cdot \cos\theta_2 , \qquad (3.20)$$

Для залежності (3.18) можна представити відповідні часткові коефіцієнти проходження  $W_{\theta 12}$ ,  $W_{\theta 21}$  та відбиття  $V_{\theta 12}$ ,  $V_{\theta 21}$  на відповідних межах середовищ та комплексний коефіцієнт проходження хвиль під кутом  $W_{\theta}$  ще як:

$$W_{\theta 12} = \frac{2Z_1 \cdot \cos\theta_2}{Z_1 \cdot \cos\theta_2 + Z_2 \cdot \cos\theta_1}, \quad V_{\theta 12} = \frac{Z_1 \cdot \cos\theta_2 - Z_2 \cdot \cos\theta_1}{Z_1 \cdot \cos\theta_2 + Z_2 \cdot \cos\theta_1},$$

$$W_{\theta 21} = \frac{2Z_2 \cdot \cos\theta_1}{Z_1 \cdot \cos\theta_2 + Z_2 \cdot \cos\theta_1}, \quad V_{\theta 21} = \frac{Z_2 \cdot \cos\theta_1 - Z_1 \cdot \cos\theta_2}{Z_1 \cdot \cos\theta_2 + Z_2 \cdot \cos\theta_1},$$
(3.21)

$$W_{\theta} = \frac{W_{12}W_{21} \cdot e^{jK_2} \frac{h}{\cos\theta_2}}{1 - V_{21}V_{21} \cdot e^{2jK_2} \frac{h}{\cos\theta_2}},$$
(3.22)

звідки

$$K_2 = \frac{2\pi f}{c_2} + j\alpha_{3.}, \qquad (3.23)$$

де  $\theta_1$  – кут падіння ультразвукової хвилі на композитний матеріал.

Після підстановки залежностей (2.5) і (3.23) у вираз (3.22) та нескладних математичних перетворень комплексний коефіцієнт проходження ультразвукових хвиль під кутом до матеріалу  $W_{\theta}$  можна представити у вигляді:

$$W_{\theta} = 2 \cdot \left( \left( e^{\frac{h\left(-\alpha+j\frac{2\pi f}{c_2}\right)}{\cos\theta_2}} + e^{\frac{h\left(\alpha-j\frac{2\pi f}{c_2}\right)}{\cos\theta_2}} - \left(\frac{h\left(-\alpha+j\frac{2\pi f}{c_2}\right)}{\cos\theta_2} - e^{\frac{h\left(\alpha-j\frac{2\pi f}{c_2}\right)}{\cos\theta_2}} - \left(\frac{h\left(\alpha-j\frac{2\pi f}{c_2}\right)}{\cos\theta_2}\right) \right)^{-1} \right) \right)$$
(3.24)

або

$$W_{\theta} = \left(\cos\left(\frac{h}{\cos\theta_2}\frac{2\pi f}{c_2} + j\frac{h}{\cos\theta_2}\alpha_{3.}\right) - j\left(\frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2}\right) \cdot \sin\left(\frac{h}{\cos\theta_2}\frac{2\pi f}{c_2} + j\frac{h}{\cos\theta_2}\alpha_{3.}\right)\right)^{-1}.$$
(3.25)

Якщо вираз (3.25) розкласти на дійсну та уявну частини, то його можна показати ще так:

$$W_{\theta} = \frac{1 + \alpha_{3.} \left(\frac{Z_{2}}{2Z_{1}} + \frac{Z_{1}}{2Z_{2}}\right) \frac{h}{\cos \theta_{2}}}{\left(1 + \alpha_{3.} \left(\frac{Z_{2}}{2Z_{1}} + \frac{Z_{1}}{2Z_{2}}\right) \frac{h}{\cos \theta_{2}}\right)^{2} + \left(\frac{2\pi f}{c_{2}} \left(\frac{Z_{2}}{2Z_{1}} + \frac{Z_{1}}{2Z_{2}}\right) \frac{h}{\cos \theta_{2}}\right)^{2}} + \frac{2\pi f}{c_{2}} \left(\frac{Z_{2}}{2Z_{1}} + \frac{Z_{1}}{2Z_{2}}\right) \frac{h}{\cos \theta_{2}}}{\left(1 + \alpha_{3.} \left(\frac{Z_{2}}{2Z_{1}} + \frac{Z_{1}}{2Z_{2}}\right) \frac{h}{\cos \theta_{2}}\right)^{2} + \left(\frac{2\pi f}{c_{2}} \left(\frac{Z_{2}}{2Z_{1}} + \frac{Z_{1}}{2Z_{2}}\right) \frac{h}{\cos \theta_{2}}\right)^{2}},$$
(3.26)

де залежність (3.26) для комплексного коефіцієнта проходження  $W_{\theta}$  можна ще представити через величини  $A_{\theta}$ ,  $B_{\theta}$  як:

$$A_{\theta} = 1 + \alpha_{3} \left( \frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2} \right) \frac{h}{\cos\theta_2}, \quad B_{\theta} = \frac{2\pi f}{c_2} \left( \frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2} \right) \frac{h}{\cos\theta_2}, \quad (3.27)$$

$$W_{\theta} = \operatorname{Re} W_{\theta} + j \operatorname{Im} W_{\theta} = \frac{A_{\theta}}{A_{\theta}^{2} + B_{\theta}^{2}} + j \frac{B_{\theta}}{A_{\theta}^{2} + B_{\theta}^{2}}, \qquad (3.28)$$

де враховуючи вираз (3.28) можна показати залежність для комплексного коефіцієнту відбиття V<sub>θ</sub> ультразвукових хвиль від такого матеріалу так:

$$V_{\theta} = 1 - W_{\theta} = ReV_{\theta} + j ImV_{\theta} = \frac{A_{\theta}^2 + B_{\theta}^2 - A_{\theta}}{A_{\theta}^2 + B_{\theta}^2} - j \frac{B_{\theta}}{A_{\theta}^2 + B_{\theta}^2}.$$
(3.29)

При  $\alpha_{3.} = 0$  вираз (3.28) можна переписати ще так:

$$W_{\theta} = \frac{1}{1 + \left(\frac{2\pi f}{c_2}\left(\frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2}\right)\frac{h}{\cos\theta_2}\right)^2} + j\frac{\frac{2\pi f}{c_2}\left(\frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2}\right)\frac{h}{\cos\theta_2}}{1 + \left(\frac{2\pi f}{c_2}\left(\frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2}\right)\frac{h}{\cos\theta_2}\right)^2}, \quad (3.30)$$

а залежність (3.29) можна записати тоді як:

$$V_{\theta} = \frac{\left(\frac{2\pi f}{c_2}\left(\frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2}\right)\frac{h}{\cos\theta_2}\right)^2}{1 + \left(\frac{2\pi f}{c_2}\left(\frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2}\right)\frac{h}{\cos\theta_2}\right)^2} - j\frac{\frac{2\pi f}{c_2}\left(\frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2}\right)\frac{h}{\cos\theta_2}}{1 + \left(\frac{2\pi f}{c_2}\left(\frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2}\right)\frac{h}{\cos\theta_2}\right)^2}, \quad (3.31)$$

коли  $Z_1/Z_2 <<1$  та є малі пори в текстильних прошарках композитного матеріалу, вирази (3.30) та (3.31) можна подати так:

$$W_{\theta} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\pi f \rho_2}{Z_1} \frac{h \cdot \cos v}{\cos \theta_2}\right)^2} + j \frac{\frac{\pi f \rho_2}{Z_1} \frac{h \cdot \cos v}{\cos \theta_2}}{1 + \left(\frac{\pi f \rho_2}{Z_1} \frac{h \cdot \cos v}{\cos \theta_2}\right)^2}, \qquad (3.32)$$

або

$$W_{\theta} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\pi f \rho_2}{Z_1} \frac{h \cdot \cos v}{\cos \theta_2}\right)^2} + j \frac{1}{\frac{Z_1}{\pi f \rho_2} \frac{\cos \theta_2}{h \cdot \cos v} + \frac{\pi f \rho_2}{Z_1} \frac{h \cdot \cos v}{\cos \theta_2}},$$

$$V_{\theta} = \frac{\left(\frac{\pi f \rho_2}{Z_1} \frac{h \cdot \cos v}{\cos \theta_2}\right)^2}{1 + \left(\frac{\pi f \rho_2}{Z_1} \frac{h \cdot \cos v}{\cos \theta_2}\right)^2} - j \frac{\frac{\pi f \rho_2}{Z_1} \frac{h \cdot \cos v}{\cos \theta_2}}{1 + \left(\frac{\pi f \rho_2}{Z_1} \frac{h \cdot \cos v}{\cos \theta_2}\right)^2},$$
(3.33)

або

$$V_{\theta} = \frac{1}{1 + \left(\frac{Z_1}{\pi f \rho_2} \frac{\cos \theta_2}{h \cdot \cos v}\right)^2} - j \frac{1}{\frac{Z_1}{\pi f \rho_2} \frac{\cos \theta_2}{h \cdot \cos v} + \frac{\pi f \rho_2}{Z_1} \frac{h \cdot \cos v}{\cos \theta_2}}.$$

Тоді модулі для відповідних коефіцієнтів проходження  $W_{\theta}$  та відбиття  $V_{\theta}$ ультразвукової хвилі, що падає під кутом до поверхні матеріалу, (враховуючи (3.32) та (3.33)) можна показати як:

$$|W_{\theta}| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\pi f \rho_2}{Z_1} \frac{h \cdot \cos v}{\cos \theta_2}\right)^2}},$$

$$|V_{\theta}| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z_1}{\pi f \rho_2} \frac{\cos \theta_2}{h \cdot \cos v}\right)^2}},$$
(3.34)
(3.35)

Залежності для фази хвиль, що проходять такий матеріал, та хвиль, які відбиваються від нього, можна подати тоді так:

$$\varphi_{W\theta} = \operatorname{arctg}\left(\frac{\pi f \rho_2}{Z_1} \frac{h \cdot \cos v}{\cos \theta_2}\right),\tag{3.36}$$

$$\varphi_{V\theta} = \operatorname{arctg}\left(-\frac{Z_1}{\pi f \rho_2} \frac{\cos\theta_2}{h \cdot \cos\nu}\right),\tag{3.37}$$

Отримані вирази (3.19), (3.34), (3.35), (3.36), (3.37) можна застосовувати, коли йдеться про еталонний двошаровий КТМ без повітряного зазору або іншого дефекту між його складовими із схожими по величині акустичними опорами, де  $\rho_2$  є середньою об'ємною щільністю для нього.

Можна описати відбиття хвилі під кутом до такого еталонного двошарового КТМ, використовуючи акустичний опір для двох середовищ  $Z_{\theta \, sx.}^{(2)}$  та комплексний коефіцієнт відбиття  $V_{\theta}$  ще за допомогою залежностей, відповідно як:

$$Z_{\theta \, \text{ex.}}^{(2)} = \frac{\frac{Z_1}{\cos \theta_1} - j \frac{Z_2}{\cos \theta_2} tg\left(K_2 h\right)}{\frac{Z_2}{\cos \theta_2} - j \frac{Z_1}{\cos \theta_1} tg\left(K_2 h\right)} \cdot \frac{Z_2}{\cos \theta_2}, \tag{3.38}$$

тоді

$$V_{\theta} = \frac{Z_{\theta \, \text{sx.}}^{(2)} \cos \theta_1 - Z_1}{Z_{\theta \, \text{sx.}}^{(2)} \cos \theta_1 + Z_1}.$$
(3.39)

Для спрощення запису наближено можна представити формулу (3.38) та (3.39) ще так:

$$Z_{\theta \, \text{ex.}}^{(2)} = \frac{Z_1 - j Z_2 tg\left(\frac{K_2 h}{\cos \theta_2}\right)}{Z_2 - j Z_1 tg\left(\frac{K_2 h}{\cos \theta_2}\right)} \cdot Z_2, \tag{3.40}$$

тоді

$$V_{\theta} = \frac{Z_{\theta \, ex.}^{(2)} - Z_{1}}{Z_{\theta \, ex.}^{(2)} + Z_{1}}.$$
(3.41)

В основному за допомогою отриманих виразів можна визначати зміну загальної сумарної товщини складових матеріалів, що входять до композиту, а також зміну загальної об'ємної густини матеріалу.

Виходячи з наведеного, можна представити аналогічні залежності для еталонного композитного матеріалу, що складається з двох шарів із акустичними опорами, які сильно відрізняються один від одного ( $Z_2 \neq Z_3$ ). Для цього випадку представимо акустичний опір  $Z_{\theta \, ex.}^{(3)}$  та комплексний коефіцієнт відбиття  $V_{\theta}$  для трьох середовищ і подамо їх так:

$$Z_{\theta \ 6x.}^{(3)} = \left(\frac{Z_1 Z_2}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2} - \frac{Z_1 Z_3}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_3} tg(K_2 h_1) tg(K_3 h_2) - j\left(\left(\frac{Z_2}{\cos \theta_2}\right)^2 tg(K_2 h_1) + \frac{Z_2 Z_3}{\cos \theta_2 \cdot \cos \theta_3} tg(K_3 h_2)\right)\right) \cdot \frac{Z_3}{\cos \theta_3} \times \left(\frac{Z_2 Z_3}{\cos \theta_2 \cdot \cos \theta_3} - \left(\frac{Z_2}{\cos \theta_2}\right)^2 tg(K_2 h_1) tg(K_3 h_2) - j\left(\frac{Z_1 Z_3}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_3} tg(K_2 h_1) + \frac{Z_1 Z_2}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2} tg(K_3 h_2)\right)\right)^{-1},$$

$$(3.42)$$

тоді

$$V_{\theta} = \frac{Z_{\theta \, ex.}^{(3)} - \frac{Z_{1}}{\cos \theta_{1}}}{Z_{\theta \, ex.}^{(3)} + \frac{Z_{1}}{\cos \theta_{1}}}.$$
(3.43)

Враховуючи отриманий вираз (3.43) для еталонного КТМ із акустичними опорами шарів, які сильно відрізняються один від одного, можна показати відбиття хвиль від КТМ, в якому може бути дефект. Такі дефекти можуть бути розшаруванням при поганому приляганні шарів один до одного, їх деформації, а також при температурному впливі на композит в процесі його виробництва. Оскільки текстильні шари композитного матеріалу можуть містити пори, то у такому випадку розшарування повинне мати значно більший розмір за товщиною або за площею дефекту у порівнянні з порами для можливості його детектування за допомогою ультразвукових хвиль.

Розглянемо КТМ з малими розмірами пор в його структурі, якими можна знехтувати. Розшарування, що представляє собою тонкий шар повітря в матеріалі або його неоднорідність, можна описати за допомогою вхідного акустичного опору  $Z_{\theta \, ex}^{(4)}$  для чотирьох середовищ як:

$$Z_{\theta \, \text{first}}^{(4)} = \left(\frac{Z_1 Z_2 Z_3}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot \cos \theta_3} - \frac{Z_1}{\cos \theta_1} \cdot \left(\frac{Z_3}{\cos \theta_3}\right)^2 \cdot tg(K_2 h_1) tg(K_3 h_2) - \frac{Z_1 Z_3 Z_4}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot \cos \theta_4} tg(K_2 h_1) tg(K_4 h_3) - \frac{Z_1 Z_2 Z_4}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot \cos \theta_4} \times tg(K_3 h_2) tg(K_4 h_3) - j \left(\left(\frac{Z_2}{\cos \theta_2}\right)^2 \cdot \frac{Z_3}{\cos \theta_3} \cdot tg(K_2 h_1) + \frac{Z_2}{\cos \theta_2} \cdot \left(\frac{Z_3}{\cos \theta_3}\right)^2 \times tg(K_3 h_2) + \frac{Z_2 Z_3 Z_4}{\cos \theta_2 \cdot \cos \theta_3 \cdot \cos \theta_4} tg(K_4 h_3) - \left(\frac{Z_2}{\cos \theta_2}\right)^2 \cdot \frac{Z_4}{\cos \theta_4} \cdot tg(K_2 h_1) \times tg(K_3 h_2) tg(K_4 h_3) \right) \cdot \left(\frac{Z_2 Z_3 Z_4}{\cos \theta_2 \cdot \cos \theta_3 \cdot \cos \theta_4} - \left(\frac{Z_2}{\cos \theta_2}\right)^2 \cdot \frac{Z_4}{\cos \theta_4} \times tg(K_3 h_2) tg(K_4 h_3) \right) \right) \cdot \left(\frac{Z_1 Z_3 Z_4}{\cos \theta_2 \cdot \cos \theta_3 \cdot \cos \theta_4} - \left(\frac{Z_2}{\cos \theta_2}\right)^2 \cdot \frac{Z_4}{\cos \theta_4} \times tg(K_3 h_2) tg(K_4 h_3) - \left(\frac{Z_2}{\cos \theta_2}\right)^2 \cdot \frac{Z_3}{\cos \theta_3} \cdot tg(K_2 h_1) tg(K_4 h_3) - \frac{Z_2}{\cos \theta_2} \cdot \left(\frac{Z_3}{\cos \theta_3}\right)^2 \times tg(K_3 h_2) tg(K_4 h_3) - j \left(\frac{Z_1 Z_3 Z_4}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_3 \cdot \cos \theta_4} \cdot tg(K_2 h_1) + \frac{Z_1 Z_2 Z_4}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot \cos \theta_4} \times tg(K_3 h_2) tg(K_4 h_3) - j \left(\frac{Z_1 Z_3 Z_4}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_3 \cdot \cos \theta_4} \cdot tg(K_2 h_1) + \frac{Z_1 Z_2 Z_4}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot \cos \theta_4} \times tg(K_3 h_2) + \frac{Z_1 Z_2 Z_3}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot \cos \theta_3} \cdot tg(K_4 h_3) - \frac{Z_1}{\cos \theta_1} \cdot \left(\frac{Z_3}{\cos \theta_3}\right)^2 tg(K_2 h_1) \times tg(K_3 h_2) tg(K_4 h_3) - tg(K_4 h_3) - tg(K_4 h_3) - tg(K_3 h_2) + \frac{Z_1 Z_2 Z_3}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot \cos \theta_3} \cdot tg(K_4 h_3) - tg(K_3 h_3) - tg(K_3 h_2) tg(K_4 h_3) - tg(K_4 h_4) - tg(K_4 h_4) - tg(K_4 h_4) - tg(K_4 h$$

де для цього випадку (аналогічно до розглянутого раніше випадку при нормальному падінні хвилі):

*h*<sub>l</sub> – товщина матеріалу до дефекту;

h<sub>2</sub> – товщина дефекту в матеріалі;

h<sub>3</sub> – товщина шару матеріалу, який знаходиться вище дефекту;

Z<sub>2</sub> – акустичний опір матеріалу до дефекту;

Z<sub>3</sub> – акустичний опір прошарку дефекту;

Z<sub>4</sub> – акустичний опір шару матеріалу, який знаходиться вище дефекту;

 $K_2$  – хвильове число для шару матеріалу до дефекту;

*К*<sub>3</sub> – хвильове число для прошарку дефекту;

*К*<sub>4</sub> – хвильове число для шару матеріалу, який знаходиться вище дефекту;

 $\theta_3$  – кут проходження хвилі крізь прошарок дефекту;

 $\theta_4$  – кут проходження хвилі крізь шар матеріалу вище дефекту.

З врахуванням виразу (3.44) комплексний коефіцієнт відбиття V<sub>0</sub> можна показати так:

$$V_{\theta} = \frac{Z_{\theta \, ex.}^{(4)} - \frac{Z_{1}}{\cos \theta_{1}}}{Z_{\theta \, ex.}^{(4)} + \frac{Z_{1}}{\cos \theta_{1}}}.$$
(3.45)

Для того, щоб отримати вираз для модуля відбиття  $|V_{\theta}|$ , необхідно з виразу (3.45) виділити дійсну  $ReV_{\theta}$  та уявну  $ImV_{\theta}$  частини, але спочатку зробити відповідні перетворення, які покажемо нижче:

$$C_{\theta} = \frac{Z_4}{\cos \theta_4} \cdot \left( \left( \frac{Z_2}{\cos \theta_2} \right)^2 \cdot \frac{Z_3}{\cos \theta_3} \cdot tg(K_2h_1) + \frac{Z_2}{\cos \theta_2} \cdot \left( \frac{Z_3}{\cos \theta_3} \right)^2 \times tg(K_3h_2) + \frac{Z_2 Z_3 Z_4}{\cos \theta_2 \cdot \cos \theta_3 \cdot \cos \theta_4} \cdot tg(K_4h_3) - \left( \frac{Z_2}{\cos \theta_2} \right)^2 \cdot \frac{Z_4}{\cos \theta_4} \cdot tg(K_2h_1) \times tg(K_3h_2) tg(K_4h_3) \right) - \frac{Z_1}{\cos \theta_1} \cdot \left( \frac{Z_1 Z_3 Z_4}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_3 \cdot \cos \theta_4} \cdot tg(K_2h_1) + \frac{Z_1 Z_2 Z_3}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot \cos \theta_4} \cdot tg(K_3h_2) + \frac{Z_1 Z_2 Z_3}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot \cos \theta_3} \cdot tg(K_4h_3) - \left( \frac{Z_1}{\cos \theta_1} \cdot \left( \frac{Z_2}{\cos \theta_2} \right)^2 \cdot tg(K_2h_1) tg(K_3h_2) tg(K_4h_3) \right) \right);$$

$$D_{\theta} = \frac{Z_4}{\cos \theta_4} \cdot \left( \left( \frac{Z_2}{\cos \theta_2} \right)^2 \cdot \frac{Z_3}{\cos \theta_3} \cdot tg(K_2h_1) + \frac{Z_2}{\cos \theta_2} \cdot \left( \frac{Z_3}{\cos \theta_3} \right)^2 \times tg(K_3h_2) + \frac{Z_2 Z_3 Z_4}{\cos \theta_4} \cdot tg(K_4h_3) - \left( \frac{Z_2}{\cos \theta_2} \right)^2 \cdot \frac{Z_4}{\cos \theta_4} \cdot tg(K_2h_1) \times tg(K_3h_2) tg(K_4h_3) \right) \right];$$

$$(3.46)$$

$$\times tg(K_3h_2) tg(K_4h_3) + \frac{Z_1}{\cos \theta_1} \cdot \left( \frac{Z_1 Z_3 Z_4}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_3 \cdot \cos \theta_4} \cdot tg(K_2h_1) + \frac{Z_1 Z_2 Z_3}{\cos \theta_3} \cdot tg(K_4h_3) - \left( \frac{Z_1 Z_3 Z_4}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot \cos \theta_3} \cdot tg(K_4h_3) - \left( \frac{Z_1 Z_3 Z_4}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_3 \cdot \cos \theta_4} \cdot tg(K_2h_1) + \frac{Z_1 Z_2 Z_3}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_3 \cdot \cos \theta_4} \cdot tg(K_2h_1) + \frac{Z_1 Z_2 Z_4}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot \cos \theta_3} \cdot tg(K_4h_3) - \left( \frac{Z_1 Z_3 Z_4}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot \cos \theta_3} \cdot tg(K_4h_3) - \left( \frac{Z_1 Z_2 Z_3}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot \cos \theta_3} \cdot tg(K_4h_3) - \frac{Z_1 Z_2 Z_3}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot \cos \theta_3} \cdot tg(K_4h_3) - \left( \frac{Z_1 Z_2 Z_3}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot \cos \theta_3} \cdot tg(K_4h_3) - \frac{Z_1}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot \cos \theta_3} \cdot tg(K_4h_3) - \frac{Z_1}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot \cos \theta_3} \cdot tg(K_4h_3) - \frac{Z_1}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot \cos \theta_3} \cdot tg(K_4h_3) - \frac{Z_1}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot \cos \theta_3} \cdot tg(K_4h_3) - \frac{Z_1}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot \cos \theta_3} \cdot tg(K_4h_3) - \frac{Z_1}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot \cos \theta_3} \cdot tg(K_4h_3) - \frac{Z_1}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot \cos \theta_3} \cdot tg(K_4h_3) - \frac{Z_1}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot \cos \theta_3} \cdot tg(K_4h_3) - \frac{Z_1}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot \cos \theta_3} \cdot tg(K_4h_3) - \frac{Z_1}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot \cos \theta_3} \cdot tg(K_4h_3) - \frac{Z_1}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot \cos \theta_3} \cdot tg(K_4h_3) - \frac{Z_1}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot \cos \theta_3} \cdot tg(K_4h_3) - \frac{Z_1}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot \cos \theta_3} \cdot tg(K_4h_3) - \frac{Z_1}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2$$

$$-\frac{Z_1}{\cos\theta_1}\cdot\left(\frac{Z_3}{\cos\theta_3}\right)^2\cdot tg(K_2h_1)tg(K_3h_2)tg(K_4h_3)\bigg);$$

$$E_{\theta} = \frac{Z_4}{\cos \theta_4} \cdot \left( \frac{Z_1 Z_2 Z_3}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot \cos \theta_3} - \frac{Z_1}{\cos \theta_1} \cdot \left( \frac{Z_3}{\cos \theta_3} \right)^2 \cdot tg(K_2 h_1) tg(K_3 h_2) - \frac{Z_1 Z_3 Z_4}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_3 \cdot \cos \theta_4} \cdot tg(K_2 h_1) tg(K_4 h_3) - \frac{Z_1 Z_2 Z_4}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot \cos \theta_4} \cdot tg(K_3 h_2) \times \right)$$

$$\times tg(K_4h_3)) - \frac{Z_1}{\cos\theta_1} \cdot \left(\frac{Z_2Z_3Z_4}{\cos\theta_2 \cdot \cos\theta_3 \cdot \cos\theta_4} - \left(\frac{Z_2}{\cos\theta_2}\right)^2 \cdot \frac{Z_4}{\cos\theta_4} \times tg(K_2h_1)tg(K_3h_2) - \left(\frac{Z_2}{\cos\theta_2}\right)^2 \cdot \frac{Z_3}{\cos\theta_3} \cdot tg(K_2h_1)tg(K_4h_3) - \frac{Z_2}{\cos\theta_2} \times \left(\frac{Z_3}{\cos\theta_3}\right)^2 \cdot tg(K_3h_2)tg(K_4h_3)\right);$$

$$\begin{split} F_{\theta} &= \frac{Z_4}{\cos \theta_4} \cdot \left( \frac{Z_1 Z_2 Z_3}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot \cos \theta_3} - \frac{Z_1}{\cos \theta_1} \cdot \left( \frac{Z_3}{\cos \theta_3} \right)^2 \cdot tg(K_2 h_1) tg(K_3 h_2) - \frac{Z_1 Z_3 Z_4}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_3 \cdot \cos \theta_4} \cdot tg(K_2 h_1) tg(K_4 h_3) - \frac{Z_1 Z_2 Z_4}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot \cos \theta_4} \cdot tg(K_3 h_2) \times \\ &\times tg(K_4 h_3)) + \frac{Z_1}{\cos \theta_1} \cdot \left( \frac{Z_2 Z_3 Z_4}{\cos \theta_2 \cdot \cos \theta_3 \cdot \cos \theta_4} - \left( \frac{Z_2}{\cos \theta_2} \right)^2 \cdot \frac{Z_4}{\cos \theta_4} \times \\ &\times tg(K_2 h_1) tg(K_3 h_2) - \left( \frac{Z_2}{\cos \theta_2} \right)^2 \cdot \frac{Z_3}{\cos \theta_3} \cdot tg(K_2 h_1) tg(K_4 h_3) - \frac{Z_2}{\cos \theta_2} \times \\ &\times \left( \frac{Z_3}{\cos \theta_3} \right)^2 \cdot tg(K_3 h_2) tg(K_4 h_3) \right). \end{split}$$

У випадку коли частини складових шарів мають спільну межу і є пористими матеріалами, то ультразвукова хвиля може не заломлюватись при падінні під кутом, проходячи цю межу. Це відбувається тому, що більша частина ультразвукового сигналу може оминати самі нитки матеріалу. Тому такі складові шари композиту із значними порами можна розглядати як такі, що

наближаються до газових середовищ. Для розрахунку таких КТМ та складових шарів з рідких розчинів або розплавів полімерів композиту (рис. 3.1) з врахуванням (3.46), якщо зробити певну заміну та деякі математичні перетворення, можна показати залежність (3.45) ще так:

$$V_{\theta} = \frac{C_{\theta} \cdot D_{\theta} + E_{\theta} \cdot F_{\theta} + j(D_{\theta} \cdot E_{\theta} - C_{\theta} \cdot F_{\theta})}{D_{\theta}^{2} + F_{\theta}^{2}},$$
(3.47)

або

$$V_{\theta} = \frac{C_{\theta} \cdot D_{\theta} + E_{\theta} \cdot F_{\theta}}{D_{\theta}^{2} + F_{\theta}^{2}} + j \frac{D_{\theta} \cdot E_{\theta} - C_{\theta} \cdot F_{\theta}}{D_{\theta}^{2} + F_{\theta}^{2}}, \qquad (3.48)$$

а сам модуль можна тоді представити так:

$$\left|V_{\theta}\right| = \sqrt{\frac{\left(C_{\theta} \cdot D_{\theta} + E_{\theta} \cdot F_{\theta}\right)^{2} + \left(D_{\theta} \cdot E_{\theta} - C_{\theta} \cdot F_{\theta}\right)^{2}}{\left(D_{\theta}^{2} + F_{\theta}^{2}\right)^{2}}}.$$
(3.49)

звідки можна отримати наступний вираз для комплексного коефіцієнта проходження  $W_{\theta}$  хвилі під кутом до матеріалу з дефектом ще так:

$$W_{\theta} = \frac{D_{\theta} (D_{\theta} - C_{\theta}) + F_{\theta} (F_{\theta} - E_{\theta})}{D_{\theta}^{2} + F_{\theta}^{2}} - j \frac{D_{\theta} \cdot E_{\theta} - C_{\theta} \cdot F_{\theta}}{D_{\theta}^{2} + F_{\theta}^{2}}, \qquad (3.50)$$

а сам модуль можна представити тоді як:

$$|W_{\theta}| = \sqrt{\frac{(D_{\theta}(D_{\theta} - C_{\theta}) + F_{\theta}(F_{\theta} - E_{\theta}))^{2} + (D_{\theta} \cdot E_{\theta} - C_{\theta} \cdot F_{\theta})^{2}}{(D_{\theta}^{2} + F_{\theta}^{2})^{2}}}.$$
 (3.51)

коли  $Z_1 = Z_3$ ,  $Z_2 = Z_4$ ,  $h_1 = h_3$  тоді представлені залежності (3.46), (3.49) та (3.51) можна показати ще так:

$$C_{\theta} = 2 \left( \frac{Z_1}{\cos \theta_1} \cdot \left( \frac{Z_2}{\cos \theta_2} \right)^3 - \left( \frac{Z_1}{\cos \theta_1} \right)^3 \frac{Z_2}{\cos \theta_2} \right) tg(K_2 h_1) + \left( \left( \frac{Z_1}{\cos \theta_1} \right)^4 - \left( \frac{Z_2}{\cos \theta_2} \right)^4 \right) tg(K_1 h_2) \cdot \left( tg(K_2 h_1) \right)^2;$$

$$D_{\theta} = 2 \left( \frac{Z_1}{\cos \theta_1} \cdot \left( \frac{Z_2}{\cos \theta_2} \right)^3 + \left( \frac{Z_1}{\cos \theta_1} \right)^3 \frac{Z_2}{\cos \theta_2} \right) tg(K_2 h_1) + \left( 2 \left( \frac{Z_1}{\cos \theta_1} \right)^2 \left( \frac{Z_2}{\cos \theta_2} \right)^2 - \left( \left( \frac{Z_1}{\cos \theta_1} \right)^4 + \left( \frac{Z_2}{\cos \theta_2} \right)^4 \right) \cdot \left( tg(K_2 h_1) \right)^2 \right) tg(K_1 h_2);$$
(3.52)

 $E_{\theta} = 0;$ 

$$F_{\theta} = 2 \left( \left( \frac{Z_1}{\cos \theta_1} \right)^2 \left( \frac{Z_2}{\cos \theta_2} \right)^2 \left( 1 - \left( tg(K_2 h_1) \right)^2 \right) - \left( \frac{Z_1}{\cos \theta_1} \cdot \left( \frac{Z_2}{\cos \theta_2} \right)^3 + \left( \frac{Z_1}{\cos \theta_1} \right)^3 \frac{Z_2}{\cos \theta_2} \right) \cdot tg(K_1 h_2) \cdot tg(K_2 h_1) \right),$$

$$|V_{\theta}| = \sqrt{\frac{(C_{\theta} \cdot D_{\theta})^{2} + (C_{\theta} \cdot F_{\theta})^{2}}{(D_{\theta}^{2} + F_{\theta}^{2})^{2}}}.$$
(3.53)

$$|W_{\theta}| = \sqrt{\frac{\left(D_{\theta}(D_{\theta} - C_{\theta}) + F_{\theta}^{2}\right)^{2} + (C_{\theta} \cdot F_{\theta})^{2}}{\left(D_{\theta}^{2} + F_{\theta}^{2}\right)^{2}}}.$$
(3.54)

Виходячи з отриманих виразів (3.43), (3.48), (3.49), (3.50) та (3.51), можна отримати різницю між амплітудами хвиль з опорного каналу (хвилі, які взаємодіяли з еталонним КТМ при його виготовленні) та хвиль з

контрольованого каналу (хвилі, що взаємодіють з КТМ з можливим дефектом в його структурі в процесі виробництва), а також розрахувати і фазовий зсув між цими хвилями. Наступні залежності цих величин, коли  $Z_1 \neq Z_3$ ,  $Z_2 \neq Z_4$ ,  $h_1 \neq h_3$  та розмірами пор в текстильних прошарках композитного матеріалу можна знехтувати, подамо тоді так:

$$\Delta |V| = \sqrt{\frac{(C_{\theta} \cdot D_{\theta} + E_{\theta} \cdot F_{\theta})^{2} + (D_{\theta} \cdot E_{\theta} - C_{\theta} \cdot F_{\theta})^{2}}{(D_{\theta}^{2} + F_{\theta}^{2})^{2}}} - \left|\frac{Z_{\theta \, ex.}^{(3)} - Z_{1}}{Z_{\theta \, ex.}^{(3)} + Z_{1}}\right|,$$
(3.55)

$$\Delta |W| = \sqrt{\frac{(D_{\theta}(D_{\theta} - C_{\theta}) + F_{\theta}(F_{\theta} - E_{\theta}))^{2} + (D_{\theta} \cdot E_{\theta} - C_{\theta} \cdot F_{\theta})^{2}}{(D_{\theta}^{2} + F_{\theta}^{2})^{2}}} - \frac{(3.56)}{-\left|1 - \frac{Z_{\theta ex.}^{(3)} - Z_{1}}{Z_{\theta ex.}^{(3)} + Z_{1}}\right|}$$

$$\Delta \varphi_{V} = \operatorname{arctg}\left(\frac{D_{\theta} \cdot E_{\theta} - C_{\theta} \cdot F_{\theta}}{C_{\theta} \cdot D_{\theta} + E_{\theta} \cdot F_{\theta}}\right) - \operatorname{arctg}\left(\frac{D_{\theta e} \cdot E_{\theta e} - C_{\theta e} \cdot F_{\theta e}}{C_{\theta e} \cdot D_{\theta e} + E_{\theta e} \cdot F_{\theta e}}\right),$$
(3.57)

де

$$C_{\theta e} = \frac{Z_4}{\cos \theta_4} \cdot \left( \left( \frac{Z_2}{\cos \theta_2} \right)^2 \cdot \frac{Z_3}{\cos \theta_3} \cdot tg(K_2h_1) + \frac{Z_2 Z_3 Z_4}{\cos \theta_2 \cdot \cos \theta_3 \cdot \cos \theta_4} \times g(K_4h_3) \right) - \frac{Z_1}{\cos \theta_1} \cdot \left( \frac{Z_1 Z_3 Z_4}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_3 \cdot \cos \theta_4} tg(K_2h_1) + \frac{Z_1 Z_2 Z_3}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot \cos \theta_3} tg(K_4h_3) \right);$$

$$\begin{split} D_{\theta e} &= \frac{Z_4}{\cos \theta_4} \cdot \left( \left( \frac{Z_2}{\cos \theta_2} \right)^2 \cdot \frac{Z_3}{\cos \theta_3} \cdot tg(K_2 h_1) + \frac{Z_2 Z_3 Z_4}{\cos \theta_2 \cdot \cos \theta_3 \cdot \cos \theta_4} \times tg(K_4 h_3) \right) + \frac{Z_1}{\cos \theta_1} \cdot \left( \frac{Z_1 Z_3 Z_4}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_3 \cdot \cos \theta_4} tg(K_2 h_1) + \frac{Z_1 Z_2 Z_3}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot \cos \theta_3} tg(K_4 h_3) \right); \end{split}$$

$$E_{\theta e} = \frac{Z_4}{\cos \theta_4} \cdot \left( \frac{Z_1 Z_2 Z_3}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot \cos \theta_3} - \frac{Z_1 Z_3 Z_4}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_3 \cdot \cos \theta_4} \times tg(K_2 h_1) \cdot tg(K_4 h_3) \right) - Z_1 \cdot \left( \frac{Z_2 Z_3 Z_4}{\cos \theta_2 \cdot \cos \theta_3 \cdot \cos \theta_4} - \left( \frac{Z_2}{\cos \theta_2} \right)^2 \cdot \frac{Z_3}{\cos \theta_3} \times tg(K_2 h_1) \cdot tg(K_4 h_3) \right);$$

$$F_{\theta e} = \frac{Z_4}{\cos \theta_4} \cdot \left( \frac{Z_1 Z_2 Z_3}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot \cos \theta_3} - \frac{Z_1 Z_3 Z_4}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_3 \cdot \cos \theta_4} \times tg(K_2 h_1) \cdot tg(K_4 h_3) \right) + Z_1 \cdot \left( \frac{Z_2 Z_3 Z_4}{\cos \theta_2 \cdot \cos \theta_3 \cdot \cos \theta_4} - \left( \frac{Z_2}{\cos \theta_2} \right)^2 \cdot \frac{Z_3}{\cos \theta_3} \times tg(K_2 h_1) \cdot tg(K_4 h_3) \right),$$

$$\Delta \varphi_{W} = \operatorname{arctg} \left( \frac{D_{\theta} \cdot E_{\theta} - C_{\theta} \cdot F_{\theta}}{D_{\theta} (D_{\theta} - C_{\theta}) + F_{\theta} (F_{\theta} - E_{\theta})} \right) - \operatorname{arctg} \left( \frac{D_{\theta e} \cdot E_{\theta e} - C_{\theta e} \cdot F_{\theta e}}{D_{\theta e} (D_{\theta e} - C_{\theta e}) + F_{\theta e} (F_{\theta e} - E_{\theta e})} \right).$$
(3.58)

Якщо розміри пор в текстильних прошарках композиту необхідно враховувати, то у виразах (3.55), (3.56), (3.57) та (3.58) при підстановці величин  $K_2h_1$  та  $K_4h_3$  потрібно замінити їх на  $K_2h_1 \cdot cosv_1$  та  $K_4h_3 \cdot cosv_3$  відповідно. Величини  $cosv_1$  та  $cosv_3$  характеризують вплив розмірів пор першого та другого прошарку текстильних матеріалів на проходження результуючого ультразвукового сигналу крізь їх структури та відбиття сигналу від них відповідно.

У випадку, коли  $Z_1 = Z_3$ ,  $Z_2 = Z_4$ ,  $h_1 = h_3$  та розмірами пор в текстильних прошарках композитного матеріалу можна знехтувати, використаємо вирази (3.34), (3.35), (3.36), (3.37), (3.41), (3.53) та (3.54) і подамо наступні залежності тоді так:

$$\Delta |V| = \sqrt{\frac{(C_{\theta} \cdot D_{\theta})^{2} + (C_{\theta} \cdot F_{\theta})^{2}}{(D_{\theta}^{2} + F_{\theta}^{2})^{2}}} - \left|\frac{Z_{\theta \, ex.}^{(2)} - Z_{1}}{Z_{\theta \, ex.}^{(2)} + Z_{1}}\right|,\tag{3.59}$$

або

$$\Delta |V| \approx \sqrt{\frac{(C_{\theta} \cdot D_{\theta})^{2} + (C_{\theta} \cdot F_{\theta})^{2}}{(D_{\theta}^{2} + F_{\theta}^{2})^{2}}} - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z_{1}}{\pi f \rho_{2}} \frac{\cos \theta_{2}}{2h_{1}}\right)^{2}}},$$
  
$$\Delta |W| = \sqrt{\frac{\left(D_{\theta}(D_{\theta} - C_{\theta}) + F_{\theta}^{2}\right)^{2} + (C_{\theta} \cdot F_{\theta})^{2}}{(D_{\theta}^{2} + F_{\theta}^{2})^{2}}} - \left|1 - \frac{Z_{\theta ex.}^{(2)} - Z_{1}}{Z_{\theta ex.}^{(2)} + Z_{1}}\right|,$$
(3.60)

або

$$\Delta |W| \approx \sqrt{\frac{\left(D_{\theta}(D_{\theta} - C_{\theta}) + F_{\theta}^{2}\right)^{2} + \left(C_{\theta} \cdot F_{\theta}\right)^{2}}{\left(D_{\theta}^{2} + F_{\theta}^{2}\right)^{2}}} - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\pi f \rho_{2}}{Z_{1}} \frac{2h_{1}}{\cos \theta_{2}}\right)^{2}}},$$
$$\Delta \varphi_{V} = \operatorname{arctg}\left(-\frac{C_{\theta} \cdot F_{\theta}}{C_{\theta} \cdot D_{\theta}}\right) - \operatorname{arctg}\left(-\frac{C_{\theta} e \cdot F_{\theta}e}{C_{\theta} e \cdot D_{\theta}e}\right), \tag{3.61}$$

або

$$\Delta \varphi_V \approx \operatorname{arctg}\left(-\frac{C_{\theta} \cdot F_{\theta}}{C_{\theta} \cdot D_{\theta}}\right) - \operatorname{arctg}\left(-\frac{Z_1 \cos \theta_2}{\pi f \rho_2 2h_1}\right),$$

де

$$\begin{split} C_{\theta e} &= 2 \Biggl( \frac{Z_1}{\cos \theta_1} \cdot \left( \frac{Z_2}{\cos \theta_2} \right)^3 - \left( \frac{Z_1}{\cos \theta_1} \right)^3 \frac{Z_2}{\cos \theta_2} \Biggr) tg(K_2 h_1); \\ D_{\theta e} &= 2 \Biggl( \frac{Z_1}{\cos \theta_1} \cdot \left( \frac{Z_2}{\cos \theta_2} \right)^3 + \left( \frac{Z_1}{\cos \theta_1} \right)^3 \frac{Z_2}{\cos \theta_2} \Biggr) tg(K_2 h_1); \\ F_{\theta e} &= 2 \Biggl( \frac{Z_1 Z_2}{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2} \Biggr)^2 \cdot \Bigl( 1 - (tg(K_2 h_1))^2 \Bigr), \end{split}$$

$$\Delta \varphi_{W} = \operatorname{arctg}\left(\frac{C_{\theta} \cdot F_{\theta}}{D_{\theta}(D_{\theta} - C_{\theta}) + F_{\theta}^{2}}\right) - \operatorname{arctg}\left(\frac{C_{\theta e} \cdot F_{\theta e}}{D_{\theta e}(D_{\theta e} - C_{\theta e}) + F_{\theta e}^{2}}\right), \quad (3.62)$$

або

$$\Delta \varphi_W \approx \operatorname{arctg}\left(\frac{C_{\theta} \cdot F_{\theta}}{D_{\theta}(D_{\theta} - C_{\theta}) + F_{\theta}^2}\right) - \operatorname{arctg}\left(\frac{\pi f \rho_2 2h_1}{Z_1 \cos \theta_2}\right),$$

Якщо враховувати пори, що будуть однакові за розмірами для двох прошарків текстильного матеріалу, то в такому випадку у виразах (3.59), (3.60), (3.61) та (3.62) величини  $K_2h_1$  та  $\pi f \rho_2 2h_1$  потрібно замінити на  $K_2h_1 \cdot cosv$  та  $\pi f \rho_2 2h_1 \cdot cosv$  відповідно. Величина cosv характеризує вплив розмірів пор першого та другого прошарку текстильних матеріалів на проходження результуючого ультразвукового сигналу крізь їх структури та відбиття сигналу від них.

Проаналізувавши отримані вирази та прийнявши кут падіння  $\theta_1 = 0$  для хвиль з частотою  $f = 75 \kappa \Gamma \mu$ , що взаємодіють з композитним матеріалом, який складається з двох плоских шарів без пор із схожими акустичними опорами  $Z_2 \approx Z_4 = 1893728 \kappa_{e} \cdot m^{-2} \cdot c^{-1}$  (підібрано для спрощення побудови моделей), показано на рис.3.2,а та на рис.3.4,а залежності модулів комплексних коефіцієнтів відбиття  $|V_{\partial e \phi}|$  та проходження  $|W_{\partial e \phi}|$  ультразвукових хвиль від товщини h2 прошарку повітря при різних товщинах h1, h3 прошарків складових композиту. На рис.3.2,6 та на рис.3.4,6 представлено залежності величин різниці  $\Delta |V|$  співвідношень відбитих хвиль та різниці  $\Delta |W|$  для хвиль, що пройшли композитний матеріал, від товщини прошарку дефекту h2 при  $h_1 = h_3 = 1.mm$ . Також побудовані поверхні, які показують залежності  $\Delta |V|$  та  $\Delta |W|$  від товщини h2 прошарку дефекту та від однакової зміни товщин h1, h3, що представлені на рис.3.3, рис.3.5 та рис.3.6.



a



Рис. 3.1. Проходження ультразвукових хвиль крізь різні КТМ: а – нормальне падіння хвиль на КТМ з наявним дефектом; б – падіння хвиль під кутом до двошарового композитного матеріалу з наявним дефектом



б

Рис. 3.2. Залежності амплітудних співвідношень хвиль  $|V_{\partial e\phi}|_1$ ,  $|V_{\partial e\phi}|_2$  та різниці  $\Delta |V|$  співвідношень відбитих хвиль від товщини прошарку дефекту  $h_2$ , мкм :

а – залежності  $|V_{\partial e \phi}|_1$ ,  $|V_{\partial e \phi}|_2$  від товщини прошарку дефекту  $h_2$ , *мкм*; б – залежність  $\Delta |V|$  від товщини прошарку дефекту  $h_2$ , *мкм* при  $h_1 = h_3 = 1$  *мм* 



Рис. 3.3. Залежність різниці  $\Delta |V|$  амплітудних співвідношень хвиль, що відбилися від контрольованого та еталонного композитних матеріалів до падаючих коливань, від товщини прошарку дефекту  $h_2$ , *мкм* та від товщин шарів складових композиту, які змінюються однаково за величиною  $h_1 = h_3$ , *мм* (показаний діапазон для  $h_1 = h_3$  від 1 мм до 1,6 мм)



Рис. 3.4. Залежності амплітудних співвідношень ультразвукових хвиль  $|W_{\partial e\phi}|_1$ ,  $|W_{\partial e\phi}|_2$  та різниці  $\Delta |W|$  співвідношень хвиль, що пройшли матеріал, від товщини прошарку дефекту  $h_2$ , мкм :

а – залежності  $|W_{\partial e\phi}|_1$ ,  $|W_{\partial e\phi}|_2$  від товщини прошарку дефекту  $h_2$ , *мкм*; б – залежність  $\Delta |W|$  від товщини прошарку дефекту  $h_2$ , *мкм* при  $h_1 = h_3 = 1$  *мм* 



Рис. 3.5. Залежність різниці  $\Delta |W|$  амплітудних співвідношень хвиль, що пройшли контрольований та еталонний композитні матеріали до падаючих коливань, від товщини прошарку дефекту  $h_2$ , *мкм* та від товщин шарів складових композиту, які змінюються однаково за величиною  $h_1 = h_3$ , *мм* 

(показаний діапазон для  $h_1 = h_3$  від 0,1 мм до 1,0 мм)



Рис. 3.6. Вид зверху залежності різниці  $\Delta |W|$  від товщини прошарку дефекту  $h_2$ , *мкм* та від товщин шарів складових композиту, які змінюються однаково за величиною  $h_1 = h_3$ , *мм* (показані максимуми різниці  $\Delta |W|$  та їх розташування)

З наведених рисунків можна побачити, що для контролю наявності дефектів у композиційних матеріалах малої товщини, які складаються з двох суцільних плоских шарів полімеру, або для контролю окремих складових частин багатошарового композиту, потрібно використовувати ультразвукові прилади з комутаційно-модуляційним перетворенням вимірювальних сигналів. Шe необхідністю малі зміни амплітуд пояснюється визначати величини ультразвукових хвиль, що взаємодіють з контрольованим композитним матеріалом, відносно амплітуди хвиль, які взаємодіяли з еталонним матеріалом. 3 рис. 3.2 та рис. 3.4 можна побачити, що для контролю композиційних двошарових матеріалів без пор з малою товщиною на наявність розшарування між складовими композиту, доцільно застосовувати ультразвукові хвилі, які проходять матеріал. На рис. 3.3 та рис. 3.5 видно, що параметри  $\Delta |V|$  та  $\Delta |W|$ значно можуть відрізнятися за своєю величиною. Тому на практиці для контролю композитних матеріалів без пор з малою товщиною доцільно використовувати ультразвукові хвилі, які пройшли матеріал, оскільки їхня амплітуда зазнає більших змін від зміни розміру дефекту ніж амплітуда відбитих від матеріалу хвиль, що може вплинути на збільшення чутливості вимірювальної системи. При цьому необхідно налаштовувати певну частоту ультразвукових хвиль, в залежності від товщини складових шарів композиту та товщини можливого розшарування, для збільшення або регулювання чутливості вимірювальної системи. Це дасть змогу створювати прилади, що зможуть проводити ефективний моніторинг багатошарових виробів без наскрізних пор в процесі їх виробництва. Розглянемо й інший крайній випадок для композитних матеріалів, коли між двома пористими текстильними шарами існує прошарок повітря, який значний за площею або за товщиною у порівнянні з розмірами самих наскрізних пор матеріалу. Приймемо за однакові розміри пор у всьому композиті. На рис.3.7 можна побачити як міняються фазові зсуви  $\Delta \phi_W$  та  $\Delta \phi_V$  (при  $\theta_1 = 0$ ) для композиту без пор, а також як ці параметри змінюються за величиною для пористих композитів.



Рис. 3.7. Залежності фазових зсувів  $\Delta \varphi_W$ , <sup>0</sup> та  $\Delta \varphi_V$ , <sup>0</sup> зондуючих хвиль у матеріалі, що контролюється, відносно коливань в еталонному матеріалі, від товщини прошарку дефекту  $h_2$ , *мкм* (кут падіння хвиль  $\theta_1 = 0$ ):

а – залежності  $\Delta \varphi_W$ , <sup>0</sup>,  $\Delta \varphi_V$ , <sup>0</sup> від товщини прошарку дефекту  $h_2$ , *м* ( $h_1 = h_3 = 1$  мм для плоских шарів складових композиту без пор); б – залежності  $\Delta \varphi_W$ , <sup>0</sup>,  $\Delta \varphi_V$ , <sup>0</sup> від товщини прошарку дефекту  $h_2$ , мкм ( $h_1 = h_3 = 1$  мм для текстильних шарів композиту з порами при cosv = 0,002) Зміна фазових зсувів  $\Delta \phi_W$  та  $\Delta \phi_V$  для зондуючих хвиль у пористому матеріалі пояснюється збільшенням пропускання частини ультразвукових хвиль через повітря пор та прошарок дефекту з оминанням самих ниток матеріалу.

Залежності величин, які характеризують зміну проходження  $\Delta |W|$  та відбиття  $\Delta |V|$  ультразвукових хвиль від двох пористих шарів композиту з прошарком повітря відносно такого ж матеріалу без дефекту (при куті падіння коливань  $\theta_1 = 10^0$ ) від параметрів  $h_2$  та *cosv*, показані на рис. 3.8 і рис.3.9. З цих рисунків видно, що навіть при зменшенні розмірів пор (cosv змінюється в діапазоні від 0 до 0,002, який характеризує собою зміну розмірів пор) в шарах композитного матеріалу, але при збільшенні товщини прошарку повітря (h2 змінюється від 0 до 4 мкм) амплітуда відбитих ультразвукових хвиль від композиту все одно буде зменшуватись. Для хвиль, які проходять крізь такий композит, їхня амплітуда зменшується також відносно амплітуди коливань, що проходять еталонний матеріал. Це можна пояснити розсіюванням частини хвиль між волокнами композиту та згасанні їх в повітряних проміжках наскрізних пор та дефекту. Різниця  $\Delta |W|$  більша за  $\Delta |V|$ , що говорить про доцільність використання ультразвукових хвиль, які проходять матеріал, для зондування та контролю пористих шарів композиту. Проходження ультразвукових хвиль для наведених матеріалів збільшується відносно суцільних шарів складових композиту з такою ж загальною товщиною в 2 мм та з однаковим дефектом. Такий випадок показано на рис. 3.10 (при куті падіння коливань  $\theta_1 = 10^0$ ), тоді різниця  $\Delta |W|$  за модулем буде меншою відповідно. Також на рис. 3.10 відображено схильність до зміни проходження ультразвукових хвиль, навіть при дуже малих зазорах розшарування між складовими частинами композиту, якщо порівнювати пористий та матеріал із суцільним складовим шаром. Це дасть можливість визначати товщину розшарувань між суцільними та пористими шарами для одного композиту в процесі його виробництва і забезпечувати при цьому оперативний контроль готових виробів.



Рис. 3.8. Залежність різниці  $\Delta |V|$  амплітудних співвідношень хвиль, що відбилися від контрольованого та еталонного композитних матеріалів з однаковими порами в їх текстильних шарах, до падаючих коливань від товщини прошарку дефекту  $h_2$ , *мкм* і від параметру *cosv* (кут падіння хвиль  $\theta_1 = 10^0$ )



Рис. 3.9. Залежність різниці амплітудних співвідношень  $\Delta |W|$  хвиль, що пройшли контрольований та еталонний композитні матеріали з однаковими порами в їх текстильних шарах, до падаючих коливань від товщини прошарку дефекту  $h_2$ , мкм і від параметру cosv (кут падіння хвиль  $\theta_1 = 10^0$ )


Рис. 3.10. Залежність різниці амплітудних співвідношень  $\Delta |W|$  хвиль, що пройшли контрольований та еталонний композитні матеріали з однаковими порами в їх текстильних шарах, із суцільними плоскими складовими композиту, до падаючих коливань від товщини прошарку дефекту  $h_2$ , *мкм* і від параметру

cos v (кут падіння хвиль  $\theta_{l} = 10^{0}$ )

Проведені дослідження можуть допомогти створити нові засоби та методи контролю КТМ та їх складових в процесі виробництва. Важливим є можливість дотримуватися встановлених регламентів за ключовими технологічними параметрами. Більшість матеріалів необхідно контролювати в процесі їх вироблення. Оскільки матеріал з різною композицією складових шарів, коли він зходить з лінії виробництва, може бути тільки відбракованим за наявності дефектів в його структурі. Тому контроль самого КТМ або його складових шарів на певному етапі виробництва дасть можливість підвищити якість готової продукції та її економічну ефективність.

Встановлення ультразвукових датчиків необхідно забезпечувати на певній відстані від поверхні контрольованого матеріалу. Ця відстань не повинна бути великою, щоб не відбувалося значного згасання ультразвукових хвиль в повітряному середовищі, але також вона не повинна призвести до перевідбивань коливань від поверхонь перетворювачів та матеріалу при малих кутах падіння хвиль з їхнім подальшим накладанням. Також необхідно звернути увагу на те, що для пористих шарів текстильних матеріалів чутливість ультразвукових датчиків може бути малою, тому можливий варіант використання коливань з їхнім перевідбиванням під кутом до поверхні матеріалу у спеціальних хвилеводах, крізь які буде проходить і сам контрольований матеріал. Це може допомогти вирішити проблему чутливості амплітуди зондуючих хвиль на наявність дефекту, але при цьому додатково необхідно налаштовувати параметри частоти, потужності і навіть самої форми випромінюваних коливань.

Спеціальні хвилеводи з безконтактними ультразвуковими перетворювачами можна використовувати і як датчики обриву ниток з великою лінійною густиною на текстильних машинах в процесі виробництва полотен різного призначення. Це є також актуальною задачею, оскільки датчики обриву ниток в основному є контактними та механічними і можуть не завжди спрацьовувати, що може призвести до браку самого текстильного полотна.

Тому далі у роботі покажемо дослідження з розповсюдження ультразвукових хвиль у хвилеводі із взаємодією їх з текстильним матеріалом. 3.3. Дослідження відбивання ультразвукових хвиль від композиції шарів текстилю, які рухаються по направляючій опорі, та взаємодія коливань у хвилеводі з текстильним матеріалом

Як було розглянуто раніше, для контролю КТМ з порами або просто текстилю із значними міжволоконними відстанями у своїй структурі, необхідно проаналізувати взаємодію ультразвукових хвиль з цим матеріалом (див рис. 3.11,а). При цьому враховується його рух по жорсткій опорі або у спеціальному хвилеводі в процесі виробництва. Швидкість руху матеріалу по направляючій набагато менша за швидкість розповсюдження звуку у повітрі, тому її впливом на перевідбивання хвиль у структурі рухомого композиту можна знехтувати. Такий випадок, що представляє собою відбиття хвиль від матеріалу під час його руху, можна описати взаємодією наступних хвиль (див рис. 3.11,б, для повного внутрішнього згасання перевідбитих хвиль у першому щільному шарі матеріалу) та зміною їхніх тисків відповідно так:

$$P_{1x6.} = P_{0x6.} (-V_{\theta 12});$$

$$P_{2x6.} = P_{0x6.} (-W_{\theta 12}V_{\theta 23}W_{\theta 21} \cdot e^{2jK_2h_2});$$

$$P_{3x6.} = P_{0x6.} (-W_{\theta 12}W_{\theta 23}V_{\theta 34}W_{\theta 32}W_{\theta 21} \cdot e^{2j(K_2h_2 + K_3h_3)});$$

$$P_{4x6.} = P_{0x6.} (-W_{\theta 12}W_{\theta 23}V_{\theta 34}V_{\theta 32}V_{\theta 34}W_{\theta 32}W_{\theta 21} \cdot e^{2j(K_2h_2 + 2K_3h_3)});$$

$$P_{5x6.} = P_{0x6.} (-W_{\theta 12}W_{\theta 23}V_{\theta 34}V_{\theta 32}V_{\theta 34}W_{\theta 32}W_{\theta 21} \cdot e^{2j(K_2h_2 + 3K_3h_3)});$$

$$\dots;$$

$$P_{x6.} = \sum_{i=1}^{m} P_{ix6.},$$

$$V_{\theta 1} = \frac{P_{x6.}}{P_{0x6.}} = -V_{\theta 12} - W_{\theta 12}V_{\theta 23}W_{\theta 21} \cdot e^{2jK_2h_2} - W_{\theta 12}W_{\theta 23}V_{\theta 34}W_{\theta 32}W_{\theta 21} \times e^{2j(K_2h_2 + K_3h_3)} - W_{\theta 12}W_{\theta 23}V_{\theta 34}V_{\theta 32}V_{\theta 34}W_{32}W_{21} \cdot e^{2j(K_2h_2 + 2K_3h_3)} - (3.64)$$

$$-W_{\theta 12}W_{\theta 23}V_{\theta 34}V_{\theta 32}V_{\theta 34}W_{\theta 32}W_{\theta 21} \cdot e^{2j(K_2h_2 + 3K_3h_3)} - \dots$$

де V<sub>θ1</sub> – комплексний коефіцієнт відбиття ультразвукових хвиль від композитного текстильного матеріалу з двома складовими шарами і

середовища опори, по якій рухається композит;

- *P*<sub>0*xe*.</sub> тиск у падаючій хвилі на поверхню контрольованого матеріалу;
  - *P<sub>x6.</sub>* сумарний тиск у відбитій хвилі від контрольованого матеріалу;
    - т кількість перевідбитих складових хвиль;
- *K*<sub>2</sub>,*K*<sub>3</sub> хвильові числа першого та другого складових шарів композиту для цього випадку;
- *h*<sub>2</sub>,*h*<sub>3</sub> умовні товщини першого та другого складових шарів композиту для цього випадку;

 $P_{1x_{6.}}, P_{2x_{6.}}, P_{3x_{6.}}, P_{4x_{6.}}, \dots, P_{mx_{6.}}$  – тиски у хвилях, що взаємодіють з текстильним матеріалом та з жорсткою опорою;

 $W_{\theta 12}, W_{\theta 21}, W_{\theta 23}, W_{\theta 32}, V_{\theta 12}, V_{\theta 23}, V_{\theta 32}, V_{\theta 34}$  – коефіцієнти часткового проходження та відбивання хвиль від відповідних середовищ, які розраховуються аналогічно до виразів (3.21).

Якщо представити залежність (3.64) через геометричну прогресію, то ми можемо тоді подати її так:

$$V_{\theta 1} = -V_{\theta 12} - W_{\theta 12} V_{\theta 23} W_{\theta 21} \cdot e^{2j K_2 h_2} - W_{\theta 12} W_{\theta 23} V_{\theta 34} W_{\theta 32} W_{\theta 21} \times e^{2j (K_2 h_2 + K_3 h_3)} \cdot \sum_{N=0}^{m-3} \left( V_{\theta 32} V_{\theta 34} \cdot e^{2j K_3 h_3} \right)^N.$$
(3.65)

Враховуючи, що  $-V_{\theta 12} = V_{\theta 21}$  та прийнявши структуру тканини з порами, то вираз (3.65) можна показати ще як:

$$V_{\theta 1} = V_{\theta 21} - W_{\theta 12} V_{\theta 23} W_{\theta 21} \cdot e^{2j K_2 d_{oy2} \frac{\pi}{4} cosv_2} - W_{\theta 12} W_{\theta 23} V_{\theta 34} W_{\theta 32} W_{\theta 21} \times$$
(3.66)  
 
$$\times e^{2j \left( K_2 d_{oy2} \frac{\pi}{4} cosv_2 + K_3 d_{oy3} \frac{\pi}{4} cosv_3 \right)} \cdot \sum_{N=0}^{m-3} \left( V_{\theta 32} V_{\theta 34} \cdot e^{2j K_3 d_{oy3} \frac{\pi}{4} cosv_3} \right)^N,$$

таку геометричну прогресію можна подати для подальших перетворень ще так:

$$V_{\theta 1} = V_{\theta 21} - W_{\theta 12} V_{\theta 23} W_{\theta 21} \cdot e^{2j K_2 d_{oy2} \frac{\pi}{4} \cos v_2} - \frac{2j (K_2 d_{oy2} \frac{\pi}{4} \cos v_2 + K_3 d_{oy3} \frac{\pi}{4} \cos v_3)}{1 - V_{\theta 32} V_{\theta 34} \cdot e^{2j K_3 d_{oy3} \frac{\pi}{4} \cos v_3}},$$
(3.67)

або

$$V_{\theta 1} = V_{\theta 21} - W_{\theta 12} V_{\theta 23} W_{\theta 21} \cdot e^{2j K_2 d_{oy2} \frac{\pi}{4} \cos v_2} - \left(\frac{1}{W_{\theta 12} W_{\theta 23} V_{\theta 34} W_{\theta 32} W_{\theta 21}} \times e^{-2j \left(K_2 d_{oy2} \frac{\pi}{4} \cos v_2 + K_3 d_{oy3} \frac{\pi}{4} \cos v_3\right)} - \frac{V_{\theta 32}}{W_{\theta 12} W_{\theta 23} W_{\theta 32} W_{\theta 21}} \times e^{-2j K_2 d_{oy2} \frac{\pi}{4} \cos v_2} \right)^{-1}.$$

Для визначення дійсної  $ReV_{\theta 1}$  та уявної  $ImV_{\theta 1}$  частини виразу (3.66) перепишемо залежність (3.67) ще так:

$$V_{\theta 1} = \left( V_{\theta 21} - V_{\theta 21} V_{\theta 32} V_{\theta 34} \cdot e^{2j K_3 d_{oy3} \frac{\pi}{4} \cos v_3} - W_{\theta 12} V_{\theta 23} W_{\theta 21} \times \right)$$

$$\times e^{2j K_2 d_{oy2} \frac{\pi}{4} \cos v_2} + W_{\theta 12} W_{\theta 21} V_{\theta 34} (V_{\theta 23} V_{\theta 32} - W_{\theta 23} W_{\theta 32}) \times$$

$$\times e^{2j \left( K_2 d_{oy2} \frac{\pi}{4} \cos v_2 + K_3 d_{oy3} \frac{\pi}{4} \cos v_3 \right)} \right) \cdot \left( 1 - V_{\theta 32} V_{\theta 34} \cdot e^{2j K_3 d_{oy3} \frac{\pi}{4} \cos v_3} \right)^{-1},$$
(3.68)

тоді, врахувавши (3.66) та (3.68), можна показати  $ReV_{\theta 1}$  і  $ImV_{\theta 1}$  як:

$$ReV_{\theta 1} = V_{\theta 21} \sum_{N=0}^{m-3} (V_{\theta 32} V_{\theta 34})^N \cdot cos \left( 2N K_3 d_{oy3} \frac{\pi}{4} cos v_3 \right) - V_{\theta 21} V_{\theta 32} V_{\theta 34} \times \sum_{N=0}^{m-3} (V_{\theta 32} V_{\theta 34})^N \cdot cos \left( (2N+2) K_3 d_{oy3} \frac{\pi}{4} cos v_3 \right) - W_{\theta 12} V_{\theta 23} W_{\theta 21} \times$$
(3.69)

$$\times \sum_{N=0}^{m-3} (V_{\theta 32} V_{\theta 34})^{N} \cdot \cos\left(2K_{2} d_{oy2} \frac{\pi}{4} \cos v_{2} + 2N K_{3} d_{oy3} \frac{\pi}{4} \cos v_{3}\right) + \\ + W_{\theta 12} W_{\theta 21} V_{\theta 34} (V_{\theta 23} V_{\theta 32} - W_{\theta 23} W_{\theta 32}) \cdot \sum_{N=0}^{m-3} (V_{\theta 32} V_{\theta 34})^{N} \times \\ \times \cos\left(2K_{2} d_{oy2} \frac{\pi}{4} \cos v_{2} + (2N+2) K_{3} d_{oy3} \frac{\pi}{4} \cos v_{3}\right), \\ Im V_{\theta 1} = V_{\theta 21} \sum_{N=0}^{m-3} (V_{\theta 32} V_{\theta 34})^{N} \cdot \sin\left(2N K_{3} d_{oy3} \frac{\pi}{4} \cos v_{3}\right) - V_{\theta 21} V_{\theta 32} V_{\theta 34} \times \\ \times \sum_{N=0}^{m-3} (V_{\theta 32} V_{\theta 34})^{N} \cdot \sin\left((2N+2) K_{3} d_{oy3} \frac{\pi}{4} \cos v_{3}\right) - W_{\theta 12} V_{\theta 23} W_{\theta 21} \times \\ \times \sum_{N=0}^{m-3} (V_{\theta 32} V_{\theta 34})^{N} \cdot \sin\left(2K_{2} d_{oy2} \frac{\pi}{4} \cos v_{2} + 2N K_{3} d_{oy3} \frac{\pi}{4} \cos v_{3}\right) + \\ + W_{\theta 12} W_{\theta 21} V_{\theta 34} (V_{\theta 23} V_{\theta 32} - W_{\theta 23} W_{\theta 32}) \cdot \sum_{N=0}^{m-3} (V_{\theta 32} V_{\theta 34})^{N} \times \\ \times \sin\left(2K_{2} d_{oy2} \frac{\pi}{4} \cos v_{2} + (2N+2) K_{3} d_{oy3} \frac{\pi}{4} \cos v_{3}\right), \end{cases}$$

$$(3.70)$$

а сам модуль (рис.3.12) покажемо загальним його видом:

$$|V_{\theta 1}| = \sqrt{ReV_{\theta 1}^{2} + ImV_{\theta 1}^{2}}.$$
 (3.71)

Для можливості контролю текстильних стрічок або ниток з великою лінійною густиною безконтактним методом, необхідно вирішити задачу підвищення чутливості зміни амплітуди зондуючих хвиль до параметрів текстильних матеріалів. Одним з варіантів вирішення даної проблеми може бути застосування хвилеводів прямокутного перерізу для збільшення відстані проходження ультразвукової хвилі крізь структуру текстильного матеріалу. Зазначене можна реалізувати, підібравши певну кількість перевідбивань ультразвукових хвиль у хвилеводі, налаштувавши потрібну частоту хвиль, їхню потужність, а також і форму самого сигналу, що зазначалося раніше у роботі.



a



б

Рис. 3.11. Проходження та відбиття ультразвукових хвиль від КТМ, який рухається по направляючій:

а – проходження та відбиття ультразвукових хвиль від складових композиту із середніми розмірами пор (перший шар із більшими порами ніж у другому);
б – проходження та відбиття ультразвукових хвиль від композиту із малими та великими розмірами пор в його складових шарах (перший шар із малими порами, а другий шар із великими)



Рис. 3.12. Поверхня, що показує зміну модуля  $|V_{\theta 1}|$ , який пропорційний амплітуді відбитих ультразвукових хвиль, від показника  $d_{oy2}\frac{\pi}{4}$  першого щільного шару матеріалу та від показника  $d_{oy3}\frac{\pi}{4}$  другого його шару

Розглянемо приклад взаємодії ультразвукових хвиль з текстильною стрічкою в хвилеводі. Сам хвилевід за довжиною та з кріпленням для ультразвукових перетворювачів дозволяє хвилі, що випромінюється та проходить крізь структуру текстильної стрічки під кутом з визначеною кількістю її основних перевідбивань, бути прийнятою до приймача коливань із більшою зміною своєї амплітуди. Для того, щоб представити взаємодію хвиль з матеріалом та із самим хвилеводом, необхідно спочатку показати комплексний коефіцієнт проходження  $W_{cm.}^*$  через стінки хвилеводу та комплексний коефіцієнт відбиття  $V_{cm.}^*$  від них для зондуючих коливань [123], що падають з повітряного середовища, у наступному вигляді:

$$W_{cm.}^{*} = 2 \cdot \left( \frac{Z_{2} \cdot \cos^{2}(2\gamma_{2})\cos\theta_{1}}{Z_{1}\sin(K_{2}(h_{1} + h_{1}^{*})\cos\theta_{2})\cos\theta_{2}} + \frac{\rho_{2}b_{2}\sin^{2}(2\gamma_{2})\cos\theta_{1}}{Z_{1}\sin(\chi_{2}(h_{1} + h_{1}^{*})\cos\gamma_{2})\cos\gamma_{2}} \right) \times \\ \times \left( 2 \cdot \left( \frac{Z_{2} \cdot \cos^{2}(2\gamma_{2}) \cdot ctg\left(K_{2}(h_{1} + h_{1}^{*})\cos\theta_{2}\right) \cdot cos\theta_{1}}{Z_{1}\cos\theta_{2}} + \frac{\rho_{2}b_{2}\sin^{2}(2\gamma_{2})\cos\theta_{1}}{Z_{1}\cos\gamma_{2}} \right) - \right) - \\ - j \left( \left( \frac{Z_{2} \cdot \cos^{2}(2\gamma_{2})\cos\theta_{1}}{Z_{1}\cos\theta_{2}} + \frac{\rho_{2}b_{2}\sin^{2}(2\gamma_{2})\cos\theta_{1}}{Z_{1}\sin(\chi_{2}(h_{1} + h_{1}^{*})\cos\gamma_{2})\cos\gamma_{2}} \right)^{2} - \\ - \left( \frac{Z_{2} \cdot \cos^{2}(2\gamma_{2})\cos\theta_{1}}{Z_{1}\cos\theta_{2}} + \frac{\rho_{2}b_{2}\sin^{2}(2\gamma_{2})\cos\theta_{1}}{Z_{1}\cos\theta_{2}} + \frac{\rho_{2}b_{2}\sin^{2}(2\gamma_{2})\cos\theta_{1}}{Z_{1}\cos\theta_{2}} + \frac{\rho_{2}b_{2}\sin^{2}(2\gamma_{2})\cos\theta_{1}}{Z_{1}\cos\phi_{2}} \right)^{2} - \\ - \left( \frac{Z_{2} \cdot \cos^{2}(2\gamma_{2}) \cdot ctg\left(K_{2}(h_{1} + h_{1}^{*})\cos\phi_{2}\right) \cdot \cos\theta_{1}}{Z_{1}\cos\phi_{2}} + \frac{\rho_{2}b_{2} \cdot \sin^{2}(2\gamma_{2}) \cdot ctg\left(K_{2}(h_{1} + h_{1}^{*})\cos\phi_{2}\right) \cdot \cos\phi_{1}}{Z_{1}\cos\phi_{2}} + \frac{\rho_{2}b_{2} \cdot \sin^{2}(2\gamma_{2}) \cdot ctg\left(K_{2}(h_{1} + h_{1}^{*})\cos\phi_{2}\right) \cdot \cos\phi_{1}}{Z_{1}\cos\phi_{2}} + \frac{\rho_{2}b_{2} \cdot \sin^{2}(2\gamma_{2}) \cdot ctg\left(K_{2}(h_{1} + h_{1}^{*})\cos\phi_{2}\right) \cdot \cos\phi_{1}}{Z_{1}\cos\phi_{2}} + \frac{\rho_{2}b_{2} \cdot \sin^{2}(2\gamma_{2}) \cdot ctg\left(K_{2}(h_{1} + h_{1}^{*})\cos\phi_{2}\right) \cdot \cos\phi_{1}}{Z_{1}\cos\phi_{2}} \right)^{2} -$$

$$(3.73)$$

$$-\left(\frac{Z_{2} \cdot \cos^{2}(2\gamma_{2})\cos\theta_{1}}{Z_{1}\sin(K_{2}(h_{1}+h_{1}^{*})\cos\theta_{2})\cos\theta_{2}} + \frac{\rho_{2}b_{2}\sin^{2}(2\gamma_{2})\cos\theta_{1}}{Z_{1}\sin(\chi_{2}(h_{1}+h_{1}^{*})\cos\gamma_{2})\cos\gamma_{2}}\right)^{2} + 1\right) \times \\ \times \left(2 \cdot \left(\frac{Z_{2} \cdot \cos^{2}(2\gamma_{2}) \cdot ctg\left(K_{2}(h_{1}+h_{1}^{*})\cos\theta_{2}\right) \cdot cs\theta_{1}}{Z_{1}\cos\theta_{2}} + \frac{\rho_{2}b_{2} \cdot \sin^{2}(2\gamma_{2}) \cdot ctg\left(\chi_{2}(h_{1}+h_{1}^{*})\cos\gamma_{2}\right) \cdot cs\theta_{1}}{Z_{1}\cos\gamma_{2}}\right) - \right) - \\ - j\left(\left(\frac{Z_{2} \cdot \cos^{2}(2\gamma_{2})\cos\theta_{1}}{Z_{1}\sin(K_{2}(h_{1}+h_{1}^{*})\cos\theta_{2})\cos\theta_{2}} + \frac{\rho_{2}b_{2}\sin^{2}(2\gamma_{2})\cos\theta_{1}}{Z_{1}\sin(\chi_{2}(h_{1}+h_{1}^{*})\cos\gamma_{2})\cos\gamma_{2}}\right)^{2} - \\ - \left(\frac{Z_{2} \cdot \cos^{2}(2\gamma_{2}) \cdot ctg\left(K_{2}(h_{1}+h_{1}^{*})\cos\theta_{2}\right) \cdot cs\theta_{1}}{Z_{1}\cos\theta_{2}} + \frac{\rho_{2}b_{2}\sin^{2}(2\gamma_{2})\cos\theta_{1}}{Z_{1}\cos\theta_{2}} + \frac{\rho_{2}b_{2}\sin^{2}(2\gamma_{2})\cos\theta_{1}}{Z_{1}\cos\theta_{2}}\right)^{2} + 1\right)\right)^{-1},$$

де для цього випадку:

Z<sub>1</sub> – акустичний опір повітря;

- Z<sub>2</sub> акустичний опір стінок хвилеводу для поздовжніх хвиль;
- $ho_2$  об'ємна щільність матеріалу стінок хвилеводу;
- *b*<sub>2</sub> швидкість розповсюдження поперечних хвиль в матеріалі стінок хвилеводу;
- $K_2$  хвильове число матеріалу стінок хвилеводу для поздовжніх хвиль;
- $\chi_2$  хвильове число матеріалу стінок хвилеводу для поперечних хвиль;
- $h_{\rm l} + h_{\rm l}^{*}$  товщина стінок хвилеводу в найтовщому місці ( $h_{\rm l}^{*}$  товщина стінок хвилеводу в найтоншому місці);
  - *θ*<sub>1</sub> кут падіння хвилі на матеріал стінки хвилеводу з повітряного
     середовища (*h*<sub>1</sub> товщина повітряного прошарку в хвилеводі в
     найтоншому його місці);

- *θ*<sub>2</sub> кут проходження поздовжньої хвилі крізь матеріал стінки хвилеводу
   після її заломлення в ньому;
- γ<sub>2</sub> кут проходження поперечної хвилі крізь матеріал стінки хвилеводу
  після її заломлення в ньому.

Коли  $c_1/b_2 > sin\theta_1 > c_1/c_2$ , де  $c_1/b_2$  – співвідношення швидкостей хвилі в повітрі та поперечних хвиль в матеріалі хвилеводу;  $c_1/c_2$  – співвідношення швидкостей хвилі в повітрі та поздовжніх хвиль в матеріалі хвилеводу, то кут  $\theta_2$  буде комплексним, а поздовжні хвилі в матеріалі стінок будуть "ковзаючими" вздовж межі середовищ. Це зробить можливим проходження тільки поперечних коливань крізь стінки хвилеводу. Далі у роботі розглянемо випадки для падіння ультразвукової хвилі в хвилеводі на текстильний матеріал, коли через його стінки проходитиме тільки поперечна хвиля, та коли поперечна та поздовжня хвилі будуть розповсюджуватись у матеріалі стінок хвилеводу вздовж межі поділу середовищ (рис. 3.13).

Спочатку врахуємо проходження тільки поперечної хвилі крізь стінки хвилеводу для отримання загальних рівнянь при відповідних кутах падіння хвиль. Щоб описати взаємодію ультразвукових хвиль із пористим середовищем текстильного матеріалу, спершу представимо наближено вирази (3.72) та (3.73) із проходженням поперечної хвилі крізь стінки хвилеводу ще так:

$$W_{cm.}^{*} = \frac{W_{\theta 12}^{*}W_{\theta 21}^{*} \cdot e^{j\frac{(K_{2} + \chi_{2})}{2}(h_{1} + h_{1}^{*})}}{1 - V_{\theta 21}^{*2} \cdot e^{j(K_{2} + \chi_{2})(h_{1} + h_{1}^{*})}},$$
(3.74)

$$V_{cm.}^{*} = \frac{V_{\theta 21}^{*} - V_{\theta 21}^{*} \cdot e^{j(K_{2} + \chi_{2})(h_{1} + h_{1}^{*})}}{1 - V_{\theta 21}^{*2} \cdot e^{j(K_{2} + \chi_{2})(h_{1} + h_{1}^{*})}}.$$
(3.75)

Часткові коефіцієнти проходження  $W_{\theta_{12}}^*, W_{\theta_{21}}^*$  та відбиття  $V_{\theta_{21}}^*$  хвиль від межі повітря з твердими стінками хвилеводу можна записати тоді як:

$$W_{\theta 12}^{*} = \frac{2\rho_{2}Z_{1}}{\rho_{1}\left(\rho_{2}b_{2}\sin^{2}(2\gamma_{2}) + Z_{1}\right)}, \quad W_{\theta 21}^{*} = \frac{2\rho_{1}\rho_{2}b_{2}\sin(2\gamma_{2})}{\rho_{2}\left(\rho_{2}b_{2}\sin^{2}(2\gamma_{2}) + Z_{1}\right)},$$

$$V_{\theta 21}^{*} = \frac{\left(\rho_{2}b_{2}\sin^{2}(2\gamma_{2}) - Z_{1}\right)}{\left(\rho_{2}b_{2}\sin^{2}(2\gamma_{2}) + Z_{1}\right)}.$$
(3.76)

Виходячи з отриманих виразів (3.74), (3.75) та (3.76), для аналізу проходження хвиль під кутом та їх відбиття від твердих стінок хвилеводу у повітрі, можна описати тепер їх взаємодію з текстильним матеріалом, який проходить крізь хвилевід.

Для хвилеводу із кріпленням для датчиків з однієї сторони до текстильного матеріалу необхідно скласти рівняння, які описують суперпозицію хвиль, що пройшли його або відбилися від нього. Тиски у хвилях, що виходять по один бік розташування датчиків відносно контрольованого матеріалу, для даного випадку з їх п'ятьма основними перевідбиваннями у хвилеводі, які взаємодіють з текстильною стрічкою, пройшовши її шість разів, з врахуванням виразів (3.63), (3.64) та (3.76) можна представити у наступному виді:

$$P_{1x6.} = P_{0x6.} \left( -V_{\theta 13} W_{\theta 12}^* W_{\theta 21}^* \cdot e^{j \left(h_1 K_1 + h_1^* \cdot \left(\frac{K_2 + \chi_2}{2}\right)\right)}\right);$$

$$P_{2x6.} = P_{0x6.} \left( -W_{\theta 13} V_{\theta 32}^* W_{\theta 32}^* W_{\theta 21}^* \cdot e^{2j K_3 h_3 \cos v_3 + j \left(h_1 + h_1^*\right) \left(\frac{K_2 + \chi_2}{2}\right)}\right);$$

$$P_{3x6.} = P_{0x6.} \left( -W_{\theta 13} V_{\theta 32}^{*3} W_{\theta 32}^* W_{\theta 21}^* \cdot e^{4j K_3 h_3 \cos v_3 + j \left(h_1 + h_1^*\right) \left(\frac{K_2 + \chi_2}{2}\right)}\right);$$

$$P_{4x6.} = P_{0x6.} \left( -W_{\theta 13} V_{\theta 32}^{*5} W_{\theta 31} \cdot e^{6j K_3 h_3 \cos v_3}\right),$$

$$(3.77)$$

де  $K_1$  – хвильове число для повітряного середовища.

Часткові коефіцієнти проходження  $W_{\theta 32}^*$  та відбиття  $V_{\theta 32}^*$  коливань, що взаємодіють з твердим середовищем можна визначити аналогічно до виразів (3.76). Якщо врахувати критичні кути падіння хвиль на стінки хвилеводу (після ïх проходження пористого текстильного матеріалу), ЩО спричиняє розповсюдження поперечної та поздовжньої хвиль в матеріалі самого хвилеводу вздовж межі його стінок та майже повне відбиття звукової енергії від них, то тисками P<sub>1x6</sub>, P<sub>2x6</sub>, P<sub>3x6</sub> можна знехтувати. Тоді прийнявши до уваги, що загальний тиск по одну сторону стрічки буде  $P_{x_{6.}} \approx P_{4x_{6.}}$ , можемо записати рівняння комплексного коефіцієнта відбиття  $V_{\theta 2}$  для даного хвилеводу (рис. 3.13,а) у вигляді:

$$V_{\theta 2} = \frac{P_{x_{\theta}}}{P_{0x_{\theta}}} = -W_{\theta 13}V_{\theta 32}^*W_{\theta 31} \cdot e^{2jK_3h_3\cos\nu_3} \cdot \left(V_{\theta 32}^{*2} \cdot e^{2jK_3h_3\cos\nu_3}\right)^2, \quad (3.78)$$

або враховуючи можливу довільну кількість основних перевідбивань хвиль, що залежить від довжини хвилеводу (чергові проходження хвилею матеріалу кратні двом), то у такому разі (3.78) у загальному виді представимо так:

$$V_{\theta 2} = \frac{P_{x_{\theta}}}{P_{0x_{\theta}}} = -W_{\theta 13}V_{\theta 32}^*W_{\theta 31} \cdot e^{2jK_3h_3\cos\nu_3} \cdot \left(V_{\theta 32}^{*2} \cdot e^{2jK_3h_3\cos\nu_3}\right)^{m-2}.$$
 (3.79)

Тоді сам модуль  $|V_{\theta 2}|$  комплексного коефіцієнту відбиття зондуючих коливань в системі хвилевід – текстильний матеріал можна показати як:

$$|V_{\theta 2}| = \sqrt{ReV_{\theta 2}^{2} + ImV_{\theta 2}^{2}} =$$

$$= \left( \left( W_{\theta 13}V_{\theta 32}^{*}W_{\theta 31}V_{\theta 32}^{*2(m-2)} \cdot \cos((2(m-2)+2)K_{3}h_{3}\cos v_{3}) \right)^{2} + \left( W_{\theta 13}V_{\theta 32}^{*}W_{\theta 31}V_{\theta 32}^{*2(m-2)} \cdot \sin((2(m-2)+2)K_{3}h_{3}\cos v_{3}) \right)^{2} \right)^{\frac{1}{2}}.$$
(3.80)

Коли перетворювачі, що кріпляться до хвилеводу, знаходяться по різні сторони текстильного матеріалу (рис. 3.13,б), то комплексний коефіцієнт проходження  $W_{\theta 3}$  для хвилеводу можна представити так:

$$W_{\theta 3} = W_{\theta 13} W_{\theta 31} \cdot e^{jK_3 h_3 \cos v_3} \cdot \left( V_{\theta 32}^{*2} \cdot e^{2jK_3 h_3 \cos v_3} \right)^{m-1}, \tag{3.81}$$

тоді модуль комплексного коефіцієнту проходження  $|W_{ heta3}|$  можна показати як:

$$|W_{\theta 3}| = \sqrt{Re W_{\theta 3}^{2} + Im W_{\theta 3}^{2}} =$$

$$= \left( \left( W_{\theta 13} W_{\theta 31} V_{\theta 32}^{*2(m-1)} \cdot \cos((2(m-1)+1) K_{3}h_{3}\cos v_{3}) \right)^{2} + \left( W_{\theta 13} W_{\theta 31} V_{\theta 32}^{*2(m-1)} \cdot \sin((2(m-1)+1) K_{3}h_{3}\cos v_{3}) \right)^{2} \right)^{\frac{1}{2}}.$$
(3.82)

За допомогою отриманих залежностей можна проаналізувати взаємодію ультразвукових хвиль з текстильними матеріалами малої товщини (текстильною стрічкою, нитками з великою лінійною густиною, різною волоконною масою і т. д.) для можливості визначення їхніх технологічних параметрів в процесі виробництва. При цьому необхідно регулювати потужність ультразвукових хвиль, які взаємодіють з текстильним волоконним матеріалом. Це необхідно для можливості контролю текстилю як за проходженням хвиль з їхнім огинанням матеріалу, враховуючи його зовнішню структуру, так і для подібного контролю волокон з врахуванням їхньої внутрішньої структури. Існує можливість, крім зміни потужності випромінюючих хвиль, налаштовувати їхню частоту під різну структуру текстильного матеріалу, яка впливає на зміну його пор. На рис. 3.14 – рис.3.17 показані залежності, що пов'язані із розглянутими у роботі хвилеводами, а також поверхні зміни модулів  $|V_{\theta 2}|$  та  $|W_{\theta 3}|$  від поверхневої густини  $m_s$  (визначається через об'ємну щільність  $\rho_3$ , яка змінюється, та постійну товщину текстильної стрічки  $h_3$ ) і від параметру m хвилеводу.



a



б

Рис. 3.13. Проходження та відбиття ультразвукових хвиль від текстильного матеріалу, який знаходиться у хвилеводі:

а – взаємодія ультразвукових хвиль з текстильним матеріалом в хвилеводі з розташуванням датчиків по одну сторону від нього; б – взаємодія ультразвукових хвиль з текстильним матеріалом в хвилеводі з розташуванням датчиків по різні сторони від нього



Рис. 3.14. Розподіл коефіцієнтів  $ReW_{\theta 3}$ ,  $ReV_{\theta 2}$  звукового тиску за товщиною  $h_3$  текстильної стрічки в залежності від параметру *m* різних хвилеводів:

а – для хвилеводу з датчиками по різні сторони текстильної стрічки;

б – для хвилеводу з датчиками по одну сторону текстильної стрічки



Рис. 3.15. Розподіл енергетичних коефіцієнтів  $ReW_{\theta 3}^2$ ,  $ReV_{\theta 2}^2$  хвиль за товщиною  $h_3$  стрічки в залежності від параметру *m* різних хвилеводів:

а – для хвилеводу з датчиками по різні сторони текстильної стрічки;
 б – для хвилеводу з датчиками по одну сторону текстильної стрічки



Рис. 3.16. Загальна залежність поступового зменшення амплітуд хвиль $|W_{\theta 3}| \approx |V_{\theta 2}|$ , що взаємодіють з волоконною текстильною масою в хвилеводах, від її поверхневої густини  $m_s$  та від шляху, який проходять коливання з перевідбиваннями, що характеризується параметром m



Рис. 3.17. Залежності амплітуд хвиль  $|W_{\theta 3}|, |V_{\theta 2}|$  від поверхневої густини  $m_s$  текстильної волоконної маси та від параметру m різних хвилеводів:

а – для хвилеводу з датчиками по різні сторони текстильної волоконної маси;
 б – для хвилеводу з датчиками по одну сторону текстильної волоконної маси

Для хвилеводів із значною висотою перерізу  $h_3$  або із суттєвою його зміною, крізь яку може проходити різна волоконна маса з великою товщиною (або поверхневою густиною  $m_s$ ) та пористістю, можна наближено виразити модулі  $|V_{\theta 2}|$  та  $|W_{\theta 3}|$  за допомогою залежностей (3.80), (3.82). При цьому акустичний опір  $Z_3$  у стільки разів змінюється у скільки разів змінюється висота хвилеводу, яка заповнена волоконною масою, у порівнянні з товщиною звичайної текстильної стрічки, а величина  $h_3$  тоді залишається постійною у виразах. Також отримані залежності (3.79), (3.80), (3.81) та (3.82) можна наближено показати виразами (3.18) та (3.19), помноживши товщину матеріалу, що представлена в них, на певну кількість проходжень хвилею самого текстилю.

Проведений аналіз показав, що розповсюдження ультразвукових коливань у хвилеводі при їх постійному проходженні пористого текстильного матеріалу, експоненціально збільшує зміну амплітуди хвиль та може підвищити чутливість безконтактних датчиків до самого текстильного волокна матеріалу. За таким характером зменшується амплітуда хвиль і від збільшення товщини або поверхневої густини  $m_s$  текстильного матеріалу, які досить є часто обмеженими за своєю величиною технологічно, що, в свою чергу, робить досить складною задачу детектування зміни зондуючих коливань в робочих умовах. Тому застосування хвилеводів допоможе вирішити прблему з безконтактного визначення основних технологічних параметрів для таких матеріалів як текстильна стрічка, нитки з великою лінійною густиною, волоконна маса та багато інших пористих матеріалів із складною внутрішньою структурою.

В основному застосування направляючих поверхонь, що відбивають та концентрують ультразвукові хвилі для безконтактного контролю текстильних матеріалів, допоможе покращити і технологічне обладнання, яке застосовуватиметься в легкій промисловості. Вдосконалення самих технічних засобів, для виробництва текстильних матеріалів, може відбуватися шляхом інтегрування безконтактних систем контролю технологічних параметрів полотен та ниток до структури текстильних машин.

## Висновки до розділу 3

1. Одержано залежності різниць  $\Delta |W|$ ,  $\Delta |V|$  амплітудних співвідношень ультразвукових хвиль, які взаємодіють з КТМ з дефектом, та хвиль, що взаємодіють з еталонним КТМ, від товщин  $h_1$ ,  $h_3$  складових шарів матеріалу і від товщини  $h_2$  самого дефекту.

2. Отримані також залежності різниць  $\Delta \varphi_W$ ,  $\Delta \varphi_V$  фазових зсувів ультразвукових хвиль, які взаємодіють з КТМ з дефектом, та хвиль, що взаємодіють з еталонним КТМ, від товщин  $h_1$ ,  $h_3$  складових шарів матеріалу і від товщини  $h_2$  самого дефекту.

3. Показано, що для контролю КТМ малої товщини краще використовувати амплітудні параметри хвиль, які пройшли складові шари матеріалу та дефект у вигляді прошарку повітря. Зазначене можна здійснити при правильному виборі величини співвідношення  $h / \lambda$  загальної товщини виробу, що контролюється, до довжини ультразвукової хвилі.

4. Розглянуто як можуть впливати пори, розмір яких змінює величину параметру *cosv*, в текстильних шарах композиту на амплітудні параметри ультразвукових хвиль при безконтактному контролі.

5. Проаналізовано розповсюдження та відбиття ультразвукових хвиль від текстильного двошарового матеріалу з щільним верхнім шаром, який спирається на жорстку поверхню направляючої у процесі безконтактного контролю. Отримані амплітудні залежності для відбитих хвиль для цього випадку.

6. Одержані залежності амплітудних співвідношень  $|V_{\theta 2}|$  та  $|W_{\theta 3}|$ ультразвукових хвиль від кількості їх проходжень перерізу хвилеводу та від товщини контрольованого матеріалу. При цьому випромінюючий та приймаючий перетворювачі знаходяться, в одному випадку, по одну сторону, а, в іншому випадку, розташовуються по різні сторони від контрольованого матеріалу.

## РОЗДІЛ 4

## ЗАСТОСУВАННЯ БЕЗКОНТАКТНИХ МЕТОДІВ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕКСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ В ПРОЦЕСІ ЇХ ВИРОБНИЦТВА

В умовах сучасного розвитку науки і техніки, та застосування нових методів для підвищення якісних характеристик [278 - 336] різних текстильних матеріалів та виробів із них, необхідно забезпечувати безперервний оперативний контроль технологічних параметрів, що впливають безпосередньо на якість та конкурентоспроможність готової продукції. Дотримання цих параметрів в необхідних межах із допустимим визначеним відхиленням дозволить зменшити відсоток бракованих метеріалів та витрату сировини в процесі виробництва тканих або в'язаних полотен на різних текстильних машинах.

Сьогодні фактично різні технологічні параметри текстильних матеріалів визначаються контактними та руйнівними методами. Так, для визначення параметру поверхневої густини використовують метод вирізання зразка та його зважування за допомогою електронних ваг в лабораторних умовах. Зрозуміло, що такий метод не дозволяє оперативно контролювати значення цього параметру та призводить до порушення цілісності досліджуваного текстильного матеріалу. Для визначення товщини текстильних полотен також необхідно вирізання зразків з подальшим вимірюванням їхнього геометричного розміру контактним виробництві вимірюють товщиноміром. Натяг ниток на механічними пристроями. Для таких пристроїв використовуються принципи, які пов'язані з взаємодією нитки з роликовими направляючими. При цьому збільшення швидкості нитки може призвести до збільшення її обривності. Крім того, розроблені безконтактні останнім часом оптичні пристрої, v яких використовується вібрація нитки з наступним визначенням частоти її коливань за допомогою фотоприймача. До недоліків таких пристроїв слід віднести залежність показів пристрою від коефіцієнту тертя нитки, від низки неінформативних параметрів та складність застосування оптичних приладів у

виробничих приміщеннях із можливим значним запиленням. Тому актуальною задачею є саме розробка безконтактних ультразвукових методів та засобів контролю технологічних параметрів текстильних матеріалів з інтегруванням таких систем до обладнання призначеного для виробництва текстильних полотен.

## 4.1. Розробка та застосування ультразвукового амплітудного методу для визначення натягу ниток основи та сили прибою ниток утоку в процесі ткацтва тканин

Як показав проведений аналіз [337 - 378], який був наведений раніше у роботі, найбільш перспективним методом для безконтактного визначення технологічних параметрів текстильних матеріалів є ультразвуковий. При цьому текстильний матеріал опромінюється ультразвуковими хвилями і значення технологічного параметру визначається за амплітудним співвідношенням ультразвукової хвилі, що пройшла крізь текстильний матеріал, або відбилась від нього, до падаючої хвилі.

Крім визначення технологічних параметрів текстильних матеріалів, вже після їх вироблення, можливе застосування ультразвукового методу контролю для коригування їхнього відхилення від нормативних показників безпосередньо в процесі самого ткацтва. Також застосування амплітудного ультразвукового методу дозволить оптимізувати параметри технологічних процесів виробництва текстильних матеріалів. Зробити зазначене можна за рахунок визначення натягу ниток основи або сили прибою ниток утоку, від яких залежить фактичне значення, одного із основних технологічних параметрів – поверхневої густини текстильних полотен. Це може впливати також і на витрату сировини при виробленні тканих полотен на ткацьких верстатах, що є важливим при великих обсягах виробництва.

Створення математичних моделей, що пов'язуватимуть натяг ниток текстильних матеріалів на технологічному обладнанні з амплітудними характеристиками відбитих та поглинутих ультразвукових хвиль, дозволить проаналізувати, спрогнозувати та покращити якісні характеристики полотен, безпосередньо в процесі їх виробництва з використанням безконтактного контролю.

Для безконтактного контролю текстильних матеріалів необхідно враховувати один або декілька інформативних параметрів ультразвукового сигналу. Це дозволяє при відповідному опрацюванні отриманих даних з контрольованого та опорного каналу виключити вплив зміни фізико-механічних параметрів матеріалу та навколишнього середовища на результат вимірювання. Також необхідно враховувати похибки, які можуть бути спричинені різними коефіцієнтами передачі цих каналів та їх неідентичністю між собою.

За зміною амплітуди відбитої ультразвукової хвилі від текстильного матеріалу відносно амплітуди хвилі, яка падає на матеріал можна визначати натяг, або силу прибою ниток утоку в процесі ткацтва (за зміною діаметрів ниток, відстаней між ними та між їх волокнами, що відповідають певній амплітуді відбитої хвилі).

У роботі наведені результати досліджень визначення натягу ниток основи, сили прибою нитки утоку в процесі ткацтва за допомогою ультразвукового безконтактного методу, що, у свою чергу, також може допомогти зменшити обривність ниток та простої обладнання.

Дослідження є дуже важливими для сучасного виробництва тканих полотен і в майбутньому дозволять вдосконалити ткацькі верстати із застосуванням безконтактних технологій визначення фактичного натягу ниток в процесі ткацтва.

Для того, щоб описати процес взаємодії ультразвукових хвиль із нитками полотна у процесі ткацтва необхідно розглянути основні залежності (вирази (4.1), (4.2), (4.3), (4.4) та дослідження, які описані в [427]), що пов'язані з однією із основних технологічних операцій на ткацькому верстаті, яка забезпечує процес формування тканини заданої будови. Такою операцією є прибій нитки утоку, під час якого натяг основи  $Q_o$  в зоні формування тканини можна подати наступною залежністю:

$$Q_o = Q_T \cdot \frac{\left(1 + k \frac{d_o}{d_y} \cdot (\sin\alpha_0 + \sin\alpha)\right) \cdot \left(1 + 2k \frac{d_o}{d_y} \cdot \sin\alpha\right)^{n-1}}{(1 - \delta) \cdot \cos\alpha} \times$$
(4.1)

$$\times e^{\frac{\mu r_y \beta \varphi}{(r_o + r_y) \cdot \sin \beta}}$$

де  $Q_T$  – натяг тканини;

- $d_o$  діаметр нитки основи;
- *d*<sub>y</sub> діаметр нитки утоку;
- $r_o$  радіус нитки основи;
- *r*<sub>y</sub> радіус нитки утоку;
- *n* число ниток утоку зони формування тканини;
- $lpha_0$  половина кута зіву при прибої;
  - $\alpha$ –кут обхвату поверхні нитки утоку ниткою основи;
  - $\beta$  кут нахилу уточної нитки в тканині;
  - $\varphi$  сумарний кут обхвату уточних ниток у зоні формування тканини;
  - $\mu$  коефіцієнт тертя між ниткою та направляючою;
  - δ коефіцієнт напруженості основних ниток при відсутності натягу тканини;
  - *k* комплексний коефіцієнт.

Силу прибою нитки утоку можна записати наступним виразом:

$$P = Q_T \cdot \left( \frac{\left(1 + k \frac{d_o}{d_y} \cdot (\sin \alpha_0 + \sin \alpha)\right) \cdot \left(1 + 2k \frac{d_o}{d_y} \cdot \sin \alpha\right)^{n-1} \cdot \cos \alpha_0}{(1 - \delta) \cdot \cos \alpha} \times (4.2) \right) \times \exp\left(\frac{\mu r_y \beta \varphi}{(r_o + r_y) \cdot \sin \beta} - 1\right).$$

Сумарний кут обхвату уточин у зоні формування тканини можна показати як:

$$\varphi = \left( \frac{2\alpha \cdot (r_o + r_y) \cdot \sin \beta}{2\alpha \mu r_y \beta + (r_o + r_y) \cdot \sin \beta \cdot \ln \left(1 + 2k \frac{d_o}{d_y} \cdot \sin \alpha\right)} \right) \times \left( \frac{Q_o (1 - \delta) \cdot \left(1 + 2k \frac{d_o}{d_y} \cdot \sin \alpha\right)^{\frac{\alpha_0 + \alpha}{2\alpha}} \cdot \cos \alpha}{Q_T \cdot \left(1 + k \frac{d_o}{d_y} \cdot (\sin \alpha_0 + \sin \alpha)\right)} \right).$$

$$(4.3)$$

Залежність (4.3) можна подати також наступним чином:

$$\varphi = \alpha_0 + \alpha + 2\alpha \cdot (n-1). \tag{4.4}$$

Із виразу (4.4) можна визначити кількість ниток утоку зони формування тканини та подати у наступному вигляді:

$$n = 1 + \frac{\varphi - (\alpha_0 + \alpha)}{2\alpha}.$$
(4.5)

Для тканини полотняного переплетіння на рис.4.1 подані графіки залежностей сили прибою нитки утоку P та натягу основи  $Q_o$  від параметру  $\Pi_y$  (кількості ниток утоку на 1 дм) та від поверхневої густини  $m_s$  тканого полотна. При цьому використані такі параметри:  $\Pi_o = 246 \, h / d M$  (кількість ниток основи на 1 дм);  $T_o = 25 \, mekc$  (лінійна густина ниток основи);  $T_y = 29,4 \, mekc$  (лінійна густина ниток утоку);  $r_o = 0,099 \, mm$ ;  $r_y = 0,107 \, mm$ ;  $Q_T = 4 \, cH$ ; k = 0,75;  $\mu = 0,5$ ; n = 4,25. На рис. 4.2,а показано зміну поверхневої густини  $m_s$  від параметру  $\Pi_y$  для розглянутого вище випадку, а на рис. 4.2,6,в показано залежності зміни кута обхвату  $\alpha$  поверхні нитки утоку основою від параметру  $\Pi_y$  та від поверхневої густини  $m_s$  при формуванні тканини на ткацькому верстаті.



Рис. 4.1. Залежності натягу ниток основи  $Q_o$ , cH та сили прибою P, cH від заповнення ниток утоку  $\Pi_y$ ,  $h/\partial M$  та поверхневої густини тканини  $m_s$ ,  $c/M^2$ :

а – залежності натягу ниток основи  $Q_o$  та сили прибою P від заповнення ниток утоку в тканині  $\Pi_y$ ; б – залежності натягу ниток основи  $Q_o$  та сили прибою Pвід поверхневої густини тканини  $m_s$ 



Рис.4.2. Залежність поверхневої густини тканини  $m_s$ ,  $c/m^2$  від параметру  $\Pi_y$ , h/dm та залежності кута обхвату  $\alpha$ , ° поверхні нитки утоку основою від параметру  $\Pi_y$ , h/dm та від поверхневої густини  $m_s$ ,  $c/m^2$ :

а – залежність поверхневої густини тканини  $m_s$  від параметру  $\Pi_v$ ;

б – залежність зміни кута обхвату  $\alpha$  поверхні нитки утоку основою від параметру  $\Pi_y$ ; в – залежність зміни кута обхвату  $\alpha$  поверхні нитки утоку основою від поверхневої густини тканини  $m_s$ 

208

Оскільки натяг основи та силу прибою нитки утоку у процесі ткацтва можна визначати безконтактно за зміною діаметрів ниток та відстаней між ними, то вираз для залежності амплітуди ультразвукової хвилі, що пройшла крізь основу з врахуванням діаметрів самих ниток можна подати так:

$$|W_{o}| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi f}{c_{2}}\left(\frac{Z_{2}}{2Z_{1}} + \frac{Z_{1}}{2Z_{2}}\right)d_{o}\frac{\pi}{4}\cos v_{o}\right)^{2}}},$$
(4.6)

де для цього випадку:

- | *W<sub>o</sub>* | модуль комплексного коефіцієнта проходження ультразвукового сигналу крізь нитки основи;
  - f частота ультразвукових коливань;
  - Z<sub>1</sub> акустичний опір повітря;
  - Z<sub>2</sub> акустичний опір текстильного матеріалу;
  - с<sub>2</sub> швидкість розповсюдження ультразвукового сигналу в текстильному матеріалі;
  - *v<sub>o</sub>* кут між вектором хвилі, що відбивається від ниток основи у бік проходження сигналу, та самими нитками.

Із залежності (4.6) можна виразити діаметр ниток основи так:

$$d_{o} = \frac{\sqrt{\frac{1}{|W_{o}|^{2}} - 1}}{\frac{\pi^{2} f}{2 c_{2}} \left(\frac{Z_{2}}{2Z_{1}} + \frac{Z_{1}}{2Z_{2}}\right) \cos v_{o}}.$$
(4.7)

Модуль комплексного коефіцієнту відбиття ультразвукової хвилі від тканини у зоні її формування в процесі ткацтва можна показати як:

$$|V| = \sqrt{1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{Km_s f \cos v}{Z_1}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z_1}{Km_s f \cos v}\right)^2}}.$$
(4.8)

Якщо визначати діаметр ниток основи безконтактним методом за допомогою відбитої ультразвукової хвилі, знаючи залежність взаємозв'язку хвиль, що відбиваються, та хвиль, які проходять крізь текстильний матеріал, можна із виразу (4.7) подати діаметр ниток основи ще так:

$$d_{o} = \frac{2|V_{o}|K_{\rho}}{\sqrt{1-|V_{o}|^{2}}\cos v_{o}\frac{\pi^{2}f}{c_{2}}\left(\frac{Z_{2}}{2Z_{1}}+\frac{Z_{1}}{2Z_{2}}\right)},$$
(4.9)

- де |V<sub>o</sub> | модуль комплексного коефіцієнта відбиття ультразвукового сигналу від ниток основи;
  - К<sub>р</sub> коефіцієнт, що характеризує надходження відбитого ультразвукового сигналу до приймача коливань від структурних показників ниток полотен та їхнього положення відносно самого приймача.

Подвійний середній діаметр ниток тканини можна визначити тоді як:

$$2d_{c} = \frac{2|V|K_{\rho}}{\sqrt{1-|V|^{2}}\cos v \frac{\pi^{2}f}{c_{2}}\left(\frac{Z_{2}}{2Z_{1}} + \frac{Z_{1}}{2Z_{2}}\right)}.$$
(4.10)

Розглянуті вище залежності, застосовуючи відбитий ультразвуковий сигнал від ниток основи та відбиті хвилі від тканини, дають змогу визначити діаметр ниток утоку. Діаметр ниток утоку за допомогою двох відбитих сигналів можна подати так:

$$d_{y} = \frac{2\left(\frac{|V|}{\sqrt{1-|V|^{2}}\cos v} - \frac{|V_{o}|}{\sqrt{1-|V_{o}|^{2}}\cos v_{o}}\right)K_{\rho}}{\frac{\pi^{2}f}{c_{2}}\left(\frac{Z_{2}}{2Z_{1}} + \frac{Z_{1}}{2Z_{2}}\right)},$$
(4.11)

тоді співвідношення діаметрів ниток основи та утоку тканини через амплітудні залежності ультразвукових хвиль двох сигналів можна показати як:

$$\frac{d_{o}}{d_{y}} = \frac{|V_{o}|}{\sqrt{1 - |V_{0}|^{2}} \cos v_{o}} \left( \frac{|V|}{\sqrt{1 - |V|^{2}} \cos v} - \frac{|V_{o}|}{\sqrt{1 - |V_{o}|^{2}} \cos v_{o}} \right),$$
(4.12)

або

$$\frac{d_{o}}{d_{y}} = \frac{1}{\frac{|V|\sqrt{1-|V_{o}|^{2}}\cos v_{o}}{|V_{o}|\sqrt{1-|V|^{2}}\cos v} - 1}}.$$

За зміною амплітуд відбитих ультразвукових хвиль можна безконтактно визначати зміну діаметрів тканини, але для цього необхідно забезпечити правильне розташування датчиків відносно самих ниток основи та основи і утоку разом у їх переплетінні, так щоб ультразвукові хвилі можна було детектувати за допомогою приймаючої частини вимірювального приладу. Самі випромінюючі та приймаючі датчики треба розташовувати так, щоб не відбувалося явища перевідбивання хвиль з їх накладанням на результуючий інформативний сигнал. Усі ці заходи у комплексі дають можливість визначити наступне співвідношення за допомогою ультразвукових хвиль, що взаємодіють з нитками тканого полотна.

$$\frac{r_{y}}{r_{o} + r_{y}} = \frac{|V| - \frac{|V_{o}|\sqrt{1 - |V|^{2}}\cos v}{\sqrt{1 - |V_{o}|^{2}\cos v_{o}}}}{|V|},$$

$$\frac{|V_{o}|\sqrt{1 + \left(\frac{Z_{1}}{Km_{s}f\cos v}\right)^{2}} \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{Z_{1}}{Km_{s}f\cos v}\right)^{2}}\cos v}}{\sqrt{1 - \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{Z_{1}}{Km_{s}f\cos v}\right)^{2}}\right)^{2}}}.$$
(4.13)

Якщо наведені залежності (4.12) та (4.13) підставити у (4.1) та (4.2), то можна отримати вирази для натягу основи  $Q_o$  в зоні формування тканини та для сили прибою нитки утоку P в процесі ткацтва, які можна визначати за амплітудами двох відбитих ультразвукових сигналів.

$$Q_{T}\left(1+k\frac{\sin\alpha_{0}+\sin\alpha}{|V|\sqrt{1-|V_{0}|^{2}}\cos v_{o}}-1\right)\left(1+2k\frac{\sin\alpha}{|V|\sqrt{1-|V|^{2}}\cos v_{o}}-1\right)^{n-1} + 2k\frac{\sin\alpha}{|V|\sqrt{1-|V|^{2}}\cos v_{o}}-1\right)^{n-1} \times (4.14)$$

$$Q_{o} = \frac{(1-\delta)\cdot\cos\alpha}{(1-\delta)\cdot\cos\alpha} \times (1-\delta)\cdot\cos\alpha + (1-\delta)\cdot\cos\alpha$$

$$\times exp\left(\frac{\mu\beta\varphi\cdot\left(\left|V\right| - \frac{\left|V_{o}\right|\sqrt{1 - \left|V\right|^{2}}\cos v}{\sqrt{1 - \left|V_{o}\right|^{2}}\cos v_{o}}\right)}{\left|V\right| \cdot \sin\beta}\right) - 1\right).$$

З врахуванням залежностей (4.14) і (4.15) число ниток утоку у зоні формування тканини тоді можна подати так:

$$n = 1 + \frac{1}{2\alpha} \cdot \left[ \left( \frac{2\alpha |V| \cdot \sin\beta}{\sqrt{1 - |V|^{2}} \cos v \frac{\pi^{2} f}{c_{2}} \left( \frac{Z_{2}}{2Z_{1}} + \frac{Z_{1}}{2Z_{2}} \right)^{\times} \right] \\ \times \left( \frac{2\alpha \mu \beta \cdot \left( \frac{|V|}{\sqrt{1 - |V|^{2}} \cos v} - \frac{|V_{o}|}{\sqrt{1 - |V_{o}|^{2}} \cos v_{o}} \right)}{\frac{\pi^{2} f}{c_{2}} \left( \frac{Z_{2}}{2Z_{1}} + \frac{Z_{1}}{2Z_{2}} \right)} \right] + \frac{\pi^{2} f}{\sqrt{1 - |V|^{2}} \cos v \frac{\pi^{2} f}{c_{2}} \left( \frac{Z_{2}}{2Z_{1}} + \frac{Z_{1}}{2Z_{2}} \right)} \\ + \frac{|V| \cdot \sin\beta}{\sqrt{1 - |V|^{2}} \cos v \frac{\pi^{2} f}{c_{2}} \left( \frac{Z_{2}}{2Z_{1}} + \frac{Z_{1}}{2Z_{2}} \right)} \\ \times \ln \left( 1 + 2k \frac{\sin\alpha}{\frac{|V| \sqrt{1 - |V_{o}|^{2}} \cos v_{o}}{|V_{o}| \sqrt{1 - |V|^{2}} \cos v} - 1} \right) \right)^{-1} \\ \times \ln \left( 1 + 2k \frac{\sin\alpha}{\frac{|V| \sqrt{1 - |V_{o}|^{2}} \cos v_{o}}{|V_{o}| \sqrt{1 - |V|^{2}} \cos v} - 1} \right) \right)^{-1} \\ \times \ln \left( 1 + 2k \frac{\sin\alpha}{\frac{|V| \sqrt{1 - |V_{o}|^{2}} \cos v_{o}}{|V_{o}| \sqrt{1 - |V|^{2}} \cos v} - 1} \right) \right)^{-1} \\ \times \ln \left( 1 + 2k \frac{\sin\alpha}{\frac{|V| \sqrt{1 - |V_{o}|^{2}} \cos v_{o}}{|V_{o}| \sqrt{1 - |V|^{2}} \cos v} - 1} \right) \right)^{-1} \\ \times \ln \left( 1 + 2k \frac{\sin\alpha}{\frac{|V| \sqrt{1 - |V_{o}|^{2}} \cos v_{o}}{|V_{o}| \sqrt{1 - |V|^{2}} \cos v} - 1} \right) \right)^{-1} \\ \times \ln \left( 1 + 2k \frac{\sin\alpha}{\frac{|V| \sqrt{1 - |V_{o}|^{2}} \cos v_{o}}{|V_{o}| \sqrt{1 - |V|^{2}} \cos v} - 1} \right) \right)^{-1} \\ \times \ln \left( 1 + 2k \frac{\sin\alpha}{\frac{|V| \sqrt{1 - |V_{o}|^{2}} \cos v_{o}}{|V_{o}| \sqrt{1 - |V|^{2}} \cos v} - 1} \right) \right)^{-1} \\ \times \ln \left( 1 + 2k \frac{\sin\alpha}{\frac{|V| \sqrt{1 - |V_{o}|^{2}} \cos v_{o}}{|V_{o}| \sqrt{1 - |V|^{2}} \cos v} - 1} \right) \right)^{-1} \\ \times \ln \left( 1 + 2k \frac{\sin\alpha}{\frac{|V| \sqrt{1 - |V_{o}|^{2}} \cos v_{o}}{|V_{o}| \sqrt{1 - |V|^{2}} \cos v} - 1} \right) \right)^{-1} \\ \times \ln \left( 1 + 2k \frac{\sin\alpha}{\frac{|V| \sqrt{1 - |V|^{2}} \cos v_{o}}{|V_{o}| \sqrt{1 - |V|^{2}} \cos v} - 1} \right) \right)^{-1} \\ \times \ln \left( 1 + 2k \frac{\sin\alpha}{\frac{|V| \sqrt{1 - |V|^{2}} \cos v_{o}}} \right)^{-1} \\ \times \ln \left( 1 + 2k \frac{\sin\alpha}{\frac{|V| \sqrt{1 - |V|^{2}} \cos v_{o}}} \right) \right)^{-1} \\ \times \ln \left( 1 + 2k \frac{\sin\alpha}{\frac{|V| \sqrt{1 - |V|^{2}} \cos v_{o}}} \right)^{-1} \\ + \frac{\ln \left( 1 + 2k \frac{1}{\sqrt{1 - |V|^{2}} \cos v_{o}}} \right)^{-1} \\ + \frac{\ln \left( 1 + 2k \frac{1}{\sqrt{1 - |V|^{2} \cos v_{o}} \right)^{-1} \\ + \frac{\ln \left( 1 + 2k \frac{1}{\sqrt{1 - |V|^{2} \cos v_{o}}} \right)^{-1} \\ + \frac{\ln \left( 1 + 2k \frac{1}{\sqrt{1 - |V|^{2} \cos v_{o}} \right)^{-1} \\ + \frac{\ln \left( 1 + 2k \frac{1}{\sqrt{1 - |V|^{2} \cos v_{o}} \right)^{-1} \\ + \frac{\ln \left( 1 + 2k \frac{1}{\sqrt{1 - |V|^{2} \cos v_{o}} \right)^{-1} \\ + \frac{\ln \left( 1 + 2k \frac{1}{\sqrt{1 - |V|^{2} \cos v_{o}} \right)^{-1} \\ + \frac{\ln \left$$

$$\times \ln \left( \frac{Q_{o}(1-\delta) \cdot \left( 1+2k \frac{\sin \alpha}{\frac{|V|\sqrt{1-|V_{o}|^{2} \cos v_{o}}}{|V_{o}|\sqrt{1-|V|^{2} \cos v}} -1 \right)^{\frac{\alpha_{0}+\alpha}{2\alpha}} \cdot \cos \alpha}{|V_{o}|\sqrt{1-|V_{o}|^{2} \cos v} -1} - (\alpha_{0}+\alpha) - (\alpha_$$

За проведеними дослідженнями отримано криві, що показують характер зміни двох співвідношень відбитих від переплетіння ниток основи та утоку ультразвукових сигналів до амплітуди падаючої на полотно хвилі в залежності від зміни сили прибою P (позначення графіку на рис.4.3 ====), в залежності від зміни натягу ниток основи  $Q_o$  (позначення графіку на рис.4.3 ====). Також отримано криві, що показують характер зміни двох співвідношень відбитих від самих тільки ниток основи ультразвукових сигналів до амплітуди падаючої на поверхню ниток хвилі в залежності від зміни сили прибою P (позначення графіку на рис.4.3 ====), в залежності від зміни натягу ниток основи  $Q_o$ (позначення графіку на рис.4.3 ====).

З рис.4.3 видно, що відбитий ультразвуковий сигнал від ниток основи набагато менший за амплітудою від того сигналу, який відбивається від решітки переплетіння тканини. Також з рис. 4.3 можна побачити, що при збільшенні натягу ниток основи та сили прибою нитки утоку збільшується амплітуда ультразвукових хвиль, що відбиваються від матеріалу при незмінній частоті ультразвукових коливань.



Рис.4.3. Залежності амплітудних співвідношень відбитих ультразвукових хвиль, які пропорційні модулям |V| та  $|V_o|$ , від натягу ниток основи  $Q_o$ , cH та від сили прибою нитки утоку P, cH тканини в процесі ткацтва

Додатково рис.4.4 показані залежності зміни амплітудних на відбитих від переплетіння співвідношень ультразвукових хвиль ниток (позначення графіку на рис.4.4,а ====) та від ниток основи (позначення графіку на рис.4.4,а ===) в залежності від зміни кута обхвату  $\alpha$  поверхні нитки утоку основою. Також на рис. 4.4,б,в представлені залежності, що показують характер зміни співвідношення відбитого від переплетіння ниток ультразвукового сигналу до амплітуди падаючої на полотно хвилі від зміни заповнення ниток утоку  $\Pi_{y}$ та від зміни поверхневої густини  $m_s$  (позначення графіків на рис.4.4,б,в ====), а також, що показують характер зміни співвідношення відбитого від самих тільки ниток основи ультразвукового сигналу до амплітуди падаючої на поверхню ниток хвилі від зміни заповнення ниток утоку П<sub>у</sub> та від зміни поверхневої густини  $m_s$  (позначення графіків на рис.4.4,б,в ====).

Загальні залежності амплітудних співвідношень відбитих ультразвукових хвиль, які пропорційні модулям |V| та  $|V_o|$ , від сили прибою нитки утоку *P* тканини в процесі ткацтва та від її поверхневої густини  $m_s$  показані на рис.4.5 та рис.4.6 відповідно.

Представлені графіки та поверхні для залежностей амплітудних співвідношень зондуючих ультразвукових хвиль на рис.4.3 – рис.4.6 є продовженням досліджень розглянутого випадку у роботі, для якого був проведений розрахунок технологічних параметрів тканини полотняного переплетіння в процесі її ткацтва.

За допомогою ультразвукових датчиків встановлених над зоною формування тканини та над основою можна визначати фактичний натяг ниток основи та силу прибою нитки утоку, що впливає як на зміну поверхневої густини тканини, так і на обривність самих ниток і простою текстильного обладнання. Вимірювальна система з бігаючою платформою сканування зони формування тканини дасть кращий результат з визначення реального натягу ниток на ткацькому станку, але з технічного боку це буде складніше реалізувати.


Рис.4.4. Залежності амплітудних співвідношень відбитих ультразвукових хвиль, які пропорційні модулям |V| та  $|V_o|$ , від кута обхвату  $\alpha$ ,  $^{\circ}$  поверхні нитки утоку основою, від заповнення ниток утоку  $\Pi_y$ ,  $\mu/\partial m$  та від  $m_s$ ,  $c/m^2$  тканини:

а – залежності |V| та  $|V_o|$  від від кута обхвату  $\alpha$ ; б – залежності |V| та  $|V_o|$  від заповнення ниток утоку в тканині  $\Pi_y$ ; в – залежності |V| та  $|V_o|$  від поверхневої

густини тканини *m*<sub>s</sub>



б

Рис.4.5. Залежність амплітудних співвідношень відбитих ультразвукових хвиль, які пропорційні модулю |V|, від сили прибою нитки утоку *P*, *cH* тканини в

процесі ткацтва та від її поверхневої густини  $m_s$ ,  $c/m^2$ :

а – залежність, яка показана у вигляді поверхні для модуля |V|; б – залежність, яка показана у вигляді дискретних значень для модуля |V|



Рис.4.6. Залежність амплітудних співвідношень відбитих ультразвукових хвиль, які пропорційні модулю  $|V_o|$ , від сили прибою нитки утоку *P*, *cH* тканини в

процесі ткацтва та від її поверхневої густини  $m_s$ ,  $c/M^2$ :

а – залежність, яка показана у вигляді поверхні для модуля  $|V_o|$ ; б – залежність, яка показана у вигляді дискретних значень для модуля  $|V_o|$ 

Як видно із залежностей рис.4.3 – рис.4.6, що для реалізації методу безконтактного контролю сили прибою нитки утоку *P* або для контролю натягу ниток основи  $Q_o$ , необхідно забезпечити високу чутливість вимірювального каналу відбитого ультразвукового сигналу від ниток основи. Це зумовлено значно меншим рівнем амплітуди ультразвукових хвиль, що відбиваються тільки від ниток основи у порівнянні з відбитими хвилями від поверхні самої тканини.

Для збільшення чутливості вимірювального сигналу можуть застосовуватися направляючі та концентруючі поверхні для зондуючих хвиль, що дасть можливість додатково визначати параметри зміни міжволоконної пористості матеріалів за необхідності.

Системи із застосуванням безконтактних датчиків, можуть включати платформи сканування текстильного полотна та сканування ряду ниток у певний момент часу в процесі ткацтва, що дасть можливість проводити оперативний контроль технологічних параметрів різних полотен.

Якщо провести короткий підсумок досліджень у цьому напрямку, то вони показали, що за зміною амплітудних співвідношень відбитих ультразвукових хвиль від полотна тканини та від ниток основи відносно амплітуди хвилі, яка падає на поверхню матеріалу, можна визначати їхній натяг, силу прибою нитки утоку в процесі ткацтва.

Наведені результати досліджень безконтактного визначення натягу ниток основи, для процесу вироблення текстильних полотен, дадуть можливість зменшити їх обривність. Також можна буде, знаючи натяг ниток, визначати фактичне значення поверхневої густини при виробленні самого текстильного полотна.

Дослідження є дуже важливими для сучасного виробництва тканих полотен і в майбутньому дозволять вдосконалити ткацькі верстати із застосуванням безконтактних технологій визначення фактичного натягу ниток в процесі ткацтва. Це дозволить оперативно визначати як зміну фактичного натягу ниток основи, так і за його значенням визначати поверхневу густину тканини та її відхилення від норми в процесі ткацтва. 4.2. Розробка та застосування ультразвукового амплітудного методу для визначення натягу ниток на текстильних в'язальних машинах в процесі виготовлення трикотажного полотна

Якість різних трикотажних полотен залежить від головних технологічних параметрів, забезпечення яких і дає можливість отримати її належний рівень. Одним із головних таких параметрів є поверхнева густина, що зазначалося раніше у роботі. Дотримання належної поверхневої густини залежить від натягу ниток на текстильних машинах, на яких виробляються трикотажні полотна, відповідно до того як і для тканин на ткацьких верстатах. Від надмірного натягу ниток може відбуватися їх обривність на технологічному обладнанні, що призводить до браку полотна, до простоїв текстильних машин і втрати коштів та часу на їх повторний запуск. Оскільки сьогодні системи регулювання натягу ниток на різних текстильних машинах в основному є тільки механічними, то це не дає можливості визначати фактичне значення цього параметру в процесі роботи таких систем і відповідно до цього вносити правильне коригування з необхідною точністю, що може суттєво впливати на якість готової продукції.

Створення ультразвукових безконтактних методів та засобів визначення натягу ниток на різних текстильних машинах дозволить забезпечити оперативний технологічний контроль цього параметру та забезпечить зворотній зв'язок із системами регулювання натягу ниток, які будуть налаштовуватися під фактичне значення цього параметру.

Рух ниток з певним натягом по робочим органам трикотажних машин представляє собою рух по направляючим різної форми. Якщо розглянути таку взаємодію нитки з циліндричною направляючою з радіусом кривизни R [428], то для визначення натягу у точці A (натяг  $P_A$ ) набігу нитки на направляючу та у точці B (натяг  $P_B$ ) її сходження, можна застосувати вирази, які описані в роботі [428]. Зазначені залежності можна показати так:

$$P_A = P_0 \cdot \left( 1 - \frac{B_0}{2P_0 (R + r(1 - \delta_{T0}))^2} \right), \quad P_B = P_1 \cdot \left( 1 - \frac{B_0}{2P_1 (R + r(1 - \delta_T))^2} \right), \quad (4.17)$$

тоді вираз, що описує натяг веденої та ведучої гілок нитки, яка взаємодіє з циліндричною направляючою, можна показати наступним чином:

$$P_{1} = P_{0} \cdot \left( 1 + \frac{(R+r)\left(e^{\mu_{T}\varphi_{T}} - 1\right)}{R+r(1-\delta_{T0})} \right) + \frac{B_{0}}{2(R+r(1-\delta_{T}))^{2}} - \frac{B_{0}}{2(R+r(1-\delta_{T}))^{2}} \cdot \left( 1 + \frac{(R+r)\left(e^{\mu_{T}\varphi_{T}} - 1\right)}{R+r(1-\delta_{T0})} \right),$$
(4.18)

звідки

$$\delta_{T0} = \frac{P_0(R+r)}{rP_0 + E_1 b_k (R+r)^2}, \ \delta_T = \delta_{T0} \cdot e^{\mu_T \varphi_P}, \ \mu_T = \frac{a_T}{\left(\frac{P_0}{R}\right)^{b_T}}, \tag{4.19}$$

де P<sub>0</sub>, P<sub>1</sub> – натяг веденої та ведучої гілок нитки;

- *r* умовний радіус нитки;
- *R* радіус кривизни циліндричної направляючої;
- $\mu_T$  коефіцієнт тертя нитки;
- $\varphi_{\scriptscriptstyle T}$  кут обхвату ниткою направляючої поверхні;

*E*<sub>1</sub> – модуль пружності нитки при стисненні;

- δ<sub>T0</sub>, δ<sub>T</sub> відносні деформації поперечного перерізу в точці входу на направляючу та виходу нитки з неї до початку попереднього зміщення;
  - *B*<sub>0</sub> коефіцієнт жорсткості нитки при згині;
  - $b_k$  ширина сліду контакту нитки на направляючій;
  - *а*<sub>*T*</sub>,*b*<sub>*T*</sub> відповідні дослідні коефіцієнти (для кожної нитки мають свої значення);
    - *φ<sub>p</sub>* значення кута обхвату ниткою направляючої поверхні перед
      попереднім зміщенням.

Описану в роботі [428] величину кута обхвату ниткою направляючої поверхні *от* можна представити як:

$$\varphi_T = \varphi_P + \arccos\left(1 - \delta_{T0} \left(\frac{2r}{R}\right)^2\right) + \arccos\left(1 - \delta_T \left(\frac{2r}{R}\right)^2\right) - \qquad (4.20)$$
$$-\arccos\left(1 - \frac{B_0}{2P_0(R+r)^2}\right) - \arccos\left(1 - \frac{B_0}{2P_1(R+r)^2}\right).$$

Для можливості визначення натягу ведучої гілки нитки на циліндричній направляючій за допомогою інформативних параметрів ультразвукових хвиль, спочатку розглянемо зміну цього параметру для різних ниток та пряжі, які широко застосовують при виготовлені трикотажних полотен.

Розглянемо бавовняний текстильний матеріал, віскозні та капронові нитки, а також вовняний текстильний матеріал, основні початкові параметри яких для розрахунку описані в роботі [428]. Наведені параметри для цих ниток та пряжі визначалися дослідним шляхом. До основних із цих параметрів для бавовняної пряжі 27,6 *текс* відносяться наступні величини: 2r = 0,22 мм;  $B_0 = 0,7 \text{ cH} \cdot \text{ мм}^2$ ;  $E_1 = 712,2 \ cH/MM^2$ ;  $a_T = 0,1656$ ;  $b_T = 0,0590$ ;  $b_k = 0,012MM$ ; питоме розривне навантаження 28,9 сН/текс; відносне розривне подовження 9%. До параметрів для віскозної нитки 16,7 *текс* відносяться наступні величини: 2 r = 0,17 мм;  $B_0 = 0.2 \ cH \cdot MM^2$ ;  $E_1 = 474.9 \ cH / MM^2$ ;  $a_T = 0.1580$ ;  $b_T = 0.1160$ ;  $b_k = 0.014 \ MM$ ; питоме розривне навантаження 14,9 сН/текс; відносне розривне подовження 24%. До параметрів для капронової нитки 28 текс відносяться наступні величини: 2r = 0,2 мм;  $B_0 = 0,22 \text{ cH} \cdot \text{ мм}^2$ ;  $E_1 = 584,4 \text{ cH}/\text{ мM}^2$ ;  $a_T = 0,1765$ ;  $b_T = 0,1186;$   $b_k = 0,012$  мм; питоме розривне навантаження 51,1 сН/текс; відносне розривне подовження 23%. До параметрів для вовняної пряжі 29,9 текс 2r = 0.23 MM;  $B_0 = 0.1 \text{ cH} \cdot \text{MM}^2;$ відносяться наступні величини:  $E_1 = 599 \ cH/MM^2$ ;  $a_T = 0,1330$ ;  $b_T = 0,0910$ ;  $b_k = 0,015 MM$ ; питоме розривне навантаження 10,7 сН/текс; відносне розривне подовження 18%. Зміна натягу  $P_{l}, cH$  для ведучої гілки різних ниток та пряжі в залежності від різних впливових факторів в процесі виробництва трикотажу показано на рис. 4.7 – рис.4.12.



Рис.4.7. Зміна натягу *P*<sub>1</sub>,*cH* ведучої гілки бавовняної пряжі при *P*<sub>0</sub> = 10 *cH*: а – зміна натягу *P*<sub>1</sub>,*cH* ведучої гілки бавовняної пряжі 27,6 *текс* від *R*, *мм*; б – поверхня зміни натягу *P*<sub>1</sub>,*cH* від *r*, *мм* та *R*, *мм* для бавовняного матеріалу



Рис.4.8. Зміна натягу  $P_{l,cH}$  ведучої гілки віскозної нитки при  $P_{0} = 10 cH$ : а – зміна натягу  $P_{l,cH}$  ведучої гілки віскозної нитки 16,7 *текс* від R, *мм*; б – поверхня зміни натягу  $P_{l,cH}$  від r, *мм* та R, *мм* для віскозних ниток



Рис.4.9. Зміна натягу  $P_{1,cH}$  ведучої гілки капронової нитки при  $P_{0} = 10 cH$ : а – зміна натягу  $P_{1,cH}$  ведучої гілки капронової нитки 28 *текс* від R, *мм*; б – поверхня зміни натягу  $P_{1,cH}$  від r, *мм* та R, *мм* для капронових ниток



Рис.4.10. Зміна натягу *P*<sub>1</sub>,*cH* ведучої гілки вовняної пряжі при *P*<sub>0</sub> = 10 *cH*: а – зміна натягу *P*<sub>1</sub>,*cH* ведучої гілки вовняної пряжі 29,9 *текс* від *R*, *мм*; б – поверхня зміни натягу *P*<sub>1</sub>,*cH* від *r*, *мм* та *R*, *мм* для вовняного матеріалу

З рис.4.7 – рис.4.10 можна побачити як змінюється натяг  $P_1$  для різних ниток та пряжі при  $P_0 = 10 \ cH$  в залежності від зміни радіусу R циліндричної направляючої та в залежності від умовного радіусу r.

Для бавовняного текстильного матеріалу зміна натягу  $P_1$  за малої лінійної густини пряжі є меншою ніж для віскозних та капронових ниток, а у порівнянні з вовною його значення є більшим, хоча абсолютна зміна цього параметру із зміною радіуса R є наближеною до вовни. Слід зазначити, що для капронових та віскозних ниток, які наведені у роботі (лінійна густина 28 *mekc* та 16,7 *mekc* відповідно), абсолютна зміна натягу  $P_1$  із зміною R є також майже однаковою за величиною, хоча значення для цього параметру є більшим для капрону.

Найбільше значення натягу  $P_1$  при  $P_0 = 10 \ cH$  для наведених ниток та пряжі як для малої лінійної густини, так і для великої відноситься до капронових ниток. Найменший натяг  $P_1$  буде для вовняного матеріалу, приблизно схожими за величиною цього параметру будуть його значення для бавовни та віскози як для малої лінійної густини матеріалу, так і для великої.

З наведених поверхонь видно, що при великій лінійній густині ниток та пряжі, коли радіус циліндричної направляючої R буде в діапазоні від 1 мм до 4 мм натяг  $P_1$  буде мати своє максимальне значення при  $P_0 = 10$  cH. Тому доцільно враховувати результати цього дослідження при виборі ниток для першочергового безконтактного контролю на підвищений натяг  $P_1$  при необхідності, що може спричинити розрив текстильного матеріалу. Такий контроль доцільно проводити використовуючи ультразвукові датчики.

Додатково проведемо дослідження зміни натягу  $P_1$  із зміною умовного радіусу r та із зміною натягу  $P_0$  веденої гілки нитки або пряжі для визначення діапазону контрольованого параметру. З рис.4.11 та рис.4.12 можна побачити, що із збільшенням параметру  $P_0$  та умовного радіусу r значно збільшується і натяг  $P_1$ . Якщо звернути увагу на величину натягу  $P_1$  для різних текстильних ниток та пряжі, які були розглянуті у роботі, то для бавовни, віскози та капрону його значення є схожим, тільки для вовни воно є значно меншим за величиною.



Рис.4.11. Залежність натягу *P*<sub>1</sub> ведучої гілки ниток від *P*<sub>0</sub> та *r* при *R* = 1,1 *мм*: а – зміна натягу *P*<sub>1</sub>,*cH* від *P*<sub>0</sub>,*cH* та *r*, *мм* для бавовняного матеріалу; б – зміна натягу *P*<sub>1</sub>,*cH* від *P*<sub>0</sub>,*cH* та *r*, *мм* для віскозних ниток



Рис.4.12. Залежність натягу  $P_1$  ведучої гілки ниток від  $P_0$  та r при R = 1,1 мм: а – зміна натягу  $P_1,cH$  від  $P_0,cH$  та r, мм для капронових ниток; б – зміна натягу  $P_1,cH$  від  $P_0,cH$  та r, мм для вовняного текстильного матеріалу

За зміною діаметра нитки та її щільності (може змінюватися за рахунок зменшення міжволоконної пористості матеріалу), з використанням амплітудних співвідношень ультразвукових хвиль, що взаємодіють з ниткою, можна визначати її натяг в процесі виробництва трикотажного полотна. Радіус нитки можна визначити за допомогою амплітуди відбитої від неї хвилі як:

$$r = \frac{|V_{T0}|K_{\rho 2}}{\sqrt{1 - |V_{T0}|^2} \cos v_1 \frac{\pi^2 f}{c_2} \left(\frac{Z_2}{2Z_1} + \frac{Z_1}{2Z_2}\right)},$$
(4.21)

тоді натяг Р<sub>1</sub> можна можна подати ще так:

$$P_{1} = P_{0} \cdot \left(1 + \frac{\left|V_{T0} | K_{\rho 2}\right|}{\sqrt{1 - \left|V_{T0} \right|^{2}} \cos v_{1} \frac{\pi^{2} f}{c_{2}} \left(\frac{Z_{2}}{2Z_{1}} + \frac{Z_{1}}{2Z_{2}}\right)}\right) \left(e^{\mu_{T} \phi_{T}} - 1\right)}{R + \frac{\left|V_{T0} | K_{\rho 2} (1 - \delta_{T0})\right|}{\sqrt{1 - \left|V_{T0} \right|^{2}} \cos v_{1} \frac{\pi^{2} f}{c_{2}} \left(\frac{Z_{2}}{2Z_{1}} + \frac{Z_{1}}{2Z_{2}}\right)}}\right) - \frac{1}{\sqrt{1 - \left|V_{T0} \right|^{2}} \cos v_{1} \frac{\pi^{2} f}{c_{2}} \left(\frac{Z_{2}}{2Z_{1}} + \frac{Z_{1}}{2Z_{2}}\right)}}$$

$$-\frac{B_{0}}{2 \cdot \left(R + \frac{|V_{T0}|K_{\rho 2}(1 - \delta_{T0})}{\sqrt{1 - |V_{T0}|^{2}} \cos v_{1} \frac{\pi^{2} f}{c_{2}} \left(\frac{Z_{2}}{2Z_{1}} + \frac{Z_{1}}{2Z_{2}}\right)}\right)^{2}} \times \frac{\left(R + \frac{|V_{T0}|K_{\rho 2}}{\sqrt{1 - |V_{T0}|^{2}} \cos v_{1} \frac{\pi^{2} f}{c_{2}} \left(\frac{Z_{2}}{2Z_{1}} + \frac{Z_{1}}{2Z_{2}}\right)}\right)}{R + \frac{|V_{T0}|K_{\rho 2}(1 - \delta_{T0})}{\sqrt{1 - |V_{T0}|^{2}} \cos v_{1} \frac{\pi^{2} f}{c_{2}} \left(\frac{Z_{2}}{2Z_{1}} + \frac{Z_{1}}{2Z_{2}}\right)},$$

$$(4.22)$$

де для цього випадку:

- Z<sub>1</sub> акустичний опір повітря;
- f частота ультразвукових коливань;
- $ho_2$  об'ємна щільність нитки;
- |V<sub>T0</sub>| модуль комплексного коефіцієнту відбиття, що пропорційний амплітудним співвідношенням відбитих ультразвукових хвиль до падаючих, які приймаються першим датчиком;
  - *v*<sub>1</sub> кут між напрямком частини хвиль, що огинають нитку, не потрапляючи на перший датчик, та її поверхнею;
- К<sub>ρ2</sub> коефіцієнт матеріалу нитки, який характеризує надходження відбитого ультразвукового сигналу до першого приймаючого датчика, в залежності від внутрішньої (міжволоконної) структури нитки.

Якщо врахувати, що для повітря та матеріалу нитки справджується нерівність  $Z_1 \ll Z_2$ , тоді вираз (4.21) можна показати ще як:

$$r = \frac{2Z_1 K_{\rho 2}}{\pi^2 f \rho_2 \cdot \sqrt{\frac{1}{|V_{T0}|^2} - 1 \cdot \cos v_1}},$$
(4.23)

залежність (4.19) враховуючи амплітуду ультразвукових хвиль, які відбиваються від текстилю та надходять на другий датчик, можна представити так:

$$\delta_{T0} = P_0 \cdot \left( R + \frac{2Z_1 K_{\rho 4}}{\pi^2 f \rho_2 \cdot \sqrt{\frac{1}{|V_T|^2} - 1 \cdot \cos v_2}} \right) \times$$
(4.24)  
$$\frac{P_0 2Z_1 K_{\rho 4}}{\pi^2 f \rho_2 \cdot \sqrt{\frac{1}{|V_T|^2} - 1 \cdot \cos v_2}} + E_1 b_k \left( R + \frac{2Z_1 K_{\rho 4}}{\pi^2 f \rho_2 \cdot \sqrt{\frac{1}{|V_T|^2} - 1 \cdot \cos v_2}} \right)^2 \right)^{-1},$$

де  $|V_T|$  – модуль комплексного коефіцієнту відбиття, що пропорційний

амплітудним співвідношенням відбитих ультразвукових хвиль до падаючих, які приймаються другим датчиком;

- *v*<sub>2</sub> кут між напрямком частини хвиль, що огинають нитку, не потрапляючи на другий датчик, та її поверхнею;
- К<sub>ρ4</sub> коефіцієнт матеріалу нитки, який характеризує надходження
   відбитого ультразвукового сигналу до другого приймаючого датчика,
   в залежності від внутрішньої (міжволоконної) структури нитки.

Натяг *P*<sub>1</sub> з врахуванням (4.23) можна показати ще як:

$$P_{1} = P_{0} + \frac{\left( \frac{R + \frac{2Z_{1}K_{\rho_{2}}}{\pi^{2}f \rho_{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{|V_{T0}|^{2}} - 1 \cdot \cos v_{1}}} \right) \left(e^{\mu_{T}\phi_{T}} - 1\right)}{R + \frac{2Z_{1}K_{\rho_{2}}(1 - \delta_{T0})}{\pi^{2}f \rho_{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{|V_{T0}|^{2}} - 1 \cdot \cos v_{1}}} \times \left( \frac{P_{0} - B_{0} \cdot \left(2 \cdot \left(\frac{R + \frac{2Z_{1}K_{\rho_{2}}(1 - \delta_{T0})}{\pi^{2}f \rho_{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{|V_{T0}|^{2}} - 1 \cdot \cos v_{1}}} \right)^{2} \right)^{-1} \right).$$

$$(4.25)$$

Зважаючи на (4.24), (4.25) та  $K_{\rho 1}$ ,  $K_{\rho 3}$  – коефіцієнти матеріалу нитки та її положення, які характеризують надходження відбитого ультразвукового сигналу до першого та другого приймаючого датчика у відповідності до зовнішньої структури нитки, можна записати залежність, яка пов'язуватиме натяг нитки з амплітудою ультразвукових хвиль, що відбиваються від текстильного матеріалу. В загальному вигляді цей вираз для визначення натягу ведучої гілки нитки за амплітудними співвідношеннями ультразвукових хвиль, що відбилися від волокон матеріалу, до хвиль, які тільки падають на нього при його взаємодії з робочими органами трикотажних машин, можна подати так:

$$P_{1} = P_{0} + \left( R + \frac{2Z_{1}K_{\rho 2}}{\pi^{2}f \rho_{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{K_{\rho 1}}{|V_{T0}|}\right)^{2} - 1 \cdot \cos v_{1}}} \right) \left( e^{\mu_{T}\phi_{T}} - 1 \right) \times \\ \times \left( R + 2Z_{1}K_{\rho 2} \left( 1 - P_{0} \cdot \left( R + \frac{2Z_{1}K_{\rho 4}}{\pi^{2}f \rho_{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{K_{\rho 3}}{|V_{T}|}\right)^{2} - 1 \cdot \cos v_{2}}} \right) \times \right) \times \\ \times \left( \frac{P_{0}2Z_{1}K_{\rho 4}}{\pi^{2}f \rho_{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{K_{\rho 3}}{|V_{T}|}\right)^{2} - 1 \cdot \cos v_{2}}} + E_{1}b_{k} \times \right) \times \\ \times \left( R + \frac{2Z_{1}K_{\rho 4}}{\pi^{2}f \rho_{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{K_{\rho 3}}{|V_{T}|}\right)^{2} - 1 \cdot \cos v_{2}}} \right)^{2} \right)^{-1} \times \\ \times \left( R + \frac{2Z_{1}K_{\rho 4}}{\pi^{2}f \rho_{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{K_{\rho 1}}{|V_{T0}|}\right)^{2} - 1 \cdot \cos v_{1}}} \right)^{-1} \cdot (P_{0} - B_{0} \cdot 2^{-1} \times 1) \times \\ \times \left( R + 2Z_{1}K_{\rho 2} \left( 1 - P_{0} \cdot \left( R + \frac{2Z_{1}K_{\rho 4}}{\pi^{2}f \rho_{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{K_{\rho 3}}{|V_{T}|}\right)^{2} - 1 \cdot \cos v_{2}}} \right) \times \right) \times \right) \times$$

$$\times \left( \frac{P_{0}2Z_{1}K_{\rho 4}}{\pi^{2}f\rho_{2}\cdot\sqrt{\left(\frac{K_{\rho 3}}{|V_{T}|}\right)^{2}-1\cdot\cos v_{2}}} + E_{1}b_{k}\times \left(\frac{R + \frac{2Z_{1}K_{\rho 4}}{\pi^{2}f\rho_{2}\cdot\sqrt{\left(\frac{K_{\rho 3}}{|V_{T}|}\right)^{2}-1\cdot\cos v_{2}}}\right)^{2} - \frac{1}{1} + \frac{1}{\pi^{2}f\rho_{2}\cdot\sqrt{\left(\frac{K_{\rho 1}}{|V_{T0}|}\right)^{2}-1\cdot\cos v_{1}}} - \frac{1}{1} + \frac{1}{1} +$$

На практиці чутливість датчика до відбитих ультразвукових хвиль від нитки матеріалу буде малою. Коефіцієнти  $K_{\rho 1}$ ,  $K_{\rho 3}$  (коефіцієнти розсіювання ультразвукових хвиль в залежності від зовнішньої структури нитки та її положення),  $K_{\rho 2}$ ,  $K_{\rho 4}$  (коефіцієнти розсіювання ультразвукових хвиль в залежності від міжволоконної структури нитки та її положення) впливають на результуючий відбитий сигнал. Зрозуміло, що необхідно для таких випадків застосовувати ультразвукові хвилі, які проходять волокна матеріалу, а також ті, що оминають саму нитку. Для підсилення чутливості датчиків доцільно застосовувати хвилеводи для визначення натягу ниток на різних трикотажних машинах. Тому для оперативного технологічного контролю натягу ниток можна амплітудний застосувати метод, який дозволяє зміною амплітуди за ультразвукових хвиль в хвилеводі визначати саме натяг ниток з великою лінійною густиною в процесі виробництва текстильних полотен.

Залежність для визначення натягу ведучої гілки нитки за амплітудними співвідношеннями ультразвукових хвиль, що пройшли матеріал, до хвиль, які тільки падають на нього з врахуванням розсіювання хвиль, що відображається зміною величини самого модуля  $|W_{T3.}|$ , можна подати аналогічно виразу (4.25) ще як:

$$P_{1} = P_{0} + \frac{\left(2Z_{1} \cdot \sqrt{\frac{1}{|W_{T_{3}}|^{2}} - 1}}{\pi^{2} f \rho_{2} \cdot \cos v_{3}}\right) \cdot \left(e^{\mu_{T} \varphi_{T}} - 1\right)}{R + \frac{2Z_{1} \cdot \sqrt{\frac{1}{|W_{T_{3}}|^{2}} - 1 \cdot (1 - \delta_{T0})}}{\pi^{2} f \rho_{2} \cdot \cos v_{3}}} \times \left(4.27\right)$$

$$\times \left(P_{0} - B_{0} \cdot \left(2 \cdot \left(R + \frac{2Z_{1} \cdot \sqrt{\frac{1}{|W_{T_{3}}|^{2}} - 1 \cdot (1 - \delta_{T0})}}{\pi^{2} f \rho_{2} \cdot \cos v_{3}}\right)^{2}\right)^{-1}\right), \qquad (4.27)$$

- де  $|W_{T_{3.}}|$  модуль комплексного коефіцієнта проходження, який пропорційний амплітудним співвідношенням ультразвукових хвиль, що пройшли волокна матеріалу нитки, до хвиль, які тільки падають на неї з врахуванням згасання та розсіювання хвиль;
  - *v*<sub>3.</sub> кут між напрямком частини хвиль, що огинають нитку, та її поверхнею.

Для визначення самого діаметру нитки d або її радіусу r за допомогою ультразвукових хвиль, що пройшли матеріал, та хвиль, які оминають саму нитку, можна скористатися наступними виразами:

$$d = \frac{4Z_1 \cdot \sqrt{\frac{1}{|W_{T_3.}|^2} - 1}}{\pi^2 f \,\rho_2 \cdot \cos v_{3.}}, \text{ also } r = \frac{2Z_1 \cdot \sqrt{\frac{1}{|W_{T_3.}|^2} - 1}}{\pi^2 f \,\rho_2 \cdot \cos v_{3.}}.$$
(4.28)

В загальному вигляді враховуючи вирази (4.19), (4.27) та (4.28) можна представити залежність для натягу *P*<sub>1</sub> ведучої гілки нитки ще так:

$$P_{1} = P_{0} + \left(R + \frac{2Z_{1} \cdot \sqrt{\frac{1}{|W_{T_{3.}}|^{2}} - 1}}{\pi^{2} f \rho_{2} \cdot \cos v_{3.}}\right) \left(e^{\mu_{T} \phi_{T}} - 1\right) \times \left(R + 2Z_{1} \left(1 - P_{0} \cdot \left(R + \frac{2Z_{1} \cdot \sqrt{\frac{1}{|W_{T_{3.}}|^{2}} - 1}}{\pi^{2} f \rho_{2} \cdot \cos v_{3.}}\right) \times \left(\frac{P_{0} 2Z_{1} \cdot \sqrt{\frac{1}{|W_{T_{3.}}|^{2}} - 1}}{\pi^{2} f \rho_{2} \cdot \cos v_{3.}} + E_{1} b_{k} \times \left(\frac{2Z_{1} \cdot \sqrt{\frac{1}{|W_{T}|^{2}} - 1}}{\pi^{2} f \rho_{2} \cdot \cos v_{3.}} + E_{1} b_{k} \times \left(\frac{2Z_{1} \cdot \sqrt{\frac{1}{|W_{T}|^{2}} - 1}}{\pi^{2} f \rho_{2} \cdot \cos v_{3.}} + E_{1} b_{k} \times \right)\right)^{-1}$$

$$(4.29)$$

На практиці для підвищення чутливості ультразвукових хвиль до зміни діаметру нитки доцільно застосовувати малопотужні датчики та відповідні до них хвилеводи. Достатньо ефективними є хвилеводи, які мають прямокутний переріз.

На рис.4.13 – рис.4.22 показані графіки та поверхні, що відображають залежність амплітудних співвідношень ультразвукових хвиль  $|W_{T_{3.}}|$  від натягу P0 веденої та P1 ведучої гілки нитки для матеріалів бавовни (рис.4.13, рис.4.14), віскозних ниток (рис.4.15, рис.4.16), капронових ниток (рис.4.17, рис.4.18), вовни (рис.4.19, рис.4.20). На рис.4.21 показане порівняння поверхонь для різних матеріалів, розглянутих окремо на рис.4.13,6; рис.4.15,6; рис.4.17,6; рис.4.19,6, що відображають залежність амплітудних співвідношень ультразвукових хвиль  $|W_{T_{3.}}|$  від умовного радіуса нитки r та параметру  $cosv_{3.}$ , який показує вплив частини хвиль, що огинають нитку та її волокна (якщо присутня велика міжволоконна пористість). На рис.4.22 показане порівняння поверхонь залежностей  $|W_{T_{3.}}|$  від натягу  $P_0$  веденої та  $P_1$  ведучої гілки нитки для різних матеріалів, розглянутих окремо на рис.4.14; рис.4.16; рис.4.18; рис.4.20. Слід зазначити, що на рис.4.21 та рис.4.22 показані поверхні для різних матеріалів (бавовни, віскозних ниток, капронових ниток, вовни), які відображають залежність амплітуд тих ультразвукових хвиль, що в основному огинають нитку (оскільки це більша частина ультразвукового сигналу, за яким амплітудний детектор засобу визначення натягу нитки фіксує напругу, що пропорційна амплітуді хвиль, які надійшли на датчик). Частину ультразвукового сигналу, що самої безпосередньо структуру проходить крізь нитки, теж можна використовувати для визначення зміни міжволоконної пористості ниток. Цей ефект визначення зміни міжволоконної пористості в процесі натягу нитки також розглянутий у роботі та експериментально зафіксований за допомогою використання ультразвукових імпульсних сигналів складної форми. Для визначення зміни міжволоконної пористості та натягу нитки необхідно використовувати пакети ультразвукових хвиль з двома різними піками амплітуд.



Рис.4.13. Залежності  $|W_{T_{3.}}|$  від натягу  $P_{l,cH}$  бавовняної пряжі при  $P_{0} = 10 cH$ : а – зміна  $|W_{T_{3.}}|$ від натягу  $P_{l,cH}$  ведучої гілки бавовняної пряжі при різних  $\rho_{2}$ ; б – поверхня зміни  $|W_{T_{3.}}|$  від r, *мм* та параметру  $cosv_{3.}$  для бавовни



Рис.4.14. Поверхня зміни модуля |*W*<sub>T3.</sub>|, пропорційного амплітуді ультразвукових хвиль, що проходять простір з текстильними волокнами, від натягу *P*<sub>1</sub>,*cH* та від натягу *P*<sub>0</sub>,*cH* для бавовняного матеріалу при зміні його розглянутого умовного діаметра від 0,3*d* до 5,3*d* 



Рис.4.15. Залежності  $|W_{T_{3.}}|$  від натягу  $P_{I,cH}$  віскозних ниток при  $P_0 = 10 cH$ : а – зміна  $|W_{T_{3.}}|$  від натягу  $P_{I,cH}$  ведучої гілки віскозних ниток при різних  $\rho_2$ ; б – поверхня зміни  $|W_{T_{3.}}|$  від r, *мм* та параметру  $cosv_{3.}$  для віскозних ниток



Рис.4.16. Поверхня зміни модуля  $|W_{T_{3.}}|$ , пропорційного амплітуді ультразвукових хвиль, що проходять простір з текстильними волокнами, від натягу  $P_{1,cH}$  та від натягу  $P_{0,cH}$  для віскозного матеріалу при зміні його розглянутого умовного діаметра від 0,4d до 6,8d

3 рис.4.13 – рис.4.16 можна побачити як змінюється модуль комплексного коефіцієнту проходження  $|W_{T_{3.}}|$ , який пропорційний амплітудним співвідношенням ультразвукових хвиль (співвідношення хвиль, що проходять та оминають волокна нитки, до хвиль, які тільки падають на неї), від натягу  $P_0$  веденої та  $P_1$  ведучої гілки нитки для бавовни та віскози, а також від параметрів  $cosv_{3.}$  та умовного радіуса r цих текстильних матеріалів.

На рис.4.13,а та рис.4.15,а показано як змінюється модуль комплексного коефіцієнту проходження  $|W_{T_3.}|$  в залежності від зміни міжволоконної пористості та збільшення об'ємної щільності  $\rho_2$  текстильних матеріалів бавовни та віскози, що впливає на зміну натягу  $P_1$  ведучої гілки нитки при  $P_0 = 10 \ cH.3$  графіків можна побачити, що при майже однаковій амплітуді ультразвукових хвиль, натяг  $P_1$  для пряжі бавовни буде більшим за значення цього параметру для віскозної нитки з різною міжволоконною пористістю, яка впливає на об'ємну щільність  $\rho_2$  матеріалу. Залежності модуля  $|W_{T_3.}|$  від параметрів  $cosv_{3.}$ , що враховує більшу частину ультразвукових хвиль, які огинають нитку, та умовного радіуса r цих текстильних матеріалів показано на рис.4.13,6 та рис.4.15,6. З цих поверхонь можна побачити, що при зменшенні параметру  $cosv_{3.}$  збільшується частина хвиль, яка огинає нитку, разом з модулем  $|W_{T_3.}|$ , при цьому на амплітуду хвиль комплексно впливає одночасно і зміна міжволоконної пористості, що може змінюватися від крутки нитки та її натягу в процесі виготовлення трикотажних полотен.

Також у ході досліджень визначено, що при зміні умовних діаметрів ниток для розглянутих матеріалів (діаметри: d = 0,22 мм для пряжі бавовни з лінійною густиною 27,6 *текс*; d = 0,17 мм для нитки віскози з лінійною густиною 16,7 *текс*), амплітуда хвиль може змінюватися у певному діапазоні (рис.4.14 та рис.4.16). З поверхонь залежності модуля  $|W_{T3.}|$  видно, що амплітуда хвиль більше змінюється при однаковому натягу  $P_1$  саме для віскози.



Рис.4.17. Залежності  $|W_{T_{3.}}|$  від натягу  $P_{1,cH}$  капронових ниток при  $P_0 = 10 cH$ : а – зміна  $|W_{T_{3.}}|$ від натягу  $P_{1,cH}$  ведучої гілки капронових ниток при різних  $\rho_2$ ; б – поверхня зміни  $|W_{T_{3.}}|$  від r, *мм* та параметру  $cosv_{3.}$  для капронових ниток



Рис.4.18. Поверхня зміни модуля  $|W_{T_{3.}}|$ , пропорційного амплітуді ультразвукових хвиль, що проходять простір з текстильними волокнами, від натягу  $P_{1,cH}$  та від натягу  $P_{0,cH}$  для капронового матеріалу при зміні його розглянутого умовного діаметра від 0,3*d* до 4,8*d* 



Рис.4.19. Залежності  $|W_{T_{3.}}|$  від натягу  $P_{l,cH}$  вовняної пряжі при  $P_{0} = 10 cH$ : а – зміна  $|W_{T_{3.}}|$ від натягу  $P_{l,cH}$  ведучої гілки вовняної пряжі при різних  $\rho_{2}$ ; б – поверхня зміни  $|W_{T_{3.}}|$  від r, *мм* та параметру  $cosv_{3.}$  для вовни



Рис.4.20. Поверхня зміни модуля  $|W_{T_{3.}}|$ , пропорційного амплітуді ультразвукових хвиль, що проходять простір з текстильними волокнами, від натягу  $P_{1,cH}$  та від натягу  $P_{0,cH}$  для вовняного матеріалу при зміні його розглянутого умовного діаметра від 0,3*d* до 5,1*d* 

3 рис.4.17 – рис.4.20 можна побачити як змінюється модуль комплексного коефіцієнту проходження  $|W_{T_{3.}}|$  від натягу  $P_0$  веденої та  $P_1$  ведучої гілки нитки для капрону та вовни, а також від параметрів  $cosv_{3.}$  та умовного радіуса r цих текстильних матеріалів.

На рис.4.17,а та рис.4.19,а показано як змінюється модуль комплексного коефіцієнту проходження  $|W_{T3.}|$  в залежності від зміни міжволоконної пористості та збільшення об'ємної щільності  $\rho_2$  текстильних матеріалів капрону та вовни, що впливає на зміну натягу  $P_1$  ведучої гілки нитки при  $P_0 = 10 \ cH.$  3 графіків можна побачити, що при майже однаковій амплітуді ультразвукових хвиль, натяг  $P_1$  для нитки капрону буде набагато більшим за значення цього параметру для воняної пряжі з різною міжволоконною пористістю, яка впливає на об'ємну щільність  $\rho_2$  матеріалу. Залежності модуля  $|W_{T3.}|$  від параметрів  $cosv_{3.}$ , що враховує більшу частину ультразвукових хвиль, які огинають нитку, та умовного радіуса r цих текстильних матеріалів показано на рис.4.17,6 та рис.4.19,6. З цих поверхонь можна побачити, що при однакових умовних радіусах r нитки капрону та вовняної пряжі, амплітуда хвиль, яка пройшла простір з волокнами, буде меншою для першого текстильного матеріалу.

Також у ході досліджень визначено, що при зміні умовних діаметрів ниток для розглянутих матеріалів (діаметри:  $d = 0,2 \, MM$  для капронової нитки з лінійною густиною 28 *текс*;  $d = 0,23 \, MM$  для вовняної пряжі з лінійною густиною 29,9 *текс*), амплітуда хвиль може змінюватися у певному діапазоні з натягом  $P_1$  в діапазоні від 0 до 130 *cH* та від 0 до 110 *cH* (рис.4.18 та рис.4.20). З поверхонь залежності модуля  $|W_{T3.}|$  видно, що амплітуда хвиль більше змінюється при однаковому натягу  $P_1$  саме для вовни.

На рис.4.21. показане порівняння поверхонь зміни модуля  $|W_{T_{3.}}|$  від r, мм та  $cosv_{3.}$ , а на рис.4.22 показане порівняння зміни  $|W_{T_{3.}}|$  від натягу  $P_{l,cH}$  та від натягу  $P_{0,cH}$  для текстильних матеріалів бавовни, віскози, капрону та вовни.



Рис.4.21. Порівняння змін  $|W_{T_{3.}}|$  від r, *мм* та  $cosv_{3.}$  для різних матеріалів: а – залежності  $|W_{T_{3.}}|$  від r, *мм* та  $cosv_{3.}$  для розглянутих матеріалів, вид зверху; б – залежності  $|W_{T_{3.}}|$  від r, *мм* та  $cosv_{3.}$  для розглянутих матеріалів, вид знизу



Рис.4.22. Порівняння змін модуля  $|W_{T_{3.}}|$ , пропорційного амплітуді ультразвукових хвиль, що проходять простір з текстильними волокнами, від натягу  $P_{l,cH}$  та від натягу  $P_{0,cH}$  для розглянутих матеріалів

На рис.4.21 з порівняння поверхонь видно, що зміна модуля  $|W_{T_{3.}}|$  від r та cosv<sub>3.</sub> сильно відрізняється для капронових ниток у порівнянні з бавовняним, віскозним, вовняним текстильними матеріалами, які схожі за величиною цього параметру між собою. Якщо порівнювати поверхні, які зображені на рис.4.22, то найбільше амплітуда хвиль, що взаємодіють з ниткою, зменшується для вовни і має більшу чутливість до малої зміни натягу Р<sub>1</sub> нитки та найменший діапазон для його визначення. Нашменшу чутливість хвиль за зміною їхньої амплітуди до малої зміни натягу Р<sub>1</sub> нитки можна віднести до бавовняного матеріалу та найбільший діапазон для його визначення, що обумовлено як з технологічної точки зору, так із отриманням корисної вимірювальної інформації за допомогою безконтактних ультразвукових датчиків (відноситься до розширювань границь діапазону визначення натягу  $P_1$  за допомогою амплітудного методу). Наведені поверхні дозволять спростити отримані вирази, що описують взаємозв'язок ультразвукових хвиль з текстильним матеріалом під час його зондування. Це дозволить спростити задачу практичного втілення безконтактних засобів контролю натягу нитки з використанням спеціальних хвилеводів.

дослідження Проведені показали, ЩО за допомогою імпульсних ультразвукових сигналів можна визначати не тільки натяг ниток з великою лінійною густиною, але і ступінь крутки комплексних ниток за зміною їх міжволоконної пористості. Одночасно міжволоконну пористість та зміну натягу нитки можна визначати використовуючи ультразвукові пакети хвиль з різними піковими амплітудами. Із збільшенням амплітуди першого піку ультразвукового сигналу складної форми можна зробити висновок про збільшення величини натягу та зменшення умовного діаметру нитки відповідно до поверхонь зображених на рис.4.21, а за зменшенням другого піку ультразвукового сигналу про зменшення міжволоконної пористості нитки із зростанням її натягу та деформації.

Для реалізації таких методів безконтактного контролю натягу ниток різного текстилю необхідно застосовувати комутаційно-модуляційні засоби.

## 4.3. Розробка опорного амплітудного методу визначення натягу ниток з великою лінійною густиною, текстильних стрічок та полотен

Для можливості контролю натягу ниток з великою лінійною густиною, текстильних стрічок та полотен за зміною натягу їхніх волокон можна використовувати також амплітуду ультразвукових хвиль, які їх проходять у повздовжньому напрямку. При цьому необхідно реалізовувати контакт перетворювачів з текстильним матеріалом для кращої передачі ультразвукового сигналу. У даному випадку буде відбуватися розсіювання ультразвукових хвиль та їх згасання в матеріалі волокон та в середовищі міжволоконних пор з перетворенням частини звукової енергії в теплову. При збільшенні натягу текстильного матеріалу елементарні волокна у ньому починають однаково упорядковуватися в структурі стрічки або ниток, поступово розпрямляючись. Це призводить до збільшення швидкості розповсюдження ультразвукових хвиль в структурі самих волокон та в збільшені амплітуди коливань, які починають розповсюджуватися повздовжньо по самих волоконах матеріалу як ПО хвилеводах. На амплітуду ультразвукових хвиль впливає коефіцієнт їхнього згасання в структурі матеріалу (коефіцієнт залежить від упорядкованості волокон при натягу текстилю), який при її збільшенні зменшується відповідно.

Зазначене, що стосується повздовжнього прозвучування текстильних матеріалів (ниток полотен, текстильних стрічок та одиночних ниток з великою лінійною густиною) контактним способом, можна використовувати для опорного визначення натягу матеріалу. Потім це дасть можливість отриманні значення натягу порівнювати із визначеними значеннями за допомогою безконтактної системи контролю текстильних матеріалів з поперечним прозвучуванням текстилю. Оскільки повздовжньому прозвучуванні при текстильних волокон ультразвукова хвиля взаємодіє з більшою кількістю матеріалу ніж при поперечному його зондуванні, то чутливість зміни амплітуди до зміни натягу волокон також збільшується. Тому для налаштування ультразвукового датчика з перетворювачем, які входитимуть до подібного
опорного каналу системи безконтактного контролю натягу текстильного матеріалу, доцільно застосовувати значення амплітуд хвиль, що отримані при повздовжньому Відмінність зондуванні текстилю. при поперечному прозвучуванні матеріалу від повздовжнього полягає ще у тому, що для другого випадку величина *cosv*<sub>3.</sub> ≈1 при розпрямленні волокон текстилю, збільшенні натягу та при зменшенні міжволоконної пористості. При зменшенні натягу текстилю величина коефіцієнту згасання  $\alpha_3$  амплітуди хвиль у матеріалі збільшується, а  $cosv_{3.} < 1$  та буде зменшуватися у певних межах при наявності значних міжволоконних відстанях. Схожий ефект можна спостерігати при поперечному прозвучуванні багатошарового текстильного матеріалу із значною товщиною та малими порами в своїй структурі.

Покажемо вираз модуля комплексного коефіцієнта проходження  $|W_{nob.}|$ зондуючих ультразвукових хвиль, що пройшли текстильний матеріал з врахуванням величин  $\alpha_{3.}$ ,  $cosv_{3.}$  та поверхневої густини волоконної маси  $m_s$ , у наступному виді:

$$|W_{no6.}| = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \alpha_{3.} \frac{c_2}{\rho_1 c_1} \cdot \frac{K m_s \cos v_{3.}}{2\pi}\right)^2 + \left(\frac{K m_s f \cos v_{3.}}{\rho_1 c_1}\right)^2}}.$$
(4.30)

Якщо міжволоконні відстані в текстильному матеріалі досить малі, то пов'язавши вираз (4.30) з шириною  $B_{m.}$  та лінійною густиною  $T_{m.}$  матеріалу, можна показати модуль комплексного коефіцієнта повздовжнього проходження хвиль ще так:

$$|W_{no6.}| = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \alpha_{3.} \frac{c_2 T_{m.}}{2\pi \rho_1 c_1 B_{m.}}\right)^2 + \left(\frac{T_{m.} f}{B_{m.} \rho_1 c_1}\right)^2}}.$$
(4.31)

Зважаючи на те, що коефіцієнт згасання хвиль  $\alpha_{3.}$  змінюється в залежності від натягу текстильного контрольованого матеріалу (від зміни орієнтації елементарних волокон в його структурі), то запишемо наближено його як добуток початкового коефіцієнту згасання  $\alpha_{03}$  хвиль та співвідношення початкового натягу матеріалу до його кінцевого значення  $P_{n.} / P_{\kappa.}$ , ще у виді:

$$\alpha_{3.} \approx \alpha_{03.} \frac{P_{n.}}{P_{\kappa.}}.$$
(4.32)

Підставивши залежність (4.32) в (4.31) покажемо модуль комплексного коефіцієнта проходження ультразвукових хвиль ще як:

$$|W_{no6.}| = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \alpha_{03.} \frac{P_{n.} c_2 T_{m.}}{2\pi P_{\kappa.} \rho_1 c_1 B_{m.}}\right)^2 + \left(\frac{T_{m.} f}{B_{m.} \rho_1 c_1}\right)^2}}.$$
(4.33)

З останнього виразу можна визначити швидкість ультразвукових хвиль в текстильному матеріалі, що може змінюватися в залежності від зміни розпрямленості волокон та їх наближені до елементарного хвилеводу за розповсюдженням коливань по ним. Значення цієї швидкості хвиль можна подати так:

$$c_{2} = \frac{2\pi P_{\kappa} \rho_{1}c_{1} B_{m} \cdot \left(\sqrt{\frac{1}{|W_{no6.}|^{2}} - \left(\frac{T_{m} f}{B_{m} \rho_{1}c_{1}}\right)^{2}} - 1\right)}{\alpha_{03.} P_{n.} T_{m.}},$$
(4.34)

а поточний кінцевий натяг текстильного матеріалу можна тоді визначити як:

$$P_{\kappa.} = \frac{\alpha_{03.} P_{n.} c_2 T_{m.}}{2\pi \rho_1 c_1 B_{m.} \cdot \left(\sqrt{\frac{1}{|W_{no6.}|^2} - \left(\frac{T_{m.} f}{B_{m.} \rho_1 c_1}\right)^2 - 1}\right)}.$$
(4.35)

На рис.4.23 показані залежності зміни швидкості  $c_2$  хвиль від натягу  $P_{\kappa}$ . матеріалів та від їхньої лінійної густини  $T_{m}$ , а на рис.4.24 наведено поверхню залежності зміни модуля  $|W_{no6}|$  від зміни натягу  $P_{\kappa}$  та лінійної густини  $T_{m}$ . матеріалу.



Рис.4.23. Залежності зміни швидкості *c*<sub>2</sub> ультразвукових хвиль від натягу *P*<sub>к.</sub> різних текстильних матеріалів та від їхньої лінійної густини *T*<sub>m.</sub>:

а – залежності c<sub>2</sub> хвиль від натягу P<sub>к.</sub> текстильних матеріалів із значною міжволоконною пористістю; б – залежності c<sub>2</sub> хвиль від лінійної густини T<sub>m.</sub> текстильних матеріалів з малою міжволоконною пористістю



Рис.4.24. Поверхня залежності зміни модуля  $|W_{no6.}|$  повздовжнього проходження ультразвукових хвиль крізь текстильний матеріал від зміни натягу  $P_{\kappa.}$  та лінійної густини  $T_{m.}$  матеріалу

З рис. 4.23,а можна побачити, що при збільшенні натягу  $P_{\kappa}$  текстильного матеріалу збільшується і швидкість  $c_2$  розповсюдження ультразвукових хвиль в середені структури такого текстилю. При цьому у текстилі з більшою лінійною густиною  $T_m$ . швидкість розповсюдження  $c_2$  ультразвукових хвиль буде меншою за значення цього параметру у матеріалі з меншою лінійною густиною при однаковому натязі  $P_{\kappa}$ . На рис. 4.23,6 показано, що швидкість  $c_2$  ультразвукових хвиль в структурі текстилю зменшується при збільшенні лінійної густини  $T_m$  матеріалу та при меншому натязі  $P_{\kappa}$ . Також порівняння графіків з рис.4.23,а та рис.4.23,6 показує, що більша міжволоконна пористість може впливати на зменшення швидкості хвиль  $c_2$  в текстильному матеріалі при його повздовжньому прозвучуванні.

На рис.4.24 наведена поверхня залежності зміни модуля  $|W_{no6.}|$ повздовжнього проходження ультразвукових хвиль крізь текстильний матеріал від зміни натягу  $P_{\kappa}$  та лінійної густини  $T_{m.}$  матеріалу. Показано, що при збільшенні лінійної густини  $T_{m.}$  текстильного матеріалу амплітуда зондуючих хвиль, яка пропорційна модулю  $|W_{no6.}|$ , буде зменшуватись, а при збільшенні натягу  $P_{\kappa}$  текстилю, навпаки, амплітуда буде збільшуватись.

Проведений аналіз показує, що повздовжнє прозвучування дає можливість додатково використовувати такий параметр ультразвукових хвиль як зміну швидкості  $c_2$  зондуючих коливань в структурі текстилю. За цим параметром та амплітудою ультразвукових хвиль можна визначати додатково натяг  $P_{\kappa}$ . текстильного матеріалу в певних межах.

В основному повздовжнє прозвучування доцільно застосовувати при опорному порівнянні визначеного значення натягу текстильних полотен із такими значеннями, отриманими за допомогою безконтактного поперечного зондування контрольованого матеріалу.

Якщо розглядати безконтактне визначення зміни натягу текстильного полотна при поперечному його зондуванні, то середню зміну цього параметру на

певній ділянці площі матеріалу, можна визначити із зміни розмірів міжволоконних пор. Ця зміна пористості викликана зміною діаметрів ниток в структурі текстилю при його натязі. У свою чергу, зміна розмірів діаметрів ниток може визначатися за допомогою зміни амплітуди відбитих від поверхні полотна ультразвукових хвиль.

При використанні діапазону значень натягу, що контролюється, в межах, де залежність зміни амплітуди відбитих ультразвукових хвиль від натягу ниток самого полотна характеризується усередненою величиною, можна таку залежність спростити та показати так:

$$P_{\kappa.} = P_{n.} \cdot \left( \frac{\left| V_{nonep.} \right|}{\left| V_{0 nonep.} \right|} \right)^{3}.$$
(4.36)

де  $|V_{0\,nonep.}|$  – комплексний коефіцієнт відбиття від текстильного одношарового полотна з початковим його натягом  $P_{n.}$ ;

 $|V_{nonep.}|$  – комплексний коефіцієнт відбиття від текстильного одношарового полотна при кінцевому його натязі  $P_{\kappa.}$ .

Визначення можливого відхилення  $\delta_{P_{\kappa}}$  значення натягу полотна, яке визначене при поперечному прозвучуванні текстильного полотна, у порівнянні з опорним значенням, отриманим за допомогою повздовжнього зондування, можна подати як:

$$\delta_{P_{\kappa.}} = \left(\frac{2\pi\rho_{1}c_{1}|V_{nonep.}|^{3} \cdot \left(\sqrt{\frac{1}{|W_{noe.}|^{2}} - \left(\frac{m_{s}f}{\rho_{1}c_{1}}\right)^{2}} - 1\right)}{\alpha_{03.}c_{2}m_{s}|V_{0nonep.}|^{3}} - 1\right) \cdot 100\%.$$
(4.37)

Враховуючи вираз (4.37) можна коригувати безконтактну ультразвукову систему визначення натягу текстильного одношарового полотна з наскрізними

порами. Це дасть можливість, у свою чергу, підвищити точність безконтактного визначення поверхневої густини самого контрольованого полотна з врахуванням його натягу на різних текстильних машинах.

Для контролю текстильних одношарових полотен з наскрізними порами повздовжнє прозвучування необхідно реалізовувати за допомогою певної кількості випромінюючих та приймаючих перетворювачів. Такі пристрої необхідно закріплювати так, щоб ультразвукові хвилі при можливості розповсюджувались по ниткам полотна (для тканин по ниткам основи та утоку). Частина хвиль буде розповсюджуватись між нитками з меншою швидкістю, що може вносити похибку при визначенні натягу. Тому на визначення натягу полотен впливє їхня структура, що робить складною задачу створення універсальної системи визначення цього параметру при повздовжньому прозвучуванні ниток для різних текстильних полотен.

За допомогою залежності (4.35) можна аналогічно до текстильних полотен визначати натяг і для ниток з великою лінійною густиною та для текстильних стрічок. Різниця для поперечного прозвучування полягає у використанні додатково хвилеводів, які дадуть змогу підвищити чутливість зміни амплітуди ультразвукових хвиль до зміни діаметру текстильного матеріалу та його натягу.

Якщо безконтактно контролювати натяг одиночних ниток за допомогою спеціальних хвилеводів, то можна скористатися отриманими в роботі виразами (3.166), (3.168) та (4.37), які дадуть змогу за зміною амплітуди ультразвукових хвиль, що взаємодіють з матеріалом, визначати і зміну натягу самих волокон.

Для подібного безконтактного контролю цілого ряду ниток необхідно застосовувати спеціальні концентруючі поверхні тиску звукових хвиль. Вони допоможуть визначати середній натяг цих ниток на текстильних машинах в процесі виробництва полотен.

Налаштування таких систем контролю доцільно проводити за допомогою опорного повздовжнього прозвучування таких ниток та визначення еталонних значень натягу для них.

### Висновки до розділу 4

1. Показано, що за зміною амплітудних співвідношень, які пропорційні модулям |V| та  $|V_o|$ , відбитих ультразвукових хвиль від полотна тканини та від ниток основи відносно амплітуди хвилі, яка падає на поверхню матеріалу, можна визначати їхній натяг  $Q_o$  та силу P прибою нитки утоку в процесі ткацтва.

2. Наведено результати досліджень безконтактного визначення натягу  $Q_o$  ниток основи, які дадуть можливість зменшити їх обривність у процесі вироблення текстильних полотен. Також показано, що знаючи натяг ниток  $Q_o$ , можна визначити фактичне значення поверхневої густини  $m_s$  самого текстильного полотна при його виробленні.

3. Приведено залежності модуля комплексного коефіцієнту проходження  $|W_{T_3.}|$  від натягу  $P_0$  веденої та  $P_1$  ведучої гілки нитки або пряжі для бавовни, віскози, капрону та вовни, а також від параметрів  $cosv_{3.}$  та умовного радіуса r цих текстильних матеріалів. Зазначені нитки та пряжа поширені і можуть застосовуватися на трикотажних машинах для виробництва різних полотен.

4. Показано залежності модуля  $|W_{T_3.}|$  ультразвукових хвиль від зміни об'ємної щільності  $\rho_2$  текстильних матеріалів, що впливає на зміну натягу  $P_1$  ведучої гілки нитки при  $P_0 = 10 \ cH$ .

5. Одержано залежності зміни швидкості  $c_2$  розповсюдження ультразвукових хвиль в текстильних матеріалах з різною лінійною густиною від їхнього натягу при повздовжньому прозвучуванні волокон. Доведено, що із збільшенням натягу текстильного матеріалу швидкість  $c_2$  розповсюдження хвиль в ньому збільшується, а при однаковому натязі із збільшенням лінійної густини матеріалу швидкість  $c_2$  коливань, навпаки, зменшується.

6. Отримано залежності модуля  $|W_{no6.}|$  повздовжнього проходження ультразвукових хвиль текстильного матеріалу від натягу та від його лінійної густини, де для першого випадку залежність зростає, а для другого – спадає.

#### РОЗДІЛ 5

## РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ ТА МЕТОДІВ ПОБУДОВИ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕКСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

На основі проведених досліджень [379 - 428], для можливості контролю технологічних параметрів текстильних матеріалів в умовах сучасного розвитку науки і техніки, доцільно застосовувати безконтактні методи отримання вимірювальної інформації про ці параметри у поєднанні з сучасними комп'ютеризованими системами.

Для можливості забезпечення належної якості текстильних полотен доцільно ще на етапі їх виробництва контролювати поверхневу густину матеріалу та його однорідність. Зазначений технологічний параметр можна забезпечувати в допустимих межах при контролі натягу ниток основи на технологічному обладнанні. Це дасть можливість підвищити якість полотен, за рахунок дотримання поверхневої густини матеріалу в допустимих визначених межах та її коригування в процесі виробництва. Таке можливе тільки при інтеграції комп'ютеризованих систем безконтактного контролю поверхневої густини текстильних матеріалів та натягу ниток основи з текстильними машинами. На цьому обладнанні вироблятимуться полотна з подальшим контролем параметрів технологічних процесів. Тому розглянемо подібну комп'ютеризовану систему з безконтактним скануванням текстильного полотна. II можна застосовувати в процесі ткацтва полотна на технологічнму обладнанні для забезпечення зворотнього зв'язку між нею та ткацьким верстатом за необхідності. Слід зазначити, що датчики на проходження ультразвукових хвиль крізь тканину можна встановлювати на ділянці технологічного обладнання, де є двосторонній доступ по обидві сторони полотна. Можна проводити сканування тканини за допомогою рухомих платформ з датчиками під час руху текстильного матеріалу, або використовуючи лінійку з безконтактними датчиками з багатьма каналами збору та оцифровки отриманих даних. Далі будемо розглядати

скануючу автоматизовану систему з рухомими платформами датчиків, що є більш раціональним вирішенням даної задачі з технічної точки зору.

# 5.1. Розробка комп'ютеризованої системи безконтактного контролю технологічних параметрів тканин в процесі їх виробництва

Для можливості оперативного контролю та дотримання поверхневої густини текстильних полотен в необхідних регламентованих межах потрібно контролювати натяг ниток основи на верстатах, де вони виробляються. При застосуванні ультразвукових безконтактних методів, для реалізації поставленого потрібно використовувати додатково завдання, один опорний метод вимірювання натягу ниток та полотна. Такий опорний метод повинен давати можливість визначати значення натягу ниток в кожній точці еталонного текстильного полотна та порівнювати отриманні значення із значеннями, які будуть визначатися безконтактними засобами при скануванні еталонної та контрольованої тканин. Також опорний метод повинен забезпечувати більший діапазон вимірювання натягу ниток ніж безконтактні засоби вимірювання цієї величини. Це дасть можливість визначати робочий діапазон безконтактних засобів вимірювання натягу текстильних полотен та налаштовувати їх з допустимою похибкою. Зазначене проводиться при порівнянні вимірюваних величин, отриманих при скануванні еталонної та контрольованої тканин з однаковою структурою та пористістю. Вирішуючи поставлені задачі та враховуючи, що пористість може тканин впливати на проходження ультразвукових хвиль крізь полотно та на їхнє відбиття від поверхні матеріалу, потрібно забезпечувати відповідне постійне коригування системи. При зміні контрольованого матеріалу систему треба налаштовувати, що пов'язано із зміною структури полотна, яка впливає часто на зміну його пористості.

Отримані відхилення між показами повздовжнього (опорного) та поперечного прозвучування матеріалу дозволять спочатку визначати робочий діапазон значень натягу, який можна застосовувати при безконтактному контролі полотна в процесі його виробництва. Це зумовлено тим, що поперечне прозвучування матеріалу дає меншу чутливість зміни амплітуди ультразвукових хвиль до зміни натягу текстильних волокон, якщо порівнювати його з повздовжнім прозвучуванням. Оскільки при безконтактному контролі можна реалізувати тільки поперечне зондування матеріалу, то отримане відхилення дозволяє додатково уточнювати робочий діапазон натягу, для якого можливе безконтактне визначення параметру за допомогою ультразвукових хвиль, що відноситься до ниток основи та до текстильного полотна. Поправка відхилення за температурою та вологістю вноситься до вимірюваного значення натягу текстильного матеріалу у вигляді цифрового коду. Крайні значення діапазону вимірюваних величин натягу, які визначаються за допомогою опорного прозвучування ультразвуковими хвилями, порівнянюються з показами ваги вантажу, що діє на еталонне полотно у процесі досліджень на розтяг матеріалу.

Представимо комп'ютеризовану систему сканування текстильного полотна в процесі його ткацтва з блоком опорного її налаштування за еталонною тканиною (БОН). Цей блок реалізує собою опорний метод корекції виміряних значень натягу текстильних матеріалів, отриманих за допомогою безконтактних датчиків скануючої платформи комп'ютеризованої системи. Розглянемо структурну схему комп'ютеризованої системи сканування текстильного полотна (рис.5.1) в процесі його виробництва більш детальніше.

Комп'ютеризована система сканування текстильних полотен складається з: мікроконтролера 1 (МК1), мікроконтролера 2 (МК2), формувача імпульсного сигналу 3, підсилювача 4, блока комутації 5, п'єзоелектричних перетворювачів 6, 7, блока комутації 8, п'єзоелектричних перетворювачів 9, 10, 11, регульованого підсилювача 12, амплітудного детектора 13, блока комутації 14, мікросхеми перетворення логічних рівнів 15, персонального комп'ютера 16 (ПК16), блока керування двигунами 17 (БКД 17) для скануючих платформ, блока комутації 20, п'єзоелектричних перетворювачів 21, 22, 23, 24, 25, 26, блока комутації 27, регульованого підсилювача 28, амплітудного детектора 29, контрольовані нитки основи 18, контрольована тканина 19, еталонна тканина 30, еталонні нитки основи 31.



Рис.5.1. Структурна схема комп'ютеризованої скануючої системи для контролю технологічних параметрів тканин в процесі виробництва

Описати роботу комп'ютеризованої системи можна наступним чином. Імпульси ультразвукової частоти подаються з МК2 на формувач імпульсного сигналу 3, з виходу якого пакети імпульсів з напругою U<sub>m</sub> подаються на підсилювач 4. Після підсилення імпульсний сигнал почергово надходить через блок комутації 20, то на п'єзоперетворювач 21, то на п'єзоперетворювач 22, або на п'єзоперетворювач 23, за допомогою яких перетворюється в ультразвукові хвилі. Переключення блоку комутації 20 контролюється МК2 за певним алгоритмом. Зазначені випромінювачі ультразвукових хвиль 21, 22, 23 та приймачі коливань 24, 25, 26 відносяться до складу БОН, де відбувається безконтактних перетворювачів налаштування системи, через опорне прозвучування еталонного полотна та ряду ниток основи з порівнянням результатів з даними отриманими при використанні п'єзоперетворювачів 6, 7, 9, 10, 11.

Випромінені ультразвукові коливання п'єзоперетворювачем 22 проходять повздовжньо крізь ряд еталонних ниток основи, які розтягуються за допомогою спеціального пристрою або вантажу, після чого вони потрапляють на п'єзоперетворювач 25, де перетворюються на електричні коливання. Потім вони проходять через блок комутації 27, який переключається МК2 синхронно з блоком 20 на різні канали зондування матеріалу. Далі електричні коливання підсилюються за потужністю підсилювачем 28 та детектуються з перетворенням у постійну напругу  $U_1$  за допомогою амплітудного детектора 29. Ця напруга  $U_1$ потрапляє, через блок комутації 14, до МК1, який контролює переключення блоку комутації 14. У самому МК1 відбувається перетворення у цифровий код  $N_1$ десятирозрядного внутрішнього аналого-цифрового за допомогою перетворювача (АЦП) детектованої напруги U<sub>1</sub>, яка пропорційна амплітуді ультразвукових хвиль, що пройшли повздовжньо крізь еталонний ряд ниток основи 31. Цей код N<sub>1</sub> з врахуванням одиниці найменшого молодшого розряду *г*<sub>и</sub> АЦП МК1 можна представити у наступному виді:

$$N_{1} = \frac{U_{1}}{r_{u}} = \frac{K_{1}K_{2}K_{3}K_{4}K_{5}K_{6}K_{7}}{\sqrt{\left(1 + \alpha_{13} \cdot \frac{P_{noc}c_{oc}T_{oc}}{2\pi P_{KOC}Z_{1}B_{oc}}\right)^{2} + \left(\frac{T_{oc}f}{B_{oc}Z_{1}}\right)^{2}} \frac{U_{m}}{r_{u}},$$
(5.1)

- де  $U_m$  амплітуда напруги електричних коливань на виході формувача імпульсного сигналу 3;
  - *r*<sub>*u*</sub> одиниця найменшого молодшого розряду АЦП МК1 за напругою;
  - U<sub>1</sub> амплітуда напруги, яка утворюється на виході детектора 29, після проходження ультразвукових хвиль крізь еталонний ряд ниток основи 31 з наступним перетворенням в електричні коливання за допомогою п'єзоперетворювача 25 та подання їх на детектор 29;
  - α<sub>13.</sub> початковий коефіцієнт згасання амплітуди коливань в матеріалі ниток основи 31 при початковому натязі *P<sub>noc</sub>* та при повздовжньому проходженні ультразвукових хвиль крізь нитки;
  - *T<sub>oc</sub>* лінійна густина еталонних ниток основи 31;
  - *B*<sub>oc</sub> ширина ряду еталонних ниток основи 31, що прозвучуються;
  - *c<sub>oc</sub>* швидкість розповсюдження ультразвукових хвиль в еталонних нитках основи 31;
    - *f* частота ультразвукових хвиль;
  - *P*<sub>*noc*</sub> початковий натяг еталонних ниток основи 31;
  - *Р<sub>кос</sub>* кінцевий натяг еталонних ниток основи 31;
    - Z<sub>1</sub> акустичний опір повітряного середовища;
    - *K*<sub>1</sub> коефіцієнт підсилення підсилювача 4;
    - K<sub>2</sub> коефіцієнт передачі сигналу блоком комутації 20;
    - К<sub>3</sub> коефіцієнт перетворення коливань випромінюючим п'єзоперетворювачем 22 та приймаючим п'єзоперетворювачем 25;
    - *К*<sub>4</sub> коефіцієнт передачі сигналу блоком комутації 27;
    - К<sub>5</sub> коефіцієнт підсилення регульованого підсилювача 28;

*K*<sub>6</sub> – коефіцієнт перетворення напруги амплітудного детектора 29;

К7 – коефіцієнт передачі сигналу блоком комутації 14.

Виходячи з виразу (5.1) одиницю напруги найменшого молодшого розряду десятирозрядного АЦП МК1 можна виразити так:

$$r_{u1} = \frac{U_{max}}{N_{max}} = \frac{5B}{2^0 + 2^1 + 2^2 + 2^3 + 2^4 + 2^5 + 2^6 + 2^7 + 2^8 + 2^9} = \frac{5B}{1023},$$
 (5.2)

де U<sub>max</sub> – максимальна амплітуда напруги, яка може бути прийнятою та оцифрованою за допомогою внутрішнього АЦП МК1;

N<sub>max</sub> – код, який пропорційно відповідає максимальній амплітуді напруги

$$U_{max}$$
.

Інший випромінюваних пакет ультразвукових коливань п'єзоперетворювачем 21, які проходять повздовжньо крізь ряд ниток основи, але вже в структурі еталонної тканини 30, яка розтягується за допомогою спеціального пристрою або вантажу, після чого вони потрапляють на п'єзоперетворювач 24, де перетворюються на електричні коливання. Потім вони проходять через блок комутації 27, який переключається МК2 синхронно з блоком 20 на різні канали зондування матеріалу аналогічно до першого розглянутого випадку. Далі електричні коливання підсилюються за потужністю підсилювачем 28 та детектуються з перетворенням у постійну напругу U<sub>2</sub> за допомогою амплітудного детектора 29. Ця напруга U<sub>2</sub> потрапляє, через блок комутації 14, до МК1, який контролює переключення блоку комутації 14. У самому МК1 відбувається перетворення у цифровий код N<sub>2</sub> за допомогою десятирозрядного внутрішнього АЦП детектованої напруги U<sub>2</sub>, яка пропорційна амплітуді ультразвукових хвиль, що пройшли повздовжньо крізь ряд ниток основи в структурі еталонної тканини 30. Цей код N2, що приймає участь в розрахунках параметру натягу, з врахуванням одиниці найменшого молодшого розряду  $r_u$  АЦП МК1 можна представити як:

$$N_{2} = \frac{U_{2}}{r_{u}} = \frac{K_{1}K_{2}K_{4}K_{5}K_{6}K_{7}K_{8}}{\sqrt{\left(1 + \alpha_{23} \cdot \frac{P_{no}c_{om}T_{oc}}{2\pi P_{\kappa o}Z_{1}B_{om}}\right)^{2} + \left(\frac{T_{oc}f}{B_{om}Z_{1}}\right)^{2}} \frac{U_{m}}{r_{u}},$$
(5.3)

- де α<sub>23.</sub> початковий коефіцієнт згасання амплітуди коливань в матеріалі ниток основи в структурі еталонної тканини 30 при початковому натязі *P<sub>no</sub>* та при повздовжньому проходженні ультразвукових хвиль крізь нитки;
  - *B<sub>om</sub>* ширина ряду ниток основи в структурі еталонної тканини 30, що прозвучується;
  - с<sub>от</sub> швидкість розповсюдження ультразвукових хвиль в нитках основи в структурі еталонної тканини 30;
  - *P<sub>no</sub>* початковий натяг ниток основи в структурі еталонної тканини 30;
  - *P*<sub>ко</sub> кінцевий натяг ниток основи в структурі еталонної тканини 30;
  - K<sub>8</sub> коефіцієнт перетворення коливань випромінюючим

п'єзоперетворювачем 21 та приймаючим п'єзоперетворювачем 24.

Пакет випромінюваних ультразвукових коливань п'єзоперетворювачем 23, які проходять повздовжньо крізь ряд ниток утоку в структурі еталонної тканини 30, яка розтягується, після чого вони потрапляють на п'єзоперетворювач 26, де перетворюються на електричні коливання. Потім вони проходять через блок комутації 27, який переключається МК2 синхронно з блоком 20 на різні канали зондування матеріалу аналогічно до першого та другого розглянутих випадків. Далі електричні коливання підсилюються за потужністю підсилювачем 28 та детектуються з перетворенням у постійну напругу  $U_3$  за допомогою амплітудного детектора 29. Ця напруга  $U_3$  потрапляє, через блок комутації 14, до МК1. У самому МК1 відбувається перетворення у цифровий код  $N_3$  за допомогою внутрішнього АЦП детектованої напруги  $U_3$ , яка пропорційна

амплітуді ультразвукових хвиль, що пройшли повздовжньо крізь ряд ниток утоку в структурі еталонної тканини 30. Цей код N<sub>3</sub> можна представити так:

$$N_{3} = \frac{U_{3}}{r_{u}} = \frac{K_{1}K_{2}K_{4}K_{5}K_{6}K_{7}K_{9}}{\sqrt{\left(1 + \alpha_{33}}\frac{P_{ny}c_{ym}T_{ym}}{2\pi P_{\kappa y}Z_{1}B_{ym}}\right)^{2} + \left(\frac{T_{ym}f}{B_{ym}Z_{1}}\right)^{2}}\frac{U_{m}}{r_{u}},$$
(5.4)

- де α<sub>33.</sub> початковий коефіцієнт згасання амплітуди коливань в матеріалі ниток утоку в структурі еталонної тканини 30 при початковому натязі *P<sub>ny</sub>* та при повздовжньому проходженні ультразвукових хвиль крізь них;
  - $T_{ym}$  лінійна густина ниток утоку в структурі еталонної тканини 30;
  - *B<sub>ym</sub>* ширина ряду ниток утоку в структурі еталонної тканини 30, що прозвучується;
  - *c<sub>ym</sub>* швидкість розповсюдження ультразвукових хвиль в нитках утоку в структурі еталонної тканини 30;
  - *P<sub>ny</sub>* початковий натяг ниток утоку в структурі еталонної тканини 30;
  - *P<sub>ку</sub>* кінцевий натяг ниток утоку в структурі еталонної тканини 30;
  - К9 коефіцієнт перетворення коливань випромінюючим

п'єзоперетворювачем 23 та приймаючим п'єзоперетворювачем 26.

Після подальшого поперечного прозвучування еталонних ниток основи 31 та етолонної тканини 30 при різних натягах матеріалу визначається робочий діапазон та відхилення показів безконтактних перетворювачів у порівнянні із значеннями, які отримані за допомогою використання опорного методу. Далі з врахуванням налаштувань безконтактна комп'ютеризованої система починає сканувати полотно 19 вже на ткацькому верстаті.

Електричні коливання, які виробляються та поступають на вихід формувача імпульсного сигналу 3, через блок комутації 5, який переключається МК1, далі потрапляють на вхід п'єзоперетворювача 10, де перетворюються в ультразвукові хвилі. Ці коливання нормально падають на контрольовану 19 ïï, тканину та поперечно проходять а потім потрапляють на п'єзоперетворювач 11, де знову перетворюються на електричні коливання. Після чого вони надходять через блок комутації 8, який переключається МК1, на регульований підсильович 12 та підсилюються за потужністю. Утворені електричні коливання детектуються за допомогою амплітудного детектора 13 з перетворенням у постійну напругу U4, яка пов'язана залежністю з поверхневою густиною  $m_s$  контрольованої тканини 19. Потім напруга  $U_4$  надходить через блок комутації 14, який теж переключає вимірювальні канали за допомогою МК1 до внутрішнього АЦП МК1. В процесі оцифровування значення напруги  $U_4$  створюється код N4, який можна показати як:

$$N4 = \frac{U_4}{r_u} = K_1 K_7 K_{10} K_{11} K_{12} K_{13} K_{14} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{K m_s f \cos \nu}{Z_1}\right)^2}} \frac{U_m}{r_u},$$
 (5.5)

де  $K_{11}$ - коефіцієнт перетворення коливань випромінюючим

п'єзоперетворювачем 10 та приймаючим п'єзоперетворювачем 11;

- *K* коефіцієнт зміни розмірів пор у порівнянні з еталонною тканиною 30 з певним натягом;
- *v* кут між напрямом розповсюдження ультразвукових хвиль, які

проходять крізь пори контрольованої тканини 19, і її поверхнею.

Відбиті ультразвукові хвилі від поверхні полотна контрольованої тканини 19 потрапляють на п'єзоперетворювач 9, потім перетворюються на електричні коливання та потрапляють на регульований підсилювач потужності 12. Далі ці коливання детектуються за допомогою амплітудного детектора 13 з перетворенням у постійну напругу  $U_5$ , яка пов'язана залежністю із зміною коефіцієнту *K* контрольованої тканини 19. Потім напруга  $U_5$  надходить через блок комутації 14 при почерговому вимірюванні до внутрішнього АЦП МК1. В процесі обробки виміряних значень напруги U<sub>5</sub> створюється код N<sub>5</sub>, який можна показати так:

$$N_{5} = \frac{U_{5}}{r_{u}} = K_{1} K_{7} K_{10} K_{12} K_{13} K_{14} K_{15} \frac{K_{\rho}}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z_{1}}{K m_{s} f \cos v}\right)^{2}}} \frac{U_{m}}{r_{u}},$$
 (5.6)

де  $K_{15}$  – коефіцієнт перетворення коливань випромінюючим

п'єзоперетворювачем 10 та приймаючим п'єзоперетворювачем 9;

 $K_{
ho}-$ коефіцієнт часткового потрапляння відбитих від контрольованої

тканини 19 ультразвукових хвиль на приймаючий п'єзоперетворювач 9.

Окремо електричні коливання, які виробляються та поступають на вихід формувача імпульсного сигналу 3, через блок комутації 5, який переключається MK1, далі потрапляють на вхід п'єзоперетворювача 6, де перетворюються в ультразвукові хвилі. Ці коливання нормально падають на контрольований ряд ниток основи 18 у певний момент часу, що синхронізовано з роботою ткацького верстата, частина яких відбивається від цього ряду ниток, а потім потрапляє на п'єзоперетворювач 7, де знову перетворюються ультразвукові хвилі на електричні коливання. Після чого вони надходять через блок комутації 8, який переключається MK1, на регульований підсильович 12 та підсилюються за потужністю. Утворені електричні коливання детектуються за допомогою амплітудного детектора 13 з перетворенням у постійну напругу  $U_6$ , яка пов'язана залежністю з лінійною густиною  $T_{oc}$  ряду ниток основи 18. Потім напруга  $U_6$  надходить через блок комутації 14, який теж переключає вимірювальні канали за допомогою MK1 до внутрішнього АЦП MK1. Отже, за значенням напруги  $U_6$  створюється код  $N_6$ , який можна показати так:

$$N_{6} = \frac{U_{6}}{r_{u}} = K_{1} K_{7} K_{10} K_{12} K_{13} K_{14} K_{16} \frac{K_{\rho o}}{\sqrt{1 + \left(\frac{B_{om} Z_{1}}{T_{oc} f \cos v_{o}}\right)^{2}}} \frac{U_{m}}{r_{u}},$$
 (5.7)

де K<sub>16</sub>-коефіцієнт перетворення коливань випромінюючим

п'єзоперетворювачем 6 та приймаючим п'єзоперетворювачем 7;

 $K_{
hoo}-$ коефіцієнт часткового потрапляння відбитих від ниток основи 18

ультразвукових хвиль на приймаючий п'єзоперетворювач 7.

 $v_o-$ кут між напрямом хвилі, що відбивається від ряду ниток основи 18 у

бік наскрізного проходження сигналу, та самими нитками.

Отримана вимірювальна інформація у вигляді цифрових кодів  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$ ,  $N_4$ ,  $N_5$ ,  $N_6$  через мікросхему перетворення логічних рівнів 15 потрапляє до ПК 16, де за допомогою спеціального програмного забезпечення обробляється та визначаються основні технологічні параметри. Натяг  $P_{\kappa oc}$  ряду еталонних ниток основи 31 виходячи з виразу (5.1) можна показати як:

$$P_{KOC} = \frac{\alpha_{13.} P_{noc} c_{oc} T_{oc}}{2\pi Z_1 B_{oc} \cdot \left(\sqrt{\left(\frac{K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 K_6 K_7 U_m}{U_1}\right)^2 - \left(\frac{T_{oc} f}{B_{oc} Z_1}\right)^2} - 1\right)}.$$
 (5.8)

При налаштуванні системи, коли  $U_{max} = K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 K_6 K_7 U_m$ , тоді натяг  $P_{\kappa o c}$  можна представити у вигляді залежності кодів, за якими цей параметр буде визначатися програмою на ПК 16 так:

$$P_{\kappa oc} = \frac{P_{noc} N_{\alpha 1} N_{c1} N_{T1}}{2\pi N_{zb1} \cdot \left(\sqrt{\left(\frac{N_{max}}{N_1}\right)^2 - \left(\frac{N_{T1} N_f}{N_{zb1}}\right)^2 - 1}\right)},$$
(5.9)

- де N<sub>α1</sub> код, який відповідає початковому коефіцієнту згасання α<sub>13.</sub> амплітуди коливань в матеріалі еталонних ниток основи 31;
  - N<sub>c1</sub>- код, який відповідає швидкості c<sub>oc</sub> розповсюдження ультразвукових хвиль в еталонних нитках основи 31;
  - N<sub>T1</sub>- код, який відповідає лінійній густині Т<sub>ос</sub>еталонних ниток основи 31;

N<sub>f</sub> – код, який відповідає частоті f ультразвукових хвиль;

 $N_{zb1}$  – код, який відповідає параметру  $B_{oc} \cdot Z_1$ .

Коди, які не визначаються за допомогою ультразвукових датчиків записуються окремо до програми обробки вимірювальної інформації.

Натяг *Р<sub>ко</sub>* ряду ниток основи в структурі еталонної тканини 30 враховуючи вираз (5.3) можна подати як:

$$P_{\kappa o} = \frac{\alpha_{23.} P_{no} c_{om} T_{oc}}{2\pi Z_1 B_{om} \cdot \left(\sqrt{\left(\frac{K_1 K_2 K_4 K_5 K_6 K_7 K_8 U_m}{U_2}\right)^2 - \left(\frac{T_{oc} f}{B_{om} Z_1}\right)^2 - 1\right)},$$
(5.10)

при попередньому налаштуванні з врахуванням, коли додатково  $K_3 = K_8$ , тоді натяг  $P_{\kappa o}$  можна представити у вигляді залежності кодів, за якими цей параметр буде визначатися програмою на ПК 16 так:

$$P_{\kappa o} = \frac{P_{no} N_{\alpha 2} N_{c2} N_{T1}}{2\pi N_{zb2} \cdot \left(\sqrt{\left(\frac{N_{max}}{N_2}\right)^2 - \left(\frac{N_{T1} N_f}{N_{zb2}}\right)^2} - 1\right)},$$
(5.11)

- де N<sub>α2</sub> код, який відповідає початковому коефіцієнту згасання α<sub>23.</sub> амплітуди коливань в матеріалі ниток основи в структурі еталонної тканини 30;
  - N<sub>c2</sub>- код, який відповідає швидкості c<sub>om</sub> розповсюдження ультразвукових хвиль в нитках основи в структурі еталонної тканини 30;
  - $N_{zb2}$  код, який відповідає параметру  $B_{om} \cdot Z_1$ .

Натяг *Р<sub>ку</sub>* ряду ниток утоку в структурі еталонної тканини 30 враховуючи вираз (5.4) можна подати у виді:

$$P_{Ky} = \frac{\alpha_{33.} P_{ny} c_{ym} T_{ym}}{2\pi Z_1 B_{ym} \cdot \left(\sqrt{\left(\frac{K_1 K_2 K_4 K_5 K_6 K_7 K_9 U_m}{U_3}\right)^2 - \left(\frac{T_{ym} f}{B_{ym} Z_1}\right)^2} - 1\right)}, \quad (5.12)$$

при додатковому налаштуванні, коли  $K_3 = K_9$ , тоді натяг  $P_{Ky}$  можна представити у вигляді залежності кодів, за якими цей параметр буде визначатися програмою на ПК 16 наступним чином:

$$P_{Ky} = \frac{P_{ny} N_{\alpha 3} N_{c3} N_{T3}}{2\pi N_{zb3} \cdot \left(\sqrt{\left(\frac{N_{max}}{N_3}\right)^2 - \left(\frac{N_{T3} N_f}{N_{zb3}}\right)^2} - 1\right)},$$
(5.13)

- де N<sub>α3</sub> код, який відповідає початковому коефіцієнту згасання α<sub>33</sub> амплітуди коливань в матеріалі ниток утоку в структурі еталонної тканини 30; N<sub>c3</sub> код, який відповідає швидкості c<sub>ym</sub> розповсюдження ультразвукових
  - $N_{T3}$  код, який відповідає лінійній густині  $T_{ym}$  ниток утоку в структурі еталонної тканини 30;

хвиль в нитках утоку в структурі еталонної тканини 30;

 $N_{zb3}$  – код, який відповідає параметру  $B_{ym} \cdot Z_1$ .

При налаштуванні скануючої системи в залежності від відсоткового впливу натягу  $P_{\kappa o}$  ниток основи та натягу  $P_{\kappa y}$  ниток утоку на структуру еталонної тканини 30 визначається її результуючий натяг  $P_{\kappa 1}$  у відповідності до алгоритму програми комп'ютеризованої системи. Програма відповідає за визначення натягу еталонного полотна 30 у кожній точці з прив'язкою до його структури. Це дозволяє визначити відхилення  $\delta_{P_{\kappa 12}}$  цього параметру за різницею між значенням натягу  $P_{\kappa 1}$ , отриманим повздовжнім прозвучуванням полотна 30, та значенням натягу  $P_{\kappa 2}$ , яке отримане за допомогою поперечного його зондування. Натяг у певному діапазоні для еталонного полотна 30 в кожній його точці за поперечним прозвучуванням матеріалу визначається так:

$$P_{\kappa 2} = P_{n2} \cdot \left(\frac{N_5}{N_{05}}\right)^3,$$
 (5.14)

- де N<sub>05</sub> код, який утворюється при відбитті ультразвукових хвиль від поверхні еталонної тканини 30 при її початковому натязі P<sub>n2</sub>;
  - N<sub>5</sub> код, який утворюється при відбитті ультразвукових хвиль від поверхні еталонної тканини 30 при її кінцевому натязі *P<sub>к2</sub>*.

Відносне відхилення  $\delta_{P_{\kappa 12}}$  значень натягу еталонного полотна тканини 30, яке визначається за допомогою поперечного його зондування, можна подати як:

$$\delta_{P_{\kappa 12}} = \frac{P_{\kappa 2} - P_{\kappa 1}}{P_{\kappa 1}} \cdot 100\%, \tag{5.15}$$

тоді абсолютне значення цього відхилення можна представити так:

$$\Delta_{P_{\kappa 12}} = P_{\kappa 2} - P_{\kappa 1}. \tag{5.16}$$

Отримані статистичні дані відхилень  $\Delta_{P_{\kappa 12}}$  для діапазону натягу еталонного текстильного полотна 30, які визначаються за допомогою повздовжнього та поперечного його прозвучування ультразвуковими хвилями, впливають на корегування безконтактної системи сканування контрольованого полотна 19. Ці дані застосовуються при безконтактному контролі натягу  $P_{\kappa 2}^{*}$  в певному визначеному діапазоні. Це можливо при поперечному прозвучуванні контрольованого полотна 19 на технологічному обладнанні в процесі виробництва. У цьому випадку можна отримати значення натягу  $P_{\kappa 2}^{*}$ контрольованого полотна тканини 19 у вигляді обчислень в комп'ютеризованій системі з врахуванням (5.14) та (5.16) так:

$$P_{\kappa 2}^{*} = P_{n2}^{*} \cdot \left(\frac{N_{5}^{*}}{N_{05}^{*}}\right)^{3} - \Delta_{P_{\kappa 12}}.$$
(5.17)

де  $N_{05}^{*}$  – код, який утворюється при відбитті ультразвукових хвиль від поверхні контрольованої тканини 19 при її початковому натязі  $P_{n2}^{*}$ ;

 $N_5^*$  – код, який утворюється при відбитті ультразвукових хвиль від поверхні

контрольованої тканини 19 при її кінцевому натязі  $P_{\kappa 2}^{*}$ .

Обчислення з врахуванням табличних відхилень  $\Delta_{P_{\kappa 12}}$ , отриманими за виразом (5.16) для структури та сировинного складу еталонного полотна 30, що відповідають контрольованому полотну 19, дають можливість коригувати покази безконтактному поперечному зондуванні матеріалу. натягу при Такий комбінований доцільно метод застосовувати, оскільки повздовжнє прозвучування матеріалу на технологічному обладнанні дуже важко реалізувати в умовах виробництва текстильних полотен. Тому можливе відхилення показів натягу, який визначається за допомогою поперечного зондування матеріалу, від справжнього значення параметру. Ці покази можна коригувати за допомогою значень, що отримані за допомогою повздовжнього зондування матеріалу, за рахунок табличних значень відхилень записаних у пам'ять системи, що пов'язані з еталонним полотном 30. Тобто для кожного виміряного значення натягу контрольованого полотна 19 є своє табличне значення відхилення, яке записане до пам'яті системи, отримане за допомогою БОН та еталонного полотна 30 у ході попередніх досліджень.

Як проводяться корегування для отриманих значень натягу полотна 19 при безконтактному контролі, так вносяться поправки до показів значень натягу ниток основи 18 на текстильних машинах. При чому, прозвучується під час безконтактного контролю ряд ниток основи 18 у певний момент часу, що синхронізований з роботою текстильного обладнання, на якому ця система сканування полотна 19 встановлена.

Обчислення натягу  $Q_o$  ряду еталонних ниток основи 31 та відхилення  $\Delta_{Q_o}$  цього параметру, які визначалися завдяки поперечному та повздовжньому прозвучуванню ультразвуковими хвилями цих ниток з врахуванням виразів(4.14) та (5.9) при налаштованій системі, коли  $U_{max} = K_1 K_7 K_{10} K_{12} K_{13} K_{14} K_{15} U_m$  та  $K_{14} = K_{15} = K_{16}$ , можна представити як:

$$\Delta_{Q_o} = Q_o - \frac{P_{noc} N_{\alpha 1} N_{c1} N_{T1}}{2\pi N_{zb1} \cdot \left(\sqrt{\left(\frac{N_{max}}{N_1}\right)^2 - \left(\frac{N_{T1} N_f}{N_{zb1}}\right)^2 - 1}\right)},$$
(5.19)

де код  $N_7$  вноситься у пам'ять комп'ютеризованої системи та відповідає величині  $(\mu\beta\phi)/\sin\beta$ , код  $N_8$  відповідає величині  $k \cdot (\sin\alpha_0 + \sin\alpha)$ , код  $N_9$ відповідає величині  $2k\sin\alpha$ , код  $N_{10}$  відповідає величині  $(1-\delta) \cdot \cos\alpha$ , код  $N_{11}$ відповідає величині  $\cos v / \cos v_o$ , код  $N_{12}$  відповідає величині n-1.

Величини, які у вигляді кодів  $N_7$ ,  $N_8$ ,  $N_9$ ,  $N_{10}$ ,  $N_{11}$ ,  $N_{12}$  вводяться у пам'ять комп'ютеризованої системи та впливають на обчислення значень натягу еталонного ряду ниток основи 31, описані у роботі після виразів (4.1) та (4.6).

Необхідно намагатися налаштувати безконтактну систему сканування, щоб  $Q_o \approx P_{\kappa o c}$  та  $\Delta_{Q_o} \rightarrow 0$ . Натяг  $Q_o^*$  ряду контрольованих ниток основи 18 на технологічному обладнанні визначається тоді так:

$$Q_o^* = Q_{OK} - \Delta_{Q_o}, \qquad (5.20)$$

де  $Q_{o\kappa}$  – натяг ряду контрольованих ниток основи 18, який початково визначається за допомогою скануючої системи без поправки відповідно до (5.18).

Контроль натягу ниток основи 18 дозволить тримати поверхневу густину *m<sub>s</sub>* контрольованої тканини 19 в регламентованих межах в процесі виробництва текстильних полотен.

Поверхневу густину  $m_s$  тканини 19 в процесі ткацтва з врахуванням зміни натягу можна безконтактно визначати за допомогою ультразвукових датчиків, що встановлені по обидві сторони полотна на рухомих платформах. Вони переміщуються завдяки БКД 17, що керує кроковими двигунами, які і приводять в рух платформи з безконтактними датчиками. У свою чергу, БКД 17 керується MK2 за заданим алгоритмом. Якщо враховувати коефіцієнти  $K_0$  і K, які характеризують собою зміну пористості при початковому натязі полотна та зміну пористості при кінцевому його натязі в момент зондування матеріалу ультразвуковими хвилями, то коефіцієнт K відповідає тоді і за зміну натягу тканини 19 в деякому діапазоні. Коефіцієнт K та зміну натягу тканини 19 на технологічному обладнанні можна визначити за співвідношеннями відбитих ультразвукових хвиль, або за зміною співвідношення кодів, які їм відповідають. Коефіцієнт K з врахуванням натягу полотна тканини 19 можна подати як:

$$K = K_0 \frac{N_5^*}{N_{05}^*},$$
 (5.21)

тоді поверхневу густину *m<sub>s</sub>* текстильного полотна 19 із врахуванням зміни його натягу можна представити у вигляді залежності кодів системи так:

$$m_{s} = \frac{Z_{1} N_{05}^{*} N_{m} \cdot \sqrt{\left(\frac{N_{max}}{N_{4}}\right)^{2} - 1}}{N_{5}^{*} f},$$
(5.22)

де  $N_m$  – код, який відповідає значенню величини  $1/(K_0 \cos \nu)$  та вводиться в

пам'ять системи для обчислення поверхневої густини *m*<sub>s</sub>

контрольованого текстильного полотна 19.

Отримані виміряні дані заносяться у пам'ять системи для кожного контрольованого полотна 19 із своєю структурою та відповідного для нього еталонного зразка 30, що може вироблятися на обладнанні, на якому може бути встановлена комп'ютеризована система сканування тканин. Також паралельно заноситься інформація про виміряні значення параметрів при різній вологості та температурі навколишнього середовища. За рахунок отриманих даних можна буде точніше вводити поправки до визначених значень параметрів в процесі безконтактного сканування текстильного полотна на виробництві.

Слід зазначити, що перед початком роботи без розміщення текстильних матеріалів у вимірювальних каналах за допомогою регульованих підсилювачів 12, 28 налаштовується комп'ютеризована система, щоб не було різних набігів амплітуд напруг на детекторах 13, 29, які може спричиняти навколишнє середовище у цих каналах.

Отже, можна сказати, що оперативно проводячи контроль натягу ниток основи забезпечується технологічний вплив, який дає можливість дотримувати поверхневу густину тканини в заданих межах, фактичне значення якої можна безконтактно визначати в процесі її виробництва. Це можливо, якщо вирішити ряд завдань, які стосуються інтеграції цих технологій до технологічних комплексів з виробництва різних полотен в текстильній промисловості. Безконтактні комп'ютеризовані системи з рухомими платформами, ЩО сканувати кожну точку текстильного полотна, дозволяють £ досить перспективними. Безконтактні технології підвищити допоможуть якість текстильних полотен та підвищити їх конкурентоздатність на вітчизняному та світовому ринках.

## 5.2. Розробка комп'ютеризованої системи сканування текстильної волоконної маси та визначення натягу ниток на трикотажних машинах

Для легкої промисловості актуальним є питання оперативного контролю технологічних параметрів різних текстильних матеріалів, що є важливим для виробничого процесу. Якщо взяти текстильну волоконну масу, то існує необхідність контролювати її за поверхневою густиною, що дасть можливість забезпечувати ефективне використання сировини для отримання якісної готової продукції на виході виробництва. Також є необхідність у контролі поверхневої густини трикотажних полотен та у запобіганні наявності дефектів у їхній структурі на різних текстильних машинах. При забезпеченні цього параметру та однорідності матеріалу у встановлених межах необхідно контролювати натяг ниток на технологічному обладнанні. Для вирішення поставленої задачі можна використати комп'ютеризовану систему, що зможе сканувати текстильну волоконну масу та визначати її поверхневу густину. Окрім зазначеного параметру, при змінні датчиків з відповідними кріпленнями у вигляді скоби та у вигляді хвилеводів, ця система зможе визначати і натяг ниток на трикотажних машинах у процесі вироблення текстильних полотен. Натяг ниток на трикотажних машинах впливає на можливість появи дефектів у структурі трикотажного полотна, а також на можливість обриву ниток, що може приводити до браку полотен та простою обладнання. Тому є досить актуальною задача створення системи із можливістю підключення різних хвилеводів та кріплень у вигляді скоби з безконтактними ультразвуковими датчиками. Зазначене, у свою чергу, дозволить контролювати різні текстильні матеріали за основними їхніми параметрами, які впливають на технологічні процеси виробництва. Іншими словами, при підключені датчиків, які розміщуються у скобі, можна контролювати поверхневу густину волоконної маси (рис. 5.2), а при підключенні ряду хвилеводів можна вимірювати натяг ниток (рис. 5.3) амплітудними методами. Також можна безконтактно визначати момент обриву ниток, в процесі виробництва трикотажних полотен.

За структурою таку комп'ютеризовану систему (рис. 5.4) можна описати з врахуванням можливості її роботи в двох режимах, для визначення поверхневої густини текстильної волоконної маси та для визначення натягу ниток на текстильних машинах.

Така система включає в себе наступні складові блоки: мікроконтролер 1 (МК1), мікроконтролер 2 (МК2), формувач імпульсного сигналу 3, підсилювач 4, п'єзоелектричні перетворювачі 5, 6, 7, кріплення скоби 8, регульовані підсилювачі 9, 10, амплітудні детектори 11, 12, блок комутації 13, мікросхему перетворення логічних рівнів 14, персональний комп'ютер 15 (ПК15), блок керування двигунами 16 (БКД 16) для транспортного механізму, який переміщує текстильну волоконну масу 17.

Разом п'єзоелектричні перетворювачі 5, 6, 7 та кріплення скоби 8 представляють собою перший блок з ультразвуковими датчиками (БУД1), а п'єзоелектричні перетворювачі 21, 22, 25, 26 разом із верхніми частинами хвилеводів 23, 27 та із нижніми їхніми частинами 24, 28 представляють собою другий блок з ультразвуковими датчиками (БУД2). При підключені БУД1 до загального блоку передачі інформації та керування (ЗБПК) та до блоку перетворення та обробки інформації (БПОІ) комп'ютеризована система може безконтактно визначати поверхневу густину текстильної волоконної маси. Якщо цю систему використовувати для безконтактного визначення натягу ниток з великою лінійною густиною, то переключивши перемикачі 18, 19, 20 в друге випромінюючі ЗБПК підключаються п'єзоелектричні положення ДО перетворювачі 21, 25, а до БПОІ підключаються приймаючі п'єзоелектричні перетворювачі 22, 26. Коли підключається БУД2, тоді комп'ютеризована система працює в режимі визначення натягу двох ниток із великою лінійною густиною на базі виміряних амплітуд напруг, які пропорційні амплітудам ультразвукових хвиль, що взаємодіють з волокнами ниток у хвилеводах. На трикотажних в'язальних машинах для оперативного моніторингу натягу великої кількості ниток, коли вони знаходяться на певній відстані одна від одної, підключаються додаткові блоки комутації до всієї системи. Це дозволяє підключити інші вимірювальні канали з хвилеводами. Також можна додатково підключати багато БПОІ з датчиками до ЗБПК за необхідності, що забезпечує принцип модульності та гнучкості системи під технологічні процеси різних текстильних машин.

Розглядається БУД2 на рис. 5.4 як одиничний модуль для визначення натягу тільки двох ниток, щоб описати принцип роботи комп'ютеризованої системи у цьому режимі роботи. Такий принцип підключення дасть можливість зменшити витрати на розробку та виробництво нового обладнання за рахунок використання базових модулів ЗБПК та БПОІ.

Далі окремо розглянемо роботу комп'ютеризованої системи в режимі визначення поверхневої густини текстильної волоконної маси та окремо покажемо як працює система при визначенні натягу ниток.

Розглянемо принцип роботи запропонованої системи режимі В безконтактного визначення поверхневої густини текстильної волоконної маси (маса текстильних волокон на одиницю площі). Імпульси ультразвукової частоти f, що виробляються МК1 надходять на формувач імпульсного сигналу 3, з виходу якого пакети імпульсів з напругою U<sub>m</sub> подаються на підсилювач 4. Після підсилення імпульсний сигнал надходить на п'єзоперетворювач 5, за допомогою якого перетворюється в ультразвукові хвилі. Ці хвилі проходять текстильні волокна перевідбиваючись від верхньої та нижньої стінок скоби 8 та надходять на перший приймаючий п'єзоперетворювач 6, а далі надходять, шляхом подальшого перевідбивання коливань з деяким ослабленням, на другий п'єзоперетворювач 7. Завдяки п'єзоперетворювачам приймаючий 7, 8 ультразвукові хвилі перетворюються в електричні коливання, підсилюються за потужністю регульованими підсилювачами 9, 10, далі детектуються та перетворюються в постійні напруги U<sub>1</sub> та U<sub>2</sub> за допомогою амплітудних детекторів 11, 12. Постійні напруги U1 та U2 утворюються із затримкою у часі та надходять до комутаційного блоку 13, який переключає вимірювальні канали почергово, з'єднуючи їх з входом МК2.





контролю поверхневої густини текстильної волоконної маси



Рис.5.3. Структура операцій системи для реалізації амплітудного методу контролю натягу ниток з великою лінійною густиною на технологічному обладнанні



285

Рис.5.4. Структурна схема комп'ютеризованої скануючої системи текстильної волоконної маси та визначення натягу ниток в процесі виробництва трикотажних

Затримка утворення напруг  $U_1$  та  $U_2$  у часі пов'язана з різною відстанню для ультразвукових хвиль, яку вони проходять перед потраплянням на перший 6 та другий 7 приймальні п'єзоперетворювачі відповідно. Момент переключення вимірювальних каналів за допомогою комутаційного блоку 13 та МК2 синхронізується з часом утворення електричних напруг  $U_1$  та  $U_2$ . Згасання амплітуд ультразвукових хвиль повинне бути у встановленому робочому діапазоні для можливості отримання невідомих значень поверхневої густини для текстильної волоконної маси. Цей параметр також визначається у робочому діапазоні для комп'ютеризованої системи. За допомогою внутрішнього аналогоцифрового перетворювача (АЦП) МК2 напруга  $U_1$  перетворюється в цифровий код  $N_1$  так:

$$N_{1} = \frac{U_{1}}{r_{u}} = \frac{K_{1}K_{2}K_{4}K_{6}K_{8}}{\sqrt{1 + \left(\frac{n_{1np.}m_{o6}m_{k}f\cos\nu}{Z_{1}}\right)^{2}}}\frac{U_{m}}{r_{u}},$$
(5.23)

- де  $r_u$  одиниця найменшого молодшого розряду АЦП МК2 за напругою;
  - *m*<sub>k</sub> поверхнева кількісна густина текстильної волоконної маси 17;
  - *n*<sub>1*np*.</sub> кількість проходжень ультразвукової хвилі до п'єзоперетворювача 6
     перерізу хвилеводу, який утворюється верхньою та нижньою стінкою скоби 8;
  - *m*<sub>06</sub> середня маса одного волокна;
    - *K*<sub>1</sub> коефіцієнт підсилення підсилювача 4;
    - K<sub>2</sub> коефіцієнт перетворення коливань випромінюючим

п'єзоперетворювачем 5 та приймаючим п'єзоперетворювачем 6;

- *K*<sub>4</sub> коефіцієнт підсилення регульованого підсилювача 10;
- *К*<sub>6</sub> коефіцієнт перетворення напруги амплітудного детектора 12;
- *K*<sub>8</sub> коефіцієнт передачі сигналу блоком комутації 13.

Інша напруга  $U_2$  перетворюється за допомогою внутрішнього АЦП МК2 в цифровий код  $N_2$  як:

$$N_{2} = \frac{U_{2}}{r_{u}} = \frac{K_{1}K_{3}K_{5}K_{7}K_{8}}{\sqrt{1 + \left(\frac{n_{2np.}m_{ob}m_{k}f\cos\nu}{Z_{1}}\right)^{2}}}\frac{U_{m}}{r_{u}},$$
(5.24)

де *n*<sub>2*np*.</sub> – кількість проходжень ультразвукової хвилі до п'єзоперетворювача 7 перерізу хвилеводу, який утворюється верхньою та нижньою стінкою скоби 8;

*K*<sub>1</sub> – коефіцієнт підсилення підсилювача 4;

K<sub>3</sub> – коефіцієнт перетворення коливань випромінюючим

п'єзоперетворювачем 5 та приймаючим п'єзоперетворювачем 7;

- K<sub>5</sub> коефіцієнт підсилення регульованого підсилювача 9;
- *К*<sub>7</sub> коефіцієнт перетворення напруги амплітудного детектора 11;

*K*<sub>8</sub> – коефіцієнт передачі сигналу блоком комутації 13.

Отримані коди  $N_1$  та  $N_2$  передаються до МК1, який виробляє сигнал для БКД 16, що, у свою чергу, керує двигунами транспортного механізму, який переміщує текстильну волоконну масу 17 для подальшого зондування наступних волокон. При роботі з іншими текстильними матеріалами та при підключенні БУД 2 до комп'ютеризованої системи, БКД 16 можна відключати від двигунів транспортного механізму та підключати до приводів, які налаштовують хвилеводи під необхідний режим роботи.

З МК1 отримані коди  $N_1$  та  $N_2$  передаються через мікросхему перетворення логічних рівнів 14 до ПК 15, де і визначається поверхнева густина  $m_s$  текстильної волоконної маси. При налаштуванні системи, коли  $U_{max} = N_{max} \cdot r_u = K_1 K_2 K_4 K_6 K_8 U_m = 5B$ ,  $K_2 = K_3$ ,  $K_4 = K_5$  та  $K_6 = K_7$ , тоді поверхнева густина  $m_s$  текстильної волоконної маси визначається за допомогою спеціальної програми на ПК 15 наступним виразом:

$$m_{s} = m_{k}m_{os} = \frac{Z_{1}N_{m}}{2f} \cdot \left( \left( \sqrt{\left(\frac{N_{max}}{N_{1}}\right)^{2} - 1} \right) \cdot N_{1np.} + \left( \sqrt{\left(\frac{N_{max}}{N_{2}}\right)^{2} - 1} \right) \cdot N_{2np.} \right), \quad (5.25)$$

де N<sub>m</sub> – код, який відповідає значенню величини 1/cosv та вводиться в пам'ять системи для обчислення середньої поверхневої густини m<sub>s</sub> текстильної волоконної маси 17;

N<sub>1np.</sub> – код, який відповідає значенню величини 1/ n<sub>1np.</sub> та вводиться в пам'ять системи, а також залежить від геометричних розмірів скоби 8;
 N<sub>2np.</sub> – код, який відповідає значенню величини 1/ n<sub>2np.</sub> та вводиться також в пам'ять системи.

Перед початком вимірювання система налаштовується без контрольованої волоконної маси 17 всередині скоби 8. При цьому за допомогою регулюючих підсилювачів 9, 10 забезпечується  $N_{max} = N_1 = N_2$ , тоді враховуючи цю рівність з виразу (5.25) отримаємо  $m_s = 0$ .

Комп'ютеризована система може працювати в режимі визначення натягу ниток за допомогою підключеного БУД 2, при цьому є можливість безконтактного моніторингу зазначеного параметру в режимі реального часу.

Розглянемо принцип роботи комп'ютеризованої системи, коли вона працює на отримання вимірювальної інформації, за якою визначається поточне значення натягу ниток на текстильній машині в процесі вироблення трикотажного полотна. Імпульси ультразвукової частоти f, що створюються МК1 надходять на формувач імпульсного сигналу 3, з виходу якого пакети імпульсів з напругою  $U_m$  подаються на підсилювач 4. Після чого імпульсний надходить на п'єзоперетворювачі 21, 25, за сигнал допомогою яких перетворюється в пакети ультразвукових хвиль. Ці хвилі проходять текстильні волокна ниток 29, 30 в двох хвилеводах, які, у свою чергу, складаються з верхніх частин 23, 27 та з нижніх частин 24, 28, що закріплені. В процесі проходження ультразвукові хвилі перевідбиваються від верхніх стінок частин 23, 27, обох
хвилеводів, та від їхніх нижніх стінок частин 24, 28. При цьому хвилі можуть проходити переріз хвилеводів перевідбиваючись від їхніх стінок стільки разів скільки потрібно для максимальної чутливості зміни амплітуди коливань до зміни геометричних розмірів нитки в процесі її натягу. Це регулюється трьома положеннями верхніх частин 23, 27 хвилеводів, які приводяться у рух і чітко зупиняються у фіксованих положеннях (на рис.5.4 – положення I, II, III) за рахунок приводів, що підключаються до них та керуються БКД 16. Отже, МК1 може через БКД 16 налаштовувати чутливість безконтактних датчиків, які знаходяться закріпленими у верхніх частинах 23, 27 хвилеводів, в залежності від матеріалу та лінійної густини контрольованої нитки.

Після того як ультразвукові хвилі пройдуть контрольовані нитки 29, 30 декілька разів перевідбиваючись у хвилеводах вони потрапляють до приймаючих п'єзоперетворювачів 22, 26, що перетворюють ультразвукові хвилі в електричні коливання, а далі надходять на регульовані підсилювачі 9, 10, де підсилюються за потужністю. Потім ці електричні коливання детектуються та перетворюються в постійні напруги  $U_3$  та  $U_4$  за допомогою амплітудних детекторів 11, 12. Постійні напруги  $U_3$  та  $U_4$ , що утворилися, надходять до комутаційного блоку 13, який переключає вимірювальні канали почергово. Вони з'єднуються з входом МК2, де напруги  $U_3$  та  $U_4$  перетворюються із затримкою (пов'язана з різними положеннями датчиків) за допомогою внутрішнього АЦП МК2 в цифрові коди  $N_3$  та  $N_4$ , які можна представити наступними виразами:

$$N_{3} = \frac{U_{3}}{r_{u}} = \frac{K_{1}K_{9}K_{4}K_{6}K_{8}}{\sqrt{1 + \left(\frac{n_{3np.}d_{H1}\rho_{2}\pi^{2}f\cos\nu_{H1}}{4Z_{1}}\right)^{2}}}\frac{U_{m}}{r_{u}},$$
(5.26)

$$N_{4} = \frac{U_{4}}{r_{u}} = \frac{K_{1}K_{10} K_{5} K_{7} K_{8}}{\sqrt{1 + \left(\frac{n_{4np.} d_{H2} \rho_{2} \pi^{2} f \cos v_{H2}}{4Z_{1}}\right)^{2}} \frac{U_{m}}{r_{u}},$$
(5.27)

де  $n_{3np.}$ ,  $n_{4np.}$  – кількість проходжень ультразвукових хвиль до п'єзоперетво-

рювачів 22, 26 перерізів першого та другого хвилеводів БУД 2;

- К9 коефіцієнт перетворення коливань випромінюючим п'єзоперетворювачем 25 та приймаючим п'єзоперетворювачем 26;
- *K*<sub>10</sub> коефіцієнт перетворення коливань випромінюючим п'єзоперетворювачем 21 та приймаючим п'єзоперетворювачем 22;
- *v<sub>h1</sub>*, *v<sub>h2</sub>* кути між напрямками розповсюдження частин хвиль, що огинають волокна ниток в першому і в другому хвилеводах БУД2, та поверхнею волокон;
- $d_{H1}, d_{H2}$  еквівалентні діаметри ниток при певних параметрах  $cosv_1, cosv_2$  в першому та в другому хвилеводах БУД 2.

Далі коди  $N_3$ ,  $N_4$  передаються через мікросхему перетворення логічних рівнів 14 до ПК 15, де і визначається натяг  $P_1$  ниток в хвилеводах. Якщо прийняти  $U_{03} = K_1 K_9 K_4 K_6 K_8 U_m$ ,  $U_{04} = K_1 K_{10} K_5 K_7 K_8 U_m$ , то умовні еквівалентні діаметри ниток  $d_{H1}$ ,  $d_{H2}$  при певних параметрах  $cosv_{H1}$ ,  $cosv_{H2}$  в хвилеводах, а також відповідні їм коди  $N_{d1}$ ,  $N_{d2}$  визначаються в ПК 15 так:

$$d_{H1} = \frac{4Z_1 \cdot \sqrt{\left(\frac{U_{03}}{U_3}\right)^2 - 1}}{n_{3np.}\pi^2 f \,\rho_2 \cdot \cos v_{H1}}, \quad N_{d1} = \frac{N_{m1}N_{3np.} \cdot \sqrt{\left(\frac{N_{03}}{N_3}\right)^2 - 1}}{N_{zf\rho}},$$

$$d_{H2} = \frac{4Z_1 \cdot \sqrt{\left(\frac{U_{04}}{U_4}\right)^2 - 1}}{n_{4np.}\pi^2 f \,\rho_2 \cdot \cos v_{H2}}, \quad N_{d2} = \frac{N_{m2}N_{4np.} \cdot \sqrt{\left(\frac{N_{04}}{N_4}\right)^2 - 1}}{N_{zf\rho}},$$
(5.28)

де N<sub>m1</sub>- код, який відповідає значенню величини 1/cosv<sub>н1</sub> та вводиться в пам'ять системи для обчислення натягу P<sub>1</sub> нитки у першому хвилеводі; N<sub>m2</sub>- код, який відповідає значенню величини 1/cosv<sub>н2</sub> та вводиться в пам'ять системи для обчислення натягу P<sub>1</sub> нитки у другому хвилеводі;

- N<sub>3np.</sub>− код, який відповідає значенню величини 1/n<sub>3np.</sub> та вводиться в пам'ять системи в залежності від положення верхньої частини 27 першого хвилеводу (положення I, II, або III);
- N<sub>4np.</sub> код, який відповідає значенню величини 1/n<sub>4np.</sub> та вводиться в пам'ять системи в залежності від положення верхньої частини 23 другого хвилеводу (положення I, II, або III);
- $N_{zf\rho}$  код, який відповідає значенню величини  $4Z_1/(\pi^2 f \rho_2)$  та вводиться також в пам'ять системи для обчислення натягу  $P_1$ .

Оскільки базовий модуль БПОІ має тільки два канали, за допомогою яких можна вимірювати натяг для двох ниток, то підключення аналогічних модулів у необхідній кількості до модуля ЗБПК дозволить визначати натяг усіх ниток, які використовуються у технологічному процесі. Такий принцип підключення аналогічних модулів дозволяє проявляти гнучкість таких систем до їх налаштування під різні текстильні машини. Натяг  $P_1$  ниток в хвилеводах, використовуючи розглянуті раніше вирази (4.29), (5.26), (5.27), (5.28), визначається в ПК 15 з використанням усіх кодів як:

$$P_{1} = P_{0} + \left(N_{R} + \frac{N_{di}}{2}\right) \left(N_{\mu\varphi} - 1\right) \cdot \left(N_{R} + \left(1 - P_{0} \cdot \left(N_{R} + \frac{N_{di}}{2}\right) \times \left(P_{0} \cdot \frac{N_{di}}{2} + N_{Eb} \cdot \left(N_{R} + \frac{N_{di}}{2}\right)^{2}\right)^{-1}\right) \cdot \frac{N_{di}}{2}\right)^{-1} \times \left(P_{0} - N_{B_{0}} \cdot \left(N_{R} + \left(1 - P_{0} \cdot \left(N_{R} + \frac{N_{di}}{2}\right) \times \left(P_{0} \cdot \frac{N_{di}}{2} + N_{Eb} \cdot \left(N_{R} + \frac{N_{di}}{2}\right)^{2}\right)^{-1}\right) \cdot \frac{N_{di}}{2}\right)^{-2}\right),$$

$$(5.29)$$

$$\times \left(P_{0} \cdot \frac{N_{di}}{2} + N_{Eb} \cdot \left(N_{R} + \frac{N_{di}}{2}\right)^{2}\right)^{-1}\right) \cdot \frac{N_{di}}{2}\right)^{-2},$$

де вносяться у ПК 15: значення натягу  $P_0$ , код  $N_R$ , який відповідає величині радіусу кривизни направляючої R, код  $N_{\mu\rho}$ , що відповідає величині  $e^{\mu_T \varphi_T}$ , код

 $N_{Eb}$ , який відповідає величині  $E_1b_k$ , код  $N_{B_0}$ , що відповідає величині  $B_0/2$ . Код  $N_{di}$  відповідає величині діаметру  $d_{hi}$  (*i* – 1, 2..., номер вимірювального каналу) та визначається програмно за виразом (5.28) в ПК 15.

Величини, які у вигляді кодів  $N_R$ ,  $N_{\mu\varphi}$ ,  $N_{Eb}$ ,  $N_{B_0}$  вводяться у пам'ять комп'ютеризованої системи та впливають на обчислення значень натягу  $P_1$  ниток в хвилеводах БУД 2, описані у роботі після виразу (4.19).

Ультразвукові перетворювачі БУД 2 можна налаштувати також і для розпізнавання обриву ниток у хвилеводі за певних отриманих величин кодів N<sub>3</sub> та N<sub>4</sub> для можливості зупинки технологічного обладнання.

Запропонована комп'ютеризована ультразвукова система дозволяє проводити оперативний безконтактний контроль важливих параметрів для різних текстильних матеріалів у процесі виробництва. Застосовуються два режима роботи скануючої ультразвукової системи, при цьому зазначене досягається за допомогою переключення БУД 1 та БУД 2 в залежності від поставленої задачі.

Якщо розглянути переваги самих ультразвукових датчиків системи, то їх можна застосовувати досить тривалий час у порівнянні з існуючими контактними. Зазначене зумовлено відсутністю контакту ультразвукових датчиків з контрольованим матеріалом. У порівнянні для контактних датчиків є встановлений час, після якого їхні характеристики можуть виходити за допустимі межі в результаті контактної взаємодії з матеріалом. Тому подальше інтегрування безконтактних технологій для визначення натягу ниток на текстильному обладнанні призведе до підвищення якості текстильних полотен та до збільшення терміну експлуатації таких систем у порівнянні з анологічними контактними. Безконтактне визначення поверхневої густини текстильної волоконної маси дозволить вдосконалити технологічні процеси із зменшенням витрат самої сировини в процесі виробництва.

## 5.3. Розробка комп'ютеризованої системи сканування текстильних матеріалів з визначенням їхньої поверхневої густини фазовим та амплітудно-фазовим ультразвуковими методами

Проведений аналіз показав, ЩО визначення поверхневої густини текстильних матеріалів за допомогою безконтактного фазового методу, при якому опромінюються полотна ультразвуковими хвилями, дає ряд переваг перед стандартним ваговим методом. Головна перевага полягає в оперативності самого контролю технологічного параметру. При цьому текстильний матеріал опромінюється ультразвуковими хвилями і значення технологічного параметру визначається за фазовим зсувом ультразвукових хвиль, що пройшли матеріал, якщо його структура однорідна. Для контролю текстильного матеріалу із складною структурою, при наявності наскрізних пор в ній, необхідно застосовувати комбінований метод, який буде враховувати особливості самої структури і її вплив на проходження зондуючого сигналу. Комбінований метод може базуватися на двох інформативних параметрах коливань, таких як фазовий зсув та зміна амплітуди відбитої ультразвукової хвилі, що дає можливість врахувати особливості впливу структури матеріалу на вимірювання поверхневої густини.

Для оперативного контролю технологічних параметрів текстильної однорідної маси та характеристик різних волокон відомі випадки застосування фазового методу [257 - 260]. Хоча у цих роботах наводився показник "поверхнева кількісна щільність", який має відмінності від поверхневої густини, проте характер залежностей схожий для фазового зсуву коливань, і наближається до лінійного, для певного діапазону вхідної величини. Також відомі дослідження [424] залежності фази ультразвукових хвиль від лінійної густини волокнистої стрічки. Однак в наведених джерелах були розглянуті випадки тільки реєстрування зсуву фази ультразвукових хвиль для однорідної волоконної маси, а для текстильних полотен із складною структурою такі дослідження не наводилися.

Для безконтактного оперативного контролю поверхневої густини різних текстильних матеріалів як з однорідною волоконною масою, так і текстильних полотен із складною структурою з наскрізними порами, необхідно застосовувати теоретичні дослідження розповсюдження ультразвукових хвиль в середовищах із декількома межами переходів між ними. Такі дослідження повинні відобразити залежність зміни фазового зсуву від поверхневої густини матеріалу без врахування та з врахуванням наскрізних пор у самому текстильному полотні. Це є дуже важливою проблемою, яка не дозволяє на сьогодні створювати високоточні адаптивні до структури матеріалу прилади технологічного контролю. Такі прилади можна було б застосовувати у легкій промисловості в оперативного неруйнівного технологічного процесі контролю різних текстильних матеріалів. Тому такі дослідження, які були наведені у роботі раніше, та розробка нової безконтактної системи комп'ютеризованого контролю поверхневої густини текстильних матеріалів дозволять V майбутньому відкрити нові можливості для дотримання високої якості товарів текстилю вітчизняного виробництва.

Для контролю поверхневої густини різних текстильних матеріалів можна використовувати фазовий метод із застосуванням амплітуди ультразвукового сигналу, що відбивається від поверхні матеріалу. Цей сигнал використовується для визначення частини ультразвукових хвиль, що проходять крізь пори матеріалу. Визначення пористості необхідне для контролю матеріалів із складною структурою, якими є текстильні полотна, оскільки проходження ультразвукових хвиль крізь них – це складний процес, який частково можна описати за допомогою принципу суперпозиції двох сигналів, перший з яких проходить крізь самі нитки в полотні, другий – крізь самі пори матеріалу. Тому, якщо необхідно контролювати поверхневу густину однорідної текстильної маси, то можна застосовувати тільки фазовий безконтактний метод, а якщо потрібно контролювати текстильні полотна із складною структурою, то необхідно застосовувати комбінований амплітудно-фазовий метод. Розглянемо нижче ці два випадки. Для визначення поверхневої густини  $m_s$  однорідної текстильної маси можна використати залежність, отриману для фазового зсуву  $\varphi_W$  ультразвукових хвиль імпульсного сигналу, що проходять текстильний матеріал, відносно падаючих хвиль:

$$\begin{split} \varphi_{W} &= \arccos\left[\sum_{N=0}^{\infty} \left(\frac{Z_{2} - Z_{1}}{Z_{1} + Z_{2}}\right)^{2N} \cdot \exp\left[-\frac{\left(\frac{K m_{s} \left(b(2N+1) \cos \nu + 1\right)}{\pi Z_{2}} - t\right)^{2}}{\left(\frac{\tau_{0}}{2 l n \sqrt{2}}\right)^{2}} - \frac{\alpha_{3.} \left(2N+1\right) K m_{s} \cos \nu}{\pi \rho_{2}}\right) \cdot \sin\left(\omega_{0} \left(\frac{K m_{s} \left(b(2N+1) \cos \nu + 1\right)}{\pi Z_{2}} - t\right)\right) \times \right. \\ & \times \left(\sum_{N=0}^{\infty} \left(\frac{Z_{2} - Z_{1}}{Z_{1} + Z_{2}}\right)^{2N} \cdot \exp\left[-\frac{\left(\frac{K m_{s} \left(b(2N+1) \cos \nu + 1\right)}{\pi Z_{2}} - t\right)^{2}}{\left(\frac{\tau_{0}}{2 l n \sqrt{2}}\right)^{2}} - \frac{\alpha_{3.} \left(2N+1\right) K m_{s} \cos \nu}{\pi \rho_{2}}\right) \cdot \cos\left(\omega_{0} \left(\frac{K m_{s} \left(b(2N+1) \cos \nu + 1\right)}{\pi Z_{2}} - t\right)\right)\right)^{-1}\right], \end{split}$$
(5.30)

де для цього випадку:

- *t* час розповсюдження ультразвукового сигналу;
- Z<sub>1</sub> акустичний опір навколишнього середовища (повітря);
- Z<sub>2</sub> акустичний опір матеріалу волоконної маси;
- $\alpha_{3.}$  коефіцієнт згасання ультразвукових хвиль в матеріалі волоконної маси;
  - К коефіцієнт, який враховує об'єм повітря в матеріалі волоконної маси;
  - *v* кут між вектором хвиль, що відбиваються від волокон матеріалу та проходять їх;
- $ho_2$  об'ємна щільність матеріалу волоконної маси.

При  $\alpha_{3.} = 0$  залежність (5.30) можна показати так:

$$\begin{split} \varphi_{W} &= \arctan\left\{ \sum_{N=0}^{\infty} \left( \frac{Z_{2} - Z_{1}}{Z_{1} + Z_{2}} \right)^{2N} \cdot exp \left( -\frac{\left( \frac{K m_{s} \left( b(2N+1) \cos v + 1 \right)}{\pi Z_{2}} - t \right)^{2}}{\left( \frac{\tau_{0}}{2 \ln \sqrt{2}} \right)^{2}} \right) \times \\ &\times \sin\left( \omega_{0} \left( \frac{K m_{s} \left( b(2N+1) \cos v + 1 \right)}{\pi Z_{2}} - t \right) \right) \times \\ &\times \left( \sum_{N=0}^{\infty} \left( \frac{Z_{2} - Z_{1}}{Z_{1} + Z_{2}} \right)^{2N} \cdot exp \left( -\frac{\left( \frac{K m_{s} \left( b(2N+1) \cos v + 1 \right)}{\pi Z_{2}} - t \right)^{2}}{\left( \frac{\tau_{0}}{2 \ln \sqrt{2}} \right)^{2}} \right) \times \\ &\times \cos\left( \omega_{0} \left( \frac{K m_{s} \left( b(2N+1) \cos v + 1 \right)}{\pi Z_{2}} - t \right) \right) \right)^{-1} \right), \end{split}$$
(5.31)

На рис. 5.5,а показано графік залежності фазового зсуву  $\varphi_W$  ультразвукових хвиль від поверхневої густини  $m_s$  однорідної волоконної маси.

Щоб показати як змінюється у часі імпульсний сигнал за амплітудою з певним фазовим зсувом  $\varphi_W$ , в залежності від поверхневої густини  $m_s$  текстильного матеріалу, застосуємо наступний вираз (2.30). При умові, коли  $\alpha_{3.} = 0$ , тоді вираз для імпульсного ультразвукового сигналу покажемо як:

$$A_{1}(t) = \frac{4Z_{1}Z_{2}}{(Z_{1}+Z_{2})^{2}} \sum_{N=0}^{\infty} \left(\frac{Z_{2}-Z_{1}}{Z_{1}+Z_{2}}\right)^{2N} \cdot \cos\left(\omega_{0}\left(\frac{Km_{s}(b(2N+1)cos\nu+1)}{\pi Z_{2}}-t\right)\right) \times \\ \times exp\left(-\frac{\left(\frac{Km_{s}(b(2N+1)cos\nu+1)}{\pi Z_{2}}-t\right)^{2}}{\left(\frac{\tau_{0}}{2\ln\sqrt{2}}\right)^{2}}\right).$$
(5.32)

На рис. 5.5,6 показане порівняння імпульсних ультразвукових сигналів, перший з яких випромінюється, а другий який вже пройшов крізь волоконне середовище матеріалу з поверхневою густиною 400 г/м<sup>2</sup>.



Рис.5.5. Взаємодія ультразвукових хвиль з однорідною волоконною масою: а – залежність фазового зсуву  $\varphi_W$  ультразвукових хвиль від поверхневої густини  $m_s$  однорідної волоконної маси; б – імпульсні ультразвукові сигнали, перший  $A_0(t)$ , з яких випромінюється, а другий  $A_1(t)$ , що вже пройшов крізь волоконний матеріал з поверхневою густиною  $m_s = 400$  г/м<sup>2</sup>

З графіків на рис. 5.5,6 можна побачити, що фазовий зсув для цього випадку буде  $\varphi_W \approx 80^0$ , а амплітуда ультразвукових хвиль, що пройшли волоконну масу,  $A_1 = 0,58$  по відношенню до одиничної амплітуди ультразвукових падаючих хвиль  $A_0 = 1$ . Видно, що за допомогою зміни фази імпульсного сигналу можна визначати поверхневу густину  $m_s$  текстильних матеріалів.

Для комп'ютеризованого контролю текстильних полотен (безперервного сканування полотна в процесі його вироблення та обробки отриманої інформації з прийняттям подальшого рішення) із складною структурою матеріалу необхідно застосовувати комбінований амплітудно-фазовий метод. Для цього методу залежність модуля комплексного коефіцієнта проходження |W| ультразвукової хвилі крізь текстильне полотно із складною структурою можна подати так:

$$|W| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{K m_s f \cos v}{Z_1}\right)^2}},$$
 (5.33)

тоді дійсну *ReW* та уявну *ImW* частини комплексного коефіцієнта проходження *W* можна представити як:

$$Re W = \frac{1}{1 + \left(\frac{K m_s f \cos v}{Z_1}\right)^2}, \quad Im W = \frac{\left(\frac{K m_s f \cos v}{Z_1}\right)}{1 + \left(\frac{K m_s f \cos v}{Z_1}\right)^2}, \quad (5.34)$$

звідки можна виразити фазовий зсув для текстильного полотна із складною структурою та показати наступною залежністю:

$$\varphi_W \approx arctg\left(\frac{Km_s f cosv}{Z_1}\right) \cdot \frac{4}{3}.$$
 (5.35)

На рис. 5.6 показані залежності зміни фазового зсуву  $\varphi_W$  в залежності від поверхневої густини  $m_s$  текстильних полотен з різною пористістю.



Рис. 5.6. Залежності для фазового зсуву  $\varphi_W$  ультразвукових хвиль, що пройшли крізь різні текстильні матеріали з різними порами між нитками, від поверхневої густини  $m_s$ :

- 1 залежність фазового зсуву  $\varphi_1$  ультразвукових хвиль від поверхневої густини  $m_s$  текстильного полотна з розмірами пор прийнятими за еталонні;
- 2 залежність фазового зсуву *φ*<sub>2</sub> ультразвукових хвиль від поверхневої густини *m<sub>s</sub>* текстильного полотна з розмірами пор в 1,59 разів меншими за еталонні;
  3 залежність фазового зсуву *φ*<sub>3</sub> ультразвукових хвиль від поверхневої густини
- *m<sub>s</sub>* текстильного полотна з розмірами пор в 2,39 разів меншими за еталонні;
   4 залежність фазового зсуву φ<sub>4</sub> ультразвукових хвиль від поверхневої густини
   *m<sub>s</sub>* текстильного полотна з розмірами пор в 3,18 разів меншими за еталонні

На рис. 5.6 видно, що графіки наближаються до лінійних з різним кутом нахилу в залежності від пористості матеріалу. Графіки з більшим фазовим зсувом при однаковій поверхневій густині  $m_s$  відповідають матеріалам з меншими порами. Тому для виключення впливу параметру зміни пористості між нитками в текстильних полотнах на результат вимірів фазового зсуву та визначення поверхневої густини  $m_s$  необхідно застосовувати амплітуду відбитого ультразвукового сигналу. Він дозволить внести корективи для коефіцієнта K, що враховує об'єм повітря в матеріалі та входить до виразу (5.35). Цю залежність корекції коефіцієнта K від зміни розмірів пор можна подати так:

$$K = \frac{K_0 Q_{0p}}{Q_p} = \frac{K_0 |V|}{|V_0|},$$
(5.36)

де для цього випадку:

 $K_0$  – коефіцієнт еталонного текстильного полотна, який враховує

відстані та об'єм повітря між нитками еталонного полотна;  $Q_{0p}, Q_p$  – пористості еталонного та контрольованого текстильних матеріалів;  $|V_0|, |V|$  – модулі коефіцієнтів відбиття ультразвукових коливань від

## еталонного та контрольованого текстильних полотен.

3 врахуванням залежності (5.36) для більшості текстильних полотен з поверхневою густиною  $m_s \leq 300$ г/м<sup>2</sup>, для яких похибка розрахунку не повинна перевищувати  $\delta_{\varphi} \leq 2\%$ , вираз (5.35) можна подати так:

$$\varphi_W = \operatorname{arctg}\left(\frac{K_0 \left|V\right| m_s f \cos v}{Z_1 \left|V_0\right|}\right) \cdot \frac{4}{3}.$$
(5.37)

За допомогою наведеного комбінованого амплітудно-фазового методу (рис. 5.7) можна визначати поверхневу густину  $m_s$  текстильних полотен із складною структурою, що мають наскрізні пори між нитками. Структурна схема комп'ютеризованої системи, за допомогою якої можна проводити контроль поверхневої густини  $m_s$  текстильних матеріалів фазовим та амплітудно-фазовим методами, представлена на рис. 5.8, а алгоритм сканування показаний на рис. 5.9.



Рис. 5.7. Структура операцій системи для реалізації амплітудного-фазового методу контролю поверхневої густини тканин



Рис. 5.8. Структурна схема комп'ютеризованої системи, за допомогою якої можна проводити контроль поверхневої густини *m<sub>s</sub>* текстильних матеріалів фазовим і амплітудно-фазовим методами



Рис. 5.9. Алгоритм процесу ультразвукового сканування текстильних матеріалів комп'ютеризованою системою при амплітудно-фазовому методі контролю

Скануюча система включає в себе формувач імпульсного сигналу 1, підсилювач потужності 2, випромінюючий та приймаючий перетворювач 3, випромінюючий перетворювач 4, приймаючі перетворювачі 5 і 6, підсилювачі з регульованим підсиленням 7, 13, 14, фазообертач 8, фазові детектори 9 і 10, амплітудні детектори 15 і 16, блок різниці напруг 11, блок відношення напруг 17, мікроконтролери (МК) 12 і 18, мікросхема перетворення логічних рівнів 19, персональний комп'ютер 20 (ПК 20) та блок керування кроковими двигунами переміщення скануючих платформ 21 (БКД 21), контрольований текстильний матеріал 22.

Опишемо роботу комп'ютеризованої даної сканування системи текстильних матеріалів. Електричні коливання з формувача імпульсного сигналу 1, підсилюються підсилювачем 2 за потужністю і поступають на випромінюючий перетворювач 3. Ультразвукові коливання, що випромінюються приймаються перетворювачем 5, після проходження ними контрольованого текстильного матеріалу 22. Радіоімпульси подаються також на випромінюючий перетворювач 4, який випромінює ультразвукові коливання, що потрапляють в приймаючий 6 після перетворювач проходження навколишнього середовища. НИМИ Електричні коливання з другого приймаючого перетворювача 6 подаються на один вхід блоку відношення 17 після підсилення їх регульованим підсилювачем 13 та детектуванням з подальшим перетворенням їх амплітудним детектором 15 у постійну напругу, на інший вхід подається вихідна постійна напруга 16, після перетворення імпульсів приймаючого амплітудного детектора перетворювача 3 з підсилення їх регульованим підсилювачем 14. Вихідну напругу блоку відношення 17 можна подати у вигляді добутку базової напруги та співвідношення амплітуд ультразвукових хвиль, що відбилися від поверхні текстильного матеріалу, до амплітуди хвиль, які падають на поверхню полотна. допомогою порівняння цієї напруги визначається За зміна пористості контрольованого матеріалу 22 відносно еталонного. Це відбувається в процесі постійного переміщення скануючих платформ відносно самого полотна з перетворювачами ультразвукових хвиль в електричні коливання, за допомогою

блоку керування БКД 21. Електричні коливання з приймаючого перетворювача 6 подаються також до блоку фазообертача 8 та фазового детектору 10, напруга на виході якого пропорційна фазовому зсуву ультразвукових коливань, що проходять навколишнє середовище і падають на текстильний матеріал полотна 22. Напруга з фазового детектору 10 потрапляє до одного входу блоку різниці напруг 11, на другий його вхід потрапляє напруга з виходу фазового детектора 9 після підсилення коливань регульованим підсилювачем 7, що потрапляють на його вхід. Напруга з виходу детектора 9 є пропорційна фазовому зсуву ультразвукових коливань, що проходять навколишнє середовище та сам текстильний матеріал полотна 22. Напруги з блоку різниці 11 та блоку відношення 17 надходять на аналогові входи мікроконтролерів 12 та 18 відповідно. За допомогою внутрішніх аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) мікроконтролерів створюються цифрові коди, що приймають участь у визначенні поверхневої густини m<sub>s</sub> текстильних полотен із різними наскрізними порами між нитками. Причому значення зміни пористості передається у вигляді коду до першого МК 12 з другого МК 18. Також з МК 18 надходить сигнал задавальної програми для блоку БКД 21. З виходу МК 12 до ПК 20, через мікросхему перетворення логічних рівнів 19, передається значення поверхневої густини *m<sub>s</sub>* текстильного полотна 22. Це значення параметру визначається за допомогою отриманих кодів у самому мікроконтролері з використанням табличних значень, які записуються в пам'ять системи з використанням залежності (5.37).

Фазообертач 8 та регульовані підсилювачі 7, 13 і 14 допомагають налаштувати правильно комп'ютеризовану систему для автоматизованого сканування перед початком вимірювань у нульовий стан показів.

Для визначення поверхневої густини  $m_s$  текстильних матеріалів фазовим методом приймається співвідношення  $|V|/|V_0|=1$  у виразі (5.37) для поверхневої густини  $m_s \leq 150$ г/м<sup>2</sup>. При цьому похибка для фазового зсуву  $\varphi_W$  не повинна перевищувати  $\delta_{\varphi_W} \leq 2,5\%$ , а канал вимірювання амплітуди відбитих

ультразвукових хвиль відключається. Якщо необхідно безконтактно визначати поверхневу густину  $m_s \leq 400$  г/м<sup>2</sup> використовуючи фазовий метод з похибкою, яка не повинна перевищувати  $\delta_{\varphi_W} \leq 1,5\%$ , тоді необхідно застосовувати залежність (5.31) для розрахунку значень невідомого параметру.

У роботі наведені результати досліджень безконтактного контролю поверхневої густини  $m_s$  для однорідної текстильної волоконної маси за допомогою ультразвукового фазового методу. Показані принцип роботи комп'ютеризованої скануючої системи, а також дослідження можливості безконтактного контролю поверхневої густини  $m_s$  текстильних полотен. При цьому враховуються наскрізні пори між нитками за допомогою комбінованого амплітудно-фазового методу.

Поставлена задача визначення поверхневої густини  $m_s$  полотна вирішується при використанні зміни амплітуди ультразвукової хвилі, яка відбивається від поверхні контрольованого матеріалу. При цьому можуть змінювитися розміри пор полотна у порівнянні з еталонним зразком, які, в свою чергу, впливають на величину амплітуди відбитої ультразвукової хвилі. Тоді, враховуючи вплив пористості текстилю на загальні покази вимірювальних приладів, можна за допомогою зміни фази хвиль, що пройшли волокна та пори полотна, визначати величину поверхневої густини  $m_s$  матеріалу.

Отже, якщо підсумувати зазначене, то дослідження з можливості застосування безконтактного контролю поверхневої густини  $m_s$  полотна показали, що за зміною амплітуди відбитих ультразвукових хвиль від матеріалів із складною структурою та за зміною фазового зсуву хвиль, які проходять крізь ці матеріали, можна визначати зазначений технологічний параметр. При цьому врахувуючи наскрізні пори між нитками самого полотна. Зроблений аналіз доводить доцільність створення нових безконтактних фазових методів та систем оперативного комп'ютеризованого контролю. Ці нові методи та системи контролю основних технологічних параметрів для різних текстильних матеріалів можна буде застосовувати безпосередньо в процесі їх виробництва.

## 5.4. Розробка ультразвукової комп'ютеризованої системи контролю об'ємної щільності текстильних матеріалів

Для контролю більшості матеріалів, що застосовуються сучасною промисловістю, використовується параметр поверхневої щільності або поверхневої густини, хоча це і є один показник, за яким визначають як експлуатаційні, так і кількісні характеристики різних листових та текстильних матеріалів. При визначенні цього технологічного параметру нехтується товщина самого матеріалу, але існують такі випадки, коли необхідно визначати саме об'ємну щільність матеріалу на виробництві (при розрахунку та створенні композитних конструкцій для різних завдань промисловості). Об'ємна щільність дає інформацію про якісні показники матеріалу, а також при її визначенні враховується товщина самого матеріалу.

Для контролю об'ємної щільності текстильних матеріалів контактним руйнівним методом необхідно вирізати контрольні проби матеріалу із полотна, замірювати геометричні розміри проб із застосуванням мікрозрізів з подальшим зважуванням цих проб на вагах.

Сьогодні не існує у світі стандартного безконтактного методу визначення об'ємної щільності текстильних матеріалів, який дозволив би оперативно контролювати цей параметр текстильних матеріалів, та був би простим в реалізації та експлуатації. Тому для контролю текстильного матеріалу зі складною структурою необхідно застосовувати метод, який буде враховувати особливості самої структури і її вплив на інформативні параметри самого зондуючого сигналу під час вимірювання.

Відомий метод визначення об'ємної щільності текстильних матеріалів, який полягає у тому, що радіоактивне випромінювання падає на зразок текстильного матеріалу з певною товщиною, а за зміною інтенсивності випромінювання, яке проходить крізь нього, визначається об'ємна щільність [259]. Однак цей метод визначення об'ємної щільності текстильних матеріалів має недоліки, які пов'язані в основному із шкідливим впливом радіоактивного

випромінювання на людину та необхідністю її захисту від нього. Також відомий метод визначення об'ємної щільності текстильних матеріалів, який полягає у тому, що плоска звукова хвиля з фіксованою амплітудою падає на зразок текстильного матеріалу з певною товщиною, а за амплітудою хвилі, яка пройшла матеріал, визначається його об'ємна щільність [347]. Однак цей метод визначення об'ємної щільності текстильних матеріалів не враховує зміну ослаблення амплітуди, яке викликане різними розмірами пор матеріалів, а також не враховує зміну геометричних розмірів та розташування ниток в їхній структурі, що може вплинути на результат контролю. Описується також метод ультразвукового контролю об'ємної щільності текстильних матеріалів в [123], який полягає у тому, що зондують текстильний матеріал ультразвуковими хвилями перпендикулярно до його поверхні, які відбиваються від нього, потім перетворюються прийняті ультразвукові коливання в електричну напругу, а за ії амплітудою та за часом розповсюдження ультразвукових коливань в матеріалі можна визначати його об'ємну щільність. Однак цей метод ультразвукового контролю об'ємної щільності текстильних матеріалів не враховує в кінцевому результаті вплив зміни геометричних розмірів ниток текстильного матеріалу на амплітуду ультразвукових хвиль, які відбилися від нього. Також відомий метод та пристрій для визначення зміни швидкості розповсюдження ультразвукових хвиль у волоконній текстильній масі [424]. Цей метод дає можливість опосередковано визначати об'ємну щільність текстильних матеріалів без врахування їхньої структури, що є суттєвим недоліком і може призвести до значних похибок при визначенні необхідного параметру.

Для безконтактного оперативного контролю об'ємної щільності різних текстильних матеріалів необхідно провести дослідження розповсюдження ультразвукових хвиль в середовищах декількох систем ниток. Це дозволить у майбутньому створювати високоточні адаптивні до структури матеріалу прилади технологічного контролю. Такі прилади можна було б застосовувати в процесі оперативного контролю об'ємної щільності різних текстильних матеріалів, що дозволить підвищити конкурентоспроможність готової продукції із заданими якісними характеристиками.

Ультразвуковий метод визначення об'ємної щільності текстильних матеріалів (рис.5.10), в якому досягались би можливість виключення впливу натягу ниток полотна та пористості на амплітуду хвиль, які пройшли крізь них, дозволить підвищити вірогідність контролю об'ємної щільності.

На рис.5.11 представлена структурна схема комп'ютеризованої системи, яка реалізує метод контролю об'ємної щільності текстильних матеріалів, алгоритм процесу сканування якої показаний на рис. 5.12.

Комп'ютеризована система містить мікроконтролери (МК) 1 i 2. формувач зондуючих імпульсів 3, підсилювач потужності 4, випромінюючий п'єзоперетворювач 5, приймаючі п'єзоперетворювачі 6 і 7, регульовані підсилювачі потужності 8 і 13, амплітудні детектори 9, 12 і 14, атенюатор 11, блок комутації 10, мікросхема перетворення логічних рівнів 15, персональний комп'ютер 16 (ПК16), блок керування двигунами 17 (БКД 17) для переміщує сканувального механізму, який безконтактні ультразвукові перетворювачі по усій площі текстильного полотна 18.

Система працює наступним чином. Електричні імпульси з частотою f, які утворюються за допомогою МК1, подаються на вхід формувача зондуючих імпульсів 3, з виходу якого подаються пакети імпульсних сигналів з напругою U<sub>m</sub>, які підсилюються підсилювачем 4 за потужністю і поступають на випромінюючий п'єзоперетворювач 5. Контрольоване текстильне полотно 18 між випромінюючим п'єзоперетворювачем 5 приймаючим вводять та п'єзоперетворювачем 6 вимірювального ультразвукового каналу. Ультразвукові п'єзоперетворювачем 5, коливання, що випромінюються проходять контрольований текстильний матеріал 18 та потрапляють до приймаючого п'єзоперетворювача 6, де перетворюються в електричні коливання, після підсилення їх регульованим підсилювачем 8, далі вони потрапляють до амплітудного детектора 9, де перетворюються у постійну напругу U<sub>1</sub>.



Рис. 5.10. Структура операцій системи для реалізації амплітудного методу контролю об'ємної щільності текстильних матеріалів



Рис.5.11. Структурна схема комп'ютеризованої системи, за допомогою якої можна контролювати об'ємну щільність текстильних полотен



Рис. 5.12. Алгоритм процесу ультразвукового сканування текстильних матеріалів комп'ютеризованою системою при амплітудному методі контролю

Напруга U<sub>1</sub>, що утворюється надходить на блок комутації 10, який у певний момент часу пропускає її на вхід МК2, де вона перетворюється за допомогою внутрішнього аналого-цифрового перетворювача (АЦП) МК2 у код N<sub>1</sub>. У свою чергу, МК2 синхронізує таке переключення каналу за допомогою блоку комутації 10 з часом надходження ультразвукових хвиль на приймаючий п'єзоперетворювач 6 із подальшим утворенням напруги U<sub>1</sub>. Перед цим фіксується напруга U<sub>0</sub>, яка утворюється після послаблення зондуючих імпульсів атенюатором 11 та проходження їх амплітудного детектора 12, амплітуда якої пропорційна амплітуді ультразвукових коливань, шо випромінюються випромінюючим п'єзоперетворювачем 5. Далі напруга U<sub>0</sub> потрапляє до МК2, де вона перетворюється в цифровий код N<sub>0</sub>. Відповідні коди можна показати наступними залежностями:

$$N_0 = \frac{U_0}{r_{u2}} = K_1 K_2 K_6 K_7 \frac{U_m}{r_{u2}}, \qquad (5.38)$$

$$N_{1} = \frac{U_{1}}{r_{u2}} = K_{1} K_{3} K_{4} K_{5} K_{7} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{K m_{s} f \cos v}{\rho_{1} c_{1}}\right)^{2}}} \frac{U_{m}}{r_{u2}}, \qquad (5.39)$$

де  $r_{u2}$  – одиниця найменшого молодшого розряду АЦП МК2 за напругою;

- *K*<sub>1</sub> коефіцієнт підсилення підсилювача 4;
- *К*<sub>2</sub> коефіцієнт послаблення атенюатора 11;

К3 – коефіцієнт перетворення коливань випромінюючим

п'єзоперетворювачем 5 та приймаючим п'єзоперетворювачем 6;

*К*<sub>4</sub> – коефіцієнт підсилення регульованого підсилювача 8;

- K<sub>5</sub> коефіцієнт перетворення напруги амплітудного детектора 9;
- *K*<sub>6</sub> коефіцієнт перетворення напруги амплітудного детектора 12;

*К*<sub>7</sub> – коефіцієнт передачі сигналу блоком комутації 10.

Частина ультразвукових коливань відбивається від контрольованого текстильного полотна 18 та потрапляє на приймаючий п'єзоперетворювач 7, за допомогою якого перетворюються в електричні коливання, далі вони підсилюються за потужністю регульованим підсильовичем 13 та потрапляють до амплітудного детектора 14, де перетворюються в постійну напругу  $U_2$ . Ця напруга надходить на вхід до МК1, де за допомогою власного внутрішнього АЦП мікросхеми перетворюється у цифровий код  $N_2$ , який можна представити так:

$$N_{2} = \frac{U_{2}}{r_{u1}} = K_{1} K_{8} K_{9} K_{10} \frac{K_{\rho}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\rho_{1}c_{1}}{K m_{s} f \cos v}\right)^{2}}} \frac{U_{m}}{r_{u1}}, \qquad (5.40)$$

- де  $r_{u1}$  одиниця найменшого молодшого розряду АЦП МК1 за напругою;
  - К<sub>р</sub> коефіцієнт, який характеризує залежність надходження відбитих ультразвукових коливань до приймаючого п'єзоперетворювача 7 від показників структури контрольованого текстильного матеріалу 18 та його положення;
  - К<sub>8</sub> коефіцієнт перетворення коливань випромінюючим

п'єзоперетворювачем 5 та приймаючим п'єзоперетворювачем 7;

- Ко коефіцієнт підсилення регульованого підсилювача 13;
- *K*<sub>10</sub>- коефіцієнт перетворення напруги амплітудного детектора 14.

Для виключення впливу натягу текстильного полотна 18 на покази вимірюваних значень об'ємної щільності  $\rho_2$ , перед основними вимірами необхідного параметру, МК1 переміщує п'єзоперетворювачі 5 і 6 вздовж всієї площі контрольованого текстильного матеріалу за допомогою БКД 17. Це відбувається за певним алгоритмом програми системи. Визначається зона текстильного полотна 18 з найбільш деформованими нитками від дії натягу на технологічному обладнанні за допомогою п'єзоперетворювачів 5 і 6. При збільшені натягу полотна 18 у певній його зоні, де деформація ниток найбільша, амплітуда ультразвукових коливань, які пройшли крізь нього, зменшується за величиною, відповідно напруга  $U_1^*$  та код  $N_1^*$ , які відповідають цій ділянці полотна 18, також будуть зменшуватися. Порівнюється код  $N_1^*$  з кодом  $N_{01}^*$ , який утворюється за напругою  $U_{01}^*$  при проходженні ультразвукових хвиль крізь еталонний матеріал полотна без натягу або при його мінімальних значеннях. Далі величини  $N_1^*$  та  $N_{01}^*$  приймають участь у введенні поправки на натяг контрольованого полотна 18 при визначенні його об'ємної щільності  $\rho_2$ за допомогою ультразвукового зондування матеріалу.

Також для визначення об'ємної щільності  $\rho_2$  текстильного полотна 18 необхідно виключити вплив зміни його пористості  $Q_p$  відносно пористості Q0 л еталонного полотна. Такий вплив можна виключити забезпечивши контроль зміни величини коефіцієнту К (відносно еталонного текстильного полотна), який в основному змінюється із зменшенням або збільшенням пор між нитками контрольованого текстильного полотна 18. Цю зміну можна фіксувати зміною ультразвукового сигналу, який відбивається від за контрольованого текстильного полотна 18 та потрапляє у приймаючий п'єзоперетворювач 7, відносно ультразвукового сигналу, який відбився від еталонного текстильного полотна та потрапив V приймаючий п'єзоперетворювач 7 раніше. Визначити зміну значення коефіцієнту К контрольованого текстильного полотна 18 можна за зміною величини постійної напруги  $U_2$  або коду  $N_2$  відносно постійної напруги  $U_{02}^*$  або коду  $N_{02}^*$ , який був утворений при зондуванні еталонного текстильного матеріалу. Знаючи, що пористість  $Q_p$  контрольованого полотна 18 та пористість  $Q_{0p}$  еталонного полотна безпосередньо пов'язані з коефіцієнтом К, тоді вираз їхнього співвідношення можна показати залежністю (5.36). Враховуючи вираз (5.36) можна визначати значення коефіцієнту K контрольованого текстильного полотна 18 пов'язавши його з напругами  $U_2$ ,  $U_{02}^*$  та  $N_2$ ,  $N_{02}^*$  наступною залежністю:

$$K = \frac{U_2}{U_{02}^*} \cdot K_0 = \frac{N_2}{N_{02}^*} \cdot K_0.$$
(5.41)

Значення коефіцієнту  $K_0$  еталонного текстильного матеріалу визначається один раз. Оскільки об'ємна щільність  $\rho_2$  контрольованого текстильного полотна 18 безпосередньо пов'язана з поверхневою густиною  $m_s$ , а їх взаємозв'язок можна показати наступним виразом:

$$\rho_2 = \frac{4K \, m_s}{\pi^2 d_{ov}},\tag{5.42}$$

де  $d_{oy}$  – сума діаметрів ниток основи та утоку контрольованого текстильного полотна 18, тоді з врахуванням залежності (5.42) об'ємну щільність  $\rho_2$  можна подати ще так:

$$\rho_{2} = \frac{4\rho_{1}c_{1}\sqrt{\left(\frac{U_{0}}{U_{1}}\right)^{2} - 1}}{\pi^{2}d_{oy} f \cos \nu} = \frac{2\rho_{1}c_{1}\sqrt{\left(\frac{U_{0}}{U_{1}}\right)^{2} - 1}}{\pi^{2}d_{c} f \cos \nu}.$$
(5.43)

Для того щоб виключити вплив зміни геометричних розмірів ниток текстильного полотна 18 та контролювати його об'ємну щільність  $\rho_2$  за допомогою ультразвукових хвиль, необхідно також за їх допомогою визначати і середній діаметр  $d_c$  ниток основи та утоку матеріалу. Як показали дослідження, відношення середнього діаметру  $d_c$  ниток контрольованого текстильного полотна 18 до середньої його довжини сторони  $\ell$  квадратної наскрізної пори можна подати як:

$$\frac{\sqrt{K}}{2} = \frac{d_c}{\ell},\tag{5.44}$$

або

$$\sqrt{K} = \frac{d_{oy}}{\ell},$$

тоді середній діаметр *d<sub>c</sub>* ниток контрольованого текстильного полотна 18, з врахуванням зміни натягу ниток, визначається за допомогою відбитого ультразвукового сигналу наступним виразом:

$$d_{c} = \frac{\ell_{0} U_{1}^{*} \sqrt{K}}{2U_{01}^{*}} = \frac{\ell_{0} U_{1}^{*} \cdot \sqrt{\frac{U_{2}}{U_{02}^{*}} \cdot K_{0}}}{2U_{01}^{*}},$$
(5.45)

де довжина  $\ell_0$  сторони квадратної наскрізної пори еталонного текстильного полотна визначається один раз.

Як показали дослідження, для контрольованих текстильних полотен з поверхневою густиною  $m_s$ , яка знаходиться в діапазоні від  $m_s = 120$  г/м<sup>2</sup> до  $m_s = 280$  г/м<sup>2</sup>, при більшій довжині сторони квадратної наскрізної пори еталонного полотна за довжину сторони пори контрольованого полотна  $\ell_0 > \ell$ , можна визначати точно середній діаметр  $d_c$  ниток з відносною похибкою 5%.

За напругами, які пропорційні ультразвуковим сигналам, що взаємодіють з контрольованим та еталонним текстильними полотнами, з урахуванням зміни натягу ниток полотна 18, коефіцієнту *K* та при  $\rho_1 c_1 / (f \cos v) = const$ , об'ємну щільність  $\rho_2$ , враховуючи (5.45) та (5.43), можна визначити наступним чином:

$$\rho_{2} = \frac{4\rho_{1}c_{1}U_{01}^{*} \cdot \sqrt{\left(\left(\frac{U_{0}}{U_{1}}\right)^{2} - 1\right)\frac{U_{02}^{*}}{U_{2}K_{0}}}}{\pi^{2}\ell_{0}U_{1}^{*}f\cos\nu} = \frac{4\rho_{1}c_{1}N_{01}^{*} \cdot \sqrt{\left(\left(\frac{N_{0}}{N_{1}}\right)^{2} - 1\right)\frac{N_{02}^{*}}{N_{2}K_{0}}}}{\pi^{2}\ell_{0}N_{1}^{*}f\cos\nu} \cdot (5.46)$$

Отже, знаючи значення коефіцієнту  $K_0$ , довжини  $\ell_0$  сторони квадратної наскрізної пори еталонного текстильного полотна, добутку частоти f та cosv, швидкість розповсюдження ультразвукових коливань в повітрі  $c_1$ , значення об'ємної щільності повітря  $\rho_1$ , можна з виразу (5.46) за отриманими кодами

 $N_0$ ,  $N_1$ ,  $N_1^*$ ,  $N_{01}^*$ ,  $N_2$ ,  $N_{02}^*$  системи визначати об'ємну щільність  $\rho_2$  контрольованого текстильного полотна 18.

Запропонована комп'ютеризована система може передавати коди, які пропорційні амплітудам ультразвукових коливань, що взаємодіяли 3 контрольованим текстильним полотном 18 через мікросхему перетворення логічних рівнів 15 на ПК 16, де далі виконуватиметься обробка вимірювальної інформації. Також комп'ютеризована система може проводити обробку даних і автономно за допомогою мікросхеми МК2. Алгоритм програми сканування текстильного полотна 18 та обробки вимірювальної інформації може включати режим мобільності блоку складової частини системи для його легкого транспортування та встановлення на різному технологічному обладнанні без підключення до ПК 16. Такий підхід забезпечить гнучкість системи контролю різних технологічних параметрів на виробництві, до якої може входити можливість розроблений ультразвуковий складовий блок. Цe дасть використовувати його додатково і для лабораторного контролю текстильних полотен за необхідності в легкій промисловості.

Ультразвуковий метод та комп'ютеризована система визначення об'ємної щільності  $\rho_2$  текстильних полотен може бути використана для безконтактного контролю зазначеного параметру та дозволить:

 виключити вплив зміни натягу ниток контрольованих текстильних полотен на амплітуду ультразвукових хвиль, які взаємодіють з цими матеріалами;

 виключити вплив пористості контрольованих текстильних матеріалів та вплив зміни геометричних розмірів їхніх ниток на амплітуду ультразвукових хвиль, які взаємодіють з цими матеріалами і за допомогою яких визначається об'ємна щільність;

 – забезпечити безконтактний оперативний контроль об'ємної щільності текстильних полотен на технологічному обладнанні, безпосередньо в процесі їх виготовлення.

## 5.5. Розробка ультразвукової комп'ютеризованої системи контролю зміни пористості текстильних полотен

сьогодні існує необхідність в автоматизованому Також 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 текстильних 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 безконтактний можна використовувати метод пористості визначення контрольованих виробів.

Пневматичні методи та засоби 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 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, 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 комп'ютеризованих роботизованих комплексів для контролю та сортування матеріалів із складною структурою безпосередньо на виробництві.

Для безконтактного контролю та сортування матеріалів із структурою, яка собою необхідно представляє умовну сітку, використовувати один i3 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 та порівнювати її з еталоном, то, в такому випадку, можна визначати зміну контрольованої пористості. Визначення зміни точно 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.

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

$$V = \left( 1 + \left( 1 - \left( ch \alpha_{3.} \chi + \frac{\rho_{2}c_{2}}{2\rho_{1}c_{1}} \cdot sh \alpha_{3.} \chi \right) \cdot 2cos \frac{2\pi f \chi}{c_{2}} \right) \times \left( \left( \left( ch \alpha_{3.} \chi + \frac{\rho_{2}c_{2}}{2\rho_{1}c_{1}} \cdot sh \alpha_{3.} \chi \right) \cdot cos \frac{2\pi f \chi}{c_{2}} \right)^{2} + \left( \left( sh \alpha_{3.} \chi + \frac{\rho_{2}c_{2}}{2\rho_{1}c_{1}} \cdot ch \alpha_{3.} \chi \right) \cdot sin \frac{2\pi f \chi}{c_{2}} \right)^{2} \right)^{-1} \right)^{\frac{1}{2}},$$

$$(5.47)$$

Якщо зважати на те, що для фільтрувальних матеріалів величина  $[(2\pi f/c_2)+\alpha_{3.}]\chi <<1$ , тоді вираз (5.47) можна подати як:

$$|V| = \sqrt{1 + \alpha_{3.} \frac{\rho_{2}c_{2}}{\rho_{1}c_{1}} \chi} \left(1 + \alpha_{3.} \frac{\rho_{2}c_{2}}{2\rho_{1}c_{1}} \chi\right)^{2} + \left(\frac{2\pi f}{c_{2}} \frac{\rho_{2}c_{2}}{2\rho_{1}c_{1}} \chi\right)^{2}}.$$
(5.48)

Коли згасання в контрольованому матеріалі менше 2 % і ним можна знехтувати  $\alpha_{3.} \approx 0$ , тоді залежність (5.48) можна показати так:

$$|V| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\rho_1 c_1}{\pi f \rho_2 \chi}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\rho_1 \lambda_1}{\pi \rho_2 \chi}\right)^2}},$$
(5.49)

де  $\lambda_1$ – довжина ультразвукової хвилі в повітрі.

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

$$\frac{|V|}{|V_0|} = \frac{Q_{0p}}{Q_p},$$
(5.50)

де  $|V_0|$  – модуль комплексного коефіцієнта відбиття ультразвукової хвилі від

еталонного матеріалу з відомою пористістю;

 $Q_{0p}$ ,  $Q_p$  – відома пористість та пористість матеріалу, що контролюється.

Вираз (5.50), з врахуванням коефіцієнтів, що характеризують тільки часткове надходження відбитих ультразвукових сигналів до приймача, можна подати у наступному вигляді:

$$\frac{|V|K_{\rho}}{|V_0|K_{\rho 0}} \approx \frac{Q_{0p}}{Q_p},\tag{5.51}$$

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 (5.49) у (5.50) враховуючи умову  $\left(\left(d_o + d_y\right)\frac{\pi}{4}\right)_0 = H_0, \left(\left(d_o + d_y\right)\frac{\pi}{4}\right)_2 = H_2,$ 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:

$$\frac{|V|}{|V_0|} = \sqrt{\frac{\left(\left(\pi f_0 \ \rho_0 H_0 \cos v_0\right)^2 + \left(\rho_1 c_1\right)^2\right) \cdot \left(\cos v_x f_0\right)^2}{\left(\left(\pi f_0 \ \rho_0 H_0 \cos v_x\right)^2 + \left(\rho_1 c_1\right)^2\right) \cdot \left(\cos v_0 f_0\right)^2}},$$
(5.52)

де  $cosv_0, cosv_x$  – величини, що характеризують розмір пор еталонного та контрольованого матеріалів;  $f_0$  – частота ультразвукових хвиль, якими опромінюються еталонний та контрольований матеріали (при виконанні перших вимірювань).

Для того, щоб точно можна було визначити на скільки змінився розмір пор в контрольованому матеріалі, необхідно за рахунок регулювання частоти  $f_x$  коливань забезпечити виконання рівності, яку можна подати так:

$$\frac{\left|V\right|^{*}}{\left|V_{0}\right|} = \sqrt{\frac{\left(\pi f_{0}f_{x} \rho_{0} H_{0}\right)^{2} + \left(\frac{f_{x}\rho_{1}c_{1}}{\cos v_{0}}\right)^{2}}{\left(\pi f_{0}f_{x} \rho_{0} H_{0}\right)^{2} + \left(\frac{f_{0}\rho_{1}c_{1}}{\cos v_{x}}\right)^{2}} = 1,$$
(5.53)

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:

$$\cos v_{x} = \sqrt{\frac{\left(f_{0} \rho_{1} c_{1}\right)^{2}}{\left(\pi f_{0} f_{x} \rho_{0} H_{0} \frac{|V_{0}|}{|V|^{*}}\right)^{2} + \left(\frac{f_{x} \rho_{1} c_{1}}{\cos v_{0}} \frac{|V_{0}|}{|V|^{*}}\right)^{2} - \left(\pi f_{0} f_{x} \rho_{0} H_{0}\right)^{2}}.$$
 (5.54)

Якщо 
$$\frac{|V|^*}{|V_0|} = 1$$
, то вираз (5.54) можна записати як:

$$\cos v_x = \frac{f_0}{f_x} \cdot \cos v_0. \tag{5.55}$$

Визначати на скільки змінюється розмір пор в контрольованому матеріалі порівняно з еталоном можна визначивши величину *cosv<sub>x</sub>*, а загальну пористість можна знайти з наступного виразу:

$$Q_p = \frac{|V_0|}{|V|} \cdot Q_{0p}. \tag{5.56}$$

Виходячи з наведеного відносну зміну  $\delta_Q$  пористості контрольованого матеріалу у відсотках можна подати в наступному вигляді:

$$\delta_{Q} = \left(\frac{Q_{0p} - \frac{Q_{0p} |V_{0}|}{|V|}}{Q_{0p}}\right) \cdot 100\% = \left(1 - \frac{|V_{0}|}{|V|}\right) \cdot 100\%, \tag{5.57}$$

а абсолютну зміну  $\Delta_O$  можна показати так:

$$\Delta_Q = Q_{0p} \cdot \left(1 - \frac{|V_0|}{|V|}\right). \tag{5.58}$$

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 cosv на амплітуду ультразвукової хвилі, яка відбивається від контрольованого текстильного полотна та представлена модулем |V|, наведені на рис.5.13. Моделювання впливу зміни частоти хвиль, що відбиваються від поверхні матеріалу, та впливу зміни розмірів пор контрольованого полотна на амплітуду зондуючих коливань показало, що безконтактний контроль структури різних текстильних матеріалів можна здійснювати керуючи частотою цих коливань.

Наведений амплітудно-частотний метод контролю (рис.5.14) можна використати для реалізації роботизованих комплексів, завдання яких може полягати у розпізнаванні фільтрувальних тканин із недопустимим розміром пор. Як складова таких комплексів може бути показана комп'ютеризована система з використанням мікроконтролеру (МК) для розпізнавання бракованих полотен, схема якої зображена на рис.5.15,а, а алгоритм сканування представлений на рис.5.16. На рис. 5.15,б наведена поверхня, що демонструє однаковий вплив двох параметрів (частоти хвиль f та розмірів пор через параметр cosv) на амплітуду коливань у вигляді цифрових кодів, якими оперує система.

Ультразвукова система для визначення зміни пористості текстильних полотен складається з наступних складових блоків: мікроконтролер 1 (МК 1), формувач зондуючих імпульсів 2, підсилювач потужності 3, випромінюючий та приймаючий п'єзоперетворювачі 4 та 6, регульований підсилювач потужності 7, амплітудний детектор 8, зовнішній аналого-цифровий перетворювач 9 (АЦП9), індикаторний LCD екран 10, мікросхема перетворення логічних рівнів МАХ232 11, персональний комп'ютер 12 (ПК 12), контрольоване полотно 5.


Рис.5.13. Поверхні, які показують вплив зміни частоти *f* та розмірів пор через величину *cosv* на амплітуду ультразвукової хвилі, яка представлена модулем комплексного коефіцієнта відбиття *V*:

а – поверхня з рівнями розмірів пор та амплітуди; б – поверхня з рівнями
 амплітуди; в – проекції рівнів амплітуди на координатах впливових параметрів



Рис. 5.14. Структура операцій системи для реалізації амплітудно-частотного методу контролю зміни пористості текстильних полотен



б

Рис.5.15. Структурна схема комп'ютеризованої системи контролю зміни пористості текстильних полотен амплітудно-частотним методом та поверхня, яка показує вплив частоти хвиль та розмірів пор матеріалу на рівень амплітуди відбитих ультразвукових коливань:

а – структурна схема системи для контролю зміни пористості полотен;
 б – поверхня, яка показує вплив частоти хвиль та розмірів пор матеріалу на
 рівень амплітуди відбитих ультразвукових коливань у вигляді цифрових кодів,
 якими оперує МК1 при зондуванні контрольованого полотна



Рис. 5.16. Алгоритм процесу ультразвукового сканування текстильних матеріалів комп'ютеризованою системою при амплітудно-частотному методі контролю

Комп'ютеризована система, яка наведена на рис.5.15,а працює наступним чином. Спочатку визначається пористість еталонного текстильного полотна, шляхом знаходження об'єму, який займає повітря в порах зразка цього матеріалу, скануванням його з обох сторін та виконанням мікрозрізів, з наступним багаторазовим збільшенням в масштабі та обробкою даних на ПК 12. Значення загальної пористості  $Q_{0\,p}$ , модуля  $|V_0|$ , який їй відповідає, та параметра  $cosv_0$  вводяться в МК 1 у вигляді кодів  $N_0$ ,  $Nv_0$ ,  $N_{cosv_0}$ . Далі задається алгоритм роботи усієї системи, що передбачає спочатку зондування контрольованого матеріалу ультразвуковими хвилями з частотою  $f_0$ , яка задається кодом N<sub>f0</sub> з МК 1 при налаштуванні блоку формувача імпульсного сигналу 2, далі імпульси подаються на підсилювач потужності 3, після чого вони поступають на випромінювач ультразвукових коливань 4. Ультразвукові коливання, що випромінюються п'єзоперетворювачем 4, потрапляють до приймаючого п'єзоперетворювача 6, після відбиття їх від поверхні контрольованого текстильного полотна 5. Амплітуда електричних коливань, які утворилася після відбиття ультразвукового сигналу від контрольованого полотна 5, пропорційна амплітуді зазначених ультразвукових хвиль, а після підсилення регульованим підсилювачем 7, напруга електричних коливань *U*<sub>1</sub>, що детектується амплітудним детектором 8, потрапляє до зовнішнього АЦП 9, за допомогою якого перетворюється у цифровий код  $N_{vx}$ , що потрапляє до МК 1.

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

$$N_{vx} = \frac{U_1}{r_1} = K_1 K_2 K_3 K_4 \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\rho_1 c_1}{\pi f \rho_2 \chi}\right)^2}} \frac{U_m}{r_1},$$
(5.59)

де  $U_m$  – амплітуда напруги електричних коливань на виході формувача

імпульсів 2;

- *K*<sub>1</sub> коефіцієнт підсилення підсилювача 3;
- *K*<sub>2</sub> коефіцієнт перетворення блоків 4, 6;

K<sub>3</sub> – коефіцієнт підсилення регульованого підсилювача 7;

- *K*<sub>4</sub> коефіцієнт детектування амплітудного детектора 8;
  - r<sub>1</sub> 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 ( $Nv_0 = N_{vx}$ ). Коли зондування припиняється МК 1 визначає параметр  $cosv_x$  у вигляді коду наступним чином:

$$N_{cosvx} = \frac{N_{f0}}{N_{fx}} \cdot N_{cosv_0}.$$
(5.60)

За параметром  $cosv_x$  можна визначати розмір пор контрольованого полотна 5 та їх зміну, а загальна його пористість  $Q_p$  визначається у вигляді коду так:

$$N_x = \frac{Nv_0}{N_{vx}} \cdot N_0. \tag{5.61}$$

Цифрові коди N<sub>cosvx</sub>, N<sub>x</sub> виводяться на LCD екран 10, а також передаються через послідовний порт та мікросхему MAX232 11 і записуються на ПК 12, де відбувається обробка та зберігання інформації.

Добуток величини коду  $N_{cosvx}$  та коефіцієнту пропорційності  $K_v$ , який відповідає зміні розмірів пор матеріалу, а також добуток величини коду  $N_{fx}$  та коефіцієнту пропорційності  $K_f$ , що відповідає зміні частоти ультразвукових коливань, показують рівнозначний вплив на амплітуду відбитих хвиль (рис. 5.15,б), в межах, що відповідають безконтактному діапазону зондування полотен із пористою структурою.

### Висновки до розділу 5

1. Розроблено структурну схему та описано принцип дії комп'ютеризованої скануючої системи текстильного полотна В процесі виробництва. Ця система дає можливість оперативно проводити контроль натягу ниток основи та самого полотна для забезпечення технологічного впливу на ткацьке обладнання. Цей вплив дає можливість дотримувати поверхневу густину тканини в заданих межах. Фактичне значення цього параметру можна безконтактно визначати в процесі виробництва самого полотна.

2. Розроблено лії структурну схему та показаний принцип комп'ютеризованої системи сканування текстильної волоконної маси та визначення натягу ниток на трикотажних машинах. Для цієї системи застосовуються два режима її роботи. Перший режим роботи пов'язаний із визначенням поверхневої густини текстильної волоконної маси. Другий режим роботи пов'язаний з визначенням натягу ниток на трикотажних машинах. допомогою переключення різних Зазначене лосягається за блоків 3 безконтактними датчиками, в залежності від технологічного процесу та поставленої задачі на виробництві.

3. Розроблено структурну схему та описаний принцип дії комп'ютеризованої системи сканування текстильної волоконної маси та текстильних полотен з визначенням їхньої поверхневої густини фазовим та амплітудно-фазовим ультразвуковими методами.

4. Розроблено структурну схему та показаний принцип дії ультразвукової комп'ютеризованої системи контролю об'ємної щільності текстильних полотен з виключенням впливу зміни натягу матеріалу на технологічному обладнанні в процесі виробництва.

5. Додатково розроблено структурну схему та описано принцип роботи ультразвукової комп'ютеризованої системи контролю зміни пористості текстильних полотен. Запропоновану систему можна використовувати для контролю нерівномірної пористості фільтрувальних тканин, а також полотна з невідповідним розміром пор та інших дефектів у ньому.

#### РОЗДІЛ 6

# РОЗРОБКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ЗРАЗКІВ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИХ СИСТЕМ ТА БЕЗКОНТАКТНИЙ КОНТРОЛЬ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕКСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Для підтвердження запропонованих в роботі положень, які відносяться до досліджень застосування безконтактного ультразвукового контролю технологічних параметрів текстильних матеріалів, необхідно створити експериментальні зразки комп'ютеризованих систем для сканування полотен. Реалізовані зразки систем сканування дадуть змогу експериментально визначати параметри пористості, поверхневої густини текстильних полотен та натягу ниток з великою лінійною густиною, контроль якого є важливим для правильної роботи текстильного обладнання. Отримана вимірювальна інформація про параметри різних текстильних матеріалів порівнюватиметься із їхніми значеннями, отриманими за допомогою існуючих методів. Таке порівняння лабораторних (контактних та точкових) методів контролю технологічних параметрів текстильних матеріалів з безконтактними методами покаже реальне їхнє відхилення за отриманими показами. При визначенні цих параметрів за допомогою різних методів може виникати похибка, яка пов'язана із складною структурою різних текстильних полотен та їх натягу безпосередньо в процесі їх виготовлення, що необхідно також враховувати. Експериментальне застосування пробних зразків комп'ютеризованих систем для безконтактного сканування полотен може показати на практиці переваги їх створення для використання в текстильній промисловості. Це дозволить проводити оперативний контроль в процесі виробництва текстильних полотен на різному текстильному обладнанні, що можливе тільки при використанні безконтактних первинних перетворювачів.

Сучасні технічні системи важко уявити без застосування мікропроцесорної техніки, яка значно розширює їх можливості. Так для безконтактних комп'ютеризованих систем, при однакових їхніх апаратних блоках з підключенням різних датчиків та зміни керуючої програми, можна вимірювати

різні параметри текстильних матеріалів. Це робить такі системи досить гнучкими та унікальними, що допоможе зменшити витрати на їх розробку та реалізацію. Далі розглянемо розробку експериментальних зразків систем, де буде врахована можливість гнучкого їхнього застосування на практиці.

# 6.1. Розробка експериментального зразка скануючої комп'ютеризованої системи текстильних полотен для контролю їхньої пористості та натягу ниток з великою лінійною густиною

Створення комп'ютеризованих систем сканування та розпізнавання різних текстильних матеріалів із різною пористістю та їх перевірка на брак може допомогти у вирішенні задачі постійного технологічного контролю готової продукції на виробництві. 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. Основа методу полягає у порівнянні зміни амплітуди ультразвукової хвилі, яка відбилася від поверхні контрольованого матеріалу, з амплітудою хвилі, що відбилася від еталонного зразку. Для реалізації поставленої задачі цей метод можна застосовувати із використанням мікропроцесорної техніки. Зазначене може бути апаратно реалізоване на базі сучасних інтегральних мікросхем, що дають можливість спростити схемотехнічні рішення необхідної технічної системи. Це дозволяє застосовувати принцип модульності складових апаратних блоків запропонованої системи при гнучкому визначенні значень різних параметрів текстильних матеріалів (додаток А) за рахунок параметрів хвиль (додаток Б).

Структурні схеми розробленого зразка системи сканування текстильних матеріалів з можливістю контролю їхніх технологічних параметрів на текстильних машинах показано на рис.6.1. Створений зразок системи дозволяє із заміною ультразвукових датчиків та переналаштуванням автоматизованого сканування на вимірювання амплітуд хвиль у хвилеводах з контрольованою ниткою визначати як пористість полотна, так і натяг ниток.



Рис.6.1. Структурні схеми експериментального зразка комп'ютеризованої системи для сканування текстильних полотен з можливістю контролю їхньої пористості та натягу ниток:

а – структурна схема зразка системи сканування полотен для контролю їхньої пористості; б – структурна схема ультразвукового зразка системи для безконтактного контролю натягу ниток з великою лінійною густиною

Розроблений зразок скануючої системи текстильних полотен, який зображений на рис.6.1, а працює наступним чином. Цифровий генератор пакетів електричних імпульсів 1 ультразвукової частоти, що утворюються на його виході, подає їх на регульований підсилювач потужності 2, після чого вони подаються на п'єзоелектричний перетворювач 3, за допомогою якого вони перетворюються в ультразвукові хвилі. Вони випромінюються та падають на поверхню контрольованого текстильного полотна 11. Потім частина ультразвукових хвиль відбивається від поверхні полотна 11 та потрапляє на п'єзоелектричний перетворювач 4, допомогою за якого вони знову перетворюються в електричні коливання, які підсилюються за потужністю підсилювачем 5. Далі ці коливання потрапляють на амплітудний детектор 6, де перетворюються в постійну напругу, яка пропорційна амплітуді ультразвукових коливань, які відбиваються від поверхні текстильного полотна 11. Утворена напруга потрапляє на вхід мікроконтролера 7 (МК 7), де за допомогою його внутрішнього аналого-цифрового перетворювача (АЦП) перетворюється в цифровий код. В пам'яті МК7 записаний код, що утворився після відбиття ультразвукових хвиль від еталонного зразка полотна, за яким у порівнянні з попереднім кодом і визначається значення зміни пористості текстильного полотна 11 відносно еталонного зразка. Поточне значення пористості текстильного полотна 11 передається через мікросхему перетворення логічних рівнів 8 в персональний комп'ютер 9 (ПК 9), де записується до бази даних і відображується у вигляді графіку в режимі реального часу. Також МК 7 керує блоком керування двигунів 10 (БКД 10), за допомогою якого переміщуються ультразвукові п'єзоелектричні перетворювачі 3 та 4 на скануючій платформі вздовж та по ширині контрольованого полотна 11. Електрична принципова схема блоків 7, 8, 10 показана в додатку В.

При відключенні БКД 10 від системи сканування та при підключенні нових п'єзоелектричних перетворювачів 3 та 4 в хвилеводі із заміною самої керуючої програми в МК 7, отримуємо ультразвукову систему для безконтактного визначення натягу ниток з великою лінійною густиною на текстильних машинах (рис.6.1,б). Для такої ультразвукової системи зміна натягу зміною амплітуди нитки визначається за ультразвукової хвилі, яка випромінюється п'єзоелектричним перетворювачем 3 та декілька раз проходить товщину нитки при розповсюдженні у хвилеводі з подальшим потраплянням її на п'єзоелектричний перетворювач 4. Далі така хвиля перетворюється в електричні коливання, що підсилюються підсилювачем 5, а за допомогою амплітудного детектора 6 перетворюються в постійну напругу, яка потрапляє до МК 7 та перетворюється у цифровий код. Новий код порівнюється з кодом, що утворився при початковому натязі нитки, та визначається поточна зміна її натягу, значення якої передається через мікросхему перетворення логічних рівнів 8 на ПК 9.

За наведеними структурними схемами на рис.6.1 були розроблені електронні блоки у вигляді електричних плат для відповідної скануючої системи з використанням одного МК 7. Проектування самих електричних схем як з одним МК, так із трьома МК для складнішої скануючої системи, яка буде розглянута далі у роботі, та відповідних плат до них (додаток Д) відбувалось у програмі Proteus 7.7. Використовуючи програму Inkscape створювалися необхідні зображення моделей плат та G-code до них (додаток Д) для фрезерування на верстаті з числовим програмним керуванням (ЧПК). Цей верстат, у свою чергу, був створений у ході проведення даної роботи для виготовлення експериментальних блоків комп'ютеризованої системи.

Симуляція фрезерування плат без підключення самого верстата з ЧПК проводилась за допомогою використання програми JCNC (додаток Д) для відладки самого технологічного процесу. Така симуляція вирізання плат з траєкторією руху ріжучого інструменту в програмі JCNC відбувалася з відображенням виконання рядка G-code програми для верстата з ЧПК. Далі отриманий G-code, після симуляції процесу фрезерування плат, відкривався в програмі grblControl та використовувався цією програмою для керування самим верстатом з ЧПК. Вигляд візуалізації коду плат в програмі grblControl приведений на рис.6.2.



арохихар_grb/Control Daily Cepter Criptera G-code программа					Состояние Рабочие координаты: 0 0 0 Машинные координаты: 0 0 0 Статус: Нет соединения Управление () (			
X: 0.000 Y: 0.000 Z: -1.000 486.349/33	/ 486.34 486.34 1007 24334 / 12.000			00:00:00 / 01:53:09 Буфер: 0 / 0 Вершины: 19892 FPS: 63	≡ Пода	емещение		
Nº	Команда	Состояние	Ответ	<u>^</u>	<	War:	>	
1	T1M6	В очереди				1.00		
2	G0Z11.000	В очереди				~		▼
3	G0X0.000Y0.000S50000M3	В очереди						
4	G0X11.793Y11.784Z11.000 В очереди —		Консоль					
Режим про	оверки 🗹 Автопрокрутка		Открыть Сброс Отправить	Пауза Прервать		10 <b>M</b>		7:14
			б				23.1	0.2018

Рис.6.2. Візуалізація електричних плат експериментальної системи з одним МК в програмі grblControl для керування процесом їх фрезерування:

а – повна візуалізація електричної плати з МК 7 та блоком перетворення 8;
 б – візуалізація доріжок електричних плат (перший етап роботи верстата з ЧПК)

337

Процес фрезерування електричних плат для скануючої ультразвукової системи в робочому полі верстата з ЧПК поділяється на три етапи, які пов'язані із заміною на кожному із етапів різних за розміром ріжучих інструментів. Ці три етапи процесу фрезерування плат скануючої системи умовно можна показати як такі:

- перший етап прорізання доріжок плат (рис.6.2,б);
- другий етап наскрізне прорізання отворів для виводів компонентів плат (додаток Д);
- третій етап прорізання контурів плат, завершальна операція на верстаті з ЧПК (додаток Д).

Сам саморобний верстат з ЧПК та процес виконання ним програм трьох етапів виготовлення плат автоматизованої системи сканування текстильних матеріалів показаний на рис.6.3. Для виготовлення плат використовувалися листи текстоліту. Після фрезерування доріжок плат лист текстоліту далі піддавався наступній обробці. Вигляд доріжок плат в процесі фрезерування та готовий результат представлені на рис.6.4.

Додатково для можливості створення хвилеводів та корпусів датчиків різної форми для експериментальних зразків ультразвукових систем контролю натягу ниток з великою лінійною густиною та контролю поверхневої густини текстильних полотен були створені 3D принтери під час виконання цієї роботи. Один із таких створених 3D принтерів показаний на рис.6.5. Сам процес друку експериментальних хвилеводів за їх створеним 3D проектом (додаток Д) за допомогою саморобних 3D принтерів показаний на рис.6.6. Слід зазначити, що друк двох хвилеводів із верхньою та нижньою їхніми частинами відбувався із використанням відповідних підтримок складних форм, які після закінчення процесу друку відривалися від основної частини хвилеводів. Таким чином, були i3 отримані хвилеводи складної форми розташуванням кріплень для безконтактних датчиків як по одну сторону контрольованої нитки, так і розташуванням кріплень по різні її сторони. При цьому один з хвилеводів за рахунок двох його частин дає можливість змінювати відстань між датчиками.



a



б

Рис.6.3. Саморобний верстат з ЧПК та фрезерування електричних плат системи:

а – передній вид саморобного верстата з ЧПК; б –фрезерування доріжок
 електричних плат із використанням верстата з ЧПК



a



б

Рис.6.4. Вигляд доріжок електричних плат в процесі фрезерування за допомогою верстата з ЧПК та готовий результат:

а – вигляд доріжок електричних плат в процесі фрезерування та після нього;
 б – готові електричні плати скануючої системи (керуючого модуля з МК 7 та блоком перетворення 8, а також плата із силовими ключами модуля БКД 10)



Рис.6.5. Саморобний 3D принтер, який був створений для друку різних форм корпусів ультразвукових датчиків, їх кріплень та хвилеводів







б

Рис.6.6. Процес друку експериментальних хвилеводів для визначення натягу ниток з великою лінійною густиною на 3D принтері та готовий результат друку:

 а – вигляд верхніх частин хвилеводів після 3D друку із робочими підтримками складних форм; б – готові надруковані хвилеводи з кріпленнями для ультразвукових датчиків як по одну сторону контрольованої нитки, так і кріпленнями по різні її сторони Такі хвилеводи з контрольованою ниткою та розповсюдженням у них ультразвукових хвиль теоретично розглядалися у цій роботі раніше. Тому створені хвилеводи разом з ультразвуковими блоками дали змогу експериментально підтвердити теоретичні дослідження таких систем, що буде наведено далі у цьому розділі.

Експериментальні хвилеводи дали змогу визначати зміну натягу нитки з великою лінійною густиною та її обрив, що є необхідним для технологічного процесу в'язання трикотажних полотен на текстильних машинах. Зазначений контроль відбувається на сучасному обладнанні в основному за допомогою контактних датчиків, які можуть іноді і не спрацьовувати, що автоматично призводить до появи браку текстильного полотна.

ультразвукових Хвилевід кріпленнями датчиків 3 для (п'єзоперетворювачів), які розташовані по різні сторони від контрольованої нитки, дають змогу налаштовувати чутливість датчиків до певного матеріалу та лінійної густини контрольованої нитки однаковій потужності при випромінюваного сигналу. Це відбувається за рахунок зміни відстанні між ультразвуковими датчиками, а значить і відстані та кількості проходжень хвилею контрольованої нитки із подальшим зменшенням або збільшенням її амплітуди. Зміна відстані між датчиками відбувається за рахунок переміщення верхньої частини хвилеводу відносно нижньої. Відсутність самого контакту між ниткою та ультразвуковими датчиками унеможливлює збій у роботі такої системи, так як це може відбуватися з контактними датчиками.

Також при скануванні безпосередньо самого матеріалу та контролі зміни його пористості відносно еталонної величини можна зменшувати витрату фарбуючих речовин, які застосовуються для надання певного кольору текстильному полотну. Крім цього за зміною пористості можна контролювати якість фільтрувальних тканин та інших матеріалів. Тому експериментальний зразок системи, який може працювати як безконтактна скануюча система зміни пористості полотен, та як ультразвукова система визначення зміни натягу ниток, є перспективним для подальшого його впровадження. 6.2. Розробка експериментального зразка комп'ютеризованої системи для контролю поверхневої густини та пористості текстильних матеріалів на технологічному обладнанні в процесі виробництва

Для безконтактного контролю поверхневої густини текстильних полотен в процесі виробництва необхідно було створити скануючу комп'ютеризовану вимірювальними каналами. систему 3 трьома Така система повинна забезпечувати безконтактие вимірювання пористості текстильних полотен, зміну натягу полотна на текстильному обладнанні та вимірювання поверхневої густини з врахуванням попередніх параметрів. Створення такої системи сканування дозволить проводити як оперативний технологічний контроль на виробництві, так і лабораторний контроль зразків полотен. Визначення поверхневої густини готових зразків текстильних полотен можна проводити вже без визначення зміни їхнього натягу з використанням безконтактних ультразвукових датчиків (рис. 6.7).

Розроблений зразок безконтактної комп'ютеризованої системи ДЛЯ контролю поверхневої густини текстильних полотен показаний на рис. 6.8, а алгоритм процесу сканування матеріалу на рис.6.9. Готовий складовий блок цього зразку системи наведений на рис. 6.10,а. Такий зразок системи працює наступним чином. Зовнішній цифровий генератор 1 виробляє пакети імпульсів, які через підсилювач потужності 2 потрапляють на п'єзоперетворювач 3, що перетворює їх в ультразвукові хвилі, які випромінюються у навколишнє середовище. Ці ультразвукові хвилі проходять крізь контрольоване текстильне полотно 23 та потрапляють на п'єзоперетворювач 4, який перетворює їх знову в електричні коливання, після чого вони надходять на регульований підсилювач 8, де коливання підсилюються за потужністю та надходять далі на простий амплітудний детектор 9. За допомогою амплітудного детектора 9 коливання перетворюються в однополярну напругу, яка поступово спадає, що пов'язано з величиною ємності зарядного конденсатора детектора 9 та тривалістю прийнятого пакету електричних коливань.



Рис. 6.7. Структура операцій системи для реалізації амплітудного методу контролю поверхневої густини та пористості текстильних матеріалів



Рис.6.8. Структурна схема зразка комп'ютеризованої системи контролю поверхневої густини та пористості текстильних матеріалів



Рис. 6.9. Алгоритм процесу ультразвукового сканування текстильних матеріалів розробленим зразком комп'ютеризованої системи контролю

Оптимальну тривалість пакету коливань можна налаштовувати за допомогою цифрового генератора 1 (рис.6.11), що пов'язано з відстанню між текстильним полотном 23 та п'єзоперетворювачами 3 та 4. Це необхідно для зменшення амплітудної похибки з однієї сторони, а з іншої сторони, необхідно слідкувати за тим, щоб не відбувалося явище перевідбивань зондуючих хвиль (рис.6.12) з подальшим їх накладанням.

Напруга на виході амплітудного детектора 9 подається на мікроконтролер 15 (МК 15) першого вимірювального каналу скануючої системи, а також подається на стандартний блок збору даних 21 (m-DAQ12). За допомогою внутрішнього десяти розрядного аналого-цифрового перетворювача (AUII) МК15 ця напруга перетворюється в цифровий код, який передається, у свою чергу, до мікроконтролера 16 (МК 16), з виходу якого через мікросхему перетворення логічних рівнів 17 потрапляє до персонального комп'ютера 18 (ПК18). Ця вимірювальна інформація оброблюється спеціально розробленою програмою (рис.6.10,б). Оскільки дванадцятирозядний АЦП блоку збору даних 21 дозволяє паралельно оброблювати напругу, що потрапляє на його вхід з досить високою швидкістю відносно перехідного процесу детектора 9, то це забезпечує відображення оцифрованого графіку зміни цієї напруги на моніторі ПК 18 в режимі цифрового осцилографа. Також цей графік напруги можна порівнювати із зображеннями зміни напруги на звичайному осцилографі С1 – 93 (рис.6.13,а). Дискретні рівні напруги у певному порядку від найменшого до найбільшого за декілька циклів надходжень пакетів хвиль за наростанням відображуються у вигляді графіку у вікні створеної програми (рис.6.13,6) для можливості визначення найбільшого значення. Швидкість опитування датчиків регулюється програмно. При швидкому опитуванні датчиків системою зображення у вікні програми буде як на осцилографі. Паралельно ці значення напруги відображуються на LCD екрані 20. Створений програмний модуль формує додатково базу даних рівня напруг з різних датчиків трьох вимірювальних каналів у певний момент часу та зберігає їх в основних додатках MS Office ПК 18 (рис.6.13,в) за необхідності.





Система автоматизованого збору д	аних (Кафедра КІТВТ - 2017 р.)			
Покази датчика Кер	ування двигунами	ератор розгортки		ереження та запис даних
0.0 B	Прям. хід Реверс Зулинка	Однотактова розгортка Тривалість	процесу	
🔲 Початок відліку		· · · · · · · · · · · ·	· · ·	
	Підсил	ення Поз	иція Ү	🔲 Записувати дані
				Зберегти дані у форматі: .txt; .doc; .xls
	Відк	рити порт Відг	правити в порт	Вимірювання
		~	*	Друк форми
	Пу	ск Скидання	Пауза	Інформ. Вихід

б

Рис. 6.10. Розроблені готовий складовий блок та програма збору вимірювальної інформації зразка комп'ютеризованої системи текстильних полотен

а – вигляд розробленого готового складового блоку зразка скануючої системи
 полотен; б – вигляд вікна розробленої програми збору вимірювальної інформації
 та керування двигунами для переміщення датчиків зразка скануючої системи



a

Sine CH2	Sine CH1	Burst	
Pulse Period K 0.0° + / / / / / / / / / / / / / / / / / /	3.000ms → 1	StartPhase	
Sine Burst	Load :Hi-Z	Gated	J B
Pulse Period	.000ms	Source Internal	
Freq 40.000kHz A	<sup>mp1</sup> 20.000Vpp	1/2	
TTEQ 40,000KNZ			

б

Рис. 6.11. Налаштування оптимальної тривалості пакету коливань за допомогою цифрового генератора 1 (генератора імпульсів ультразвукової частоти):

а – блок генерації електричних коливань – SDG1005 Siglent та блок візуалізації електричних процесів – осцилограф С1 – 77 для налаштування системи сканування текстильних полотен; б – екран цифрового генератора 1 (SDG1005 Siglent)



Рис.6.12. Дослідження згасання амплітуди ультразвукових хвиль в повітряному середовищі та накладання перевідбитих хвиль при різних відстанях між датчиками (покази осцилографа C1 – 55, де перший канал – осцилограми з виходу цифрового генератора 1, другий канал – осцилограми з виходу п'єзоперетворювача 4)

Відповідно до того як вимірюється амплітуда напруги, яка пропорційна амплітуді ультразвукових хвиль, що пройшли крізь контрольоване полотно 23, відбувається вимірювання та перетворення в цифровий код напруг й інших вимірювальних каналів скануючої системи.

Ультразвукові хвилі, які відбиваються від поверхні контрольованого полотна 23, потрапляють до п'єзоперетворювача 7 другого вимірювального каналу, де перетворюються в електричні коливання, які далі підсилюються регульованим підсилювачем 10 та потрапляють до амплітудного детектора 11. За допомогою амплітудного детектора 11 електричні коливання перетворюються в однополярну напругу з амплітудою, яка пропорційна амплітуді ультразвукових хвиль, що приймаються п'єзоперетворювачем 7. Ця напруга, у свою чергу, надходить до внутрішнього десятирозрядного АЦП мікроконтролера 14 (МК 14), де перетворюється у цифровий код, що надходить спочатку на МК 15, а потім на МК 16, звідки потрапляє на мікросхему перетворення логічних рівнів 17, а далі на ПК 18. Цей цифровий код дає можливість визначити пористість контрольованого текстильного полотна 23 за її зміною відносно пористості еталонного полотна.

Третій вимірювальний канал скануючої системи є опорним. Пакети підсилювача 2 електричних коливань, ЩО надходять 3 системи на п'єзоперетворювач 5, перетворюються в ультразвукові хвилі, які проходять тільки повітряне середовище навколишнє потрапляють та ДО п'єзоперетворювача 6. Далі ультразвукові хвилі знову перетворюються в електричні коливання та підсилюються регульованим підсилювачем 12. Потім вони потрапляють на амплітудний детектор 13, де перетворюються В однополярну напругу, що надходить до внутрішнього десятирозрядного АЦП МК 16, який перетворює її у цифровий код. Величина цього коду пропорційна амплітуді ультразвукової хвилі, яка тільки падає на контрольоване текстильне полотно 23. Код в опорному каналі, що утворився надходить через мікросхему перетворення логічних рівнів 17 на ПК 18. Паралельно вимірювальна інформація надходить з другого та третього вимірювальних каналів на блок збору даних 21.



Рис. 6.13. Перетворення системою вимірювального сигналу в цифровий формат:
а – ультразвукові зондуючі хвилі та напруга на виході амплітудного детектора 9, яка відображається на екрані осцилографа С1 – 93 і моніторі ПК 18; б – вибіркова дискретизація вихідної напруги з детектора 9 та її вивід на LCD екран

20 із позначенням "STOP" зупинки скануючої платформи; в – зберігання масиву даних про величини напруг з датчиків програмою в стандартних додатках

MS Office

Блок збору даних 21 відображає виміряні напруги з трьох каналів системи у вигляді графіків на моніторі ПК 18.

Зміна натягу визначається за зміною амплітуди ультразвукових хвиль, що пройшли крізь контрольоване полотно 23, у порівнянні з амплітудою хвиль, які пройшли еталонне полотно без натягу або при його найменших значеннях.

Далі за отриманими значеннями амплітуд напруг з трьох вимірювальних каналів можуть автоматично розраховуватися технологічні параметри текстильних полотен за допомогою розробленої програми, що запускається на ПК 18 та працює з документами офісу із збереженими даними.

Контрольоване текстильне полотно може скануватися за шириною та довжиною з переміщенням платформи з ультразвуковими датчиками вперед, за це відповідає БКД 19 при натисканні кнопки "Прямий хід" у вікні розробленої програми. Також сканування полотна може відбуватися за шириною та довжиною з переміщенням платформи з датчиками назад, за це відповідає БКД 19 при натисканні кнопки "Реверс", а при зупинці сканування натискається кнопка "Зупинка" у вікні створеної програми. На самому LCD екрані 20 відображуються ці команди сканування як "Direct course", "Reverse", "STOP".

Перед початком вимірів набіги амплітуд у вимірювальних каналах зменшуються регульованими підсилювачами системи.

Додатково два вимірювальні канали (на проходження хвиль та їх відбиття) підключалися до осцилографа 22 (осцилограф С1 – 93) для можливості порівняння графіків розробленого зразка системи сканування текстильних полотен з показами даного приладу.

Сканування трикотажних полотен може відбуватися на плосков'язальних текстильних машинах, а сканування полотен різних тканин може відбуватися на ткацьких верстатах в процесі їх вироблення. Якщо є необхідність контролювати пористість трикотажних полотен на круглов'язальних текстильних машинах за допомогою розробленого зразка комп'ютеризованої системи (рис.6.14), то випромінюючий та приймаючий її п'єзоперетворювачі другого вимірювального каналу закріплюються нерухомо (рис.6.15).



Рис.6.14. Зовнішній вигляд розробленого зразка комп'ютеризованої системи сканування для виявлення відхилення пористості трикотажного полотна на круглов'язальній текстильній машині



Рис.6.15. Положення безконтактних ультразвукових датчиків, випромінювача та приймача ультразвукових хвиль, відносно трикотажного полотна в процесі роботи круглов'язальної текстильної машини

У цьому випадку саме контрольоване полотно рухається відносно п'єзоперетворювачів. Таким чином відбувається процес сканування полотна на круглов'язальній текстильній машині.

Загальне, на що можна звернути увагу, у порівнянні відбиття ультразвукових хвиль від трикотажного полотна з відбиттям хвиль від полотна тканини (додаток Ж), це те, що для першого випадку датчики потрібно розташовувати значно ближче до поверхні полотна. Ця необхідність пов'язана з тим, що трикотажне полотно має складнішу просторову будову з нитками у вигляді петельних рядів, які можуть більше розсіювати відбиті ультразвукові хвилі ніж полотна тканин простих ткацьких переплетень.

Також слід зазначити, що можна програмно змінити роботу зразка комп'ютеризованої системи. Він може без підключення до ПК 18 виконувати сканування текстильних полотен за певним алгоритмом, оброблювати отримані дані значень напруг з датчиків та самостійно визначати технологічні параметри контрольованих полотен.

Створений зразок комп'ютеризованої системи сканування дав змогу показати експериментально (додаток 3), що можна проводити оперативний безконтактний контроль технологічних параметрів текстильних полотен. 3 врахуванням натягу матеріалу (в основному для трикотажних полотен у зв'язку з тим, що матеріал добре розтягується, якщо порівнювати з тканиною) та його пористості можна точніше визначати поверхневу густину текстильного полотна в процесі виробництва. Також розроблені ультразвукові засоби зразка системи дають можливість проводити і точковий контроль в лабораторних умовах вже готових полотен в залежності від промислової необхідності.

Якщо розглядати можливість мобільності зразка комп'ютеризованої системи для його подальшого встановлення на технологічному обладнанні, то розміри розробленого та реалізованого електронного блоку системи можна зменшити приблизно в чотири рази для промислових зразків.

Інші результати проведених досліджень, які отримані за допомогою розробленого зразка комп'ютеризованої системи, будуть наведені далі у розділі.

## 6.3. Безконтактний контроль пористості та поверхневої густини текстильних матеріалів за допомогою експериментальних засобів

У ході виконання роботи були проведені дослідження з можливості застосування безконтактного контролю пористості та поверхневої густини текстильних полотен за допомогою експериментальних скануючих засобів. Оскільки проводилися дослідження багатьох зразків полотен в лабораторних умовах, які під час вимірювань не піддавались натягу, то він не враховувався, а тільки пористість матеріалу при визначенні їх поверхневої густини. Досліджувалися зразки полотен трикотажу та зразки різних тканин.

Пористість зразків різних полотен  $Q_p$  визначалась у порівнянні з пористістю еталонного зразку  $Q_{0p}$ . Значення параметрів  $Q_p$  та  $Q_{0p}$ знаходились поетапно. На першому етапі за оптичним скануванням та мікрозрізами визначалися об'єми наскрізних пор та загальна пористість текстильних еталонного  $Q_{0p}(cm.m.)$  та контрольованих матеріалів  $Q_p(cm.m.)$ площею 1 мм<sup>2</sup>. Другим етапом визначались амплітуди ультразвукових хвиль, що їхні співвідношення у порівнянні із взаємодіяли з матеріалами та співвідношеннями загальних об'ємів пор матеріалів. Пористість  $Q_p(\sigma. M.)$ розраховувалась за допомогою модулів комплексних коефіцієнтів відбиття хвиль від контрольованого матеріалу |V| та еталонного зразка  $|V_0|$ , які пов'язані із пропорційними їм напругами  $U_2$  і  $U_2^*$  з детектора ультразвукової системи. Ці напруги утворюються під час вимірювання амплітуд відбитих від текстильних контрольованого та еталонного матеріалів ультразвукових хвиль. Отже, загальна пористість та її відхилення з врахуванням залежності (5.56) визначались так:

$$Q_{p}(\delta.m.) = \frac{|V_{0}|}{|V|} \cdot Q_{0p}(cm.m.) = \frac{U_{2}^{*}}{U_{2}} \cdot Q_{0p}(cm.m.).$$
(6.1)

$$\delta_{Q_p} = \left( \left( Q_p(\delta.\,M.) - Q_p(cm.\,M.) \right) / Q_p(cm.\,M.) \right) \cdot 100\%.$$
(6.2)

Основні параметри ультразвукових малопотужних датчиків, які використовувалися при дослідженні пористості текстильних полотен:

- діюче значення напруги електричного синусоїдального сигналу на вході датчика – не більше 5 В (саме для текстильних матеріалів доцільно використовувати малопотужні датчики);
- вхідний електричний опір на частоті максимального випромінювання безконтактного датчика 380 Ом;
- максимальна частота ультразвукових коливань для випромінювання безконтактним датчиком – 40 кГц;
- частота максимального приймання хвиль датчиком 42 кГц при опорі навантаження 3,9 кОм;
- оптимальна тривалість повторення пакету ультразвукових хвиль 20 мс.

Зондування текстильних зразків може проводитися в автоматичному режимі по 50 вимірів пікових значень амплітуд напруг з детекторів ультразвукової системи на секунду. Після оцифровки вимірів вибиралося одне пікове значення амплітуди за 3 секунди або 20 пікових значень амплітуд напруг за 1 хвилину для зменшення масиву оброблюваних даних системою.

Результати проведених досліджень з визначення співвідношень параметрів пористості  $Q_{0p}(cm.m.)/Q_p(cm.m.)$  зразків тканин та співвідношень напруг  $U_2/U_2^*$  представлені в табл. 6.1 та на рис.6.16.

Таблиця 6.1

Зразки тканин	Q <sub>0p</sub> (зразок 1), Q <sub>p</sub> (зразки 2, 3, 4, 5), мм <sup>3</sup> на 1 мм <sup>2</sup> площі	Q <sub>0p</sub> /Q <sub>p</sub>	U2 <sup>*</sup> (зразок 1) U2 (зразки 2, 3, 4, 5), В	U2/U2*
1 (еталонний зразок)	0,3744	-	0,70	-
2	0,2138	1,75	1,25	1,79
3	0,5840	0,64	0,45	0,64
4	0,6558	0,57	0,41	0,59
5	0,3717	1,01	0,70	1,00

### Показники співвідношень пористостей та амплітуд детектованих напруг



Рис. 6.16. Залежність амплітудного співвідношення напруг  $U_2/U_2^*$  від співвідношення об'ємів пор  $Q_{0p}/Q_p$  тканин

- теоретична залежність;

 - скспериментальна залежність ( □- точки, які визначені за виміряними значеннями напруг та виміряними розмірами пор тканин, що досліджувались)
З врахуванням зміни середньої пористості текстильного полотна відносно еталонного зразка, що характеризується величиною співвідношення напруг  $U_2^*/U_2$ , можна безконтактно визначати і поверхневу густину  $m_s$  матеріалу.

Стандартний метод визначення поверхневої густини — ваговий метод. За допомогою зважування контрольного зразку з визначеною площею була розрахована сама поверхнева густина  $m_s(cm.m.)$  матеріалу за нормальних умов для можливості порівняння її значень із вимірами  $m_s(б.m.)$ безконтактних засобів.

Експериментальні дослідження базувалися на порівнянні контактного та безконтактного методів визначення поверхневої густини  $m_s$  різних тканин. Безконтактний метод включає в себе визначення модуля коефіцієнту проходження |W|, який характеризується співвідношенням напруг  $U_1/U_0$  з детекторів ультразвукової системи. Перша напруга  $U_1$  пропорційна амплітуді ультразвукових хвиль, які пройшли матеріал, друга напруга  $U_0$  пропорційна амплітуді хвиль, що тільки падають на контрольований матеріал. Поверхнева густина  $m_s$  тканин розраховувалася за амплітудами хвиль та показана із врахуванням виразів (5.33), (6.1) та (6.2), а також показане її відхилення  $\delta_{m_s}$ як:

$$m_{s}(\delta.M.) = \frac{Z_{1} \cdot \sqrt{\frac{1}{|W|^{2}} - 1}}{K \ f \ cos \ V} = \frac{Z_{1} U_{2}^{*} \cdot \sqrt{\left(\frac{U_{0}}{U_{1}}\right)^{2} - 1}}{K_{0} U_{2} \ f \ cos \ V}, \tag{6.3}$$

$$\delta_{m_s} = \frac{m_s(\delta.\,M.) - m_s(cm.\,M.)}{m_s(cm.\,M.)} \cdot 100\%.$$
(6.4)

Комплексні дослідження зміни пористості зразків тканин як за їхніми мікрозрізами, так і визначення цього параметру за допомогою амплітуд детектованих напруг, показані у табл. 6.2. На цій основі зроблено коригування розрахунку значень поверхневої густини  $m_s$  зразків тканин, які отримані за виміряними напругами. Було порівняно результати із стандартним методом, що також наведено у табл. 6.2 (це є продовженням досліджень наведених у табл.6.1).

#### поверхневої густини















368

369





371



Проаналізувавши отримані експериментальні дані в табл.6.2 необхідно додатково визначити для еталонного та контрольованих зразків тканин за енергією коефіцієнти проходження  $|W_0|^2$ ,  $|W|^2$  ультразвукових хвиль та коефіцієнти їх відбиття  $|V_0|^2$ ,  $|V|^2$  від зазначених текстильних матеріалів використовуючи виміряні напруги  $U_0$ ,  $U_1^*$ ,  $U_2^*$ ,  $U_1$ ,  $U_2$ . Це необхідно для визначення вісотку розсіювання ультразвукової енергії для оптимального безконтактної вимірювальної під налаштування системи структуру контрольованого текстильного полотна. Одне із таких налаштувань може полягати у правильному розміщенні датчиків відносно поверхні полотна, а також у визначенні їх оптимальної кількості та чутливості за необхідності. Ці параметри можна визначити за виміряними напругами так:

$$|W_0|^2 \approx \left(\frac{U_1^*}{U_0}\right)^2, |W|^2 \approx \left(\frac{U_1}{U_0}\right)^2, |V_0|^2 \approx \left(\frac{U_2^*}{U_0}\right)^2, |V|^2 \approx \left(\frac{U_2}{U_0}\right)^2.$$
 (6.5)

Слід зазначити, що невелика частина звукової енергії не сприймається ультразвуковим датчиком за рахунок її згасання у середовищі розповсюдження хвиль. Навіть виміряне значення напруги  $U_0$  на малу величину менше дійсного, за яким характеризується амплітуда падаючої на матеріал хвилі. Зазначені параметри ультразвукових хвиль наведені у табл. 6.3 та на рис.6.17., рис.6.18.

Таблиця 6.3

Зразки	$ W_0 ,$	$ W_0 ^2$ (зразок 1), $ W ^2$	$ V_0 ,$	$ V_0 ^2$ (зразок 1), $ V ^2$
тканин	W	(зразки 2, 3, 4, 5)	V	(зразки 2, 3, 4, 5)
1 (ет. зр.)	0,752	0,565	0,526	0,277
2	0,451	0,204	0,940	0,883
3	0,940	0,883	0,338	0,114
4	0,977	0,955	0,308	0,095
5	0,865	0,748	0,526	0,277

Показники коефіцієнтів проходження та відбиття хвиль за енергією



Рис.6.17. Теоретичні залежності модулів |W|, |V| від поверхневої густини  $m_s$  різних тканин та їх експериментальні значення, які отримані за допомогою виміряних напруг  $U_0$ ,  $U_1^*$ ,  $U_2^*$ ,  $U_1$ ,  $U_2$ 



Рис.6.18. Теоретичні залежності коефіцієнтів  $|W|^2$ ,  $|V|^2$  за енергією від поверхневої густини  $m_s$  різних тканин та їх експериментальні значення, які

отримані за допомогою виміряних напруг  $U_0, U_1^*, U_2^*, U_1, U_2$ 

З табл.6.3 та рис.6.18 видно, що сума коефіцієнтів проходження та відбиття за енергією для деяких зразків, отриманих за виміряними значеннями напруг, на малу величину більше одиниці. Це можна пояснити тим, що незначна частина енергії ультразвукової хвилі, яка пропорційна падаючій на контрольований матеріал хвилі, додатково втрачається в процесі її проходження повітряного середовища опорного каналу та подальшого її перетворення приймачем в електричну величину. Можлива незначна невідповідність відстаней між перетворювачами вимірювального та опорного каналів ультразвукової системи. Якщо така втрата звукової енергії не призводить до збільшення похибки вимірювань, яка буде виходити за допустимі межі, то нею можна знехтувати. При значному зростанні похибки вимірювання необхідно перед початком роботи ультразвукової системи краще її налаштовувати за допомогою регульованих підсилювачів. Це можна зробити, виставивши початкові скориговані значення вихідних напруг на детекторах для кожного із вимірювальних каналів, або задавши коригувальний код при обробці цифрової вимірювальної інформації системою. Також можна побачити, що для деяких зразків тканин із складним переплетенням, або для зразків трикотажних полотен (табл. 6.4), сума коефіцієнтів проходження та відбиття за енергією менше одиниці. Це може вказувати на додаткове розсіювання відбитих ультразвукових хвиль від поверхні контрольованого полотна, що взаємодіють із складною структурою тканини (із складним переплетенням ниток) або трикотажу (із петельними рядами полотна). Для контролю трикотажних полотен важко використовувати амплітуду відбитих ультразвукових хвиль у порівнянні з тканинами простих ткацьких переплетень. Складність полягає у тому, що потрібно для відбитих від матеріалу хвиль випромінюючий розміщувати та приймаючий перетворювачі біля контрольованого полотна на дуже малій відстані.

У табл. 6.4. показані зразки трикотажних полотен ластик 1+1 та гладь, які досліджувались на взаємодію текстильного матеріалу з ультразвуковими хвилями. Результати вказують на те, що розсіювання відбитих хвиль від трикотажних полотен більше ніж від контрольованих тканин.

# Результати досліджень зразків трикотажних полотен з порівнянням контактного руйнівного та безконтактного методів визначення їх



#### Продовження табл. 6.4



#### Продовження табл. 6.4



При зондуванні трикотажу, тільки на проходження ультразвукових хвиль крізь матеріал із визначеною пористістю, контроль його поверхневої густини мало чим буде відрізнятися від такого процесу для простих тканин. При цьому розсіювання ультразвукових хвиль не буде значно впливати на похибку вимірювання для матеріалу з малою товщиною. Тому для трикотажних полотен доцільно використовувати метод з вимірювальним каналом на проходження ультразвукових хвиль крізь контрольований матеріал для застосування його у текстильній промисловості.

Пористість різних текстильних полотен необхідно визначати для корегування безконтактного контролю поверхневої густини різних текстильних полотен з різною структурою переплетення ниток. Можливим варіантом спрощення апаратної частини скануючої системи є розділення її вимірювальних каналів на окремі частини. Одна частина враховуватиме ослаблення ультразвукових хвиль, які пройшли крізь контрольоване полотно, та буде працювати в режимі його сканування, а інша частина може визначати пористість точково за допомогою амплітуди відбитої ультразвукової хвилі перед початком роботи системи для її кращого налаштування. Це може суттєво спростити апаратну частину автоматизованих систем сканування для контролю текстильних полотен з однаковою пористістю. Реалізація вимірювальної частини системи, яка буде визначати пористість полотна на одиницю його площі, може базуватися просто на звичайних блоках відношень детектованих напруг з цифровими вольтметрами на виході каналу. Для такої спрощеної реалізації необхідно залежність модуля | V | комплексного коефіцієнта відбиття хвиль від об'єму пор $Q_p$  в зразку полотна з одиничною площею 1 мм<sup>2</sup>, яка показана на рис. 6.19,а, привести до лінійного виду. Обернена величина  $|V|^{-1}$ , що визначається за допомогою співвідношень виміряних детектованих напруг ( $|V|^{-1} \approx U_0 / U_2$ ), дає можливість отримати лінійну характеристику вихідної величини від зміни об'єму пор  $Q_p$  в різних зразках текстильних полотен, що наведено на рис. 6.19,6. Це дозволить, без застосування дорогих інтегральних мікросхем та складного програмного забезпечення, напряму з використанням тільки блока відношень напруг та простого вольтметра визначати пористість текстильних полотен. Без такого регулювання системи похибка вимірювань поверхневої густини m<sub>s</sub> буде значною (рис. 6.20,а). На рис.6.21,а можна побачити вплив розсіювання енергії хвиль для досліджуваних зразків тканин та трикотажу, а на рис.6.20,6, рис.6.21,6 показані відхилення  $\delta_{Q_p}$ ,  $\delta_{m_s}$  безконтактно виміряних параметрів  $Q_p$  та  $m_s$  у порівнянні з їх існуючим визначенням.



Рис. 6.19. Залежності модуля |V| та величини  $|V|^{-1}$  комплексного коефіцієнта від об'єму пор  $Q_p$  в зразку полотна на одиницю площі 1 мм<sup>2</sup>

а – залежність модуля |V| від об'єму пор  $Q_p$ , мм<sup>3</sup> в різних матеріалах; б – залежність оберненої величини модуля  $|V|^{-1}$  від об'єму пор  $Q_p$ , мм<sup>3</sup> в різних

матеріалах



Рис. 6.20. Залежності відхилень  $\delta_{m_s}$  та  $\delta_{Q_p}$  від об'єму пор  $Q_p$  в зразку полотна на одиницю площі 1 мм<sup>2</sup>

а – залежність відхилення  $\delta_{m_s}$  від  $Q_p$  без корегування  $m_s$  за допомогою відбитої ультразвукової хвилі; б – залежність відхилення  $\delta_{Q_p}$  від об'єму пор  $Q_p$ 



Рис. 6.21. Залежності суми коефіцієнтів за енергією  $|W|^2 + |V|^2$  та відхилення  $\delta_{m_s}$  від поверхневої густини  $m_s$  різних зразків полотен

а – залежність параметру  $|W|^2 + |V|^2$  від поверхневої густини  $m_s$  різних зразків полотен; б – залежність відхилення  $\delta_{m_s}$  від поверхневої густини  $m_s$  з корегуванням його значення за допомогою відбитої ультразвукової хвилі

Проведені дослідження показали, що на практиці можна застосовувати безконтактні ультразвукові методи та засоби контролю як пористості різних текстильних полотен, так і їх поверхневої густини.

Також експериментально доведено, що трикотажні полотна, за допомогою петельних рядів у своїй структурі, розсіюють відбиті ультразвукові хвилі більше ніж тканини простих ткацьких переплетень. Це, у свою чергу, ускладнює практичну реалізацію способів прийняття таких відбитих від матеріалу ультразвукових хвиль. Тому для трикотажних полотен доцільно визначати перед сканування точково їхню пористість за допомогою окремих безконтактних вимірювальних засобів. Такі засоби для визначення невідомої пористості контрольованого полотна відносно еталонного зразка можна реалізувати без використання мікропроцесорної техніки та складної обробки вимірювальної інформації. Це можна зробити лише, використовуючи прості схемотехнічні рішення із застосуванням вольтметрів для індикації значень контрольованих параметрів. При цьому напруга на індикаторі вольтметра буде пропорційною величині пористості текстильного полотна.

Експериментальні дані дають можливість зробити висновок, що для тканин простих ткацьких переплетень можна реалізувати адаптивний ультразвуковий контроль їхньої поверхневої густини. Це пов'язано з тим, що поверхня тканини добре може відбивати ультразвукові хвилі у порівнянні з трикотажними полотнами. Тому за допомогою відбитих хвиль можна визначати на скільки змінюється пористість самого матеріалу відносно еталонного зразку. Було показано, що саме зміна пористості полотна, яка може змінюватися із зміною його структури, найбільше впливає на похибку безконтактних вимірів поверхневої густини текстильного матеріалу.

Безконтактний метод контролю поверхневої густини може давати високу точність вимірювань при умові точного положення ультразвукових датчиків відносно текстильного матеріалу та мінімізації похибок вимірювальних каналів скануючої системи. Такий безконтактний метод може забезпечувати як оперативний контроль параметру на виробництві, так і його точковий контроль.

## 6.4. Безконтактне вимірювання натягу ниток з великою лінійною густиною за допомогою експериментальних ультразвукових засобів із використанням хвилеводів

Дотримання у відповідних межах поверхневої густини, одного із важливих технологічних параметрів текстильних полотен, залежить від натягу ниток на текстильних машинах, на яких вони виробляються. Від надмірного натягу ниток може відбуватися їх обривність на технологічному обладнанні, що призводить до браку текстильного полотна та до простоїв текстильних машин. Навіть нерівномірний натяг ниток на трикотажних машинах призводить до утворення петель різного розміру в самому полотні, що теж може призвести до нерівномірності його поверхневої густини та браку. Системи вимірювання та регулювання натягу ниток на різних текстильних машинах в основному є тільки контактними та механічними. Це означає, що оперативно визначати фактичне значення цього параметру та контролювати його в процесі роботи таких систем дуже складно.

Існують контактні прилади визначення натягу ниток [423], але вони не дають можливості їх встановлення без впливу на текстильний матеріал. Це призводить до додаткового зростання натягу при його вимірюванні. Зазначене може вносити суттєву похибку від контактного тиску датчика на сам матеріал. Також існують оптичні безконтактні пристрої визначення різних параметрів ниток, але вони можуть мати значні похибки у зв'язку із запиленістю середовища у виробничих умовах.

Визначення натягу можна проводити за зміною діаметра нитки та її щільності (може змінюватися за рахунок зменшення міжволоконної пористості матеріалу). Зміна діаметра нитки, у свою чергу, впливає на зміну амплітуди зондуючої ультразвукової хвилі, яка може розповсюджуватися у хвилеводі, де знаходиться і сам контрольований матеріал. При виконанні досліджень був розроблений метод безконтактного вимірювання натягу нитки з великою лінійною густиною з використанням спеціально виготовлених хвилеводів. Запропонований метод частково описувався у роботі раніше. Він полягає у багаторазовому проходженні ультразвукової хвилі крізь переріз хвилеводу, де знаходиться контрольована нитка, та у визначенні натягу текстильних волокон матеріалу за ослабленням зондуючих ультразвукових хвиль. Зрозуміло, що необхідно для таких випадків застосовувати ультразвукові хвилі, які проходять волокна матеріалу, а також ті хвилі, що оминають саму нитку. Саме для підсилення чутливості датчиків доцільно застосовувати хвилеводи. Різні за формою та розмірами хвилеводи можна застосовувати для визначення натягу ниток на трикотажних машинах в процесі виробництва текстильних полотен. На практиці для підвищення чутливості ультразвукових хвиль до зміни діаметру нитки доцільно застосовувати малопотужні датчики та відповідні до них хвилеводи. Достатньо ефективними є хвилеводи, які мають прямокутний переріз. На рис.6.22 показаний хвилевід, який був виготовлений 3D друком для експериментальних досліджень та безконтактного вимірювання натягу нитки з лінійною У великою густиною. цього хвилеводу ультразвукові п'єзоперетворювачі розташовуються по різні сторони від контрольованої нитки. Відстань між датчиками можна змінювати, але в початковому положенні вона розрахована на потрійне проходження хвилею перерізу хвилеводу під кутом з подвійним відбиттям її від його стінок. При зміні відстанні між ультразвуковими датчиками, коли верхня та нижня частини хвилеводу рухаються одна відносно одної, можна налаштовувати вимірювальний канал на чутливість ультразвукових хвиль за їх амплітудою (рис. 6.23,а,б) до текстильного матеріалу. Так для більш ефективного методу вимірювання натягу ниток, який був також розроблений у виконання досліджень та експериментально підтверджений, можна холі використовувати ультразвукові імпульсні сигнали складної форми з двома різними піками амплітуд (рис. 6.23,в). За цими піками амплітуд сигналу можна буде враховувати частину ультразвукових хвиль, яка проходить крізь контрольовану нитку з великою лінійною густиною, та частину хвиль, що оминає текстильний матеріал нитки. Це необхідно для того, щоб вимірювати значення натягу нитки з малою похибкою за допомогою хвилеводу.







а – створений хвилевід у процесі роботи вид збоку; б – передній вид створеного хвилевода у процесі його роботи; в – імпульсний сигнал у різних масштабах, що приймається п'єзоперетворювачем без перевідбивань ультразвукових хвиль



без нитки з ниткою без натягу (**P**<sup>\*</sup> = **0**) **P**<sup>\*</sup> = 98 cH а





а – імпульсні ультразвукові сигнали, які приймаються без перевідбивань;
 б – ультразвукові сигнали, які тричі проходять крізь переріз хвилеводу
 відбиваючись двічі від його стінок; в – зондуючі ультразвукові сигнали складної

форми з двома піками амплітуд, що подавалися у два різні хвилеводи

Без застосування хвилеводу амплітуда ультразвукової хвилі, яка проходить контрольовану нитку, залишається майже без змін. Також, як видно з рис. 6.21, при проходженні ультразвукової хвилі крізь середовище з текстильними волоконами матеріалу, без її перевідбивань від стінок хвилеводу та без багаторазової взаємодії хвилі з ниткою, її амплітуда майже не змінюється. Це відноситься до поперечного зондування матеріалу нитки з великою лінійною густиною в хвилеводі. Тому доцільно визначати оптимальну кількість проходжень хвилі крізь контрольований матеріал, враховуючи товщину нитки та потужність зондуючого сигналу при незмінній частоті хвиль, для їх більшої чутливості до зміни натягу текстильних волокон.

В процесі досліджень встановлено, що на амплітудні співвідношення ультразвукових хвиль, які взаємодіють з різними текстильними нитками, впливає їхня лінійна густина T, яка виражається через товщину нитки h або умовний її діаметр d (може бути показаний через умовний радіус r), та параметр cosv. Слід зазначити, що параметр cosv залежить від пористості матеріалу, частоти f ультразвукових хвиль та їх потужності. Параметр cosv змінюється із зміною частини хвиль, що огинають нитку, а умовний діаметр d впливає на зміну частини хвиль, що проходять крізь текстильні волокна та міжволоконні пори. Для визначення зміни параметру cosv та умовного радіусу r нитки можна застосувати імпульсний ультразвуковий сигнал з двома різними піками амплітуд хвиль.

Імпульсні ультразвукові сигнали складної форми з двома різними піками 6.23,в амплітуд які показані на рис. застосовувалися хвиль, ДЛЯ експериментальних вимірів поточного натягу  $P^*$  нитки в створених хвилеводах (рис.6.24 та рис. 6.26). Візуально за допомогою осцилографа С1 – 93 визначалась найбільша зміна амплітуд піків зондуючих нитку сигналів для різних хвилеводів (рис.6.25 та рис. 6.27). Визначено, що для безконтактного вимірювання нитки з лінійною густиною 445 текс, краще підходить хвилевід з розташованими датчиками по різні сторони від матеріалу.



Рис. 6.24. Процес безконтактного вимірювання натягу нитки, що спричиняє тягарець на ній (з використанням ультразвукових хвиль, які тричі проходять крізь переріз хвилеводу та двічі відбиваються від його стінок з текстильним матеріалом всередині). Використовується хвилевід з регульованими відстанями між датчиками по різні сторони від нитки



Ультразвуковий імпульсний сигнал з двома вираженими піками амплітуди

Рис. 6.25. Дослідження зміни форми та амплітуди імпульсного ультразвукового сигналу від зміни величини натягу P<sup>\*</sup>, cH нитки з лінійною густиною
T = 445 mekc ( me / m ) в хвилеводі. Застосовується для зондування нитки ультразвуковий імпульсний сигнал з двома різними піками амплітуди та хвилевід з датчиками по різні сторони від нитки

 $P^* = 98 cH$ 

 $P^* = 98 cH$ 

(більша крутка нитки)

 $P^* = 68.6 \text{ cH}$ 



Рис. 6.26. Процес безконтактного вимірювання натягу нитки, що спричиняє тягарець на ній (з використанням ультразвукових хвиль, які чотири рази проходять крізь переріз хвилеводу та тричі відбиваються від його стінок з текстильним матеріалом всередині). Використовується хвилевід з датчиками по одну сторону від нитки



Ультразвуковий імпульсний сигнал з двома вираженими піками амплітуди





(більша крутка нитки)

Ультразвуковий імпульсний сигнал з одним вираженим піком амплітуди



без нитки  $P^* = 0$   $P^* = 19,6$  сН  $P^* = 49$  сН  $P^* = 68,6$  сН  $P^* = 98$  сН

Рис. 6.27. Дослідження зміни форми та амплітуди імпульсного ультразвукового сигналу від зміни величини натягу *P<sup>\*</sup>, cH* нитки з лінійною густиною  $T = 445 \ mekc \ (mel/m)$  в хвилеводі. Застосовується хвилевід з датчиками по одну

сторону від нитки

Якщо визначати за допомогою хвилеводу зміну натягу певної гілки нитки застосовуючи зондування матеріалу ультразвуковим імпульсним сигналом з двома різними піками амплітуд, то можна записати вирази для цього параметру  $P^*(\sigma.m.)$  та його відхилення  $\delta_{P^*}$  відносно значення  $P^*(cm.m.)$  отриманого існуючим контактним методом так:

$$P^{*}(\delta...k) = \frac{P}{2} \cdot \left[ \left( \frac{r}{r^{*}} \right)^{3} + \left( \frac{\cos v_{2}}{\cos v_{2}^{*}} \right)^{3} \right],$$

$$P^{*}(\delta...k) = \frac{Pr^{3}}{2} \cdot \left[ \sqrt{\frac{T}{\pi f r n \cdot \cos v_{1}} \cdot \sqrt{\frac{1}{|W_{1}|^{2} - 1}}} \right]^{-3} + \frac{P}{2} \cdot \left[ \frac{\pi^{2} f r n \rho_{2} \cos v_{2}}{Z_{1}} \right]^{3} \cdot \left[ \sqrt{\frac{1}{|W_{2}| - \frac{P_{1w}}{K_{V} P_{01w}^{*}}}} \right]^{-1} \right]^{-3}, \quad (6.6)$$

$$P^{*}(\delta...k) = \frac{Pr^{3}}{2} \cdot \left[ \sqrt{\frac{T}{\sqrt{\frac{Z_{1}}{\pi f r n \cdot \cos v_{1}} \cdot \sqrt{\left(\frac{U_{1}}{U_{1}}\right)^{2} - 1}}} \right]^{-3} + \frac{P}{2} \cdot \left[ \frac{\pi^{2} f r n \rho_{2} \cos v_{2}}{Z_{1}} \right]^{3} \cdot \left[ \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{U_{1}^{*}}{U_{1}^{*} - \frac{U_{1}}{K_{V} U_{1}^{*}}}} \right]^{-3}} \right]^{-3}, \quad (6.6)$$

$$P^{*}(\delta...k) = \frac{Pr^{3}}{2} \cdot \left[ \sqrt{\frac{T}{\sqrt{\frac{Z_{1}}{\pi f r n \cdot \cos v_{1}} \cdot \sqrt{\left(\frac{U_{1}}{U_{1}}\right)^{2} - 1}}} \right]^{-3} + \frac{P}{2} \cdot \left[ \frac{\pi^{2} f r n \rho_{2} \cos v_{2}}{Z_{1}} \right]^{3} \cdot \left[ \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{U_{1}^{*}}{U_{1}^{*} - \frac{U_{1}}{K_{V} U_{1}^{*}}}} \right]^{-3}} \right]^{-3}, \quad (P_{01w}) \quad (U_{1})$$

$$K_V = K_p^{\left(\frac{P_{01w}}{P_{1w}}\right)} = K_p^{\left(\frac{U_1}{U_i}\right)},\tag{6.7}$$

$$\delta_{P^{*}} = \frac{P^{*}(\sigma...) - P^{*}(cm...)}{P^{*}(cm...)} \cdot 100\%.$$
(6.8)

- де *i* 2, 3, 4..., номер значення амплітуди напруги з приймаючого перетворювача при зміні натягу гілки нитки відносно її попереднього стану;
  - U<sub>1</sub> амплітуда напруги, яка пропорційна меншому піку імпульсного
     ультразвукового сигналу, коли він розповсюджується в хвилеводі без нитки;
  - U<sub>i</sub> амплітуда напруги, яка пропорційна меншому піку імпульсного ультразвукового сигналу, коли він розповсюджується в хвилеводі з ниткою із зміною її натягу, різні значення якого пов'язані з порядковим номером *i*;
- U<sub>1</sub><sup>\*</sup> амплітуда напруги, яка пропорційна більшому піку імпульсного
   ультразвукового сигналу, коли він розповсюджується в хвилеводі без нитки;
- U<sup>\*</sup><sub>i</sub> амплітуда напруги, яка пропорційна більшому піку імпульсного
   ультразвукового сигналу, коли він розповсюджується в хвилеводі з
   ниткою із зміною її натягу, різні значення якого пов'язані з порядковим
   номером *i*;
- $|W_1|$  модуль комплексного коефіцієнта проходження ультразвукових хвиль, який дорівнює співвідношенню напруг  $U_i/U_1$ ;
- $|W_2|$  модуль комплексного коефіцієнта проходження ультразвукових хвиль, який дорівнює співвідношенню напруг  $U_i^*/U_1^*$ ;
  - v<sub>1</sub> кут між напрямком частини хвиль, що огинають волокна нитки в її середині, та поверхнею цих волокон;
  - *v*<sub>2</sub> кут між напрямком частини хвиль, що огинають саму нитку із зовнішньої
     ії сторони, та поверхнею усього матеріалу;

- $v_2^*$  кут між напрямком частини хвиль, що огинають саму нитку із зовнішньої ії сторони, та поверхнею усього матеріалу під час зміни натягу волокон;
  - *r* умовний радіус контрольованої нитки при відсутності натягу;
  - n кількість проходжень ультразвукової хвилі перерізу хвилеводу з ниткою, яка необхідна для потрапляння коливань до приймаючого перетворювача;

 $K_V$  – коефіцієнт об'єму повітря між волокнами нитки;

К<sub>р</sub>-початковий коефіцієнт міжволоконної пористості матеріалу нитки;

Т – лінійна густина нитки;

Р-початковий натяг нитки;

- *P*<sub>01*w*</sub>-амплітуда тиску в хвилі меншого піку імпульсного сигналу, який проходить хвилевід без нитки;
- *P*<sub>1*w</sub></sub>– амплітуда тиску в хвилі меншого піку імпульсного сигналу, який проходить хвилевід з ниткою при зміні її натягу;</sub>*
- *P*<sup>\*</sup><sub>01*w*</sub> –амплітуда тиску в хвилі більшого піку імпульсного сигналу, який проходить хвилевід без нитки.

За допомогою отриманого виразу (6.6) можна на практиці визначати зміну поточного натягу  $P^*(\mathfrak{G}.\mathfrak{M}.)$  нитки з великою лінійною густиною T. Цей метод підходить для безконтактного вимірювання натягу ниток на самому технологічному обладнанні за необхідності його застосування для виробничого процесу. Також можна додатково досліджувати зміну міжволоконної пористості різних ниток в процесі їхнього натягу.

Як було показано на рис. 6.25 та рис. 6.27, більша зміна двох піків ультразвукових сигналів при зміні натягу нитки спостерігалася з використанням хвилеводу з розташуванням датчиків по різні сторони від волокон матеріалу. Тому дослідження для цього випадоку розглянуті в табл. 6.5 більш детально, а в інших випадках необхідно визначати кращу відстань між датчиками експериментально. Це необхідно для налаштування оптимальної чутливості ультразвукових п'єзоперетворювачів до щільності та розмірів певної нитки.

### Таблиця 6.5

Параметр	Експериментальні дані					
<i>Т</i> , мг/м	445					
<i>r</i> , MM	1.50					
<i>f</i> , кГц	40					
cosv <sub>2</sub>	0,00335					
K <sub>p</sub>	2,8					
<i>P</i> , cH	19,6					
п	3					
i	-	2	3			
$P^*$ , cH	-	0	19,6			
<i>r</i> *, MM	-	1,50	1,47			
$cosv_2^*$	-	0,00335	0,00334			
Осцило- грами ультра- звукових сигналів	2U1 = 305 MB	2U2=170MB 2U2*=315MB	2U3=165 mB 2U3=165 mB 2U3=340 mB			
Розмах амплітуди напруги	$2U_1 = 305 \text{ mB}$ $2U_1^* = 420 \text{ mB}$	$2U_2 = 170 \text{ мB}$ $2U_2^* = 315 \text{ мB}$	$2U_3 = 165 \text{ мB}$ $2U_3^* = 340 \text{ мB}$			
$ W_1  = \frac{U_i}{U_1}$	1	0,557	0,541			
$ W_2  = \frac{U_i^*}{U_1^*}$	1	0,750	0,810			
$P^*$ , cH	-	0	20,364			
Відхил. $\delta_{P^*}$ , %	_	0	3,9			

Результати досліджень безконтактного вимірювання натягу нитки
i	4	5	6				
$P^*$ cH	49,0	68,6	98,0				
$r^*$ , MM	1.02	0,99	0,95				
$\cos v_2^*$	0,00282	0,00222	0,00183				
Осцило- грами ультра- звукових сигналів	2U4=90MB	2Us=85 MB	2U6=80MB				
Розмах	$2U_4 = 90 \text{ MB}$	$2U_5 = 85 \text{ MB}$	$2U_6 = 80 \text{ MB}$				
амплітуди	$2U_4 = 340 \text{ MB}$	$2U_5 = 365 \text{ MB}$	$2U_6 = 380 \text{ MB}$				
$ W_1  = \frac{U_i}{U_1}$	0,295	0,279	0,262				
$ W_2  = \frac{U_i^*}{U_1^*}$	$=\frac{U_i^*}{U_1^*}$ 0,810 0,869		0,905				
$P^*$ , cH	47,904	68,333	98,544				
Відхил. $\delta_{P^*}$ , %	-2,2	-0,39	0,56				
Загальне п	орівняння імпульсних у	льтразвукових сигна	лів складної форми (з				
двома піка	ми амплітуди, за якими	визначається натяг та	а зміна міжволоконної				
пористос	ті нитки) після проходж	сення та перевідбиван	нь хвиль у хвилеводі				
Хвилевід Зміна імпульсного ультразвукового сигналу при зміні натягу нитки Портина імпульсного ультразвукового сигнали при зміні натягу нитки Портина імпульсного ультразвукового сигнали при зміни натягу нитки Портина імпульсного ультразвукового сигнали натяги натяги натяги							

Наведені результати показують, що існує можливість створення точного безконтактного методу визначення натягу нитки з великою лінійною густиною. Частину ультразвукового сигналу, що проходить безпосередньо крізь структуру самої нитки, теж можна використовувати для визначення зміни міжволоконної пористості ниток. Цей ефект визначення зміни міжволоконної пористості в процесі натягу нитки експериментально зафіксований за допомогою використання ультразвукових імпульсних сигналів складної форми.

Безконтактне визначення натягу нитки за допомогою хвилеводу, результати якого наведені в табл. 6.5, показано з усіма осцилограмами імпульсних ультразвукових сигналів. Можна побачити із загального порівняння імпульсних сигналів відповідність кожної їх осцилограми поточному значенню в хвилеводі. Чітко видно, ЩО перший пік амплітуди натягу нитки ультразвукового сигналу зменшується, а другий пік амплітуди збільшується. Поєднання вимірювальної інформації про амплітудні інформативні параметри двох піків ультразвукових хвиль дає можливість враховувати частину коливань, яка оминає контрольований матеріал, та зменшити похибку вимірювання натягу. Збільшення амплітуди другого піку ультразвукового сигналу складної форми показує збільшення величини натягу та зменшення умовного діаметру нитки, а зменшення амплітуди першого піку ультразвукового сигналу показує зменшення міжволоконної пористості нитки із зростанням її натягу та деформації.

На рис.6.28 зображено графічно теоретичні залежності з використанням виразу (6.6) та експериментальні дані, які наводилися також і в табл. 6.5. З отриманих даних параметрів можна побачити, що на ділянці кривої, коли діє натяг нитки в діапазоні з 20 сН до 50 сН, значно зменшується її діаметр та міжволоконна пористість. На початку процесу натягу нитки, коли міжволоконна пористість значна, частина хвиль проходить крізь пори між волокнами, тому вищий пік амплітуди додатково збільшується. При натязі 50 сН вищий пік амплітуди збільшується за рахунок частини хвиль, що огинають нитку із зменшеним діаметром із зовні її поверхні. Інша частина коливань, яка спочатку додатково збільшувала амплітуду цього піку, тепер проходячи крізь зменшені пори між волокнами матеріалу із середини, зменшує результуючу його амплітуду. Тому з графіку на рис.6.28 видно, що амплітуда цього піку протягом дії натягу на нитку у цьому діапазоні його значень (20 сН - 50 сН) залишається однаковою.

Проведені дослідження показали, що за допомогою імпульсних ультразвукових сигналів можна визначати не тільки натяг ниток з великою лінійною густиною, але і ступінь крутки комплексних ниток за зміною їх міжволоконної пористості, яка, у свою чергу, може контролюватися за зміною амплітуд ультразвукових хвиль (рис. 6.25 та рис. 6.27).

Можна застосовувати один пік амплітуди ультразвукового сигналу для визначення натягу  $P^*(\delta.m.)$  нитки з меншою точністю (рис. 6.29 та рис.6.30,а). Для цього налаштовується ультразвуковий вимірювальний канал з хвилеводом на проходження хвиль крізь волокна з міжволоконними порами текстильного матеріалу. Враховуючи зазначене, поточний натяг  $P^*(\delta.m.)$  нитки можна визначити тоді так:

$$P^{*}(\delta. m.) = P \cdot \left(\frac{r}{r^{*}}\right)^{3} = P r^{3} \cdot \left(\sqrt{\frac{T}{\frac{Z_{1}}{\pi f r n \cdot \cos v_{1}} \cdot \sqrt{\frac{1}{|W_{1}|^{2}} - 1}}}\right)^{-3}.$$
(6.9)

Також можна визначати натяг  $P^*(\sigma.m.)$  з меншою точністю і за іншим піком амплітуди ультразвукового сигналу, що характеризує частину хвиль, яка оминає нитку. Такий вираз для поточного натягу  $P^*(\sigma.m.)$  нитки можна показати як:

$$P^{*}(\sigma. M.) = P \cdot \left(\frac{\cos v_{2}}{\cos v_{2}^{*}}\right)^{3} = P \cdot \left(\frac{\pi^{2} f rn \rho_{2} \cos v_{2}}{Z_{1}}\right)^{3} \cdot \left(\sqrt{\frac{1}{\left(|W_{2}| - \frac{P_{1w}}{K_{V} P_{01w}^{*}}\right)^{2}} - 1}\right)^{-3}.$$
 (6.10)



Рис. 6.28. Залежності амплітудних параметрів від натягу нитки у хвилеводі: а – залежності модулів  $|W_1|$ ,  $|W_2|$  хвиль від натягу  $P^*$  нитки (повн. розрах.); б – залежності параметрів напруг  $2U_i$ ,  $2U_i^*$  від натягу  $P^*$  нитки (повн. розрах.)



Рис. 6.29. Залежності параметрів ультразвукових хвиль від натягу нитки: а – залежності модулів  $|W_1|$ ,  $|W_2|$  від натягу  $P^*$  нитки (викор. спрощ. розрах.); б – залежності коефіцієнтів за енергією  $|W_1|^2$ ,  $|W_2|^2$ ,  $|W_{12}|^2$  від натягу  $P^*$  нитки



Рис. 6.30. Залежності відхилення  $\delta_{P^*}$  від натягу  $P^*$  нитки в хвилеводі:

а – залежність відхилення  $\delta_{P^*}$  від натягу  $P^*$  нитки з врахуванням  $|W_1|, |W_2|$  окремо та обох цих параметрів одразу; б – залежність відхилення  $\delta_{P^*}$  від натягу  $P^*$  нитки ( $P^*$  визначений за виразом (6.6))

Розглянемо як розподіляється звукова енергія зондуючих хвиль в процесі поступового збільшення натягу нитки у хвилеводі. Можна сказати, що відбувається поступове її перетікання з одієї частини текстильного матеріалу до навколишнього середовища з більшим оминанням перешкоди у вигляді волокон нитки. При цьому пік амплітуди ультразвукового сигналу та його коефіцієнт за енергією  $|W_1|^2$ , який характеризує проходження хвиль крізь волокна з міжволоконними порами нитки, буде зменшуватися. Більший пік амплітуди ультразвукового сигналу та його коефіцієнт за енергією  $|W_2|^2$ , який характеризує оминання хвиль умовного діаметра нитки, буде поступово збільшуватися. Слід звернути увагу на те, що загальна звукова енергія, яка проходить крізь середовище з ниткою у хвилеводі, залишається майже на одному рівні за величиною, при різних значеннях натягу текстильних волокон. Наближено загальний коефіцієнт проходження за енергією  $|W_{_{3G2}}|^2$ лля ультразвукового сигналу складної форми з двома піками амплітуди хвиль можна визначити так:

$$|W_{3a2}|^2 \approx |W_{12}|^2 = \frac{|W_1|^2 + |W_2|^2}{2}.$$
 (6.11)

Як змінюються при натязі нитки коефіцієнти проходження за енергією  $|W_1|^2$ ,  $|W_2|^2$ для окремих частин сигналу з відповідними піками амплітуди хвиль, а також як змінюється наближений коефіцієнт за енергією  $|W_{12}|^2$  для загального зондуючого сигналу, показано на рис. 6.29,6.

Імпульсний ультразвуковий сигнал з двома різними піками амплітуд хвиль, які налаштовуються під лінійну густину нитки та її умовний радіус, дасть можливість використовувати ультразвукові методи та засоби для оперативного контролю натягу ниток в процесі виробництва різних текстильних полотен. Різні конструктивні рішення будови хвилеводів дадуть можливість вимірювати натяг ниток безконтактно та підвищити чутливість датчиків.

# 6.5. Безконтактне вимірювання натягу зразків трикотажного полотна за допомогою амплітуди ультразвукових хвиль, які пройшли крізь текстильний матеріал

В наш час актуальною задачею є створення безперервного моніторингу як натягу ниток на різних текстильних машинах, так і натягу самого полотна. Це дасть можливість забезпечувати контроль рівномірного натягу полотна на трикотажних машинах, від якого залежить однорідність структури, пористість та дотримання однакового значення поверхневої густини у кожній точці матеріалу. Для можливості забезпечення оперативного контролю натягу полотна на текстильних машинах доцільно застосовувати безконтактні технології.

З безконтактних перетворювачів, які є безпечними для людини та досить простими у налагоджуванні та експлуатації – є ультразвукові. Якщо порівнювати розповсюджені оптичні датчики з ультразвуковими, то їх чутливість до текстильного матеріалу є обмеженою, що пов'язано з довжиною хвилі, яка буде відбиватися від найменшого волокна матеріалу та не буде проходити крізь товщину його шару. Також на покази оптичних датчиків може впливати запиленість приміщення, де їх встановлено. Інші існуючі датчики, які застосовують для визначення натягу текстильних матеріалів є контактними. Це робить їх застосування для оперативного контролю досить складною задачею. Виходячи із зазначеного, можна сказати, що безконтактні ультразвукові системи визначення натягу текстильних полотен є перспективними для отримання інформації про значення параметру в кожній точці полотна в процесі його виробництва. Це дозволить, у свою чергу, забезпечувати якісні характеристики вироблених полотен на досить високому рівні та вдосконалити технологічне обладнання для різних процесів в текстильній промисловості.

Однією із задач для безконтактного контролю натягу текстильного полотна є виключення впливу структури самого полотна на зміну розмірів його пор в процесі розтягу текстильних волокон. За зміною міжволоконних відстаней та розмірів наскрізних пор в структурі матеріалу можна визначати і величину його натягу. Пористість текстильного матеріалу на одиницю його площі, або її зміна у певний момент часу впливає на амплітуду ультразвукових хвиль, які проходять контрольовані волокна матеріалу. Також розмір наскрізних пор впливає на амплітуду хвилі, яка проходить крізь них. На скільки пори полотна та міжволоконна відстань збільшуються чи зменшуються при розтягненні волокон текстилю, на стільки відповідно буде змінюватися амплітуда зондуючої хвилі. Можливий варіант, коли наскрізні пори можуть розширюватися, а міжволоконні відстані зменшуватимуться. У такому випадку їх комплексний вплив буде відображатися на амплітуді хвиль, які пройшли крізь структуру трикотажного полотна з певним натягом. При значно більшому впливі натягу на зміну міжволоконних відстаней за зміну розмірів самих пор, або коли відстані між волокнами матеріалу та самі пори однаково зменшуються при натязі полотна, можна краще визначати невідомий параметр за амплітудою зондуючих хвиль.

У ході досліджень були проведені експериментальні вимірювання амплітуди ультразвукових хвиль, які пройшли зразки полотен різних матеріалів при їх розтягненні. Зразки трикотажних полотен опромінювалися імпульсним ультразвуковим сигналом з частотою хвиль в пакеті 40 кГц. За основу для досліджень бралися зразки полотен з кевларовими нитками та з поліетиленової пряжі.

Усі виміри амплітуди ультразвукових коливань проводилися із її порівнянням з амплітудою хвиль, які пройшли крізь зразок полотна при дії на нього початкового натягу. Після цього визначалось поточне значення натягу для кожного зразку трикотажного полотна у трьох його зонах (рис.6.31). Далі визначався розподіл натягу в другій зоні петельних рядів (позначення 2 для даної зони), а також у крайніх першій та третій зонах матеріалу (позначення 1 та 3 для крайніх зон), де знаходяться межі більш деформованих петельних рядів зразку.

Три зони зразків, які прозвучувалися ультразвуковими хвилями могли бути використані для роботи ближче до верхнього кріплення матеріалу або до нижнього. Крайні положення трьох зон зондування (зверху або знизу біль самого кріплення) ультразвуковими хвилями зразків трикотажних полотен не бралися.



Зразок 2



Зразок З





Рис. 6.31. Ультразвукове вимірювання натягу зразків 1, 2, 3 трикотажних полотен з кевларовими нитками (на зразку 3 представлені зони 1, 2, 3 прозвучування матеріалу) та натягу зразку трикотажу 4 з поліетиленової пряжі

До зразків підвішувалися два вантажі по краям, що спричиняли місцеві натяги  $P_1^*, P_3^*$  у зоні 1, 3 найбільше, та у зоні 2 матеріалу частково. Наближене поточне загальне значення натягу  $P^* \approx P_1^* + P_3^*$  зразку та його складові  $P_1^*, P_3^*$ визначались із використанням амплітудних залежностей хвиль, які проходять зони 1 та 3 на полотні. Ці складові величини натягу можна показати так:

$$P_1^* = P_1 \cdot \left(\frac{U_{1k}}{U_{1k+1}}\right)^3, \quad P_3^* = P_3 \cdot \left(\frac{U_{3k}}{U_{3k+1}}\right)^3,$$
 (6.12)

- де *P*<sub>1</sub>, *P*<sub>1</sub><sup>\*</sup> початковий та поточний натяги зразка полотна, які пов'язані з першою та частково з другою зонами зразка трикотажного полотна;
  - *P*<sub>3</sub>, *P*<sub>3</sub><sup>\*</sup> початковий та поточний натяги зразка полотна, які пов'язані з третьою та частково з другою зонами зразка трикотажного полотна;
    - k величина початкового індексу відліку, який пов'язаний з першим
       значенням поточного натягу зразку полотна, що визначається, та з
       амплітудою ультразвукової хвилі, яка проходить при цьому матеріал;
    - U<sub>1k</sub> напруга, яка пропорційна амплітуді ультразвукових хвиль, які
       пройшли полотно зразка у першій його зоні, про що говорить перший
       індекс 1, до зміни першого поточного значення натягу, про що
       говорить другий індекс k;
  - U<sub>1k+1</sub> напруга, яка пропорційна амплітуді ультразвукових хвиль, які пройшли полотно зразка у першій його зоні, про що говорить перший індекс 1, після зміни поточного значення натягу, про що говорить другий індекс k+1;
    - U<sub>3k</sub> напруга, яка пропорційна амплітуді ультразвукових хвиль, які
       пройшли полотно зразка у третій його зоні, про що говорить перший
       індекс 3, до зміни першого поточного значення натягу, про що
       говорить другий індекс k;
  - U<sub>3k+1</sub> напруга, яка пропорційна амплітуді ультразвукових хвиль, які пройшли полотно зразка у третій його зоні, про що говорить перший

індекс 3, після зміни поточного значення натягу, про що говорить другий індекс k + 1.

Було проведено порівняння значень амплітуд хвиль, що пройшли крізь контрольований матеріал, при його різному натязі, який був визначений за допомогою існуючого контактного методу, та при натязі, що визначався за допомогою безконтактного ультразвукового методу. Визначався загальний натяг зразку  $P^*$  із використанням залежності (6.12), який відображений на рис. 6.32. Якщо представити величину відхилення  $\delta_P$  показів натягу між визначенням цього параметру існуючим та ультразвуковим методами, тоді його подамо як:

$$\delta_P = \left(\frac{P_1^* + P_3^* - P_{m1} - P_{m3}}{P_{m1} + P_{m3}}\right) \cdot 100\%, \tag{6.13}$$

де *P<sub>m1</sub>*, *P<sub>m3</sub>* – натяги зразка полотна, які пов'язані з першою, третьою та другою зонами зразка трикотажного полотна, що визначені існуючим методом через масу двох підвішених вантажів до матеріалу.

Залежності відхилень  $\delta_P$  від зростання загального натягу  $P^*$  для зразків різних трикотажних полотен наведено на рис. 6.33.

Коли поточні натяги у зоні 1 та 3 рівні  $P_1^* = P_3^*$  із врахуванням амплітуди хвиль, які пройшли крізь середню зону 2 зразка, вираз (6.12) можна показати так:

$$P_1^* = P_3^* = \frac{(P_1 + P_3)}{2} \cdot \left(\frac{U_{2k}}{U_{2k+1}}\right)^3, \tag{6.14}$$

де U<sub>2k</sub> – напруга, яка пропорційна амплітуді ультразвукових хвиль, які пройшли полотно зразка у другій його зоні, про що говорить перший індекс 2, до зміни першого поточного значення натягу, про що говорить другий індекс k;

U<sub>2k+1</sub> – напруга, яка пропорційна амплітуді ультразвукових хвиль, які
 пройшли полотно зразка у другій його зоні, про що говорить перший
 індекс 2, після зміни поточного значення натягу, про що говорить
 другий індекс k+1.



Рис. 6.32. Залежності розмаху амплітуди напруги 2U від натягу  $P^*$  зразків полотен трикотажу при їх прозвучуванні у зоні 1 та 3 матеріалу



Рис. 6.33. Залежності відносного відхилення  $\delta_P$  від натягу  $P^*$  зразків полотен трикотажу при їх прозвучуванні у зоні 1 та 3 матеріалу

Слід зазначити, що залежність (6.14) при розрахунку буде давати меш точний результат (рис.6.34), оскільки натяг із зон 1 та 3 у зону 2 зразка полотна розподіляється через петельні ряди нерівномірно, що може призвести до значних відхилень показів контрольованого параметру. Виходячи із зазначеного, можна сказати, що менший натяг у зоні 2 зразка менше деформує нитки та пори матеріалу. Тому амплітуда хвилі, яка проходить крізь цю зону частіше буде більшою для різних матеріалів. Якщо записати амплітудне відхилення  $\delta_U$  хвиль, які проходять крізь зону 2 та пропорційні напрузі  $U_{2k}$ , у порівнянні з хвилями, що проходять зони 1 та 3 зразка полотна та пропорційні напругам  $U_{1k}$ ,  $U_{3k}$  при  $P_1^* = P_3^*$ , то такий вираз можна показати як:

$$\delta_U = \left(\frac{U_{2k} - U_{1k}}{U_{1k}}\right) \cdot 100\% = \left(\frac{U_{2k} - U_{3k}}{U_{3k}}\right) \cdot 100\%.$$
(6.15)

Залежності відхилень  $\delta_U$  від зростання загального натягу  $P^*$  зразків різних трикотажних полотен наведено на рис.6.35. У табл.6.6 представлено осцилограми ультразвукових хвиль, які проходили зразки різних трикотажних полотен при розтягненні матеріалу та у стані їхнього спокою без натягу у різних зонах петельних рядів (зони 1, 2 та 3). Наведено осцилограми хвиль, які взаємодіяли з трьома зразками трикотажних полотен з кевларовими нитками 58х2 *Текс*, та хвиль, що проходили зразок з поліетиленової пряжі 44 *Текс*.

Величина амплітуди результуючого ультразвукового сигналу залежить від суперпозиції коливань, які проходять крізь наскрізні пори полотна, хвиль, що проходять крізь міжволоконні відстані, та хвиль, які проходять крізь самі волокна текстильного матеріалу. Вплив структури зразків полотен на амплітуду зондуючих хвиль можна також побачити з їх осцилограм в табл.6.6.

Також проводилися дослідження з можливості застосування амплітуди ультразвукових хвиль, які відбиваються від трикотажних полотен, для визначення різних параметрів матеріалу. Практичні результати вказують, що ультразвукове випромінювання, яке відбите від трикотажу, важко використовувати, бо воно може сильно розсіюватися від структури полотна.



при виміряних напругах  $U_{2k+1}$ , що пропорційні амплітудам ультразвукових хвиль, які пройшли матеріал при розтягненні

Рис. 6.34. Залежності розмаху амплітуди напруги 2*U* від натягу *P*<sup>\*</sup> зразків полотен трикотажу при їх прозвучуванні у зоні 2 матеріалу



Рис. 6.35. Залежності відносного відхилення  $\delta_U$  від натягу  $P^*$  зразків полотен трикотажу при їх прозвучуванні у зоні 2 матеріалу

# № Дослідження проходження ультразвукових хвиль крізь зразки трикотажних полотен під натягом Зразок 1 Напруги, що пропорційні амплітудам ультразвукових хвиль, які пройшли зону 2 трикотажного зразку 1 з кевларовими нитками 58х2 *текс* $2U^* = 2U_{20} = 300 \text{ MB}$ $2U_1 = 2U_{21} = 300 \text{ MB}$ $2U_2 = 2U_{22} = 300 \text{ мB}$ $\delta_U = 13,1 \%$ $\delta_{U} = 30,43 \%$ Осцилограми напруг, що пропорційні ультразвуковим хвилям, які пройшли зону 3 трикотажного зразку 1 з кевларовими нитками 58х2 *текс* = 300 MB= 265 mB1 $2U^* = 2U_{30} = 300 \text{ MB}$ 2U<sub>1</sub> = 2U<sub>31</sub> = 265 мВ $2U_2 = 2U_{32} = 230$ мВ Визначення натягу контактним методом $P^* = 28,4 H$ $P^{*} = 0$ $P^* = 16.8 H$ Визначення натягу безконтактним ультразвуковим методом $P^* = 18,57 H$ $P^* = 25,51 H$ $\delta_P = -10,17 \%$ $\delta_P = 11,32 \%$ Зразок 2 Осцилограми напруг, що пропорційні ультразвуковим хвилям, які пройшли зону 2 трикотажного зразку 2 з кевларовими нитками 58х2 *текс* 2 100 MB 340 MB

### Результати досліджень безконтактного вимірювання натягу трикотажу

	$2U^* = 2U_{20} = 340 \text{ мB}$	$2U_1 = 2U_{21} = 400 \text{ мB}$	2U <sub>2</sub> = 2U <sub>22</sub> = 315 мВ			
	Визначен	ня натягу контактним ме	етодом			
	$P^* = 0$	P <sup>*</sup> = 16,8 H	$P^* = 28,4 H$			
	Визначення натягу	безконтактним ультразв	уковим методом			
	_	$P^* = 13,87 H$	$P^* = 34,15 H$			
	-	$\delta_P = -16,85 \%$	$\delta_P = 20,26$ %			
	-	$\delta_U=25~\%$	$\delta_U$ = 14,55 %			
	Осцилограми напруг, пройшли зону 1 трикотаж	що пропорційні ультразв тного зразку 2 з кевларов	вуковим хвилям, які ими нитками 58х2 <i>текс</i>			
		$2U^* = 340 \text{ MB}$ $2U_1 = 320 \text{ MB}$	$2U_2 = 275 \text{ MB}$			
	$2U^* = 2U_{10} = 340 \text{ mB}$	$2U_1 = 2U_{11} = 320$ мВ	$2U_2 = 2U_{12} = 275$ мВ			
	Визначення натягу контактним методом $P^* = 0$ $P^* = 16.9 \text{ H}$ $P^* = 29.4 \text{ H}$					
	$P^* = 0$	P* = 16,8 H	$P^* = 28,4 H$			
	Визначення натягу	безконтактним ультразв	уковим методом			
	-	$P^* = 18,03 \text{ H}$	$P^* = 26,28 \text{ H}$			
	-	$\delta_P = 8,06 \%$	$\delta_P = -7,46 \%$			
		Зразок З				
	Осцилограми напруг, пройшли зону 2 трикотаж	що пропорційні ультразв сного зразку 3 з кевларові	вуковим хвилям, які ими нитками 58х2 <i>текс</i>			
3		$2U^* = 1000 \text{ MB}$ $2U_1 = 880 \text{ MB}$ $2U_2 = 760 \text{ MB}$				

	$2U^* = 2U_{20} = 1000$ мВ	$2U_1 = 2U_{21} = 880$ мВ	$2U_2 = 2U_{22} = 760 \text{ мB}$				
	$P^* = 0$ $P^* = 16.8 \text{ H}$ $P^* = 28.4 \text{ H}$						
	Визначення натягу безконтактним ультразвуковим методом						
	-	$P^* = 18.29 \text{ H}$	$P^* = 25.89 \text{ H}$				
	-	$\delta_P = 9,68 \%$	$\delta_P = -8,82\%$				
	-	$\delta_U = -5 \%$					
	Осцилограми напруг, що пропорційні ультразвуковим хвилям, які						
	пройшли зону 3 трикотажного зразку 3 з кевларовими нитками 58х2 <i>текс</i>						
		$2U^* = 1000 \text{ MB}$ $2U_1 = 920 \text{ MB}$ $2U_2 = 800 \text{ MB}$					
	$2U^* = 2U_{30} = 1000 \text{ mB}$ $2U_1 = 2U_{31} = 920 \text{ mB}$ $2U_2 = 2U_{32} = 800 \text{ m}$						
	Визначення натягу контактним методом						
	$P^* = 0 \qquad P^* = 16,8 \text{ H} \qquad P^* = 28,4 \text{ H}$						
	Визначення натягу безконтактним ультразвуковим методом						
	-	P' = 18,6/H	$P^* = 25,36 \text{ H}$				
	-	$\delta_P = 11,95 \%$	$\delta_P = -10,68 \%$				
		Зразок 4					
	зуковим хвилям, які						
	пройшли зону 2 трикотажного зразку 4 з полетиленової пряжі 44 <i>текс</i>						
4	2U <sup>*</sup> = 660 MB 2U1=560MB						
	$2U^* = 2U_{20} = 660 \text{ мB}$	$2U_1 = 2U_{21} = 560 \text{ мB}$	$2U_2 = 2U_{22} = 600 \text{ мB}$				
	-	$\delta_U = 12 \ \%$	$\delta_U = 50 \%$				



Для того, щоб безконтактно визначати як розподіляється натяг в зонах 1, 2 та 3 зразка полотна, потрібно порівняти амплітуду ультразвукових хвиль, які проходять крізь ці зони матеріалу. Різний розмір пор та міжволоконних відстаней у зонах 1, 2, 3 зразка дає можливість порівнювати різну величину амплітуд ультразвукових хвиль, які проходять крізь них. Це характеризує різний розподіл натягу по всій ширині полотна. На рис. 6.36,а показано як змінюється величина напруг, які пропорційні амплітудам ультразвукових хвиль, що пройшли матеріал у зонах 1, 2 та 3 четвертого зразку зображеного на рис.6.31. Сам розподіл натягу по зразку трикотажного полотна для кожної зони матеріалу із використанням амплітуд зондуючих ультразвукових хвиль при  $P_1^* = P_3^*$  або  $U_{1k+1} = U_{3k+1}$  можна розрахувати тоді так:

$$P_{1z}^{*} = P_{3z}^{*} = \frac{\left(P_{1}^{*} + P_{3}^{*}\right)}{2N_{z}} \cdot \left(N_{z} - \left(1 - \frac{\left|U_{2k} - U_{2k+1}\right|}{U_{1k+1}}\right)^{3}\right),\tag{6.16}$$

$$P_{2z}^{*} = \frac{\left(P_{1}^{*} + P_{3}^{*}\right)}{N_{z}} \cdot \left(1 - \frac{\left|U_{2k} - U_{2k+1}\right|}{U_{1k+1}}\right)^{3},$$

$$P_{2z}^{*} = \frac{\left(P_{1}^{*} + P_{3}^{*}\right)}{N_{z}} \cdot \left(1 - \frac{\left|U_{2k} - U_{2k+1}\right|}{U_{3k+1}}\right)^{3},$$
(6.17)

де  $P_{1z}^{*}$  – значення натягу зразка полотна у першій зоні;  $P_{2z}^{*}$  – значення натягу зразка полотна у другій зоні;  $P_{3z}^{*}$  – значення натягу зразка полотна у третій зоні;  $N_{z}$  – кількість зон полотна, що прозвучуються хвилями, та в яких визначається зміна величини натягу, його нерівномірний розподіл (для

нашого випадку  $N_z = 3$ ).

За отриманими виразами (6.16) та (6.17) можна розраховувати розподіл натягу по усій ширині полотна, що контролюється. На рис.6.36,6 показаний розподіл натягу по трьом зонам четвертого зразка трикотажного матеріалу з поліетиленової пряжі 44 *мекс* при різному загальному навантажені полотна. З наведеного рис.6.36 можна побачити, що натяг зразку по його краям, яким відповідають зони 1 та 3 полотна, збільшується. Це можна пояснити більшим розтягненням текстильних волокон зразку трикотажу у крайніх його зонах, які прозвучуються ультразвуковими хвилями. Розподіл натягу можна визначати по усій ширині полотна за допомогою порівняння амплітуд ультразвукових хвиль з різних зон прозвучування зразка.

Проведені дослідження показали складність реалізації безконтактного контролю натягу трикотажних полотен з різною структурою та сировинним складом з одним налаштуванням безконтактної системи під різні зразки матеріалів. Це пов'язано з тим, що під впливом структури полотна наскрізні пори можуть більше як розширюватися, так і зменшуватися у порівнянні з міжволоконними відстанями текстильного матеріалу при натязі. У свою чергу, це впливає на амплітуду ультразвукових хвиль, які проходять крізь такі контрольовані полотна.



Рис. 6.36. Зміна розмаху амплітуди напруги 2*U*, яка пропорційна амплітуді хвиль, та зміна розподіленого натягу  $P_z^*$  від зон 1, 2, 3 зразку полотна при дії загального натягу  $P^*$ :

а – залежності розмаху напруги 2*U* від зон 1, 2, 3 зразку полотна при натязі  $P^*$ ; б – залежності розподіленого натягу  $P_z^*$  від зон 1, 2, 3 зразку при натязі  $P^*$  Для прикладу, розглянемо вплив структури полотна на зміну амплітуди зондуючих хвиль при взаємодії коливань з четвертим зразком трикотажу, коли прозвучується друга його зона на самому матеріалі, якщо порівнювати з іншими зразками з кевларовими нитками. Для поліетиленового зразка у другій його зоні більше розтягуються наскрізні пори у порівнянні із зменшенням міжволоконних відстаней матеріалу. Тому спочатку амплітуда хвиль зменшується, а потім із зростанням натягу також збільшується. Виходячи із зазначених причин, спочатку проводився аналіз зміни амплітуди ультразвукових хвиль, що проходили крізь досліджуваний матеріал, для кожного зразку окремо.

Наведений метод визначення як загального натягу зразка полотна, так і можливості безконтактного вимірювання значень натягу у певних його зонах є досить актуальною задачею для легкої промисловості. Такий оперативний контроль натягу у кожній точці полотна на різних текстильних машинах можуть забезпечити тільки вимірювальні системи з безконтактними датчиками.

Проведені дослідження показали можливість застосування безконтактного ультразвукового контролю натягу трикотажних полотен для моніторингу технологічного процесу їх виробництва на текстильних машинах. Це дасть змогу інтегрувати нові безконтактні вимірювальні системи до різного технологічного обладнання, яке зможе підвищувати якісні характеристики готових полотен. Запропонований безконтактний метод полягає в прозвучуванні ультразвуковими хвилями текстильного полотна в декількох його контрольних зонах та подальшому визначенні поточного значення натягу трикотажу. Визначається невідомий параметр за зміною амплітуди ультразвукових хвиль, що проходять матеріал, під дією на нього натягу, який також змінюється в процесі руху органів технологічного обладнання. Запропонований безконтактний метод є досить перспективним, бо має ряд суттєвих переваг у порівнянні з існуючими контактними. Також такий метод дає можливість економії значних коштів на розробку нового обладнання без застосування та налагоджування контактних датчиків визначення натягу текстильного матеріалу, що є досить громіздкою та складною задачею.

6.6. Оцінка вірогідності контролю поверхневої густини, пористості текстильних матеріалів та оцінка вірогідності контролю натягу ниток з великою лінійною густиною

Однією з основних кількісних оцінок вірогідності безконтактного контролю є абсолютна вірогідність, яка представляє собою вірогідність прийняття правильного рішення [349] про знаходження контрольованого параметру "в допуску" або "поза допуском" для самого матеріалу. Досить важливим є правильність оцінки вірогідності контролю технологічних параметрів для різних текстильних матеріалів. Вираз для абсолютної вірогідності контролю можна показати так [321]:

$$D_{\kappa} = 1 - P_{nOM}, \qquad (6.18)$$

де *P<sub>пом.</sub>* – вірогідність помилкових рішень при контролі. Вірогідність помилкових рішень, у свою чергу, можна подати як:

$$P_{nOM} = \alpha_{\kappa} + \beta_{\kappa}, \qquad (6.19)$$

r

- де *α<sub>к</sub>* помилка першого роду (технологічний параметр контрольованого матеріалу, який входить в межі допуску, визнаний як такий, що виходить за ці межі);
  - β<sub>κ</sub> помилка другого роду (технологічний параметр контрольованого матеріалу, який виходить за межі допуску, визнаний як такий, що входить в ці межі).

Для інженерного розрахунку помилок першого та другого роду можна використати наближені їхні залежності враховуючи симетричний допуск  $d_{\kappa}$  для контрольованих параметрів [321]:

$$\alpha_{\kappa} = \frac{0.3 \rho_{\kappa} (1 + r_{\kappa} \rho_{\kappa})}{1 + 0.6 \rho_{\kappa} (\rho_{\kappa} - 0.1) \cdot \sqrt{r_{\kappa}} (1.9 - r_{\kappa})} \cdot e^{-\frac{r_{\kappa}}{2}}, \qquad (6.20)$$

$$\beta_{\kappa} = \frac{0.3 \,\rho_{\kappa} \left(1 - 0.1 \cdot \frac{\rho_{\kappa}}{r_{\kappa}}\right)}{1 + 0.8 \, r_{\kappa} \,\rho_{\kappa}} \cdot e^{-\frac{r_{\kappa}}{2}}, \tag{6.21}$$

звідки

$$r_{\kappa} = \frac{d_{\kappa}}{\sigma(X)}, \qquad \rho_{\kappa} = \frac{\sigma(\delta)}{\sigma(X)},$$

де  $\sigma(X)$  – середньоквадратичне відхилення контрольованого параметру X ;  $\sigma(\delta)$  – середньоквадратичне відхилення похибки вимірювання  $\delta$ .

Величина заданих значень поверхневої густини m<sub>s</sub> та пористості Q<sub>p</sub> контрольованого матеріалу може відрізнятися від фактичного значення параметру в залежності від багатьох факторів в процесі вироблення матеріалу. Особливо на зміну цих параметрів може впливати подальша обробка сурових полотен на кінцевому етапі виробництва. Межі допуску поверхневої густини *m*<sub>s</sub> та пористості  $Q_p$  контрольованого матеріалу необхідно задати так, щоб вони входили в 5% відхилення від істинного значення [222]. Якщо брати до уваги величину амплітуди коливань натягу ниток з різною їхньою частотою в процесі виробництва текстильних матеріалів, то вона може мати середню варіацію поточних значень до 25% [427, 428] в усталеному режимі роботи обладнання, що пов'язано з багатьма факторами: різним радіусом кривизни та силою тертя направляючих робочих органів текстильної машини; силою тертя нитки по поверхні нитконатягувача; різною товщиною нитки по всій її довжині; різною швидкістю руху нитки у певний момент часу при її подачі та інших факторів. Сам допуск вимірюваних значень натягу повинен бути в середньому не більше 5%. В такому випадку можна вважати визначення зазначених технологічних параметрів достовірними. Тоді обчисливши вирази (6.20), (6.21) та (6.18) можна отримати значення  $\alpha_{\kappa}$ ,  $\beta_{\kappa}$  та  $D_{\kappa}$  для поверхневої густини  $m_s$  і пористості  $Q_p$ різних текстильних матеріалів, які наведені в табл.6.7, табл.6.8, а також показати

на рис.6.37 залежності  $\alpha_{\kappa}$ ,  $\beta_{\kappa}$  та  $D_{\kappa}$  для вимірювального контролю від натягу нитки  $P^*$  з лінійною густиною 445 текс.

Таблиця 6.7

N⁰	Текстильний матеріал	Поверхнева густина m <sub>s</sub> , г/м <sup>2</sup>	$r_{\kappa}$	$ ho_{\kappa}$	$\alpha_{\kappa}$	$eta_{\kappa}$	$D_{\kappa}$
1.	Тканина №1 (еталон)	236	3,33	0,06	0,00009	0,00006	0,9998
2.	Тканина №2	299	1,68	0,08	0,00648	0,00516	0,9884
3.	Тканина №3	152	2,00	0,16	0,00885	0,00523	0,9859
4.	Тканина №4	100	1,43	0,16	0,02118	0,01445	0,9644
5.	Тканина №5	156	1,06	0,06	0,01	0,009	0,9810
6.	Трикотаж. полотно №1	233	2,00	0,12	0,00629	0,00418	0,9895
7.	Трикотаж. полотно №2	236	1,85	0,11	0,00738	0,00519	0,9874

# Оцінка вірогідності контролю поверхневої густини текстильних матеріалів

### Таблиця 6.8

# Оцінка вірогідності контролю пористості матеріалів

N⁰	Текстильний	Пористість Q <sub>p</sub> ,	$r_{\kappa}$	$ ho_{\kappa}$	$\alpha_{\kappa}$	$\beta_{\kappa}$	$D_{\kappa}$
	матеріал	мм <sup>3</sup> на 1 мм <sup>2</sup>					
		площі					
1.	Тканина №1 (еталон)	0,3744	1,90	0,004	0,00019	0,00018	0,9996
2.	Тканина №2	0,2097	1,60	0,065	0,00596	0,00497	0,9891
3.	Тканина №3	0,5824	1,11	0,12	0,0221	0,01744	0,9605
4.	Тканина №4	0,6392	1,43	0,14	0,01879	0,01325	0,9680
5.	Тканина №5	0,3744	1,88	0,14	0,00869	0,00572	0,9856
6.	Трикотаж. полотно №1	0,4765	1,44	0,11	0,01400	0,01058	0,9754
7.	Трикотаж. полотно №2	0,3744	1,88	0,10	0,00583	0,00429	0,9899







Рис. 6.37. Залежності помилок першого  $\alpha_{\kappa}$ , другого  $\beta_{\kappa}$  роду та вірогідності  $D_{\kappa}$  для вимірювального контролю від натягу  $P^*$ , *cH* нитки з лінійною густиною 445 *текс*:

а – залежності першого  $\alpha_{\kappa}$ , другого  $\beta_{\kappa}$  роду від натягу  $P^*$  нитки; б – залежність вірогідності  $D_{\kappa}$  вимірювального контролю від натягу  $P^*$ нитки

Як видно з табл.6.7, табл.6.8 та рис.6.37 показники  $\alpha_{\kappa}$ ,  $\beta_{\kappa}$  та  $D_{\kappa}$ демонструють можливість та доцільність використання безконтактних методів контролю технологічних параметрів текстильних матеріалів для забезпечення високої якості готових полотен в процесі виробництва. Такі методи у поєднанні з комп'ютеризованими системами контролю допоможуть встановити відповідність між дійсним станом технологічного параметру текстильного матеріалу його заданій нормі. При цьому в автоматизованому режимі можуть розрізнятися багато різних станів технологічного параметру текстильних матеріалів в залежності від поставленого технічного завдання на виробництві. Оскільки контроль полягає в безпомилковому визначенні дійсних значень технологічних параметрів, то врахувавши можливі недоліки розроблених методів та засобів безконтактного визначення зазначених параметрів, можна охарактеризувати його вірогіднісними характеристиками, з яких основною є вірогідність контролю.

Отримана вірогідність відображає ступінь об'єктивності результатів контролю технологічних параметрів текстильних матеріалів. Достовірність контролю характеризується помилками контролю, які є випадковими подіями. Помилки контролю можуть залежити від багатьох факторів, що можуть впливати як на засоби контролю та призводити до їхніх похибок, так і на відповідність допусків контролю необхідному їхньому значенню.

Вірогідність контролю  $D_{\kappa}$  для поверхневої густини, пористості різних текстильних матеріалів та вірогідність контролю  $D_{\kappa}$  для натягу ниток були визначені із використанням розроблених зразків експериментальних комп'ютеризованих систем. Отримані значення вірогідності контролю  $D_{\kappa}$ показали можливість забезпечення технологічних параметрів різних текстильних матеріалів в необхідних регламентованих межах із врахуванням помилок першого  $\alpha_{\kappa}$  та другого  $\beta_{\kappa}$  роду. Зазначені помилки контролю із збільшенням поверхневої густини  $m_s$  тканин та із збільшенням натягу  $p^*$  ниток зменшуються, а із збільшенням пористості  $Q_p$ , навпаки, можуть збільшуватися.

#### Висновки до розділу 6

1. Розроблено зразок комп'ютеризованої системи сканування текстильних матеріалів з можливістю визначення їхньої пористості  $Q_p$  та натягу ниток  $P^*$  з великою лінійною густиною на текстильних машинах. Створений зразок системи дозволяє змінювати ультразвукові датчики з їхніми платформами та кріпленнями для можливості контролю різних параметрів текстильних полотен.

2. Створено експериментальний зразок комп'ютеризованої системи сканування та контролю різних тканин та полотен трикотажу з врахуванням натягу  $P^*$  матеріалу за їхньою поверхневою густиною  $m_s$  та пористістю  $Q_p$ . Показана можливість поєднання скануючих засобів зразка системи з технологічним текстильним обладнанням.

3. Експериментально підтверджена можливість застосування ультразвукового безконтактного методу контролю пористості  $Q_p$  та поверхневої густини  $m_s$  в діапазоні від 100 г/м<sup>2</sup> до 300 г/м<sup>2</sup> для різних текстильних полотен. Також показано, що відхилення  $\delta_{m_s}$  отриманих значень поверхневої густини  $m_s$  за допомогою зразка безконтактної системи із використанням відбитої ультразвукової хвилі може зменшити його величину більше ніж у 25 разів. Значення відхилення поверхневої густини  $\delta_{m_s}$  в межах діапазону від 0,15% до 6% та можливість контролю параметру  $m_s$  робить застосування безконтактного методу доцільним на виробництві. Наведено значення вірогідності контролю.

4. Наведено експериментальні дослідження з безконтактного вимірювання натягу  $P^*$  нитки в діапазоні від 19,6 сН до 98 сН з лінійною густиною T = 445 текс. Показано, що натяг ниток краще вимірювати за допомогою сигналу з двома різними піками амплітуди. Наведено значення вірогідності контролю.

5. Експериментально досліджено як можна безконтактно визначати зміну натягу трикотажного полотна по окремим його зонам. Продемонстровано, що можливо застосовувати амплітуду хвиль, які пройшли крізь зразок трикотажу, для вимірювання натягу полотна в межах від 0 до 26 Н.

#### ОСНОВНІ ВИСНОВКИ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ РОБОТИ

дисертаційній роботі вирішена У актуальна науково-прикладна побудови проблема розробки методології i практичної реалізації комп'ютеризованих систем безконтактного контролю технологічних параметрів текстильних матеріалів шляхом використання ультразвукових методів, оскільки існуючі методи та засоби не дозволяють проводити оперативний контроль в процесі виробництва, що повністю відповідає поставленій меті.

1. Проведено аналіз, який показав, що існуючі методи та засоби контролю поверхневої густини та багатьох інших технологічних параметрів текстильних матеріалів базуються на руйнівному вирізанні та зважуванні зразків в лабораторних умовах. Зазначене не дає можливості проводити оперативний контроль на виробництві, що може суттєво впливати на якість готової продукції. Тому доцільно застосовувати безконтактні методи та засоби контролю для різних технологічних параметрів текстильних матеріалів із застосуванням сучасних комп'ютеризованих систем. Розглянуто більш детально амплітудний та фазовий ультразвукові методи контролю різних параметрів текстильних матеріалів.

2. Проаналізовано особливості розповсюдження ультразвукових коливань в різних текстильних матеріалах, які пов'язані з різними розмірами пор та іншими структурними показниками полотен, що дало можливість обґрунтувати нові підходи до розробки методів безконтактного контролю їхніх технологічних параметрів. Отримані математичні моделі ультразвукового поля дали змогу:

- описати залежності згасання амплітуди ультразвукових хвиль, що взаємодіють із складною структурою текстильних матеріалів для можливості визначення частоти хвиль при безконтактному контролі технологічних параметрів; - описати залежності різниць амплітуд ультразвукових хвиль, які взаємодіють з двошаровим КТМ з дефектом, та амплітуд хвиль, що взаємодіють з еталонним матеріалом;

описати залежності різниць фазових зсувів ультразвукових хвиль, які
 взаємодіють з двошаровим КТМ з дефектом, та фазових зсувів хвиль, що
 взаємодіють з еталонним композиційним матеріалом;

- описати залежності амплітуди ультразвукових хвиль від кількості їх проходжень перерізу хвилеводу та від товщини контрольованого матеріалу для можливості підвищення чутливості амплітудного параметру хвиль до матеріалу, що необхідно при безконтактному контролі його натягу.

3. Розроблено амплітудний метод, при якому за зміною амплітуд відбитих ультразвукових хвиль від полотна тканини та від ниток основи відносно амплітуди хвилі, яка падає на поверхню матеріалу, можна визначати їхній натяг та силу прибою нитки утоку в процесі ткацтва. Наведено результати досліджень безконтактного визначення натягу ниток основи, які дадуть можливість зменшити їх обривність у процесі вироблення тканин. Також показано, що, знаючи натяг ниток, можна визначити фактичне значення поверхневої густини самої тканини при її виробленні на технологічному обладнанні.

4. Приведено залежності модуля комплексного коефіцієнту проходження від натягу веденої та ведучої гілки нитки і пряжі для бавовни, віскози, капрону та вовни, а також від параметрів <sup>COSV</sup><sub>3</sub>. та умовного радіуса цих текстильних матеріалів. Зазначені нитки та пряжа поширені і можуть застосовуватися на трикотажних машинах для виробництва різних полотен. Показано залежності модуля проходження ультразвукових хвиль від зміни об'ємної щільності текстильних матеріалів, що впливає на зміну натягу веденої гілки в 10 сН.

5. Одержано залежності зміни швидкості розповсюдження ультразвукових хвиль в текстильних матеріалах з різною лінійною густиною від їхнього натягу при повздовжньому прозвучуванні волокон. Доведено, що із збільшенням натягу текстильного матеріалу швидкість розповсюдження хвиль в ньому збільшується, а при однаковому натязі із збільшенням лінійної густини матеріалу швидкість коливань, навпаки, зменшується. Отримано залежності модуля повздовжнього проходження ультразвукових хвиль текстильного матеріалу від натягу та від його лінійної густини, де для першого випадку залежність зростає, а для другого – спадає.

6. Розроблено безконтактний метод та на його основі запропоновано структурну схему комп'ютеризованої системи контролю технологічних параметрів тканини з врахуванням її натягу в процесі виробництва. Реалізація цієї системи дає можливість:

- оперативно проводити контроль натягу ниток основи та самої тканини для забезпечення технологічного впливу на ткацьке обладнання;

- дотримувати поверхневу густину тканини в заданих межах, фактичне значення якої можна безконтактно визначати в процесі виробництва.

7. Розроблено безконтактний метод та на його основі запропоновано структурну схему комп'ютеризованої системи контролю текстильної волоконної маси та визначення натягу ниток на трикотажних машинах. Для цієї системи застосовуються два режима її роботи. Перший режим роботи пов'язаний із визначенням поверхневої густини текстильної волоконної маси. Другий режим роботи пов'язаний з визначенням натягу ниток на трикотажних машинах. Зазначене досягається за допомогою переключення різних блоків з безконтактними датчиками, в залежності від технологічного процесу та поставленої задачі на виробництві.

8. Розроблено безконтактні методи та на їх основі запропоновано структурну схему комп'ютеризованої системи контролю текстильної волоконної маси та тканин з визначенням їхньої поверхневої густини при використанні амплітудних та фазових параметрів ультразвукових хвиль, а також запропоновано структурну схему ультразвукового пристрою для контролю об'ємної щільності текстильних матеріалів з виключенням впливу зміни їх натягу на технологічному обладнанні в процесі виробництва.

9. Розроблено безконтактний метод та на його основі запропоновано структурну схему ультразвукової комп'ютеризованої системи для контролю зміни пористості текстильних матеріалів. Реалізація цієї системи дає можливість:

- використовувати безконтактний контроль для визначення нерівномірної пористості фільтрувальних тканин;

- застосовувати безконтактний контроль для виявлення дефектів структури у різних текстильних матеріалах.

10. Розроблено структури комп'ютеризованих систем контролю основних технологічних параметрів текстильних матеріалів. Це дозволило створити та дослідити експериментальні зразки запропонованих систем та їх програмне забезпечення:

 комп'ютеризованої системи контролю пористості та натягу ниток з великою лінійною густиною;

- спеціалізованої комп'ютеризованої системи контролю поверхневої густини і пористості для різних тканин та трикотажних полотен в процесі виробництва.

11. Експериментальні дослідження показали що:

- ультразвуковий безконтактний метод контролю пористості та поверхневої густини в діапазоні від 100 г/м<sup>2</sup> до 300 г/м<sup>2</sup> для різних тканин та трикотажних полотен можна застосовувати при оперативному моніторингу параметрів на виробництві;

- відхилення отриманих значень поверхневої густини за допомогою безконтактної системи при використанні відбитої ультразвукової хвилі відносно значень параметру, отриманих стандартним методом, можна зменшити у декілька разів;

- відхилення значень поверхневої густини, отриманих за допомогою безконтактного методу, відносно значень параметру, отриманих із

використанням стандартного методу, знаходиться в межах діапазону від 0,15% до 6%, а можливість безперервного контролю поверхневої густини робить застосування безконтактного методу доцільним на виробництві;

- безконтактне визначення натягу нитки з лінійною густиною 445 текс можна проводити в діапазоні від 19,6 сН до 98 сН, а сам натяг ниток краще визначати за допомогою ультразвукового імпульсного сигналу з двома різними піками амплітуди;

- безконтактно можна визначати зміну натягу трикотажного полотна по окремим його зонам, а також можливо застосовувати амплітуду хвиль, які пройшли крізь зразок трикотажу, для визначення натягу полотна в межах від 0 до 26 Н.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Zdorenko V, Kyzymchuk O, Barylko S, et al (2018). The use of ultrasonic method for determining the basis weight of textile materials, *The Journal of The Textile Institute*, 109, P. 410-418 (Scopus).

2. Barylko S, Zdorenko V, Kyzymchuk O, et al (2019). Adaptive ultrasonic method for controlling the basis weight of knitted fabrics, *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 14, P. 1-7 (Scopus).

3. Здоренко В.Г., Барилко С.В. Контроль технологічних параметрів тканини за допомогою ультразвукового адаптивного пристрою. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2013. № 3. С. 7–11.

4. Здоренко В.Г., Барилко С.В., Чорноморченко В.К., Защепкіна Н.М. Дослідження згасання амплітуд ультразвукових хвиль при контролі тканин з різною поверхневою щільністю. Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. 2013. № 3 (71). С. 24–29.

5. Здоренко В.Г., Барилко С.В., Кисельов В.Б. Дослідження згасання ультразвукових хвиль при безконтактному контролі товщини полімерного покриття текстильних матеріалів. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. 2014. № 4 (78). С. 169–177.

6. Здоренко В.Г., Барилко С.В., Дяченко А.С. Технологічний контроль пористості текстильних матеріалів із складною структурою. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2017. № 1. С. 105–112.

7. Здоренко В.Г., Барилко С.В., Барилко О.В. Технологічний контроль текстильних матеріалів. *Метрологія та прилади*. 2017. № 5. С. 86–88.

8. Здоренко В.Г., Барилко С.В., Лісовець С.М., Зенкін А.С. Удосконалення акустичного безконтактного контролю матеріалів зі складною внутрішньою структурою. *Метрологія та прилади*. 2018. № 3. С. 47–51.

9. Здоренко В.Г., Барилко С.В., Барилко О.В., Лісовець С.М., Лебедюк Т.В. Дослідження застосування ультразвукового безконтактного методу визначення технологічних параметрів для процесу ткацтва. *Вісник Херсонського національного технічного університету.* 2018. № 4(67). С. 152–161.
10. Барилко С.В., Лісовець С.М., Головата І.В. Ультразвуковий метод визначення об'ємної щільності текстильних матеріалів. *Вісник інженерної академії України.* 2018. № 2. С. 116–121.

11. Здоренко В.Г., Лісовець С.М., Барилко С.В., Яненко О.П. Моделювання роботи електроакустичного тракту з об'єктом дослідження. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. 2018. № 2. С. 117–121.

12. Здоренко В.Г., Барилко С.В., Лісовець С.М., Шипко Д.О., Дерій Ю.О. Застосування фазового і амплітудно-фазового акустичних методів для автоматизованого контролювання поверхневої щільності текстильних матеріалів. *Стандартизація, сертифікація, якість*. 2019. № 2(114). С. 86–94.

13. Лісовець С.М., Барилко С.В., Зенкін А.С., Здоренко В.Г. Контроль поверхневої густини текстильних матеріалів шляхом використання автоматизованої сканувальної системи. *Метрологія та прилади*. 2019. № 5(79). С. 52–55.

14. Здоренко В.Г., Барилко С.В., Лісовець С.М., Шипко Д.О. Дослідження проходження ультразвукових хвиль крізь двошаровий матеріал із складною структурою при контролі його технологічних параметрів. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. 2020. № 1. С. 50–62.

15. Здоренко В.Г., Барилко С.В., Лісовець С.М., Шипко Д.О., Василенко В.М. Відбиття ультразвукових хвиль від двошарового пакету текстильних матеріалів зі щільним верхнім шаром. Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. 2020. № 2. С. 62–70.

16. Здоренко В.Г., Барилко С.В., Лісовець С.М., Шипко Д.О. Дослідження згасання ультразвукових хвиль при їх проходженні та відбитті від одношарових матеріалів з порами різного розміру. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. 2020. № 3. С. 99–111.

17. Здоренко В.Г., Барилко С.В., Лісовець С.М., Шипко Д.О., Василенко В.М., Палій Б.М. Дослідження відбиття ультразвукових хвиль від одношарових текстильних полотен та двошарових текстильних пакетів із різним розміром пор.

Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. 2020. № 4. С. 104–114.

18. Здоренко В.Г., Барилко С.В., Лісовець С.М., Шипко Д.О. Застосування ультразвукового пристрою для визначення поверхневої густини текстильної волоконної маси. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну.* 2020. № 5. С. 68–74.

19. Пат. 84211 Україна, МПК G01N33/36, G01N29/00. Ультразвуковий пристрій для вимірювання поверхневої щільності текстильних матеріалів. Скрипник Ю.О., Здоренко В.Г., Барилко С.В.; заявник та патентовласник Київський національний університет технологій та дизайну, № u201305479; заявл. 29.04.2013; опубл. 10.10.2013. Бюл. № 19.

20. Пат. 132500 Україна, МПК G01N33/36, G01N29/00. Ультразвуковий спосіб визначення об'ємної щільності текстильних матеріалів. Здоренко В.Г., Барилко С.В., Барилко О.В., Лісовець С.М.; заявник та патентовласник Київський національний університет технологій та дизайну, № u201305479; заявл. 11.10.2018; опубл. 25.02.2019. Бюл. № 4.

21. Zashchepksna N., Zdorenko V., Barylko S. Application of a ultrasonic method for quality assurance of materials. *Study of problems in modern science: new technologies in engineering, advanced management, efficiency of social institutions. Bydgoszcz.* 2015. P. 450–466.

22. Здоренко В.Г., Барилко С.В., Защепкіна Н.М. Визначення товщини текстильного матеріалу ультразвуковим амплітудним методом: тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції наукової молоді та студентів. *М*-*во освіти і науки України, КНУТД*. Євпаторія, 2013. С. 24–26.

23. Здоренко В.Г., Барилко С.В. Безконтактний метод контролю пористості текстильних матеріалів: тези доповідей III Міжнародної науковопрактичної конференції. *М-во освіти і науки України, ХНТУ*. Херсон, 2017. С. 98–99.

24. Здоренко В.Г., Барилко С.В. Безконтактний метод виявлення дефектів в матеріалах: тези доповідей І Міжнародної науково-практичної конференції "Мехатронні системи: інновації та інжиніринг". *М-во освіти і науки України, КНУТД*. Київ, 2017. С. 124–125.

25. Лісовець С.М., Барилко С.В. Контроль властивостей тканинних і трикотажних матеріалів амплітудно-фазовими акустичними методами: тези доповідей ІІ Міжнародної науково-практичної конференції "Мехатронні системи: інновації та інжиніринг". *М-во освіти і науки України, КНУТД*. Київ, 2018. С. 70.

26. Барилко С.В., Здоренко В.Г., Лісовець С.М. Технологічний контроль натягу ниток основи безконтактним методом: тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих вчених. *М-во освіти і науки України, ХНТУ*. Херсон, 2018. С. 32–34.

27. Barylko S., Zdorenko V., Kyzymchuk O., Lisovets S., Melnyk L., Barylko O. Non-contact method for fabric basis weight measurement: *Abstract of 49th IFKT International Congress, Textile Research Institute*. Łódź, Poland, 2018. P. 15.

28. Barylko S., Zdorenko V., Kyzymchuk O., Lisovets S., Melnyk L., Barylko O. Control of the fabric porosity by non-contact method: *IEEE Ukraine Student, Young Professional and Women in Engineering Congress*. Kyiv, Ukraine, 2018. P. 48–52.

29. Барилко С.В., Лісовець С.М., Шипко Д.О. Застосування безконтактного ультразвукового методу для автоматизованого контролю технологічних параметрів текстильних матеріалів: тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих вчених "Молодь – науці і виробництву – 2019: Інноваційні технології легкої промисловості". *М-во освіти і науки України, ХНТУ*. Херсон, 2019. С. 26–27.

30. Барилко С.В. Визначення натягу ниток безконтактним ультразвуковим методом для застосування в текстильній промисловості: тези доповідей III Міжнародної науково-практичної конференції "Мехатронні системи: інновації та інжиніринг". *М-во освіти і науки України, КНУТД*. Київ, 2019. С. 15 – 21.

31. Здоренко В.Г., Защепкіна Н.М., Барилко С.В., Палій Б.М. Дослідження відбиття ультразвукових хвиль від двошарового текстильного пакету: тези доповідей XXI Міжнародної конференції з математичного моделювання. *М-во освіти і науки України, ХНТУ*. Херсон, 2020. С. 94.

32. Здоренко В.Г., Барилко С.В., Зленко О.О. Застосування ультразвукової комп'ютеризованої системи для контролю поверхневої густини текстильних матеріалів: тези доповідей І Всеукраїнської конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених "Інноватика в освіті, науці та бізнесі: виклики та можливості". *М-во освіти і науки України, КНУТД*. Київ, 2020. С. 237–244.

33. Adamek K. Permeability simulations in textiles. *International journal of* systems applications, engineering & development. 2015. V. 9. P. 77–84.

34. Alonso V. Jaques, Jeffrey C. LaCombe. Regularization inverse method for variable binary diffusivity measurements. *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*. 2012. V. 33. Issue 3. P. 195–202.

35. Amit Rawal, Srijan Gupta, Harshvardhan Saraswat, Apurv Sibal. Geometrical modeling of near-net shape braided preforms. *Textile Research Journal*. 2015. V. 85. P. 1055–1064.

36. Ballou J.W., Smith J.C. Dynamic measurements of polymer physical properties. *Journal of Applied Physics*. 1949. Vol. 20, No. 6. P. 493–502.

37. Bendat Julius S., Piersol Allan G. Random Data: Analysis and Measurement Procedures, 4th Edition. *Hoboken: John Wiley&Sons, Inc.* 2011. 640 p.

38. Borisenko G.V. Numerical solution of the boundary-value problem for a nonlinear diffusion equation in image processing. *Computational Mathematics and Modeling*. 2007. V. 18. Issue 3. P. 245–252.

39. Chaikin M., Chamberlain N. The propagation of longitudinal stress pulses in textile fibers. *Journal of the textile institute*. 1955. Vol. 46, No. 1. P. 25–61.

40. Charch W.H., Moseley W.W. Structure property relationships in synthetic fibers. *Textile Research Journal*. 1959. Vol. 29, No. 7. P. 525–535.

41. Chen C.H. Ultrasonic and advanced methods for nondestructive testing and material characterization. *University of Massachusetts, USA World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.* 2007. P. 1–217.

42. Chris Turner, Hamed Sari-Sarraf, Eric Hequet, Stanislav Vitha. Variation in maturity observed along individual cotton fibers using confocal microscopy and image analysis. Textile Research Journal, 2015. V. 85. P. 867-883.

43. Ciarkowski A., Boersma J., Mittra R. Plane wave diffraction by a wedge-a spectral domain approach. *IEEE Trans. on Ant. and Prop.* 1984. No. 1. P. 20–29.

44. Cords H. Physikalisch basierte Gewebesimulation in Echtzeit. *Diplomarbeit Universität Rostock*. 2004. 117 p.

45. Das A., Kothari V.K., Balaji M. Studies on cotton-acrylic bulked yarns and fabrics. Part I: Yarn characteristics. *Journal of the Textile Institute*. 2007. V. 98 (3). P. 261–267.

46. Elinor E Swery, Tom Allen, Piaras Kelly. Automated tool to determine geometric measurements of woven textiles using digital image analysis techniques. *Textile Research Journal*. 2016. V. 86. P. 618–635.

47. Finckh H., Stegmaier Th., Planck H. Der wegzur perfektion. Die numerische simulation der gewebeherstellung: the way to perfection. The numerical simulation in fabric manufacture. *43. Internationale Chemiefasertagung. Dornbirn (Österreich).* 2004. P. 341–344.

48. Fisher N.I. Statistical analysis of circular data. *Cambridge: Cambridge University Press*. 2000. 277 p.

49. Fowler K. A., Elfbaum G. M., Smith K. A., Nelligan T. J. Theory and application of precision ultrasonic thickness gaging. *NDTnet*. 1997. V. 2. No. 10.

50. Fujino K., Kawai H., Horino T. Eksperimental study of the viscoelastic properties of textile fibers. Dynamic measurements from subsonic to supersonic frequencies. *Textile Research Journal*. 1955. No. 8. P. 722–737.

51. Grabowska K.E., Ciesielska-Wróbel I. Basic comparison of the properties of the loop and frotte yarns, woven and knitted fabrics. *Autex Research Journal*. 2014.
V. 1 4(3). P. 135–144.

52. Gun A.D. Dimensional, physical and thermal comfort properties of plain knitted fabrics made from modal viscose yarns having microfibers and conventional fibers. *Fibers and Polymers*. 2011. V. 12 (2). P. 258–267.

53. Hamburger W.J. The application of sonic techniques to the investigation of the effect of visco-elastic behavior upon stress-strain relationships in certain high polymers. *Textile Research Jornal.* 1948. Vol. 18, No. 12. P. 705–743.

54. Hillier K.W. A method of measuring some dynamic elastic constans and its application to the study of high polymers. *The Proceedings of the Physical Society*. 1949. Part 11, Vol. 62. P. 701–713.

55. Ishtiaque S.M., Das A., Kundu A.K. Ring frame process parameters and fabric comfort. Part I - low-stress mechanical properties of fabrics. *Journal of the Textile Institute*. 2014. V. 105 (3). P. 348–355.

56. Jammalamadaka S. Rao, SenGupta A. Topics in circular statistics. *Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.* 2001. 322 p.

57. Khoddami A., Carr C.M., Gong R.H. Effect of hollow polyester fibres on mechanical properties of knitted wool polyester fabrics. *Fibers and Polymers*. 2009. V. 10 (4). P. 452–460.

58. Lawrence Marple, Jr. Computing the Discrete-Time "Analytic" Signalvia FFT. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 1999. Vol. 47. № 9. P. 2600–2603.

59. Lenzi E.K., Lenzi M.K., Gimenez T.M., da Silva L.R. Some results for an NN-dimensional nonlinear diffusion equation with radial symmetry. *Journal of Engineering Mathematics*. 2010. V. 67. Issue 3. P. 233–240.

60. Lions J.L. Some methods in the mathematical analysis of systems and their control. *Gordon and Breach*. 1981. 308 p.

61. Lyons D., Graham J. Acoustic measurement of fiber properties. *Textile Research Journal*. 1975. No. 7. P. 549–553.

62. Lyons W.J. Dynamic properties of filaments, jarns, and cords at sonic frequencies. *Textile Research Journal*. 1949. Vol. 19, No. 3. P. 123–135.

63. Malkovich R.Sh. Approximate analytical solutions of a nonlinear diffusion equation. *Technical Physics Letters*. 2006. V. 32. Issue 10. P. 884–885.

64. Maochang Qin, Guihong Fan. A new method for finding special solutions of nonlinear diffusion equation. *Nonlinear Dynamics*. 2009. V. 55. Issue 4. P. 349–353.

65. Mishra R., Kremenakova D., Behera B.K., Militky J. Structural design engineering of woven fabric by soft computing, *Autex Research Journal*. 2011. № 2. V. 12. P. 37–41.

66. Morgan H.M. Correlation of molecular orientation measurements in fibers

by optical birefringence and pulse velosity methods. *Textile Research Journal*. 1962. Vol. 32, No. 10. P. 866–868.

67. Moseley W.W. The measurement of molecular orientation fibres by acoustic methods. *Journal Applied Polymer Science*. 1960. Vol. 34, No. 9. P. 266–276.

68. Myoung Hee Shim, Jooyoun Kim, Chung Hee Park The effects of surface energy and roughness on the hydrophobicity of woven fabrics. *Textile Research Journal*. 2014. V. 84. P. 1268–1278.

69. Nolle A.W. Methods for measuring dynamic mechanical properties of rubber like materials. *Journal of Applied Physics*. 1948. Vol. 19, No. 8. P. 753–774.

70. Philip Broadbridge, Joanna M. Goard. Exact solution of a degenerate fully nonlinear diffusion equation. *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik ZAMP*. 2004. V. 55. Issue 3. P. 534–538.

71. Pileckas E. The measurements possibilities of acoustic damping in composite materials. *AVIATION*. 2004. Vol. VIII. No 4. P. 16–20.

72. Qing Chen, Xuhong Miao, Haiwen Mao, Pibo Ma, Gaoming Jiang. The comfort properties of two differential-shrinkage polyester warp knitted fabrics. *AUTEX Research Journal*. 2016. V. 16. № 2. P. 1–10.

73. Rief S., Glatt E., Laourine E., Aibibu D., Cherif C., Wiegmann A. Modeling and cfd-simulation of woven textiles to determine permeability and retention properties. *AUTEX Research Journal*. 2011. V. 11 (3). P. 78–83.

74. Shaikh T.N., Bhattacharya S.S. Deriving an empirical formula to determine the optimum level of falsetwist in mechanically-crimped textured polyester yarn. *Textile Research Journal*. 2011. V. 81 (19). P. 1995–2005.

75. Standard guide for abrasion resistance of textile fabrics (rotary platform, double-head method). *ASTM D3884*. 2009. 7 p.

76. Standard test method for pilling resistance and other related surface changes of textile fabrics: martindale tester. *ASTM D4970/D4970M*. 2010. 4 p.

77. Su C.L., Fang J.X. Optimum drafting conditions of non-circular polyester and cotton blend yarns. *Textile Research Journal*. 2006. V. 76(6). P. 441–447.

78. Swapnil Chichan, Anirban Guha. A Method of modeling fabric shear using finite element analysis. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series E.* 2015.

V. 96. Issue 1. P. 1–7.

79. Tang K.P., Fan J.T., Zhang J.F., Sarkar M.K., Kan C.W. Effect of softeners and crosslinking conditions on the performance of easy-care cotton fabrics with different weave constructions. *Fibers and Polymers*. 2013. V. 14 (5). P. 822–831.

80. Tavanai H., Morshed M., Moghaddam A. Production of high bulk polyester filament yarn. *Journal of the Textile Institute*. 2013. V. 104 (1). P. 1–6.

81. Textiles-determination of the permeability of fabrics to air. *China GB/T5453*. 1997. 11 p.

82. Thorsen W., Veneklasen P. The spectral distribution of sound prodused by fibers and fabrics in friction. Part 1. *Textile Research Journal*. 1961. No. 31. P. 804–809.

83. Tianyong Zheng, Xiangjun Zhang, Zhixiang Zhao, Zhen Wu. Geometric structure model of plain woven fabric based on progressive spring-slide mechanics. *Textile Research Journal*. 2014. V. 84. P. 1803–1819.

84. Tkorsen W. The spectral distribution of sound prodused by fibers and fabrics in friction. Part 2. *Textile Research Journal*. 1962. No. 32. P. 670–676.

85. Tokita N. The effects of crystallization and drawing on the viscoelastic properties of fibers. *Journal of Polymer Science*. 1956. No. 20. P. 515–536.

86. Varshney R.K., Kothari V.K., Dhamija S. Influence of polyester fibre fineness and cross-sectional shape on low-stress characteristics of fabrics. *Journal of the Textile Institute*. 2011. V. 102 (1). P. 31–40.

87. Vasil'ev G. P., Lichman V. A., Peskov N. V., Semendyaeva N. L. Numerical modeling of heat and moisture diffusion in porous materials. *Computational Mathematics and Modeling*. 2015. V. 26. Issue 4. P. 501–513.

88. Weyland H. Measurement of the modulus of dynamic elasticity of staple fibers. *Textile Research Journal*. 1961. No. 7. P. 629–635.

89. Work R.W. The effect of variations in degree of structural order on same physical properties of cellulose and cellulose acetate jarns. *Textile Research Journal*. 1949. Vol. 19, No. 7. P. 381–393.

90. Xiaoyan Liu, Xinjin Liu. Numerical simulation of the three-dimensional flow field in four pneumatic compact spinning using the Finite Element Method.

*Textile Research Journal.* 2015. V. 85. P. 1712–1719.

91. Xinjin Liu, Jianli Liu, Xuzhong Su. A computational model for the sound absorption coefficients of multi-layer non-wovens. *Textile Research Journal*. 2015.
V. 85. P. 1553–1564.

92. Xinjin Liu, Xiaoyan Liu, Xuzhong Su. Theoretical study on a spinning triangle with fiber superposition. *Textile Research Journal*. 2015. V. 85. P. 1541–1552.

93. Xueting Liu, Xiong Yan, Huiping Zhang. Effects of pore structure on sound absorption of kapok-based fiber nonwoven fabrics at low frequency. *Textile Research Journal*. 2016. V. 86. P. 755–764.

94. Yip J., Ng S. Study of three-dimensional spacer fabrics: physical and mechanical properties. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008. V. 206. P. 359–364.

95. Zashchepksna N., Zdorenko V., Barylko S. Application of a ultrasonic method for quality assurance of materials. *Study of problems in modern science: new technologies in engineering, advanced management, efficiency of social institutions. Bydgoszcz.* 2015. P. 450–466.

96. Zhengyue Wang, Hong Hu. A finite element analysis of an auxetic warpknitted spacer fabric structure. *Textile Research Journal*. 2015. V. 85. P. 404–415.

97. Zhongping Li, Chunlai Mu, Wanjuan Du. Non-simultaneous blow up for coupled nonlinear diffusion equations with absorptions. *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik*. 2013. V. 64. Issue 2. P. 253–263.

98. Аксененко М.Д., Бараночников М.Л., Смолин О.В. Микроэлектронные фотоприемные устройства. Москва, 1984. 208 с.

99. Алексеев К.Г. Исследование процесса формирования хлопчатобумажной ткани полотняного переплетения. Москва, 1958. 146 с.

100. Алексеев К.Г. О новых методах расчета уработок в тканях основных простых ткацких переплетений. *Текстильная промышленность*. 1973. № 4. С. 47–49.

101. Алексеев К.Г. Основы расчета параметров строения и формирования тканей. Москва, 1973. 166 с.

102. Алёшин Н.П., Лупачев В.Г. Ультразвуковая дефектоскопия: справ.

пособие. Минск, 1987. 271 с.

103. Алимова Х.А., Даминов А.Д., Иногамджанов Д.Д. Изменение исходных свойств нитей при формировании ткани. *Технология текстильной промышленности*. 2001. № 3. С. 118–120.

104. Ананьев Л.М., Бобров П.Н., Спицын Л.А. Анализ прохождения звукових колебаний через слой волокнистого материала. *Технология текстильной промышленности*. 1974. № 4. С. 25–29.

105. Балдев Р., Раджендран В., Паланичами П. Применение ультразвука. Москва, 2006. 576 с.

106. Барилко С.В. Безконтактний метод контролю поверхневої щільності тканин. Тези доповідей I Міжнародної наукової конференції пам'яті професора Володимира Поджаренка "Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах", (Вінниця, 18-20 жовтня 2011 р.). *М-во освіти і науки України, ВНТУ*. Вінниця, 2011. С. 87.

107. Безруков А.В., Приходько В.Ю., Тютекин В.В. Рассеяние звукових волн радиально-слоистыми цилиндрическими телами. *Акуст. журн.* 1987. Т 32, № 6. С. 762–766.

108. Белецкая В.В, Селиверстов В.Ю., Киселев А.М. и др. Моделирование структуры тканей. *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности*. 2013. № 3. С. 23–28.

109. Бергман Л., под ред. Григорьева В.С. и Розенберга Л.Д. Ультразвук и его применение в науке и технике. 2-е изд. Москва, 1957. 726 с.

110. Берестнев В.А., Флексер Л.А., Хвальковский Н.В. Неразрушающие методы контроля механических характеристик текстильних материалов. *Текстильная промышленность*. 1971. № 12. С. 53–56.

111. Берус Г.И., Розанов Ф.М. Определение коэффициента уплотненности переплетения. Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 1983. № 2. С. 43–46.

112. Бистра І. М. Вдосконалення методу і засобу ультразвукової товщинометрії виробів з матеріалів зі значним загасанням: дис. на здобуття наук. ступеня кандидата техн. наук за спеціальністю 05.11.13. Київ, 2014. 152 с.

113. Блохинцев Д.И. Акустика неоднородной движущейся среды. Москва, 1946. 100 с.

114. Бобров П.Н., Волосников Ф.К., Козубенко В.А. Применение ультразвука для исследования свойств волокна. *Текстильная промышленность*. 1974. № 3. С. 64–65.

115. Боровиков А.С., Вайнберг Э.И., Горбунов В.И. и др.; под ред. Клюева В.В. Приборы для неразрушаюшего контроля материалов и изделий. Справочник: в 2-х книгах. Кн.1. Москва, 1986. 488 с.

116. Боровиков В.А., Кинбер Б.Е. Геометрическая теория дифракции. Москва, 1978. 248 с.

117. Бражников Н.И. Исследование акустической прозрачности фольги и контроль ее поверхностной плотности. *Автоматизация горно-обогатительных и металлургических производств*. 1983. С. 104–112.

118. Бражников Н.И. Развитие ультразвуковых методов контроля физикохимических свойств веществ. ИФЖ. 1969. Т. 16, № 2. С. 387–388.

119. Бражников Н.И. Ультразвуковые методы измерения плотности вещества. Приборы и системы управления. 1976. № 10. С. 17–21.

120. Бражников Н.И. Ультразвуковые методы контроля. Москва, 1965. 248с.

121. Брайерлей С. Теория и практические методы расчета плотности ткани. Москва, 1937. 135 с.

122. Бренер И.Р., Флексер И.А., Берестнев В.А. Контроль прочности комлексных нитей акустическим методом. *Текстильная промышленность*. 1974. № 4. С. 64–66.

123. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. Москва, 1973. 343 с.

124. Брок Т. Мембранная технология. Москва, 1987. 484 с.

125. Буденков Г.А., Гуревич С.Ю. Современное состояние бесконтактных методов и средств ультразвукового контроля. *Дефектоскопия*. 1981. № 5. С. 5–33.

126. Букина Ю.А. Сергеева Е.А. Методы контроля качества текстильных материалов. Определение физико-механических характеристик. *Вестник Казанского технологического университета*. Казань, 2012. Т. 15. С. 49–54.

127. Букреев В.С., Жижин Г.Н., Яковлев В.А. и др. Лазерный интерференционный толщиномер. *Измерительная техника*. 1975. № 6. С. 18–20.

128. Бухгольц В.П., Тисевич Э.Г. Емкостные преобразователи в системах автоматического контроля и управления. Москва, 1972. 79 с.

129. Вайнштейн Л.А., Суков А.И. Дифракция на волнистой поверхности. Сравнение численных методов. Радиотехника и электроника. 1984. Т 29, № 8. С. 1472–1478.

130. Вакс Е.Э. Измерение натяжения нитей. Москва, 1966. 232 с.

131. Васильченко В.Н. Влияние переплетения вискозной ткани на величину уработки нитей в ней. *Текстильная промышленность*. 1978 № 6. С. 47– 48.

132. Васильченко В.Н. Влияние строения саржи 1/3 из вискозных нитей на их уработку. *Текстильная промышленность*. 1977. № 2. С. 48–49.

133. Васильченко В.Н., Крисанов Е.Д. Влияние строения полотна из вискозных нитей на уработку. *Текстильная промышленность*. 1975. № 11. С. 40–42.

134. Васильченко В.Н., Крисанов Е.Д. Уработка нитей в ткачестве в зависимости от их сырьевого состава. *Текстильная промышленность*. 1982. № 2. С. 59–60.

135. Васильчикова Н.В. Изменение площади поперечного сечения нитей в меланжевых тканях разных структур. Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 1981. № 1. С. 12–14.

136. Васильчикова Н.В., Киселев А.К. О расчете максимальной плотности ткани. Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 1968. № 5. С. 22–26.

137. Велиев Ф.А. Определение технологических параметров тканей переменной плотности по утку. *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности.* 1990. № 3. С. 41–43.

138. Велиев Ф.А., Бурнашев Р.З. О прочности структуры ткани переменной плотности на границе плотного и разреженного участков. *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности.* 1992. № 4. С. 37–40.

139. Велиев Ф.А., Бурнашев Р.З. О прочности структуры ткани переменной плотности. Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 1992. № 5. С. 39–41.

140. Викторов В.А., Лункин Б.В., Совлуков А.С. Радиоволновые измерения параметров технологических процессов. Москва, 1989. 209 с.

141. Власов П.В. Исследование возможных применений радиоактивного излучения при нормализации процессов ткачества. Москва, 1963. 152 с.

142. Власова Н.Н. Разработка технологии изготовления и метода расчета параметров структуры тканей для фильтров: дис. на соискание учен. степени кандидата технических наук: 05.19.02. Москва, 2011. 149 с.

143. Воробей В.В., Маркин В.Б. Контроль качества изготовления и технология ремонта композитних конструкций. Новосибирск, 2006. 190 с.

144. Высоцкий А. В., Курочкин А.П. Конструирование и наладка пневматических устройств для линейных измерений. Москва, 1977. 153 с.

145. Гельфант М.Е., Калошин В.М., Ходоров Г.Н. Радиоизотопные приборы и их применение в промышленности: справочное пособие. Москва, 1986. 224 с.

146. Герасимов В.Г., Гурвич А.К., Дегтерев А.П. и др.; под ред. Клюева В.В. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Справочник: в 2-х книгах. Кн. 2. Москва, 1986. 352 с.

147. Гитис М.Б. Преобразователи для импульсной ультразвуковой дефектоскопии. Основные теоретические положения. *Дефектоскопия*. 1981. № 2. С. 65–84.

148. Голик А.З., Коченюк Н.Я Исследование скорости распространения и коэффициэнта поглощения звукових волн в широком интервале температур. Украинский физический журнал. 1970. № 8. С. 1259–1265.

149. Горбатов А.А., Рудашевский Г.Е. Акустические методы измерения расстояний и управления. Москва, 1981. 208 с.

150. Гордеев В.А. Ткацкие переплетения и анализ тканей. Москва, 1969. 245 с.

151. Горячая И.С., Севостьянов П.А. Компьютерное моделирование

поперечных сечений пряжи и миграции волокон. Москва, 2000. № 3897.

152. ГОСТ 15902.3-79. Полотна нетканые. Методы определения прочности Межгосударственный стандарт. Москва, 1979. 6 с.

153. ГОСТ 18353-79. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. Дата введения: 01.07.1980. Москва, 1979. 17 с.

154. ГОСТ 22238-76. Контроль неразрушающий. Меры образцовые для поверки толщиномеров покрытий. Общие положения. Дата введения: 01.01.1978. Москва, Государственный комитет СССР по стандартам, 1979. 4 с.

155. ГОСТ 23702-90. Контроль неразрушающий. Преобразователи ультразвуковые. Методы испытаний. Дата введения: 01.01.1992. Москва, 1992. 35 с.

156. ГОСТ 28702-90. Контроль неразрушающий. Толщиномеры ультразвуковые. Общиетехнические требования. Дата введения: 01.01.1992. Москва, 2005. 10 с.

157. ГОСТ 29104.10-91. Ткани технические. Метод определения изменения размеров в кипящей воде. Дата введения: 01.01.1993. Москва, Комитет стандартизации и метрологии СССР, 1991. 18 с.

158. ГОСТ 29104.11-91. Ткани технические. Метод определения капиллярности. Дата введения: 01.01.1993. Москва, Комитет стандартизации и метрологии СССР, 1991. 21 с.

159. ГОСТ 29104.12-91. Ткани технические. Метод определения стойкости к нефтепродуктам. Дата введения: 01.01.1993. Москва, Комитет стандартизации и метрологии СССР, 1991. 16 с.

160. ГОСТ 29104.13-91. Ткани технические. Метод определения стойкости к агрессивным средам. Дата введения: 01.01.1993. Москва, Комитет стандартизации и метрологии СССР, 1991. 23 с.

161. ГОСТ 29104.14-91. Ткани технические. Метод определения термостойкости. Дата введения: 01.01.1993. Москва, Комитет стандартизации и метрологии СССР, 1991. 26 с.

162. ГОСТ 29104.22-91. Ткани технические. Метод определения компонентов полного удлинения при растяжении нагрузкой, меньше разрывной.

Межгосударственный стандарт. Москва, 1991. 4 с.

163. ГОСТ 29104.23-91. Ткани технические. Метод определения тонкости фильтрации. Дата введения: 01.01.1993. Москва, Комитет стандартизации и метрологии СССР, 1991. 26 с.

164. ГОСТ 29104.4-91. Ткани технические. Метод определения разрывной нагрузки и удлинения при разрыве Межгосударственный стандарт. Москва, 1991. 7 с.

165. ГОСТ 29104.9-91. Ткани технические. Метод определения изменения размеров в горячем воздухе. Дата введения: 01.01.1993. Москва, Комитет стандартизации и метрологии СССР, 1991. 12 с.

166. ГОСТ 8.495-83. Государственная система обеспечения единства измерений. Толщиномеры ультразвуковые контактные. Методы и средства поверки. Дата введения: 01.01.1985. Москва, Государственный комитет СССР по стандартам, 1985. 10 с.

167. ГОСТ Р ИСО 3759-99. Материалы текстильные. Подготовка, нанесение меток и измерение проб текстильных материалов и одежды при испытании по определению изменений линейных размеров. Межгосударственный стандарт. Москва, 2011. 4 с.

168. Грановский Т. С. Строение и анализ ткани. Москва, 1985. 152 с.

169. Гребенник В.С. Физические основы ультразвуковых методов измерения толщины. Москва, 1968. 40 с.

170. Гречухин А.П., Селиверстов В.Ю. Способ построения границ профиля нити в ткани с переменной плотностью расположения нитей. *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности*. 2012. № 1. С. 46–49.

171. Гречухин А.П., Селиверстов В.Ю. Способ построения профиля нити в ткани. Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2010. № 5. С. 52–55.

172. Григорьев А. Н., Берестенев В.А., Флексер Л.А., Бренер И.Р. Акустический метод исследования тканей. *Текстильная промышленность*. 1976. № 7. С. 75–76.

173. Гринченко В.Т., Вовк И.В. Волновые задачи рассеяния звука на

упругих оболочках. Киев, 1986. 240 с.

174. Гуменюк Т.Б., Герасимов В.В., Мичко А.А. Розробка методики для вивчення та аналізу структурних характеристик матеріалів. *Вісник Технологічного університету Поділля*. 1999. № 4. Ч. 2. С. 9–11.

175. Гурвичус И.В., Душанскис Н.Я., Чурилин В.А. и др. Связь между диэлектрическими и акустическими параметрами химических комплексних нитей. *Научные труды высших учебных заведений Литовской ССР. Технология текстильного и кожевного производства*. 1978. № 6. С. 68–75.

176. Гурович А.К., Сясько В.А., Артемьев Б. В., Грудский А. Я., Федосенко Ю. К., Шевалдыкин В. Г. Толщинометрия изделий и покрытий. Методы и задачи. *В мире неразрушающего контроля.* 2008. № 2 (40). С. 5.

177. Гущина К.Г., Беляева С.А., Командрикова Е.Я. и др. Эксплуатационные свойства материалов для одежды и методы оценки их качества. Москва, 1984. 312 с.

178. Дамянов Г.Б., Бачев Ц.З., Сурнина Н.Ф. Строение ткани и современные методы ее проектирования. Москва, 1984. 240 с.

179. Демаркас В.Й., Пилецкас Э.Л. Ультразвуковая эхоскопия. Ленинград, 1988. 276 с.

180. Дзенис В.В. Применение ультразвуковых преобразователей с точечным контактом для неразрушающего контроля. Рига, 1987. 263 с.

181. Доммаркас В.И., Кажис Р.И. Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи. Вильнюс, 1975. 255 с.

182. Донской А.Ф., Келлер О.К., Кратыш Г.С. Ультразвуковые электротехнологические установки. Ленинград, 1968. 276 с.

183. ДСТУ 5725-2:2005. Точність (правильність і прецизійність) методів та результатів вимірювання. Ч. 2. Основний метод визначення повторюваності і відтворюваності стандартного методу вимірювання (ГОСТ ISO 5725-2-2003. IDT). Чинний від 01.02.2005. Вид. офіц. Київ, Держспоживстандарт України, 2006. 22 с.

184. ДСТУ ISO 10012:2005. Системи керування вимірюванням. Вимоги до процесів вимірювання та вимірювального обладнання (ISO 10012:2003, IDT).

Чинний від 25.07.2005. Вид. офіц. Київ, Держспоживстандарт України, 2005. 29с.

185. ДСТУ ISO 13936-1:2009. Матеріали текстильні. Визначення опору до розсування ниток у швах тканих виробів. Частина 1. Метод відкривання закріпленого шва. Чинний від 18.05.2009. Вид. офіц. Київ, Держспоживстандарт України, 2008. 26 с.

186. ДСТУ ISO 13936-2:2009. Матеріали текстильні. Визначення опору до розсування ниток у швах тканих виробів. Частина 2. Метод фіксованого навантаження. Чинний від 18.05.2009. Вид. офіц. Київ, Держспоживстандарт України, 2008. 22 с.

187. ДСТУ ISO 13936-3:2009. Матеріали текстильні. Визначення опору до розсувності ниток у шві тканих виробів. Частина 3. Метод фіксованої голки. Чинний від 18.05.2009. Вид. офіц. Київ, Держспоживстандарт України, 2008. 18с.

188. ДСТУ ISO 14419:2005. Матеріали текстильні. Оливовідштовхувальність. Метод визначення стійкості до вуглеводнів. Чинний від 16.09.2005. Вид. офіц. Київ, Держспоживстандарт України, 2005. 12 с.

189. ДСТУ ISO 7211-2:2008 Матеріали текстильні. Методи аналізу структури тканини. Частина 1. Метод визначення кількості ниток на одиницю довжини реміз. Чинний від 16.02.2008. Вид. офіц. Держспоживстандарт України, Київ, 2008. 26 с.

190. ДСТУ ISO 7211-2:2008. Матеріали текстильні. Методи аналізу структури тканини. Частина 2. Метод визначення кількості ниток на одиницю довжини реміз. Чинний від 16.02.2008. Вид. офіц. Держспоживстандарт України, Київ, 2008. 22 с.

191. ДСТУ ISO 7211-6:2007. Матеріали текстильні. Методи аналізу структури тканини. Частина 6. Метод визначення поверхневої густини тканини шва. Чинний від 22.10.2007. Вид. офіц. Київ, Держспоживстандарт України, 2007. 24 с.

192. ДСТУ ISO 9001:2009. Система управління якістю. Вимоги (ISO 9001:2008, IDT). Чинний від 01.09.2009. Вид. офіц. Київ, Держспоживстандарт України, 2009. 26 с.

193. ДСТУ ISO 9865-2001. Матеріали текстильні. Визначення

водонепроникності тканин шляхом випробування дощуванням за методом Бундесманна. Чинний від 11.12.2001. Вид. офіц. Київ, Держспоживстандарт України, 2001. 22 с.

194. ДСТУ ISO/TR 7066-1:2007. Оцінення невизначеності під час калібрування та застосування приладів вимірювання витрати. Частина 1. Лінійні калібрувальні характеристики. Чинний від 01.01.2009. Вид. офіц. Київ, Держспоживстандарт України, 2009. 24 с.

195. ДСТУ ГОСТ 30157.0-2003. Полотна текстильні. Методи визначання зміни розмірів після мокрих оброблень або хімічного чищення. Загальні положення. Чинний від 12.11.2003. Вид. офіц. Київ, Держспоживстандарт України, 2003. 18 с.

196. ДСТУ ГОСТ 30157.1-2003. Полотна текстильні. Методи визначання зміни лінійних розмірів після мокрих оброблень або хімічного чищення. Режими оброблень вуглеводнів. Чинний від 12.11.2003. Вид. офіц. Київ, Держспоживстандарт України, 2003. 14 с.

197. ДСТУ ГОСТ 30292-2003 (ИСО 4920-81). Полотна текстильні. Метод випробування дощуванням. Чинний від 12.11.2003. Вид. офіц. Київ, Держспоживстандарт України, 2003. 12 с.

198. Дытнерский Ю. М., Брыков В. П., Каграманов Г. Мембранное разделение газов. Москва, 1991. 344 с.

199. Дьяконов В.П. МАТLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6. Обработка сигналов и проектирование фильтров. Москва, 2005. 576 с.

200. Дьяченко К.П. Электрические измерения. Москва, 1972. 519 с.

201. Евсеев В.Н., Иванов В.С., Романов В.Н. Об определении звукового давления, создаваемого пластиной с ребрами жесткости под воздействием случайной нагрузки. *Акуст. журн.* 1981. Т 27, № 2. С. 220–227.

202. Ермаков А.А., Козлов А.Б. Микропроцессорный измеритель плотности текстильного материала на основе двухволнового оптоэлектронного преобразователя. Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 1999. № 5. С. 104–108.

203. Ермолов И.Н. Теория и практика ультразвукового контроля. Москва,

1981. 240 c.

204. Алёшин Н.П., Бобров В.Т., Ланге Ю.В., Щербинский В.Г. Ультразвуковой контроль. Москва, 2011. 224 с.

205. Ермолов И.Н., Алёшин Н.П., Потапов А.И.; под ред. Сухорукова В.В. Неразрушающий контроль: в 5 кн. Кн. 2: Акустические методы контроля: практ. пособие. Москва, 1991. 283 с.

206. Ермолов И.Н., Вопилкин А.Х., Бадалян В.Г. Расчеты в ультразвуковой дефектоскопи: краткий справочник. Москва, 2004. 110 с.

207. Ермолов И.Н., Ермолов М.И. Ультразвуковой контроль. Учебник для специалистов первого и второго уровня квалификации. Издание пятое, стериотипное. Москва, 2006. 208 с.

208. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В.; под общ. ред. Клюева В.В. Неразрушающий контроль: справочник: в 7 т. Т. 3: Ультразвуковой контроль. Москва, 2004. 864 с.

209. Ермолов И.Н., Останин Ю.Я. Методы и средства неразрушающего контроля качества. Москва, 1988. 368 с.

210. Ефремов Д. Е., Махмуд Билал. Параметры строения ткани при овальном поперечном сечении нити. *Технология текстильной промышленности*. 1989. № 2. С. 48–51.

211. Ефремов Д.Е., Ефремов Е.Д. Геометрические характеристики строения ткани при "стадионной" форме поперечных сечений нитей. Изв. вузов. *Технология текстильной промышленности.* 1989. № 4. С. 50–54.

212. Жихарев А.П. Теоретические основы и экспериментальные методы исследований для оценки качества материалов при силовых, температурных и влажностных воздействиях. Москва, 2003. 328 с.

213. Завадский В.Ю. Вычисления волновых полей в открытых областях и волноводах. Москва, 1972. 558 с.

214. Зайцев Д.В., Гречухин А.П. Компьютерное трехмерное моделирование строения ткани полотняного переплетения на различных этапах переплетения. *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности.* 2012. № 4. С. 85–88.

215. Застрогин Ю.Ф. Контроль параметров движения с использованием лазеров. Москва, 1981. 176 с.

216. Защепкіна Н.М., Здоренко В.Г. Ультразвуковий пристрій для технологічного контролю якості текстильних матеріалів. *Вісник КНУТД*. 2007. № 5 (37). С. 40–43.

217. Зворыкина Е.К. Методика приготовления микросрезов. Москва, 1987, 93 с.

218. Здоренко В.Г. Дослідження впливу натягу трикотажних та тканих полотен на величину поверхневої щільності. *Вісник ДАЛПУ*. 2000. № 2. С. 105–110.

219. Здоренко В.Г. Исследование прохождения импульсного ультразвукового сигнала через пленочный материал. Тез. докл. Х I L I I науч. и Х научно-метод. конф. профессорско-преподавательского состава КТИЛП, КТИЛП. Киев, 1990. 217 с.

220. Здоренко В.Г., Барилко С.В. Визначення поверхневої щільності текстильних матеріалів безконтактним ультразвуковим методом. Тези доповідей VIII Міжнародної українсько-польської конференції молодих науковців "Механіка та інформатика", (Хмельницький, 12-14 травня 2011 р.). *М-во освіти і науки України, ХНУ*. Хмельницький, 2011. С. 59–60.

221. Здоренко В.Г., Барилко С.В. Дослідження безконтактного ультразвукового контролю поверхневої щільності тканин полотняного переплетіння. *Вісник КНУТД*. 2011. № 4 (60). С. 27–31.

222. Здоренко В.Г., Барилко С.В. Дослідження похибки розрахункового методу визначення поверхневої щільності тканин. *Вісник КНУТД*. 2013. № 2 (70). С. 16–21.

223. Здоренко В.Г., Барилко С.В. Дослідження проходження імпульсного ультразвукового сигналу крізь тканину при контролі поверхневої щільності. *Вісник ХНУ*. 2013. № 3. С. 90–96.

224. Здоренко В.Г., Барилко С.В. Ультразвуковий контроль поверхневої щільності тканин. *Вісник ХНУ*. 2012. № 1. С. 82–88.

225. Здоренко В.Г., Барилко С.В., Защепкіна Н.М. та ін. Визначення зміни

пористості тканини за зміною амплітуди відбитої ультразвукової хвилі. Вісник КНУТД. 2012. № 3. С. 122–127.

226. Зубащенко Г.П., Васильченко В.Н. Влияние строения ткани полотняного переплетения из полушерстяной пряжи на ее уработку. *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности*. 1984. № 3. С. 39–42.

227. Зубрецкая Н.А., Барилко С.В., Поликарпов А.А., Федин С.С. Оценка качества электронных изделий по обобщенному показателю с использованием программного модуля. *Управління проектами, системний аналіз і логістика*. 2012. № 9. С. 62–67.

228. Зуев В.Е. Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере. Москва, 1970. 496 с.

229. Иванова.Ю., Бершев Е.Н. Оптический метод контроля структурных характеристик ткани. Известия вузов. Технология′текстильной промышленности. 1990. № 5. С. 19–26.

230. Ивановский В.И. Дистанционное обнаружение дефектов ткани. Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. Иваново, 2010. Т. 326. С. 124–126.

231. Иванюк Е.В. Разработка структур, технологии выработки и метода автоматизированного проектирования слоисто-каркасных тканей и контурных трехмерных текстильных изделий: автореферат дис. на соискание учен. степени кандидата технических наук: 05.19.02. Санкт-Петербург, 2011. 16 с.

232. Иноземцева Н.А. Разработка метода проектирования тканей по заданному порядку фазы строения: автореферат дис. на соискание учен. степени кандидата технических наук: 05.19.02. Москва, 2010. 16 с.

233. Кажис Р.И. Ультразвуковые информационно-измерительные системы. Вильнюс, 1986. 216 с.

234. Калинин В.А. Современные ультразвуковые толщиномеры. Москва, 1972. 52 с.

235. Калявин В.П., Мозгалевский А.В. Технические средства диагностирования. Ленинград, 1984. 210 с.

236. Карева Т.Ю. Определение величины изгиба нитей основы в тканях

новых структур на основе линейной теории изгиба. Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2002. № 3. С. 48–51.

237. Кармалицын Н.И., Тутане З.А. Образцовые меры поверхностной плотности для поверки и градуировки радиоизотопных толщиномеров. *Измерительная техника*. 1975. № 5. С. 30–31.

238. Карпаш О.М., Рибіцький І.В., Карпаш М.О. Обґрунтування можливості використання кодів Баркера для підвищення чутливості ультразвукового безконтактного способу вимірювання товщини. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2008. № 2. С. 31–35.

239. Карташев В. Г., Качанов В. К. Оптимальное выделение сигналов на фоне структурного шума в УЗ дефектоскопи. *Дефектоскопия*. 1992. № 7. С. 14–24.

240. Качанов В.К., Мозговий О.В., Пітолін О.І., Попко В.П., Рябов Г.Ю.; за ред. Бабака В.П. Сучасні методи та засоби ультразвукового контролю з використанням статистичної обробки сигналів. Київ, 1994. 132 с.

241. Качанов В.К., Соколов И.В. Особености применения сложномодулированых сигналов в ультразвуковой дефектоскопии. Дефектоскопия. 2007. № 12. С. 18–42.

242. Керимов С.Г., Ефремов Е.Д. К вопросу теории фазового строения тканых изделий. *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности.* 1978. № 6. С. 49–54.

243. Керимов С.Г., Храмов С.Н. Расчет максимальной технологической плотности ткани с учетом вида переплетения. *Текстильная промышленность*. 1987. № 5. С. 68–69.

244. Кестинг Р.Е. Синтетические полимерные мембраны. Москва, 1991. 336 с.

245. Колганов В.И. Ультразвуковой бесконтактный метод и программноаппаратные средства автоматизированного неразрушающего контроля качества изделий из полимерных композиционных материалов: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.11/ Санкт-Петербург, 2001. 249 с.

246. Колесников А.Е. Ультразвуковые измерения. Москва, 1982. 240 с.

247. Комаров А.Б. Разработка методов обнаружения местных пороков ткани с использованием компьютерных технологий: дис. ... канд. техн. наук: 05.19.01/ Иваново, 2004. 163 с.

248. Кондратьев Ю.А., Половинкин А.В. Исследование искажений акустического сигнала при его распространении в среде с частотно-зависимым коэффициэнтом затухания. *Технические средства диагностирования*. 1987. С. 3–12.

249. Корицкий К.И. Влияние крутки на структуру и физические параметры нити. Известия ВУЗ. Технология текстильной промышленности. 1961. № 5. С. 30–38.

250. Королев М.В. Безэталонные УЗ толщиномеры. Москва, 1985. 109 с.

251. Королев М.В. Эхо-импульсные толщиномеры. Москва, 1980. 111 с.

252. Королев М.В., Карпельсон А.Е. Широкополосные ультразвуковые преобразователи. Москва, 1982. 157 с.

253. Королев М.В., Коновалов А.А., Стариков Б.П. Миниатюрный безэталонный эхо-импульсный толщиномер – измеритель скорости звука. Дефектоскопия. 1986. № 10. С. 8–14.

254. Королев М.В., Стариков Б.П., Карпельсон А.Е. Ультразвуковые импульсные приборы контроля прочности материалов. Москва, 1987. 111 с.

255. Королев М.В., Шевалдыкин В.Г., Карпельсон А.Е. Безэталонный эхоимпульсный ультразвуковой толщиномер. *Дефектоскопия*. 1983. № 9. С. 23–30.

256. Костин С.Л. Разработка методов технического контроля структурных параметров тканых полотен: дис. ... канд. техн. наук: 05.19.02/ Иваново, 2004. 216 с.

257. Костюков А.Ф. Исследование влияния упорядоченного множества волокон на волновые соотношения ультразвука. *Вестник АГАУ*. 2011. № 5. С. 90– 94.

258. Костюков А.Ф. Модель регистрации признаков многослойной структуры с помощью акустических колебаний. *Вестник АГАУ*. 2010. № 3. С. 94–98.

259. Костюков А.Ф. Приборы и методы лабораторного контроля основних

технологических параметров сельскохозяйственных волокон с помощью ультразвука. *Вестник АГАУ*. 2011. № 3. С. 95–98.

260. Костюков А.Ф. Экспериментальное определение свойств волокон с помощью акустических колебаний. *Вестник АГАУ*. 2010. № 9. С. 84–87.

261. Котова В.И., Носов М.П. Исследования текстурированных капронових нитей акустическим методом. *Текстильная промышленность*. 1976. № 12. С. 72–75.

262. Котоносова В.Я., Белинский Б.А. Измерение коэффициента затухания ультразвука в углеродных нитях и волокнах. *Заводская лаборатория*. 1976. № 4. С. 447–449.

263. Котоносова В.Я., Перепечко И.И., Фролов В.И. К вопросу исследования прочностных свойств углеродных волокон на основе полиакрилонитрильных Механика волокон ультразвуковими методами. полимеров. 1978. № 4. С. 724–728.

264. Котоносова В.Я., Сбитнев О.С. Методика определения динамического модуля упругости углеродных нитей и волокон. Заводская лаборатория. 1974. № 1. С. 106–107.

265. Крауткремер Й., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль материалов: справочное издание. Москва, 1991. 752 с.

266. Кретов Е.Ф. Ультразвуковая толщинометрия в машиностроении. *В* мире неразрушающего контроля. 2008. № 2. С. 26–28.

267. Крючков Ю.Н., Лепорский А.Н. Измерения абсолютных значений толщины диэлектрических материалов. *Дефектоскопия*. 1978. № 8. С. 106–107.

268. Кукин Г.Н., Соловьев А.Н., Кобляков А.И. Текстильное материаловедение. Волокна и нити. Москва, 1989. 387 с.

269. Кулабушева И.В. Разработка метода проектирования параметров строения и технологии изготовления тканей: автореферат дис. на соискание учен. степени кандидата технических наук: 05.19.02. Москва, 2003. 16 с.

270. Кулаков Ю.О., Куц В.Ю. Дослідження кругових медіанних фільтрів в задачах аналізу фазових характеристик сигналів. *Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.С. Пухова НАН України.* 2008. Т. 2. С. 429–434.

271. Куликовский К.Л., Купер В.Я. Методы и средства измерений. Москва, 1986. 447 с.

272. Кутепов О.С. Строение и проектирование тканей. Москва, 1973. 216 с.

273. Куц Ю. В., Куц Н. Е. Применение выборочных характеристик расположения и рассеяния в фазометрии. Электронное моделирование. 2004. Т. 26. № 2. С. 89–97.

274. Куц Ю.В. Методи та системи статистичної фазометрії: дис. на здобуття наук. ступеня доктора техн. наук за спеціальністю 05.11.16 "Інформаційно-вимірювальні системи". *Національний авіаційний університет*. Київ, 2004. 316 с.

275. Куц Ю.В., Монченко О.В. Ультразвуковое измерение толщины многослойных материалов и изделий. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2008. № 1. С. 35–38.

276. Куц Ю.В., Щербак Л.М. Застосування перетворення Гільберта у фазометрії. *Технологические системы*. 2004. № 2. С. 50–55.

277. Куц Ю.В., Щербак Л.М. Статистична фазометрія. Наукова монографія. Тернопіль, 2009. 384 с.

278. Лазарев Л.П., Мировицкая С.Д. Контроль геометрических и оптических параметров волокон. Москва, 1988. 280 с.

279. Лайонс Ричард. Цифровая обработка сигналов: второе издание. Москва, 2007. 656 с.

280. Лейтес Л.Г. Уработка и усадка нитей в суровье в зависимости от его прочности. *Текстильная промышленность*. 1960. № 1. С. 36–39.

281. Ленец О.П., Махова В.Л., Ефремов Д.Е. Расчет уработки нитей в однослойной суровой ткани по ее поверхностной плотности и изменение уработки при формировании ткани. *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности*. 2006. № 1. С. 44–46.

282. Лисаковский А.Н., Васильченко В.Н., Апокин Ц.В. Влияние плотности по утку и вида переплетения на процесс формирования базальтовой ткани. *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности*. 2002. № 6. С. 49–53.

283. Лютак I.3. Математична модель обробки сигналу ультразвукових пластинчатих хвиль. Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. 2007. № 2 (16). С. 178–183.

284. Лютак І.З., Кісіль І.С. Адаптивний алгоритм обробки виміряного ультразвукового сигналу в частотній області. *Методи та прилади контролю якості*. 2006. № 16 С. 15–18.

285. Малецкая С.В., Дружинская И.О. Автоматизированный метод построения мелкоузорчатого переплетения на базе крепа. Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2013. № 4. С. 64–65.

286. Малецкая С.В., Женгурова Е.А. Автоматизированный метод построения комбинированного вафельного переплетений. *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности.* 2012. № 3. С. 53–55.

287. Малецкая С.В., Женгурова Е.А. Алгоритм автоматизированного построения рисунка вафельного переплетений ткани. *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности.* 2012. № 1. С. 59–63.

288. Малецкая С.В., Иващенко Е.П. Автоматизированное построение заправочных рисунков для выработки тканей с полосками из разных переплетений. Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2011. № 6. С. 48–52.

289. Малецкий В.В. Разработка новых способов построения комбинированных переплетений с использованием информационных технологий: автореферат дис. на соискание учен. степени кандидата техн. наук: 05.19.02. Москва, 2011. 16 с.

290. Малюжинец Г.Д., Тужилин А.А. Дифракция плоской звуковой волны на тонкой полубесконечной упругой пластине. *Журн. вычисл. математики и математ. физики.* 1970. Т 10, № 5. С. 1210–1227.

291. Мардиа К. Статистический анализ угловых наблюдений. Москва, 1979. 240 с.

292. Марков Н.М., Сацердотов П.А. Влияние измерительного усилия на погрешность измерения. *Измерительная техника*. 1981. № 11. С. 26–27.

293. Мартынова А.А., Васильев А.В., Власова Н.А. Расчет разрывной

нагрузки полоски ткани. Текстильная промышленность. 1988. № 5. 69 с.

294. Мартынова А.А., Левакова Н.М. Анализ и расчет пористости ситовых тканей. *Текстильная промышленность*. 1989. № 9. С. 61–62.

295. Мартынова А.А., Слостина Г.Л., Власова Н.А. Строение и проектирование тканей. Москва, 1999. 434 с.

296. Мартынова А.А., Юхина Е.А. Расчет пористости ткани. *Текстильная* промышленность. 1984. № 2. С. 56–57.

297. Матаушек И. Ультразвуковая техника. Москва, 1962. 511 с.

298. Матис И.Г. Электроемкостные преобразователи для неразрушающего контроля. Рига, 1977. 326 с.

299. Меридит М., Хирл Дж. Физические методы исследования текстильных материалов. Москва, 1963. 388 с.

300. Меркулова В.М. О точности импульсного метода измерения затухания и скорости ультразвука. *Акустический журнал*. 1966. № 12. С. 474–478.

301. Милашюс В.М. Исследование изменений структуры ткани при постоянной деформации. *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности*. 1974. № 5. С. 12–16.

302. Михлин Б.З. Высокочастотные емкостные и индуктивные датчики. Москва – Ленинград, 1960. 72 с.

303. Монченко О.В. Фазовий метод ультразвукової товщинометрії виробів з багатошарових матеріалів: дис. на здобуття наук. ступеня кандидата техн. наук за спеціальністю 05.11.13. Київ, 2010. 156 с.

304. Мороз А.Н. Исследование параметров чувствительности пьезоэлектрического датчика цилиндрической формы для измерения звукового давлення при мойке шерсти. *Вісник НТУ "ХПІ"*. Харків. 2010. № 36. С. 89–93.

305. Мороз А.Н. Теоретическое исследование взаимодействия звукових колебаний со слоем среды, моделирующей шерсть. Энергосбережение, энергоаудит. 2009. № 11(69). С. 49–60.

306. Мороз О.М., Черенков О.Д., Свергун Ю.Ф. Використання акустичних коливань в технологічних процесах виробництва. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства "Проблеми

енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України". Харків, 2005. Вип. 43, Т. 1. С. 145–151.

307. Музалевская А.А. Разработка методов автоматизированного исследования параметров структуры однослойных пестротканей: автореферат дис. на соискание учен. степени кандидата технических наук: 05.19.02. Кострома, 2008. 16 с.

308. Мчедлишвили Б.В., Волков В.В. Мембраны и нанотехнологии. 2008. Т. 3. № 11-12. 67 с.

309. Некрасов Н.Ю. Контроль пороков ткани телевизионностробоскопическим методом. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. Орел: Орлов. гос. техн. ун-т. 2012. Т. 3 (293). С. 90–93.

310. Никитин М.Н. Проектирование тканей. Москва, 1961, 212 с.

311. Николаев С.Д., Малецкий В.В. Новые способы совмещения нескольких переплетений. *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности*. 2010. № 7. С. 30–33.

312. Николаев С.Д., Маховер Н.А., Парфенов О.В. Влияние вида переплетения на параметры строения тканей. Изв. вузов. Технология *текстильной промышленности*. 2008. № 2. С. 59–60.

313. Николаев С.Д., Раченкова О.М. Компьютерное моделирование геометрических моделей тканей различного переплетения. *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности.* 1998. № 4. С. 42–44.

314. Николаев С.Д., Юхин С.С. Оценка напряженно-деформированного состояния нитей при выработке тканей различных переплетений. *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности*. 1998. № 6. С. 37–39.

315. Новиков Н.Г. О строении и проектировании ткани с помощью геометрического метода. *Текстильная промышленность*. 1946. № 6. С. 24–28.

316. Новикова О.А. Разработка метода проектирования и определения оптимальных параметров изготовления тканей комбинированных переплетений: автореферат дис. на соискание учен. степени кандидата технических наук: 05.19.03. Москва, 1996. 15 с.

317. Носов Ю.Р. Оптоэлектроника. Москва, 1977. 231 с.

318. Олійник Ю.А., Бистра І.М., Куц Ю.В. Експериментальні дослідження фазового методу ультразвукового неруйнівного контролю. *Східно-Європейський* журнал передових технологій. Харків, 2013. № 1/9 (61). С. 49–52.

319. Олійник Ю.А., Куц Ю.В., Близнюк О.Д. Фазовий спосіб ультразвукової товщинометрії. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*. Київ, 2013. № 1. С. 23–27.

320. Оников Э.А., Саукова Л.А., Горбунова Е.О. О геометрическом методе анализа и посторения тканей полотняного переплетения. *Текстильная промышленность*. 1964. № 1. С. 50–52.

321. Орнатский П.П. Теоретические основы информационноизмерительной техники. Киев, 1983. 455 с.

322. Павлов И.В. Композиционные материалы и неразрушающий контроль. В мире неразрушающего контроля: Ежеквартальное журнальное обозрение. 2003. № 3. С. 4–7.

323. Павлов Ю.А., Иезуитова ГЛ., Ребарбар Я.М., Романов В.Н. Автоматизированная система контроля качества готовых тканей. Москва, 1981. 264 с.

324. Пат. 100756 Україна, МПК G01B17/02. Ультразуковий двошкальний спосіб вимірювання товщини виробів. Куц Ю.В., Олійник Ю.А., Монченко О.В., № u201501408; заявл. 19.02.2015; опубл. 10.08.2015. Бюл. № 15. 3 с.

325. Пат. 2131605 Россия, МКИ 6 G 01N 33/36. Бесконтактный способ анализа структуры ткани. Лустгартен Н.В, Сокова Г.Г., Сергеев А.С.; заявитель и патентодержатель Костромской технологический университет, № 98108331/12; заявл. 29.04.1998; опубл. 10.06.1999. Бюл. № 16.

326. Пат. 2151393 РФ, МПК G01N33/36. Способ распознавания компьютерного изображения текстильных изделий. Опубл. 20.06.2000.

327. Пат. 2164679 Россия, МКИ 7 G 01 N 21/89. Способ контроля структурных геометрических параметров тканых материалов. Шляхтенко П.Г., Труевцев Н.Н.; заявитель и патентодержатель *Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна*, № 2164679; заявл. 25.06.1999; опубл. 27.03.2001. Бюл. № 14.

328. Пат. 73763 Україна, МПК G01N33/36, G01N29/00. Ультразвуковий спосіб визначення поверхневої щільності матеріалів. Скрипник Ю.О., Здоренко В.Г., Барилко С.В., Єфіменко В.Б.; заявник та патентовласник *Київський національний університет технологій та дизайну*, № u201202723; заявл. 06.03.2012; опубл. 10.10.2012. Бюл. № 19.

329. Пат. 79972 Україна, МПК G01B17/02. Спосіб ультразвукового вимірювання товщини матеріалів та виробів. Куц Ю.В., Найда В.Л., Олійник Ю.А., Монченко О.В., № u201212606; заявл. 05.11.2012; опубл. 13.05.2013, Бюл. №9. 4 с.

330. Пат. 12052 Україна, МПК G01N33/36. Пристрій для вимірювання жорсткості матеріалів. Лебідь О.С., Арабулі А.Т., Березненко М.П., Березненко С.М., Гришко А.А., Бєлєнікін В.В. *Київський Національний Університет технологій та дизайну,* № u200507438; заявл. 26.07.2005; опубл. 16.01.2006. Бюл. № 1. 6 с.

331. Пат. 28841 Україна, МПК (2006) G01L1/00. Спосіб вимірювання деформації текстильних матеріалів одягу. Михайловський Ю.Б., Мица В.В., Золотенко Е.О., Стрижова О.П.; заявник та патентовласник *Хмельницький національний університет.* № u200708755; заявл. 30 07.2007; опубл. 25.12.2007. 4с.

332. Пат. 36800 Україна, МПК G01N33/36. Пристрій для вивчення процесу усадки текстильних матеріалів. Кардаш О.В., Кардаш О.О., Яцишина Л.К., Філін О.В., Гаврилюк І.О., Пономарчук О.В., Гусак Ю.О., Руденко Н.Г., Горобець Ю.В.; заявник та патентовласник *Київський національний університет технологій та дизайну*, № u200020732; заявл. 10 02.2000; опубл. 16.04.2001. Бюл. № 3. 3 с.

333. Пат. 63663 Україна, МПК G01H7/00, G01N29/00. Пристрій для вимірювання часу проходження та згасання акустичних імпульсів. Скрипник Ю.О., Здоренко В.Г., Барилко С.В.; заявник та патентовласник *Київський національний університет технологій та дизайну*, № u201106890; заявл. 01.06.2011; опубл. 10.10.2011. Бюл. № 19.

334. Пат. 83772 Україна, МПК G01N33/36. Пристрій для визначення

лінійної щільності волокнистого матеріалу. Головій О.В., Жуплатова Л.М., Мохер Ю.В., Толмачов В.С.; заявник та патентовласник *Інститут луб'яних культур УААН*, № а2007 05413; заявл. 17.05.07; опубл. 11.08.08. Бюл. № 15. 8 с.

335. Пат. 9371 Україна, МПК G01N33/36. Прилад для вивчення деформаційних властивостей текстильних матеріалів в умовах різного вологорежиму середовища. Буханцова Л.В., температурного Злотніков B.O., Кущевський М.О.; заявник та патентовласник Хмельницький національний університет, № и200502830; заявл. 28 03.2005; опубл. 15.09.2005. Бюл. № 9. 2 с.

336. Патент України на корисну модель № 35057. Спосіб ультразвукового вимірювання товщини виробів. Куц Ю.В., Єременко В.С., Монченко О.В., Лапіга І.М.; опубл. 26.08.2008. Бюл. № 16. 2008.

337. Патент України на корисну модель № 18441. Спосіб ультразвукового вимірювання товщини багатошарових матеріалів та виробів. Єременко В.С., Куц Ю.В., Монченко О.В.; опубл. 26.08.2008. Бюл. № 16. 2008. 4 с.

338. Пашин Е.Л. Новый метод оценки гибкости волокна в селекционных целях. Льняное дело. 1995. № 3. 27 с.

339. Перепечко И.И. О распространении звука в ориентированных полимерах. *Механика полимеров*. 1969. № 3. С. 437–441.

340. Перепечко И.И., Гречишкин В.А., Казарян Л.Г. и др. Исследования ориентации и кристаллизации полиэтилентерефталата акустическим методом. Высокомолекулярные соединения. 1970. № 2. С. 438–442.

341. Пестряков В.Б. Фазовые радиотехнические системы (основы статистической теории). Москва, 1968. 466 с.

342. Пискарев И.В. Фильтровальные ткани. Изготовление и применение. Москва, 1963. 49 с.

343. Полянин А.Д., Зайцев В.Ф., Журов А.И. Методы решения нелинейных уравнений математической физики и механики. Москва, 2005. 256 с.

344. Попов Ю.Н. Измерение толщины прозрачных пластин. Приборы и *техника эксперимента*. 1978. № 3. С. 237–238.

345. Прохрова І.А., Рязанова О.Ю., Закора О.В. Проектування тканин за заданою матеріалоємністю. *Вісник Київського національного університету* 

технологій та дизайну. 2010. № 5. С. 254–258.

346. Прусенко В.С. Пневматические датчики и вторичные приборы. Москва – Ленинград, 1965. 193 с.

347. Пугачев А.В., Сахаров Э.В., Долинин В.А. Радиоизотопные приборы технологического контроля: справочник. Москва, 1980. 96 с.

348. Пугачев С.И. Пьезокерамические преобразователи. Расчет и проектирование: справочник. Ленинград, 1984. 256 с.

349. Разумный В.М. Оценка параметров автоматического контроля. Москва, 1975. 80 с.

350. Разыграев Н.П., Разыграев А.Н., Пономарёв С.Н., Безлюдько Г.Я., Миховски М., Мирчев Й. Исследование технологии ультразвукового контроля толщины ЭМА методом. *Дефектоскопия*. 2010. № 6. С. 60–80.

351. Раченкова О.М. Разработка метода расчета рациональных параметров строения тканей различного переплетения с учетом технологии их изготовления: автореферат дис. на соискание учен. степени кандидата технических наук: 05.19.03. Москва, 2000. 16 с.

352. Роговина А.А., Фаинберг Э.З. О применении метода определения скорости распространения звука для исследования химических волокон. *Химические волокна*. 1972. № 6. С. 53–55.

353. Розанов Ф.М., Кутепов О.С., Жупикова Д.М., Молчанов С.В. Строение и проектирование тканей. Москва, 1953. 469 с.

354. Рябчиков М.Л., Власенко В.І., Ковтун С.І. Нестаціонарна модель водовбирання текстильними матеріалами по товщині. Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. Луганськ, 2009. № 2 (132). С. 325–334.

355. Свечников С.В. Элементы оптоэлектроники. Москва, 1971. 272 с.

356. Свитцов А.А. Введение в мембранные технологии. Москва, 2007. 280с.

357. Селиванов Г.И. Строение элементов тканей. *Текстильная* промышленность. 1963. № 3. С. 45–52.

358. Селиванов М.Н., Фридман А.Э., Кудряшова Ж. Ф. Качество

измерений. Ленинград, 1987. 287 с.

359. Семеренко А.В. Эхо – метод ультразвуковой толщинометрии. *В мире неразрушающего контроля*. 2008. № 2 (40). С. 6–10.

360. Сергеева А.И., Цейтлин Я.М., Кармалицын Н.И. Оценка поправок на локальные деформации при контактных измерениях толщины изделий из низкомодульных материалов. *Измерительная техника*. 1990. № 3. С. 17–18.

361. Синицын В.А. Методика оценки напряженности выработки ткани на ткацких станках. *Технология текстильной промышленности*. 1995. № 4. С. 49–53.

362. Синицын В.А. Методика расчета параметров строения тканей с переменной плотностью расположения нитей. Изв. вузов. Технология *текстильной промышленности*. 1997. № 5. С. 40–44.

363. Синицын В.А., Крупитчикова Н.Ю. О расположении нитей основы в структуре ткани уточный репс 2/2. Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 1997. № 3. С. 48–52.

364. Синицын В.А., Шейнова Т.И. Основы теории строения и проектирования тканей. Иваново, 1994. 32 с.

365. Склянников В.П,. Кондратьев А.В. Система комплексных параметров строения ткани. *Текстильная промышленность*. 1988. № 4. С. 38–39.

366. Склянников В.П. О расчете наполнения тканей, выработанных однослойными переплетениями. *Текстильная промышленность*. 1962. № 9. С. 59–62.

367. Склянников В.П. Оптимизация строения и механических свойств тканей из химических волокон. Москва, 1974, 168 с.

368. Склянников В.П. Строение и качество тканей. Москва, 1984. 176 с.

369. Склянников В.П. Форма и поперечные размеры пряжи в вискозных штапельных тканях полотняного переплетения. Изв. вузов. Технология *текстильной промышленности.* 1969. № 1. С. 25–28.

370. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Москва, 2003. 104 с.

371. Смирнов А.Д. Импульсная ультразвуковая измерительная аппаратура.

Вопросы конструирования. Москва, 1967. 281 с.

372. Смирнов В.И. Теоретические исследования строения тканей полотняного переплетения. Москва, 1960. 100 с.

373. Смирнова И.Н. Исследование внутренней структуры ткани методом текстилеграфии. Изв. вузов. Технология легкой промышленности. 1973. № 3. С. 167–168.

374. Сокова Г.Г. Разработка метода автоматического анализа проектирования групп полотен льняного ассортимента: автореферат дис. на соискание учен. степени кандидата технических наук: 05.19.03. Кострома, 2000. 18 с.

375. Сокова Г.Г. Целостность восприятия изображения ткани в компьютерной фотограмметрии. Современные технологии и оборудование текстильной промышленности (Текстиль-98): тез. докл. всерос. н.-т. конф. МFTA. Москва, 1998. 91 с.

376. Сокова Г.Г., Бейтина А.А. Прогнозирование порядка фазы строения льняных тканей с учетом изгибной жесткости пряжи. Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2007. № 3. С. 50–52.

377. Соловьев А.Н., Кирюхин С.М. Оценка и прогнозирование качества текстильных материалов. Москва, 1984. 215 с.

378. Степанов Г.В. Геометрия осевой линии нити. Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 1994. № 6. С. 34–36.

379. Степанов Г.В., Кочетов А.А. Описание геометри нити в ткани с помощью рядов Фурье. Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 1999. № 2. С. 56–58.

380. Стор И.Н. Расчет поверхностного заполнения и поверхностной пористости ткани. *Текстильная промышленность*. 1980. № 9. С. 36–37.

381. Сударикова Е. В. Неразрушающий контроль в производстве: учеб. пособие. Ч. 1. Санкт-Петербург, 2007. 137 с.

382. Сударикова Е. В. Неразрушающий контроль в производстве: учеб. пособие. Ч. 2. Санкт-Петербург, 2007. 112 с.

383. Супрун Н.П. Моделювання процесів масообміну через текстильні

матеріали. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. 2000. № 4. С. 32–34.

384. Сурнина Н.Ф. Проектирование ткани по заданным параметрам. Москва, 1973. 142 с.

385. Сучков Г.М. Исследование особенностей распространения упругих волн, возбуждаемых ЭМА способом. *Контроль. Диагностика*. 2001. №12. С. 36–39.

386. Таточенко Л.К., Киселев В.И., Песня В.Т., Кобляков Н.А. и др. Контроль технологических параметров текстильных материалов: методы, устройства. Москва, 1985. 192 с.

387. Тернова Т.І. Розробка та застосування методів аналізу та контролю якості текстильних матеріалів: дис. ... канд. техн. наук: 05.19.03/ ХНТУ. Херсон, 2007. 179 с.

388. Толкунова Н.М., Чернов Е.Н., Гончарова И.Е. Испытание текстильных материалов. Москва, 1993. 224 с.

389. Толубеева Г.И. Методика расчета уработок нитей во фронтальной плоскости однослойной ткани по ее заправочным данным и высоте волны изгиба основы. *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности.* 2012. № 3. С. 48–53.

390. Третьяков В.А., Фирсов И.П. Искажение акустического импульсного сигнала при прохождении через кристаллические образцы малых размеров. *Прикладная акустика*. 1977. С. 123–128.

391. Уразов Н.Х. Строение и проектирование тканей. Ташкент, 1971. 260 с.

392. Усенко В.А., Шахова Н.В. Деформация элементарных волокон в процесе кручения комплексных капроновых нитей. Известия ВУЗ. Технология текстильной промышленности. 1967. № 2. С. 23–27.

393. Фирсов А.В., Демидов А.В., Новиков А.Н. Алгоритм выявления неоднородности изображений тканого полотна. Москва, 2010. С. 30–32.

394. Форейт И. Емкостные датчики неэлектрических величин. Москва – Ленинград, 1966. 156 с.

395. Хадсон Р. Инфракрасные системы. Москва, 1973. 534 с.

396. Хакимов О.Ш., Хабибуллаев П.К. Акустические методы и приборы для контроля и исследования ориентированных полимеров. Ташкент, 1990. 268 с.

397. Харкевич А.А. Спектры и анализ. Москва, 1962. 234 с.

398. Хвальковский В.Н. Теория переплетений и анализ тканей. Москва, 1930. 327 с.

399. Хванг Сан-Так, Каммермейер К. Мембранные процессы разделения. Москва, 1981. 464 с.

400. Хенл Х., Мауэ А., Вестпфаль К. Теория дифракции. Москва, 1964. 427с.

401. Хидоятова Р.А., Фаинберг Э.З., Папков С.П. Исследование структуры ацетатных нитей акустическим методом. Скорость распространения ультразвука в нитях. *Химические волокна*. 1975. № 3. С. 18–19.

402. Цидулко Ф.В. Точность пневматического контроля линейных размеров. Москва, 1976. 155 с.

403. Чернобелский Л.Н. К вопросу измерения времени запаздывания. *Радиоизмерительная техника*. 1968. Вып. 8. С. 55–60.

404. Чуприн В.А., Бизюлев А.Н., Коновалов А.А. Особенности ультразвуковой толщинометрии промышленных объектов и изделий. *В мире неразрушающего контроля.* 2008. № 2 (40) С. 12–14.

405. Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Шарапова Е.В.; под ред. Шарапова В.М. Пьезоэлектрические датчики. Москва, 2006. 632 с.

406. Шаталина Д.А. Разработка автоматизированных методов построения комбинированных репсовых переплетений: автореферат дис. на соискание учен. степени кандидата техн. наук: 05.19.02. Москва, 2011. 16 с.

407. Шендеров Е.Л. Прохождение звука через трансверсально-изотропную пластину. *Акуст. журн.* 1984. Т 30, № 1. С. 122–129.

408. Шестов Н.С. Выделение оптических сигналов на фоне случайных помех. Москва, 1967. 347 с.

409. Шкарлет Ю.М. Бесконтактные методы ультразвукового контроля. Москва, 1974. 57 с.

410. Шкунников Ю.П., Васильчикова Н.В. Анализ экспериментальных
методов исследования строения ткани и разработка их классификации. Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 1980. № 1. С. 6–10.

411. Шляхтенко П.Г. Неразрушающие методы оптического контроля структурных параметров волокносодержащих материалов. СПб.: СПГУТД, 2010. 258 с.

412. Шляхтенко П.Г., Труевцев Н.Н. Дифракционный метод контроля геометрической структуры ткани по её фотоизображению. Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2003. № 4. С. 19–24.

413. Шумиловский Н.Н., Мельцер Л.В. Основы теории устройств автоматического контроля с использованием радиоактивных изотопов. Москва, 1957. 207 с.

414. Шумиловский Н.Н., Мельцер Л.В. Применение ядерных излучений в устройствах автоматического контроля технологических процесов. Москва – Ленинград, 1958. 96 с.

415. Шустов Ю.С., Давыдов А.Ф., Курденкова А.В. Экспертиза текстильных волокон и нитей. Монография. Москва, 2016. 193 с.

416. Щербаков В.П., Цыганов И.Б., Дмитриев О.Ю., Полякова Т.И. Теория, методика, результаты определения жесткости нити при изгибе. *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности*. 2006. № 4 (292). С. 104-109.

417. Щербинский В.Г. Алёшин Н.П. Ультразвуковой контроль сварных соединений. Москва, 1989. 340 с.

418. Юденич Г.В. Переплетение и анализ тканей. Москва, 1958. 289 с.

419. Юдин Е.Я., Осипов Г.Л., Федосеева Е.Н. и др. Звукопоглощающие и звукоизоляционные материалы. Москва, 1966. 248 с.

420. Якунин М.А. Разработка технологии и методов обнаружения внешних пороков текстильных материалов с применением локальных бинарных шаблонов и вейлет-анализа: дис. ... канд. техн. наук: 05.19.02/ Москва, 2011. 125 с.

421. Бузов Б. А., Алыменкова Н. Д. Материаловедение в производстве изделий легкой промышленности: учебник для студентов вузов. Москва, 2004. 448 с.

422. Gloy Y.-S., Gries T., Spies G. (2013). Non Destructive Testing of Fabric

Weight in the Weaving Process. 13th International Symposium on Nondestructive Characterization of Materials (NDCM-XIII), 20-24 May 2013, Le Mans, France. NDT.net Issue: 2014-04.

423. Hu Xintong, Zhang Yujing, Meng Zhuo, Sun Yize (2019). Tension modeling and analysis of braiding carriers during radial-direction and axial-direction braiding, *The Journal of The Textile Institute*, P 1-12.

424. Кандрин Ю.В., Цымбалист О.В., Воробьев Н.П. Скорость распространения ультразвуковых колебаний в волоконной среде. Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2011. № 1(75). С. 95–98.

425. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. Москва, 1987. 248 с.

426. Васильченко В.Н. Прибой уточной нити. Москва, 1993. 192 с.

427. Щербань В.Ю., Волков О.И., Щербань Ю.Ю. Математические модели в САПР оборудования и технологических процессов легкой и текстильной промышленности. Киев, 2003. 588 с.

428. Щербань В.Ю., Хомяк О.Н., Щербань Ю.Ю. Механика нити. Киев, 2002. 196 с. додатки

# Додаток А **ДОСЛІДЖУВАНІ ЗРАЗКИ ТКАНИН**



Рис. А.1. Досліджувані зразки тканин з показаною їх товщиною та умовними межами наскрізних пор у найширшому і найвужчому місцях:

а – тканина № 2.1 з поверхневою густиною  $m_s = 110 \ \text{г/m}^2$ ; б – тканина № 2.3 з поверхневою густиною  $m_s = 232 \ \text{г/m}^2$ ; в – тканина № 3.2 з поверхневою густиною  $m_s = 175 \ \text{г/m}^2$ 



Рис. А.2. Досліджувані зразки тканин з показаною їх товщиною та умовними межами наскрізних пор у найширшому і найвужчому місцях:

а – тканина № 3.3 з поверхневою густиною  $m_s = 255$  г/м<sup>2</sup>; б – тканина № 4.1 з поверхневою густиною  $m_s = 185$  г/м<sup>2</sup>; в – тканина № 4.2 з поверхневою густиною  $m_s = 25$  г/м<sup>2</sup>



Рис. А.3. Досліджувані зразки тканин з показаною їх товщиною та умовними межами наскрізних пор у найширшому і найвужчому місцях:

а – тканина № 4.3 з поверхневою густиною  $m_s = 192$  г/м<sup>2</sup>; б – тканина № 5.1 з поверхневою густиною  $m_s = 143$  г/м<sup>2</sup>; в – тканина № 6 з поверхневою густиною

$$m_s = 376 \text{ г/m}^2$$



Рис. А.4. Досліджувані зразки тканин з показаною їх товщиною та умовними межами наскрізних пор у найширшому і найвужчому місцях:

б

2

tr

117, 112

а – тканина № 6.1 з поверхневою густиною  $m_s = 114$  г/м<sup>2</sup>; б – тканина № 7.1 з поверхневою густиною  $m_s = 119 \text{ г/м}^2$ 

# Додаток Б

# РОЗРАХУНКИ В СИСТЕМІ МАТНСАД

# Б.1. Розрахунок значень комплексних коефіцієнів проходження *W* та відбиття *V* для двошарових матеріалів без пор

 $z1:=410.44 \qquad z2:=131600 \qquad z3:=131600 \qquad z4:=410.44 \qquad h1:=0.000025 \qquad h2:=0.000030$ 

$$K3 := 1394.198$$
  $K2 := 1394.198$   $K23 := \frac{(K2 + K3)}{2}$   $\alpha := 15$ 

$$\begin{split} & \text{W12} \coloneqq \frac{z1 \cdot 2}{(z1 + z2)} \qquad \text{W23} \coloneqq \frac{z2 \cdot 2}{(z2 + z3)} \qquad \text{W32} \coloneqq \frac{z3 \cdot 2}{(z3 + z2)} \qquad \text{W24} \coloneqq \frac{z2 \cdot 2}{(z2 + z4)} \qquad \text{W34} \coloneqq \frac{z3 \cdot 2}{(z3 + z4)} \\ & \text{V21} \coloneqq \frac{(z2 - z1)}{(z2 + z1)} \qquad \text{V23} \coloneqq \frac{(z2 - z3)}{(z2 + z3)} \qquad \text{V32} \coloneqq \frac{(z3 - z2)}{(z3 + z2)} \qquad \text{V24} \coloneqq \frac{(z2 - z4)}{(z2 + z4)} \qquad \text{V34} \coloneqq \frac{(z3 - z4)}{(z3 + z4)} \\ & \text{W9} \coloneqq \frac{\left[ \frac{\text{W12} \cdot \text{W23} \cdot \text{W34} \cdot e^{\frac{z}{1} \left[ \left( 2\pi \cdot \frac{75000}{338} \right) + i \cdot a \right] \cdot (h1 + h2) \right]}{1 - \left[ \left[ 1 - (1 - \text{V21} \cdot \text{V34}) \cdot (1 + \text{V23}) \cdot (1 + \text{V32}) \right] \cdot e^{\frac{z2}{1} \left[ \left( 2\pi \cdot \frac{75000}{338} \right) + i \cdot a \right] \cdot (h1 + h2) \right]} \end{split}$$

W9 = 0.007422088029612 + 0.080742359746645i

 $\sqrt{0.007422088029612^2 + 0.080742359746645^2} = 0.081082772819977$ 

$$W10 := W12 \cdot W23 \cdot W34 \cdot \sum_{n=0}^{20000} \left[ \left[ 1 - (1 - V21 \cdot V34) \cdot (1 + V23) \cdot (1 + V32) \right] \right]^n \cdot e^{-(2 \cdot n + 1) \cdot \left[ \left( -i \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{7000}{338} \right) + \alpha \right] (h1 + h2) \cdot (1 + V23) \cdot (1 + V32) \right]^n \cdot e^{-(2 \cdot n + 1) \cdot \left[ \left( -i \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{7000}{338} \right) + \alpha \right] \cdot (h1 + h2) \cdot (1 + V32) \cdot (1 + V32) \cdot (1 + V32) \cdot (1 + V32) \right]^n \cdot e^{-(2 \cdot n + 1) \cdot \left[ \left( -i \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{7000}{338} \right) + \alpha \right] \cdot (h1 + h2) \cdot (1 + V32) \cdot (1 + V32)$$

W10 = 0.007422088029612 + 0.080742359746645i

$$W10 := \frac{z1 \cdot 2}{(z1 + z2)} \cdot \frac{z2 \cdot 2}{(z2 + z3)} \cdot \frac{z3 \cdot 2}{(z3 + z4)} \cdot \sum_{n=0}^{20000} \left[ \left[ 1 - \left[ 1 - \frac{(z2 - z1)}{(z2 + z1)} \cdot \frac{(z3 - z4)}{(z3 + z4)} \right] \cdot \left[ 1 + \frac{(z2 - z3)}{(z2 + z3)} \right] \cdot \left[ 1 + \frac{(z3 - z2)}{(z3 + z2)} \right] \right]^n \cdot e^{-(2 \cdot n + 1) \cdot \left[ \left( -i \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{75000}{338} \right) + \alpha \right] \cdot (h1 + h2)}$$

W10 = 0.007422088029612 + 0.080742359746645i

$$W10 := \frac{4}{1 + \left(\frac{z3}{2 \cdot z2}\right) + \left(\frac{z2}{2 \cdot z1}\right) + \left(\frac{z1}{2 \cdot z1}\right) + \left(\frac{z1}{2 \cdot z3}\right) + \left(\frac{z1}{$$

W10 = 0.007422088029612 + 0.080742359746645i

$$W10 := \frac{4}{1 + \left(\frac{z2}{2 + z3}\right) + \left(\frac{z3}{2 + z2}\right) + \left(\frac{z2 + z3}{2 + z1}\right) + \left(\frac{z2}{2 + z1}\right) + \left(\frac$$

W10 = 0.007422159778157 + 0.080743140274554i

1 - (0.007422159778157 + 0.080743140274554i) = 0.992577840221843 - 0.080743140274554i

$$VL := 1 - \left[1 - \frac{[z2 \cdot (z3 - z1) + z1 \cdot (z1 - z3)]}{[z2 \cdot (z3 + z1) + z1 \cdot (z1 + z3)]}\right] \cdot \left[1 + \frac{(z2 - z3)}{(z2 + z3)}\right] \cdot \left[1 + \frac{(z3 - z2)}{(z3 + z2)}\right]$$

VL = 0.987602075069793

$$V12 := \left[ \sqrt{VL} \cdot \sum_{n=0}^{2000} VL^{n} \cdot e^{-2 \cdot n \left[ \left( -i \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{75000}{338} \right) + \alpha \right] (h1 + h2)} \right] - \left[ \sqrt{VL} \cdot \sum_{n=0}^{2000} VL^{n} \cdot e^{-(2 \cdot n + 2) \cdot \left[ \left( -i \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{75000}{338} \right) + \alpha \right] (h1 + h2)} \right] \\ V12 = 0.99257530651475 - 0.080503087356447i$$

# Б.2. Розрахунок амплітуди та визначення часу затримки імпульсного ультразвукового сигналу, що пройшов контрольований матеріал, та сигналу, який відбився від його поверхні



# Б.З. Розрахунок амплітудних параметрів ультразвукових хвиль, які розповсюджуються у хвилеводі з текстильним матеріалом всередині, та хвиль, що відбиваються від текстилю при контролі натягу ниток основи на ткацькому верстаті

 $-W12 \cdot W23 \cdot V34 \cdot W32 \cdot W21 \cdot e^{2 \cdot i \cdot (K2 \cdot h2 + K3 \cdot h3)} = 0.000026745825741 + 0.000052958602061i$  $-\left[ \text{V12} + \text{W12} \cdot \text{W23} \cdot \text{V34} \cdot \text{W32} \cdot \text{W21} \cdot e^{2 \cdot i \left( \text{K2} \cdot h2 + \text{K3} \cdot h3 \right)} \cdot \sum_{N=0}^{0} \left( \text{V32} \cdot \text{V34} \cdot e^{2 \cdot i \cdot \text{K3} \cdot h3} \right)^{N} \right] = 0.999903845382599 + 0.000052958602061i$  $-\left[V_{12} + W_{12} \cdot W_{23} \cdot V_{34} \cdot W_{32} \cdot W_{21} \cdot e^{2 + (K2 \cdot h_2 + K3 \cdot h_3)} \cdot \sum_{N=0}^{1} (V_{32} \cdot V_{34} \cdot e^{2 + K3 \cdot h_3})^N\right] = 0.999904177819489 + 0.000055551946031i$  $W21T \coloneqq \frac{-2 \cdot \rho 1 \cdot zt \cdot sin(2 \cdot \pi \cdot 0.25)}{\rho 2 \cdot \left[z2 \cdot \left(cos(2 \cdot \pi \cdot 0.25)\right)^2 + zt \cdot \left(sin(2 \cdot \pi \cdot 0.25)\right)^2 + z1\right]}$ W21T = -0.000877007154822  $W12L := \frac{-2 \cdot \rho 2 \cdot (z1 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 0.02468))}{\rho 1 \cdot \left[z2 \cdot (\cos(2 \cdot \pi \cdot 0.25))^2 + zt \cdot (\sin(2 \cdot \pi \cdot 0.25))^2 + z1\right]}$ W12L = -0.153530348307317  $W12T := \frac{-2 \cdot \rho 2 \cdot z1 \cdot sin(2 \cdot \pi \cdot 0.02468)}{\rho 1 \cdot \left[z2 \cdot (cos(2 \cdot \pi \cdot 0.25))^2 + zt \cdot (sin(2 \cdot \pi \cdot 0.25))^2 + z1\right]}$ W12T = -0.024000483808471  $N := \left[\frac{\left[z2 \cdot \left(\cos(2 \cdot \pi \cdot 0.25)\right)^2\right]}{z1 \cdot \sin[K2 \cdot (h2 + h3) \cdot \cos(\pi \cdot 0.49)]}\right] + \frac{\left[zt \cdot \left(\sin(2 \cdot \pi \cdot 0.25)\right)^2\right]}{\left[z1 \cdot \sin[Kt \cdot (h2 + h3) \cdot \cos(\pi \cdot 0.25)]\right]}$  $\mathbf{M} \coloneqq \begin{pmatrix} \underline{z2} \\ \underline{z1} \end{pmatrix} \cdot \left[ \frac{\left( \cos(2 \cdot \pi \cdot 0.25) \right)^2}{\tan[\mathbf{K}2 \cdot (\mathbf{h}2 + \mathbf{h}3) \cdot \cos(\pi \cdot 0.49)]} \right] + \left( \underline{z1} \\ \underline{z1} \right) \cdot \left[ \frac{\left( \sin(2 \cdot \pi \cdot 0.25) \right)^2}{\tan[\mathbf{K}t \cdot (\mathbf{h}2 + \mathbf{h}3) \cdot \cos(\pi \cdot 0.25)]} \right]$ 

W1 := 
$$\frac{2 \cdot N}{2 \cdot M - i \cdot (N^2 - M^2 + 1)}$$
 V1 :=  $\frac{\left[i \cdot (M^2 - N^2 + 1)\right]}{\left[2 \cdot M - i \cdot (N^2 - M^2 + 1)\right]}$ 

W1 = 0.000000579930595 + 0.000763057557738i V1 = 0.999999420064757 - 0.000760008537678i

$$= \frac{\left[\frac{W12L \cdot W21T \cdot e^{\frac{i}{2} \cdot \frac{(Kt + K2) \cdot (h2 + h3)}{2}}{1 - V21L \cdot V21L \cdot e^{\frac{2 \cdot i}{2} \cdot \frac{(Kt + K2) \cdot (h2 + h3)}{2}}\right]}{1 - V21L \cdot V21L \cdot e^{\frac{2 \cdot i}{2} \cdot \frac{(Kt + K2) \cdot (h2 + h3)}{2}}$$

$$V := \frac{\left[\frac{V21L - V21L \cdot e^{\frac{2 \cdot i}{2} \cdot \frac{(Kt + K2) \cdot (h2 + h3)}{2}}{1 - V21L \cdot V21L \cdot e^{\frac{2 \cdot i}{2} \cdot \frac{(Kt + K2) \cdot (h2 + h3)}{2}}\right]}$$

W = 0.000000512466133 + 0.000713153797756i

w

-V12 = 0.999877099556858

V = 0.999999481304844 - 0.000718590952578i

h2 := 0.002	h3 := 0.002	! i≍	√-1	ρ <b>1</b> >	= 1.184	ρ2 := 270	:= 2700			
$\frac{\sin(\pi \cdot 0.45)}{\sin(\pi \cdot 0.01707)} = 1$	8.427 <u>sin</u>	n(π · 0.1626 (π · 0.0170	) 7) = 9.121	$\frac{\sin(\pi)}{\sin(\pi)}$	· 0.45) · 0.45) =	$1 \frac{\sin(s)}{\sin(s)}$	π · 0.1626 π · 0.1626	$\frac{b}{b} = 1$		
$\frac{6320}{343} = 18.426$	<u>31:</u> 34	$\frac{30}{3} = 9.125$		<u>6320</u> 6320	= 1	3 3	$\frac{130}{130} = 1$			
$\frac{406}{343} = 1.184$	<u>170</u>	$\frac{064000}{5320} = 27$	00 3	2700 - 313	0 = 84510	100	z3 := -	1372 cos(π · 0	00 .01707)	
$\mathrm{K1} \coloneqq 2 \cdot \pi \cdot \frac{75000}{343}$	K2 := 2	$\cdot \pi \cdot \frac{75000}{6320}$	K	t := 2 · π	75000 3130	K4	:= 2 · π ·	75000 343		
$z1 := \frac{406}{\cos(\pi \cdot 0.017)}$	(07) zź	$l := \frac{17064}{\cos(\pi + 1000)}$	0.45)	zt := —	8451000 os(π · 0.1	0 626) z4	t := cos(:	406 π · 0.0170	07)	
W21xv := $\frac{1}{\rho^2}$	$\frac{2 \cdot \rho 1 \cdot zt}{zt \cdot (\sin(2))}$	$\frac{\sin(2 \cdot \pi \cdot 0)}{\pi \cdot 0.25}$	0.25) <sup>2</sup> + z1]	W31	$l := \frac{2 \cdot z}{z1 + z}$	3 z3	cos	w := 0.25		
W12xv := $\frac{1}{\rho 1}$	-2 · [zt · (sin(2	ρ2 · z1 · π · 0.25))	<sup>2</sup> + z1	W13	$B := \frac{2 \cdot z}{z1 + z}$	1 z3	V31 :=	$\frac{(z^3 - z^1)}{(z^1 + z^3)}$	<u>)</u> ))	
$V21xv := \frac{\left[zt \cdot zt\right]}{\left[zt \cdot zt\right]}$	$(\sin(2 \cdot \pi \cdot (\sin(2 \cdot \pi + ())))))))))))))))))))))))))))))))))$	$(0.25))^2 - z1$ $(0.25))^2 + z1$	]	V32a	$zv := \frac{\left[z3\right]}{\left[zt\right]}$	$- zt \cdot (si$ $\cdot (sin(2 \cdot$	$\frac{n(2 \cdot \pi \cdot \pi \cdot \pi \cdot 0.25)}{\pi \cdot 0.25}$	$\frac{(0.25)^2}{(0.25)^2 + z^3}$		
h3 := 0,0.000010.01										
$W0(h3) := W13 \cdot W31 \cdot V32xv^{2 \cdot 0} \cdot cos[(2 \cdot 0 + 1) \cdot K3 \cdot h3 \cdot cosv]$										
$W1(h3) := W13 \cdot W31 \cdot V32xv^{2 \cdot 1} \cdot cos[(2 \cdot 1 + 1) \cdot K3 \cdot h3 \cdot cosv]$										
$W2(h3) := W13 \cdot W31 \cdot V32xv^{2\cdot 2} \cdot \cos[(2\cdot 2 + 1) \cdot K3 \cdot h3 \cdot \cos v]$										
$W3(h3) := W13 \cdot W31 \cdot V32xv^{2\cdot 3} \cdot cos[(2 \cdot 3 + 1) \cdot K3 \cdot h3 \cdot cosv]$										
W4(h3) := W13 · W31 · V32xv <sup>2.4</sup> · cos[(2 · 4 + 1) · K3 · h3 · cosv]										
	W5(h3) :=	W13 · W	31 · V32x	v <sup>2-5</sup> · cos[	(2 · 5 + 1	l) - K3 - 1	h3 · cosv	]		
$W6(h3) := W13 \cdot W31 \cdot V32xv^{e^{i\varphi}} \cdot \cos[(2 \cdot 6 + 1) \cdot K3 \cdot h3 \cdot \cos v]$										
0.015									Π	



-0.015

5.10-4

0.0015

0.002 0.0025 h3 0.003 0.0035 0.004 0.0045

0.001



5.10-4

0.001

0.0015

0.002 0.0025 h3 0.003

0.0035 0.004 0.0045

0





h3 := 0,0.00001..0.01  $V0(h3) := \left[ \begin{array}{ccc} W13 \cdot V32xv \cdot W31 \cdot V32xv^{2 \cdot 0} \cdot \cos\left[(2 \cdot 0 + 2) \cdot K3 \cdot h3 \cdot \cos v\right] \right]^2$  $\mathrm{V1}(h3) \coloneqq \left[ \begin{array}{cc} \mathrm{W13} \cdot \mathrm{V32xv} \cdot \mathrm{W31} \cdot \mathrm{V32xv}^{2 \cdot 1} \cdot \cos \bigl[ (2 \cdot 1 + 2) \cdot \mathrm{K3} \cdot h3 \cdot \mathrm{cosv} \bigr] \right]^2$  $V2(h3) := \left[ W13 \cdot V32xv \cdot W31 \cdot V32xv^{2\cdot 2} \cdot \cos\left[(2 \cdot 2 + 2) \cdot K3 \cdot h3 \cdot \cos v\right] \right]^2$  $V3(h3) := \left[ W13 \cdot V32xv \cdot W31 \cdot V32xv^{2\cdot 3} \cdot \cos\left[(2 \cdot 3 + 2) \cdot K3 \cdot h3 \cdot \cos v\right] \right]^2$  $\mathrm{V4}(h3) \coloneqq \left[ \begin{array}{cc} \mathrm{W13} \cdot \mathrm{V32xv} \cdot \mathrm{W31} \cdot \mathrm{V32xv}^{2\cdot 4} \cdot \cos \bigl[ (2 \cdot 4 + 2) \cdot \mathrm{K3} \cdot h3 \cdot \mathrm{cosv} \bigr] \right]^2$ 

180 · 0.25 = 45

 $\frac{\sin(\pi \cdot 0.01707)}{2} = 0.054$  $\frac{\sin(\pi \cdot 0.01707)}{\sin(\pi \cdot 0.1626)} = 0.11 \qquad \pi \cdot 0.45 \cdot \frac{180}{\pi} = 81$  $sin(\pi \cdot 0.45)$ 

#### продовження додатку Б





# Б.4. Розрахунок амплітудних параметрів ультразвукових хвиль, які взаємодіють з текстильною ниткою при дії на неї натягу



 $\frac{2 \cdot \rho_1 \cdot c_1 \cdot \sqrt{\frac{1}{\sqrt{Wmtag^2}} - 1}}{\pi^2 \cdot f \cdot \rho_2 \cdot convag} = 0.11 \qquad \qquad \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{r \cdot \pi^2 \cdot f \cdot \rho_2 \cdot convag}{2 \cdot \rho_1 \cdot c_1}\right)^2}} = 0.998$ 





z



483

# Додаток В

# ПРОЕКТУВАННЯ СКАНУЮЧИХ СИСТЕМ ТЕКСТИЛЬНИХ ПОЛОТЕН



б

Рис. В.1. Проектування складових частин скануючих систем текстильних полотен, які реалізовані на мікроконтролерах

а – електрична схема керуючої частини скануючої системи текстильних полотен;

б – проект друкованих плат для двох скануючих систем



a



- Рис. В.2. Проектування заготовок складових частин хвилеводу для 3D друку, у якому ультразвукові перетворювачі знаходяться по різні сторони від контрольованої нитки
- а загальний вигляд зборки складових частин хвилеводу; б хвилевід для нитки у перерізі



a



Рис. В.3. Проектування заготовок складових частин хвилеводу для 3D друку, у якому ультразвукові перетворювачі знаходяться по одну сторону від контрольованої нитки

а – загальний вигляд зборки складових частин хвилеводу; б – хвилевід для нитки у перерізі

# Додаток Д

# ВИГОТОВЛЕННЯ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ ДЛЯ СКАНУЮЧИХ СИСТЕМ ТЕКСТИЛЬНИХ ПОЛОТЕН ЗА ДОПОМОГОЮ ВЕРСТАТА З ЧПК



## Д.1. Керування верстатом з ЧПК при фрезеруванні плат



б

Рис. Д.1. Проект комплекту друкованих плат скануючої системи в програмі JCNC з відображенням g-code:

 а – загальний вигляд проекту друкованих плат скануючої системи в програмі
 JCNC; б – симуляція процесу фрезерування плат з траєкторією руху ріжучого інструменту в програмі JCNC





Рис. Д.2. Завершальні другий та третій етапи процесу фрезерування плат скануючих систем текстильних полотен:

а – другий етап виготовлення плат - наскрізне прорізання отворів для виводів компонентів плат; б – третій етап виготовлення плат - прорізання контурів плат

489

# Д.2. Частина створеного G-code контурів доріжок плат

%

(Header)

(Generated by gcodetools from Inkscape.)

(Using default header. To add your own header create file "header" in the output dir.)

M3

(Header end.)

G21 (All units in mm)

(Start cutting path id: path3347) (Change tool to Default tool)

G00 Z5.000000

G00 X65.367089 Y-0.259248

G01 Z-0.400000 F100.0(Penetrate)

G01 X0.597090 Y-0.259248 Z-0.400000 F400.000000

G01 X0.597090 Y81.020763 Z-0.400000

G01 X0.597090 Y162.300764 Z-0.400000

G01 X65.367089 Y162.300764 Z-0.400000

G01 X130.137090 Y162.300764 Z-0.400000

G01 X130.137090 Y81.020763 Z-0.400000

G01 X130.137090 Y-0.259248 Z-0.400000

G01 X65.367089 Y-0.259248 Z-0.400000

G01 X65.367089 Y-0.259248 Z-0.400000

G00 Z5.000000

(End cutting path id: path3347)

(Start cutting path id: path3347)

(Change tool to Default tool)

G00 Z5.000000

G00 X65.367089 Y0.022974

G01 Z-0.400000 F100.0(Penetrate) G01 X129.854868 Y0.022974 Z-0.400000 F400.000000 G01 X129.854868 Y81.020763 Z-0.400000 G01 X129.854868 Y162.018542 Z-0.400000 G01 X65.367089 Y162.018542 Z-0.400000 G01 X0.879312 Y162.018542 Z-0.400000 G01 X0.879312 Y81.020763 Z-0.400000 G01 X0.879312 Y0.022974 Z-0.400000 G01 X65.367089 Y0.022974 Z-0.400000 G01 X65.367089 Y0.022974 Z-0.400000

G00 Z5.000000

(End cutting path id: path3347)

(Start cutting path id: path3347) (Change tool to Default tool)

G00 Z5.000000

G00 X57.817645 Y14.163436

G01 Z-0.400000 F100.0(Penetrate) G02 X57.015338 Y14.443534 Z-0.400000 I0.045164 J1.418472 F400.000000 G02 X54.995423 Y16.264355 Z-0.400000 I8.681690 J11.661776 G01 X53.090423 Y18.335956 Z-0.400000 G01 X53.090423 Y25.125026 Z-0.400000 G01 X53.090423 Y31.914097 Z-0.400000 G01 X47.163756 Y31.914097 Z-0.400000 G01 X41.237089 Y31.914097 Z-0.400000 G01 X41.237089 Y30.484432 Z-0.400000 G02 X41.133854 Y29.080654 Z-0.400000 I-9.595751 J-0.000000

491

G02 X40.944939 Y28.508877 Z-0.400000 I-1.737360 J0.256925 G02 X40.500843 Y28.216638 Z-0.400000 I-0.491189 J0.262877 G02 X34.510272 Y27.962985 Z-0.400000 I-5.990571 J70.613549 G02 X28.433475 Y28.121645 Z-0.400000 I-0.000000 J116.452418 G02 X28.029090 Y28.301652 Z-0.400000 I0.032220 J0.616610 G02 X27.836472 Y28.700814 Z-0.400000 I0.475521 J0.475521 G02 X27.690423 Y31.264985 Z-0.400000 I22.436492 J2.564171 G01 X27.690423 Y33.889652 Z-0.400000 G01 X28.678200 Y33.889652 Z-0.400000 G01 X29.665978 Y33.889652 Z-0.400000 G01 X29.665978 Y31.914097 Z-0.400000 G01 X29.665978 Y29.938541 Z-0.400000 G01 X34.288725 Y29.938541 Z-0.400000 G01 X38.911471 Y29.938541 Z-0.400000 G01 X39.035578 Y31.654300 Z-0.400000 G02 X39.309537 Y33.280357 Z-0.400000 I8.696098 J-0.629017 G02 X39.563387 Y33.625534 Z-0.400000 I0.568639 J-0.152256 G02 X40.002059 Y33.760478 Z-0.400000 I0.467197 J-0.738269 G02 X47.516534 Y33.885331 Z-0.400000 I7.648546 J-234.141326 G01 X55.065978 Y33.889649 Z-0.400000 G01 X55.065978 Y26.596606 Z-0.400000 G01 X55.065978 Y19.303561 Z-0.400000 G01 X56.900423 Y17.542037 Z-0.400000 G02 X58.503819 Y15.682055 Z-0.400000 I-9.038843 J-9.413025 G02 X58.734867 Y14.957305 Z-0.400000 I-1.021174 J-0.724751 G02 X58.479254 Y14.398009 Z-0.400000 I-0.739691 J0.000000 G02 X57.817645 Y14.163433 Z-0.400000 I-0.630789 J0.728803 G01 X57.817645 Y14.163436 Z-0.400000 G00 Z5.000000

(End cutting path id: path3347)

(Change tool to Default tool)

G00 Z5.000000

G00 X59.158201 Y31.914097

G01 Z-0.400000 F100.0(Penetrate)

G01 X58.170423 Y31.914097 Z-0.400000 F400.000000 G01 X58.170423 Y42.297557 Z-0.400000 G01 X58.170423 Y52.681018 Z-0.400000 G01 X56.900423 Y53.927430 Z-0.400000 G01 X55.630423 Y55.173842 Z-0.400000 G01 X55.630423 Y58.642858 Z-0.400000 G01 X55.630423 Y62.111874 Z-0.400000 G01 X49.703756 Y62.111874 Z-0.400000 G01 X43.777089 Y62.111874 Z-0.400000 G01 X43.777089 Y60.015367 Z-0.400000 G02 X43.601728 Y57.991496 Z-0.400000 I-11.766606 J0.000000 G02 X43.333597 Y57.475367 Z-0.400000 I-0.950162 J0.165902 G02 X42.807176 Y57.232085 Z-0.400000 I-0.593884 J0.593880 G02 X37.830264 Y57.031874 Z-0.400000 I-4.976912 J61.759065 G01 X32.770423 Y57.031874 Z-0.400000 G01 X32.770423 Y59.669244 Z-0.400000 G02 X32.990122 Y62.209129 Z-0.400000 I14.791298 J0.000000 G02 X33.316223 Y62.800559 Z-0.400000 I1.022657 J-0.178253 G03 X33.628152 Y63.400977 Z-0.400000 I-0.651158 J0.719524 G03 X33.951223 Y67.935110 Z-0.400000 I-43.469080 J5.375886 G02 X34.230991 Y72.468225 Z-0.400000 I53.540260 J-1.029124 G02 X34.463756 Y72.842810 Z-0.400000 I0.502191 J-0.052446 G02 X34.923189 Y72.985172 Z-0.400000 I0.494773 J-0.784218 G02 X41.579939 Y73.114220 Z-0.400000 I6.771497 J-177.542806 G02 X48.110415 Y72.847269 Z-0.400000 I0.050809 J-78.768710 G02 X48.584522 Y72.536057 Z-0.400000 I-0.048787 J-0.591062 G02 X48.718632 Y71.971516 Z-0.400000 I-1.001911 J-0.536209 G02 X48.559884 Y71.548279 Z-0.400000 I-0.689409 J0.017194

G02 X48.134809 Y71.331918 Z-0.400000 I-0.463308 J0.384496

G02 X42.190312 Y71.142986 Z-0.400000 I-5.944497 J93.423201

G01 X36.157089 Y71.142986 Z-0.400000

G01 X36.157089 Y67.072418 Z-0.400000

G02 X35.873462 Y63.105303 Z-0.400000 I-27.885964 J-0.000000

G02 X35.451534 Y62.163343 Z-0.400000 I-1.858883 J0.267166

G03 X34.921130 Y61.260952 Z-0.400000 I2.393171 J-2.013723

G03 X34.745978 Y60.307244 Z-0.400000 I2.508914 J-0.953708

G01 X34.745978 Y59.289652 Z-0.400000

G01 X38.132645 Y59.289652 Z-0.400000

G01 X41.519312 Y59.289652 Z-0.400000

G01 X41.519312 Y61.265208 Z-0.400000

G02 X41.726741 Y63.154843 Z-0.400000 I8.710792 J0.000000

G02 X42.083756 Y63.805208 Z-0.400000 I1.295203 J-0.287823

G02 X42.754236 Y64.113663 Z-0.400000 I0.752280 J-0.752280

G02 X49.403161 Y64.369652 Z-0.400000 I6.648925 J-86.219731

G02 X56.135377 Y64.245816 Z-0.400000 I0.000000 J-183.055953

G02 X56.882050 Y64.094415 Z-0.400000 I-0.086189 J-2.341973

G01 X57.605978 Y63.819178 Z-0.400000

G01 X57.605978 Y59.919843 Z-0.400000

G01 X57.605978 Y56.020509 Z-0.400000

G01 X58.875978 Y54.774097 Z-0.400000

G01 X60.145978 Y53.527685 Z-0.400000

G01 X60.145978 Y42.720891 Z-0.400000

G01 X60.145978 Y31.914097 Z-0.400000

G01 X59.158201 Y31.914097 Z-0.400000

G01 X59.158201 Y31.914097 Z-0.400000

G00 Z5.000000

(End cutting path id: path3347)

(Start cutting path id: path3347) (Change tool to Default tool)

G00 Z5.000000

G00 X59.152999 Y57.031874

G01 Z-0.400000 F100.0(Penetrate) G01 X58.160020 Y57.031874 Z-0.400000 F400.000000 G01 X58.235777 Y63.588252 Z-0.400000 G01 X58.311534 Y70.144627 Z-0.400000 G01 X60.428201 Y71.620119 Z-0.400000 G02 X62.633802 Y72.814768 Z-0.400000 I6.396568 J-9.176207 G02 X64.097089 Y73.102754 Z-0.400000 I1.481488 J-3.666051 G02 X65.621975 Y73.014890 Z-0.400000 I0.056499 J-12.295686 G02 X66.026781 Y72.870637 Z-0.400000 I-0.116225 J-0.966267 G02 X66.260513 Y72.564984 Z-0.400000 I-0.297923 J-0.470014 G02 X66.309003 Y71.957736 Z-0.400000 I-1.332601 J-0.411972 G02 X65.990371 Y71.519152 Z-0.400000 I-0.572603 J0.080962 G02 X64.642275 Y71.142986 Z-0.400000 I-1.692833 J3.463019 G03 X63.142044 Y70.802334 Z-0.400000 I0.515972 J-5.746187 G03 X61.615662 Y70.014097 Z-0.400000 I2.514107 J-6.740439 G01 X60.160533 Y69.026319 Z-0.400000 G01 X60.153251 Y63.029097 Z-0.400000 G01 X60.145970 Y57.031874 Z-0.400000 G01 X59.152991 Y57.031874 Z-0.400000 G01 X59.152999 Y57.031874 Z-0.400000 G00 Z5.000000

(End cutting path id: path3347)

(Start cutting path id: path3347) (Change tool to Default tool)

G00 Z5.000000 G00 X64.376549 Y81.362193 G01 Z-0.400000 F100.0(Penetrate)

G02 X62.597903 Y81.431078 Z-0.400000 I-0.476621 J10.690559 F400.000000

G02 X62.189326 Y81.630304 Z-0.400000 I0.084915 J0.692717

G02 X61.985439 Y82.040846 Z-0.400000 I0.508373 J0.508373

G02 X61.839312 Y84.178590 Z-0.400000 I15.563832 J2.137745

G01 X61.839312 Y86.376859 Z-0.400000

G01 X49.915423 Y86.450479 Z-0.400000

G01 X37.991534 Y86.524097 Z-0.400000

G01 X37.918670 Y102.861287 Z-0.400000

G02 X38.002214 Y119.142410 Z-0.400000 I848.747064 J3.785548

G02 X38.164892 Y119.582953 Z-0.400000 I0.706002 J-0.010395

G02 X38.569743 Y119.784798 Z-0.400000 I0.431135 J-0.357812

G02 X46.351645 Y119.967430 Z-0.400000 I7.781902 J-165.701125

G01 X54.219312 Y119.967430 Z-0.400000

G01 X54.219312 Y121.961539 Z-0.400000

G02 X54.331996 Y123.927392 Z-0.400000 I17.204115 J-0.000000

G02 X54.511462 Y124.501539 Z-0.400000 I1.595078 J-0.183466

G02 X54.924208 Y124.846115 Z-0.400000 I0.633051 J-0.338803

G02 X56.204796 Y125.047430 Z-0.400000 I1.280588 J-3.972320

G01 X57.605978 Y125.047430 Z-0.400000

G01 X57.605978 Y124.059653 Z-0.400000

G02 X57.367388 Y123.310465 Z-0.400000 I-1.295540 J0.000000

G02 X56.905822 Y123.071875 Z-0.400000 I-0.461566 J0.327168

G01 X56.205665 Y123.071875 Z-0.400000

G01 X56.129711 Y116.792430 Z-0.400000

G01 X56.053756 Y110.512986 Z-0.400000

G01 X54.193175 Y110.430549 Z-0.400000

G02 X52.411074 Y110.525314 Z-0.400000 I-0.406142 J9.166291

G02 X51.986367 Y110.765287 Z-0.400000 I0.102800 J0.677750

G02 X51.820682 Y111.200695 Z-0.400000 I0.554570 J0.460256

G02 X51.951879 Y111.764946 Z-0.400000 I1.113722 J0.038421

G02 X52.375351 Y112.160899 Z-0.400000 I0.794332 J-0.425110

G02 X53.241462 Y112.347430 Z-0.400000 I0.866111 J-1.917523

G01 X54.219312 Y112.347430 Z-0.400000

G01 X54.219312 Y115.169653 Z-0.400000 G01 X54.219312 Y117.991875 Z-0.400000 G01 X47.022645 Y117.991875 Z-0.400000 G01 X39.825978 Y117.991875 Z-0.400000 G01 X39.825978 Y103.175208 Z-0.400000 G01 X39.825978 Y88.358541 Z-0.400000 G01 X51.374006 Y88.358541 Z-0.400000 G02 X62.906778 Y88.276191 Z-0.400000 I0.000000 J-807.592937 G02 X63.368451 Y88.187235 Z-0.400000 I-0.019166 J-1.341974 G02 X63.619979 Y87.881970 Z-0.400000 I-0.143804 J-0.374747 G02 X63.814867 Y85.647235 Z-0.400000 I-12.715107 J-2.234735 G03 X63.947600 Y83.411277 Z-0.400000 I18.899297 J-0.000000 G03 X64.097089 Y83.278541 Z-0.400000 I0.149489 J0.017811 G03 X64.245248 Y83.412603 Z-0.400000 I0.000000 J0.148900 G03 X64.379312 Y86.096685 Z-0.400000 I-26.801877 J2.684082 G01 X64.379312 Y88.914830 Z-0.400000 G01 X55.700978 Y88.989463 Z-0.400000 G01 X47.022645 Y89.064097 Z-0.400000 G01 X46.927398 Y89.737736 Z-0.400000 G02 X46.975888 Y90.344984 Z-0.400000 I1.381092 J0.195276 G02 X47.209620 Y90.650637 Z-0.400000 I0.531655 J-0.164360 G02 X47.620294 Y90.775589 Z-0.400000 I0.431453 J-0.680690 G02 X56.654201 Y90.894220 Z-0.400000 I9.204013 J-356.864974 G02 X65.633619 Y90.711694 Z-0.400000 I0.103151 J-215.888364 G02 X66.045614 Y90.507776 Z-0.400000 I-0.023256 J-0.565142 G02 X66.218937 Y90.064052 Z-0.400000 I-0.582056 J-0.483069 G02 X66.291839 Y85.780554 Z-0.400000 I-61.093838 J-3.182141 G01 X66.213756 Y81.444097 Z-0.400000 G01 X64.376549 Y81.362193 Z-0.400000 G01 X64.376549 Y81.362193 Z-0.400000 G00 Z5.000000

(End cutting path id: path3347)

(Start cutting path id: path3347)

(Change tool to Default tool)

G00 Z5.000000 G00 X65.471915 Y98.800766

G01 Z-0.400000 F100.0(Penetrate)

G02 X65.289625 Y98.857093 Z-0.400000 I-0.000000 J0.323134 F400.000000 G02 X64.822804 Y99.244259 Z-0.400000 I1.841857 J2.695816 G02 X64.542426 Y99.755315 Z-0.400000 I0.736504 J0.736504 G02 X64.379312 Y101.244633 Z-0.400000 I6.717568 J1.489318 G02 X64.707548 Y102.669397 Z-0.400000 I3.256324 J-0.000000 G02 X65.914411 Y104.399474 Z-0.400000 I6.094904 J-2.965689 G01 X67.449511 Y105.997433 Z-0.400000 G01 X74.440063 Y106.082385 Z-0.400000 G03 X81.379182 Y106.307175 Z-0.400000 I-2.085110 J171.581069 G03 X81.794963 Y106.469721 Z-0.400000 I-0.037311 J0.708482 G03 X81.989054 Y106.852054 Z-0.400000 I-0.344812 J0.415476 G03 X82.159312 Y112.394082 Z-0.400000 I-90.113853 J5.542028 G01 X82.159312 Y118.016058 Z-0.400000 G01 X83.429312 Y119.373793 Z-0.400000 G03 X84.350234 Y120.869338 Z-0.400000 I-3.226823 J3.018318 G03 X84.699312 Y122.833033 Z-0.400000 I-5.348733 J1.963695 G03 X84.558212 Y124.876099 Z-0.400000 I-14.861887 J-0.000000 G03 X84.360645 Y125.273211 Z-0.400000 I-0.690513 J-0.095835 G03 X83.966247 Y125.477331 Z-0.400000 I-0.518229 J-0.518229 G03 X82.385090 Y125.611878 Z-0.400000 I-1.581158 J-9.223421 G01 X80.748201 Y125.611878 Z-0.400000 G01 X80.748201 Y126.599655 Z-0.400000 G01 X80.748201 Y127.587433 Z-0.400000 G01 X82.809504 Y127.587433 Z-0.400000 G02 X84.745143 Y127.290628 Z-0.400000 I-0.000000 J-6.460124 G02 X85.772837 Y126.656774 Z-0.400000 I-0.735897 J-2.343190 G02 X86.351173 Y125.594990 Z-0.400000 I-1.621451 J-1.571573

G02 X86.674867 Y122.764425 Z-0.400000 I-12.214167 J-2.830565 G01 X86.674867 Y119.802734 Z-0.400000 G01 X85.404867 Y118.556322 Z-0.400000 G03 X84.413167 Y117.193106 Z-0.400000 I3.576284 J-3.643967 G03 X84.134867 Y116.012710 Z-0.400000 I2.364147 J-1.180396 G01 X84.134867 Y114.715509 Z-0.400000 G01 X87.521272 Y114.836247 Z-0.400000 G02 X90.852392 Y114.794823 Z-0.400000 I1.235054 J-34.640526 G02 X91.331272 Y114.605431 Z-0.400000 I-0.050087 J-0.826767 G02 X91.555367 Y114.160190 Z-0.400000 I-0.397687 J-0.479177 G02 X91.754867 Y106.844100 Z-0.400000 I-134.048555 J-7.316090 G02 X91.563502 Y99.524191 Z-0.400000 I-140.092692 J0.000000 G02 X91.349574 Y99.097961 Z-0.400000 I-0.593439 J0.031050 G02 X90.926338 Y98.939219 Z-0.400000 I-0.440430 J0.530684 G02 X90.361796 Y99.073323 Z-0.400000 I-0.028333 J1.136064 G02 X90.050574 Y99.547559 Z-0.400000 I0.279859 J0.522899 G02 X89.779312 Y106.148473 Z-0.400000 I80.177914 J6.600914 G01 X89.779312 Y112.911878 Z-0.400000 G01 X87.839034 Y112.911878 Z-0.400000 G02 X85.904736 Y112.972265 Z-0.400000 I0.000000 J31.009159 G02 X85.016812 Y113.088266 Z-0.400000 I0.414147 J6.626358 G01 X84.134867 Y113.264655 Z-0.400000 G01 X84.134867 Y109.448613 Z-0.400000 G01 X84.134867 Y105.632571 Z-0.400000 G01 X83.137268 Y104.756668 Z-0.400000 G01 X82.139672 Y103.880766 Z-0.400000 G01 X75.149298 Y103.880766 Z-0.400000 G01 X68.158925 Y103.880766 Z-0.400000 G01 X67.256897 Y102.950108 Z-0.400000 G03 X66.586621 Y101.925570 Z-0.400000 I2.322164 J-2.250737 G03 X66.354867 Y100.748774 Z-0.400000 I2.871875 J-1.176796 G02 X66.228082 Y99.530616 Z-0.400000 I-5.915469 J0.000000 G02 X66.016201 Y99.139433 Z-0.400000 I-0.763797 J0.160732 G02 X65.655774 Y98.853297 Z-0.400000 I-1.425347 J1.425347

G02 X65.471915 Y98.800766 Z-0.400000 I-0.183858 J0.295487 G01 X65.471915 Y98.800766 Z-0.400000 G00 Z5.000000

(End cutting path id: path3347)

(Start cutting path id: path3347) (Change tool to Default tool)

G00 Z5.000000 G00 X60.428201 Y110.654100

G01 Z-0.400000 F100.0(Penetrate)

G02 X60.192533 Y110.747601 Z-0.400000 I-0.000000 J0.343747 F400.000000 G02 X59.958535 Y111.096404 Z-0.400000 I0.646778 J0.686790 G02 X59.922847 Y111.510214 Z-0.400000 I0.700660 J0.268870 G02 X60.108505 Y111.858404 Z-0.400000 I0.664720 J-0.130841 G02 X60.428201 Y111.990826 Z-0.400000 I0.319696 J-0.319696 G02 X60.747896 Y111.858404 Z-0.400000 I-0.000000 J-0.452118 G02 X60.933558 Y111.510210 Z-0.400000 I-0.479011 J-0.479011 G02 X60.897866 Y111.096404 Z-0.400000 I-0.736373 J-0.144928 G02 X60.663868 Y110.747601 Z-0.400000 I-0.880777 J0.337987 G02 X60.428201 Y110.654100 Z-0.400000 I-0.235667 J0.250246 G01 X60.428201 Y110.654100 Z-0.400000

(End cutting path id: path3347)

(Start cutting path id: path3347) (Change tool to Default tool)

G00 Z5.000000

500

## G00 X59.296549 Y112.971085

G01 Z-0.400000 F100.0(Penetrate)

G02 X57.517903 Y113.039970 Z-0.400000 I-0.476621 J10.690559 F400.000000 G02 X57.109326 Y113.239196 Z-0.400000 I0.084915 J0.692717 G02 X56.905608 Y113.649807 Z-0.400000 I0.507757 J0.507757 G02 X56.759312 Y115.802635 Z-0.400000 I15.766805 J2.152828 G01 X56.759312 Y118.016058 Z-0.400000 G01 X58.029312 Y119.373793 Z-0.400000 G01 X59.299312 Y120.731524 Z-0.400000 G01 X59.299312 Y123.171700 Z-0.400000 G01 X59.299312 Y125.611878 Z-0.400000 G01 X57.464867 Y125.611878 Z-0.400000 G01 X55.630423 Y125.611878 Z-0.400000 G01 X55.630423 Y126.609875 Z-0.400000 G01 X55.630423 Y127.607872 Z-0.400000 G01 X58.382089 Y127.527097 Z-0.400000 G01 X61.133756 Y127.446322 Z-0.400000 G01 X61.211658 Y123.490628 Z-0.400000 G01 X61.289560 Y119.534930 Z-0.400000 G01 X60.012213 Y118.281311 Z-0.400000 G03 X58.980474 Y116.924604 Z-0.400000 I4.142629 J-4.221021 G03 X58.734867 Y115.973788 Z-0.400000 I1.717644 J-0.950816 G03 X59.058021 Y115.220509 Z-0.400000 I1.039534 J0.000000 G03 X59.934312 Y114.833105 Z-0.400000 I0.978783 J1.029199 G02 X60.849223 Y114.481632 Z-0.400000 I-0.121817 J-1.683627 G02 X61.133756 Y113.899655 Z-0.400000 I-0.452914 J-0.581977 G02 X60.805878 Y113.366563 Z-0.400000 I-0.597312 J-0.000000 G02 X59.296549 Y112.971085 Z-0.400000 I-1.674679 J3.313466 G01 X59.296549 Y112.971085 Z-0.400000

G00 Z5.000000

(End cutting path id: path3347)

(Start cutting path id: path3347)

(Change tool to Default tool)

G00 Z5.000000 G00 X60.385958 Y115.451878

G01 Z-0.400000 F100.0(Penetrate)

G02 X59.979053 Y115.550225 Z-0.400000 I0.000000 J0.890941 F400.000000 G02 X59.596506 Y115.857171 Z-0.400000 I0.558550 J1.087980 G02 X59.429948 Y116.278665 Z-0.400000 I0.560427 J0.465114 G02 X59.541470 Y116.774394 Z-0.400000 I0.913822 J0.054831 G02 X59.877387 Y117.244970 Z-0.400000 I2.161923 J-1.188088 G02 X61.536611 Y118.970822 Z-0.400000 I31.308337 J-28.439151 G01 X63.250423 Y120.655319 Z-0.400000 G01 X63.250423 Y124.066014 Z-0.400000 G01 X63.250423 Y127.476709 Z-0.400000 G01 X62.331634 Y128.367233 Z-0.400000 G03 X61.287707 Y128.962085 Z-0.400000 I-1.677879 J-1.731132 G03 X58.763188 Y129.339819 Z-0.400000 I-2.861343 J-10.498332 G02 X56.221475 Y129.610317 Z-0.400000 I0.527527 J17.033633 G02 X55.827064 Y129.877407 Z-0.400000 I0.106590 J0.582158 G02 X55.661739 Y130.344782 Z-0.400000 I0.955591 J0.600950 G02 X55.717762 Y130.794629 Z-0.400000 I0.937252 J0.111688 G02 X56.037960 Y131.048235 Z-0.400000 I0.374288 J-0.143628 G02 X59.108405 Y131.256322 Z-0.400000 I3.070445 J-22.549098 G01 X62.321881 Y131.256322 Z-0.400000 G01 X63.773928 Y129.720994 Z-0.400000 G01 X65.225978 Y128.185665 Z-0.400000 G01 X65.225978 Y123.999373 Z-0.400000 G01 X65.225978 Y119.813080 Z-0.400000 G01 X63.032513 Y117.632479 Z-0.400000 G02 X60.780620 Y115.593523 Z-0.400000 I-22.966492 J23.101980 G02 X60.385958 Y115.451878 Z-0.400000 I-0.394662 J0.478994 G01 X60.385958 Y115.451878 Z-0.400000

502

G00 Z5.000000

(End cutting path id: path3347)

(Start cutting path id: path3347) (Change tool to Default tool)

G00 Z5.000000

G00 X45.920570 Y98.809346

G01 Z-0.400000 F100.0(Penetrate)

G02 X43.948767 Y98.930178 Z-0.400000 I0.074299 J17.361366 F400.000000 G02 X43.424312 Y99.105592 Z-0.400000 I0.160354 J1.351150 G02 X43.165543 Y99.528405 Z-0.400000 I0.263005 J0.451554 G02 X42.930423 Y108.071676 Z-0.400000 I155.095161 J8.543271 G02 X43.092082 Y116.683136 Z-0.400000 I229.443720 J-0.000000 G02 X43.269089 Y117.088764 Z-0.400000 I0.605372 J-0.022737 G02 X43.672400 Y117.271367 Z-0.400000 I0.444035 J-0.444035 G02 X48.480272 Y117.427430 Z-0.400000 I4.807872 J-73.980463 G02 X53.194636 Y117.163417 Z-0.400000 I0.000000 J-42.223042 G02 X53.664522 Y116.844946 Z-0.400000 I-0.068134 J-0.606410 G02 X53.798632 Y116.280405 Z-0.400000 I-1.001911 J-0.536209 G02 X53.639884 Y115.857168 Z-0.400000 I-0.689409 J0.017194 G02 X53.217406 Y115.635278 Z-0.400000 I-0.477739 J0.396468 G02 X49.104756 Y115.451875 Z-0.400000 I-4.112650 J46.019566 G01 X44.905978 Y115.451875 Z-0.400000 G01 X44.905978 Y108.255208 Z-0.400000 G01 X44.905978 Y101.058541 Z-0.400000 G01 X46.414459 Y101.058541 Z-0.400000 G02 X47.836416 Y100.863542 Z-0.400000 I0.000000 J-5.282036 G02 X48.433756 Y100.494097 Z-0.400000 I-0.340517 J-1.218196 G02 X48.651244 Y99.929652 Z-0.400000 I-0.623706 J-0.564444 G02 X48.433756 Y99.365208 Z-0.400000 I-0.841194 J0.000000

G02 X47.828986 Y99.013738 Z-0.400000 I-0.853308 J0.772232 G02 X45.920570 Y98.809346 Z-0.400000 I-1.871278 J8.460506 G01 X45.920570 Y98.809346 Z-0.400000 G00 Z5.000000

(End cutting path id: path3347)

(Start cutting path id: path3347) (Change tool to Default tool)

G00 Z5.000000

G00 X19.003216 Y81.302986

G01 Z-0.400000 F100.0(Penetrate)

G01 X16.401534 Y81.302986 Z-0.400000 F400.000000

G01 X16.401534 Y82.290763 Z-0.400000

G01 X16.401534 Y83.278541 Z-0.400000

G01 X18.603950 Y83.278541 Z-0.400000

G03 X20.677596 Y83.582677 Z-0.400000 I0.000000 J7.221291

G03 X21.708394 Y84.209200 Z-0.400000 I-0.686925 J2.291407

G01 X22.610423 Y85.139856 Z-0.400000

G01 X22.610423 Y108.559700 Z-0.400000

G01 X22.610423 Y131.979545 Z-0.400000

G01 X24.241385 Y133.593486 Z-0.400000

G01 X25.872346 Y135.207430 Z-0.400000

G01 X45.889229 Y135.207430 Z-0.400000

G01 X65.906114 Y135.207430 Z-0.400000

G01 X68.106048 Y132.959711 Z-0.400000

G01 X70.305978 Y130.711992 Z-0.400000

G01 X70.305978 Y122.807255 Z-0.400000

G01 X70.305978 Y114.902521 Z-0.400000

G01 X74.438434 Y114.824419 Z-0.400000

G02 X78.457014 Y114.544549 Z-0.400000 I-0.751957 J-39.788060

504

G02 X78.857792 Y114.290790 Z-0.400000 I-0.066151 J-0.547842 G02 X79.023438 Y113.823362 Z-0.400000 I-0.955015 J-0.601502 G02 X78.967528 Y113.373568 Z-0.400000 I-0.936181 J-0.112003 G02 X78.642790 Y113.126564 Z-0.400000 I-0.361954 J0.138895 G02 X74.180198 Y112.911875 Z-0.400000 I-4.462592 J46.273055 G01 X69.570036 Y112.911875 Z-0.400000 G01 X68.668009 Y111.981216 Z-0.400000 G03 X68.042206 Y110.938661 Z-0.400000 I1.921779 J-1.862664 G03 X67.765978 Y109.179153 Z-0.400000 I5.465727 J-1.759508 G02 X67.595050 Y107.378548 Z-0.400000 I-9.569519 J0.000000 G02 X67.322486 Y106.864256 Z-0.400000 I-0.973329 J0.186473 G02 X66.792015 Y106.630885 Z-0.400000 I-0.565232 J0.565232 G02 X57.233041 Y106.425084 Z-0.400000 I-9.461493 J217.365337 G02 X47.623931 Y106.556728 Z-0.400000 I0.165397 J362.840160 G02 X47.163756 Y106.696512 Z-0.400000 I0.024467 J0.907895 G02 X46.921963 Y107.067168 Z-0.400000 I0.283299 J0.449000 G02 X46.648582 Y110.149413 Z-0.400000 I25.671459 J3.830187 G02 X46.684646 Y113.313509 Z-0.400000 I39.332286 J1.133951 G02 X46.853261 Y114.111319 Z-0.400000 I2.609663 J-0.134822 G01 X47.149786 Y114.887430 Z-0.400000 G01 X50.251287 Y114.887430 Z-0.400000 G02 X53.202999 Y114.637376 Z-0.400000 I0.000000 J-17.546432 G02 X53.664522 Y114.304946 Z-0.400000 I-0.108821 J-0.637669 G02 X53.798632 Y113.740405 Z-0.400000 I-1.001911 J-0.536209 G02 X53.639884 Y113.317168 Z-0.400000 I-0.689409 J0.017194 G02 X53.224313 Y113.080568 Z-0.400000 I-0.521573 J0.432845 G02 X51.080312 Y112.911875 Z-0.400000 I-2.144002 J13.540181 G01 X48.857089 Y112.911875 Z-0.400000 G01 X48.857089 Y110.795208 Z-0.400000 G01 X48.857089 Y108.678541 Z-0.400000 G01 X57.323756 Y108.678541 Z-0.400000 G01 X65.790423 Y108.678541 Z-0.400000 G01 X65.790423 Y110.313113 Z-0.400000 G02 X66.106751 Y111.814918 Z-0.400000 I3.723160 J-0.000000
G02 X67.060423 Y113.194097 Z-0.400000 I4.066566 J-1.792630

G01 X68.330423 Y114.440509 Z-0.400000 G01 X68.330423 Y122.080456 Z-0.400000 G01 X68.330423 Y129.720404 Z-0.400000 G01 X66.558939 Y131.476139 Z-0.400000 G01 X64.787459 Y133.231875 Z-0.400000 G01 X45.731772 Y133.231875 Z-0.400000 G01 X26.676087 Y133.231875 Z-0.400000 G01 X25.631033 Y132.161643 Z-0.400000 G01 X24.585979 Y131.091408 Z-0.400000 G01 X24.585979 Y107.669224 Z-0.400000 G01 X24.585979 Y84.247038 Z-0.400000 G01 X23.095438 Y82.775012 Z-0.400000 G01 X21.604896 Y81.302986 Z-0.400000 G01 X19.003216 Y81.302986 Z-0.400000 G01 X19.003216 Y81.302986 Z-0.400000 G00 Z5.000000

(End cutting path id: path3347)

(Start cutting path id: path3347) (Change tool to Default tool)

G00 Z5.000000 G00 X31.218200 Y31.914097

G01 Z-0.400000 F100.0(Penetrate)
G01 X30.230423 Y31.914097 Z-0.400000 F400.000000
G01 X30.230423 Y34.312985 Z-0.400000
G01 X30.230423 Y36.711874 Z-0.400000
G01 X27.464646 Y36.711874 Z-0.400000
G02 X24.759799 Y36.858975 Z-0.400000 I0.000000 J24.941587
G02 X24.360201 Y37.050541 Z-0.400000 I0.072387 J0.663550

- G02 X24.186730 Y37.457633 Z-0.400000 I0.419085 J0.419087
- G02 X24.021535 Y53.780361 Z-0.400000 I806.328067 J16.322728
- G01 X24.021535 Y70.171515 Z-0.400000
- G01 X22.250052 Y71.927250 Z-0.400000
- G01 X20.478570 Y73.682986 Z-0.400000
- G01 X18.440052 Y73.682986 Z-0.400000
- G01 X16.401534 Y73.682986 Z-0.400000
- G01 X16.401534 Y74.670763 Z-0.400000
- G01 X16.401534 Y75.658541 Z-0.400000
- G01 X18.942504 Y75.658541 Z-0.400000
- G01 X21.483473 Y75.658541 Z-0.400000
- G01 X23.740281 Y73.416847 Z-0.400000
- G01 X25.997090 Y71.175153 Z-0.400000
- G01 X25.997090 Y67.772403 Z-0.400000
- G01 X25.997090 Y64.369652 Z-0.400000
- G01 X28.113757 Y64.369652 Z-0.400000
- G01 X30.230423 Y64.369652 Z-0.400000
- G01 X30.230423 Y73.485430 Z-0.400000
- G02 X30.392436 Y82.534099 Z-0.400000 I252.771283 J-0.000000
- G02 X30.569089 Y82.939875 Z-0.400000 I0.604067 J-0.021638
- G02 X30.975385 Y83.115274 Z-0.400000 I0.424090 J-0.424090
- G02 X41.978930 Y83.278541 Z-0.400000 I11.003545 J-370.715926
- G02 X52.962524 Y83.067100 Z-0.400000 I0.000000 J-285.384827
- G02 X53.493597 Y82.835049 Z-0.400000 I-0.030570 J-0.793694
- G02 X53.774695 Y82.324289 Z-0.400000 I-0.739981 J-0.739981
- G02 X53.937089 Y80.859493 Z-0.400000 I-6.525006 J-1.464796
- G01 X53.937089 Y79.327430 Z-0.400000
- G01 X61.698201 Y79.327430 Z-0.400000
- G01 X69.459312 Y79.327430 Z-0.400000
- G01 X69.459312 Y80.964319 Z-0.400000
- G02 X69.593858 Y82.545477 Z-0.400000 I9.357968 J0.000000
- G02 X69.797978 Y82.939875 Z-0.400000 I0.722349 J-0.123831
- G02 X70.202364 Y83.119881 Z-0.400000 I0.436606 J-0.436606
- G02 X76.279161 Y83.278541 Z-0.400000 I6.076797 J-116.293765

G02 X82.269732 Y83.024889 Z-0.400000 I0.000000 J-70.867202

G02 X82.713828 Y82.732650 Z-0.400000 I-0.047094 J-0.555116

G02 X82.866385 Y82.151756 Z-0.400000 I-1.139152 J-0.609650

G02 X83.005978 Y69.609317 Z-0.400000 I-563.398334 J-12.542440

G01 X83.005978 Y57.031874 Z-0.400000

G01 X81.877090 Y57.031874 Z-0.400000

G01 X80.748201 Y57.031874 Z-0.400000

G01 X80.748201 Y60.277430 Z-0.400000

G01 X80.748201 Y63.522986 Z-0.400000

G01 X78.631534 Y63.522986 Z-0.400000

G01 X76.514867 Y63.522986 Z-0.400000

G01 X76.514867 Y51.246319 Z-0.400000

G01 X76.514867 Y38.969652 Z-0.400000

G01 X79.316930 Y38.969652 Z-0.400000

G02 X82.042224 Y38.784313 Z-0.400000 I0.000000 J-20.129496

G02 X82.562486 Y38.526160 Z-0.400000 I-0.123203 J-0.901618

G02 X82.817750 Y38.004701 Z-0.400000 I-0.633144 J-0.633144

G02 X83.005978 Y34.998382 Z-0.400000 I-23.913859 J-3.006319

G01 X83.005978 Y31.914097 Z-0.400000

G01 X81.877090 Y31.914097 Z-0.400000

G01 X80.748201 Y31.914097 Z-0.400000

G01 X80.748201 Y34.312985 Z-0.400000

G01 X80.748201 Y36.711874 Z-0.400000

G01 X78.189647 Y36.711874 Z-0.400000

G02 X75.660865 Y36.830600 Z-0.400000 I-0.000000 J26.990048

G02 X75.085203 Y37.004025 Z-0.400000 I0.142625 J1.515555

G02 X74.803412 Y37.454379 Z-0.400000 I0.252120 J0.471091

G02 X74.539312 Y51.058692 Z-0.400000 I350.260389 J13.604313

G02 X74.703737 Y64.753102 Z-0.400000 I570.361663 J-0.000000

G02 X74.877978 Y65.159874 Z-0.400000 I0.595311 J-0.014298

G02 X75.277577 Y65.351441 Z-0.400000 I0.471986 J-0.471986

G02 X77.982423 Y65.498541 Z-0.400000 I2.704846 J-24.794471

G01 X80.748201 Y65.498541 Z-0.400000

G01 X80.748201 Y73.400763 Z-0.400000

G01 X80.748201 Y81.302986 Z-0.400000 G01 X76.091534 Y81.302986 Z-0.400000 G01 X71.434867 Y81.302986 Z-0.400000 G01 X71.434867 Y79.666097 Z-0.400000 G02 X71.300321 Y78.084939 Z-0.400000 I-9.357968 J0.000000 G02 X71.096201 Y77.690541 Z-0.400000 I-0.722349 J0.123831 G02 X70.690431 Y77.513872 Z-0.400000 I-0.427456 J0.427456 G02 X61.661915 Y77.351875 Z-0.400000 I-9.028516 J251.509227 G02 X52.652995 Y77.561183 Z-0.400000 I-0.000000 J193.982693 G02 X52.122804 Y77.795367 Z-0.400000 I0.037270 J0.801645 G02 X51.841706 Y78.306127 Z-0.400000 I0.739981 J0.739981 G02 X51.679312 Y79.770923 Z-0.400000 I6.525006 J1.464796 G01 X51.679312 Y81.302986 Z-0.400000 G01 X41.942645 Y81.302986 Z-0.400000 G01 X32.205978 Y81.302986 Z-0.400000 G01 X32.205978 Y69.167430 Z-0.400000 G01 X32.205978 Y57.031874 Z-0.400000 G01 X31.218200 Y57.031874 Z-0.400000 G01 X30.230423 Y57.031874 Z-0.400000 G01 X30.230423 Y59.571874 Z-0.400000 G01 X30.230423 Y62.111874 Z-0.400000 G01 X28.113757 Y62.111874 Z-0.400000 G01 X25.997090 Y62.111874 Z-0.400000 G01 X25.997090 Y50.540763 Z-0.400000 G01 X25.997090 Y38.969652 Z-0.400000 G01 X28.762867 Y38.969652 Z-0.400000 G02 X31.467713 Y38.822552 Z-0.400000 I-0.000000 J-24.941571 G02 X31.867311 Y38.630985 Z-0.400000 I-0.072387 J-0.663552 G02 X32.056222 Y38.230288 Z-0.400000 I-0.463310 J-0.463310 G02 X32.205978 Y35.103208 Z-0.400000 I-32.573726 J-3.127081 G01 X32.205978 Y31.914097 Z-0.400000 G01 X31.218200 Y31.914097 Z-0.400000 G01 X31.218200 Y31.914097 Z-0.400000 G00 Z5.000000

(End cutting path id: path3347)

(Start cutting path id: path3347)

(Change tool to Default tool)

G00 Z5.000000

G00 X33.758200 Y31.914097

G01 Z-0.400000 F100.0(Penetrate) G01 X32.770423 Y31.914097 Z-0.400000 F400.000000 G01 X32.770423 Y40.098541 Z-0.400000 G01 X32.770423 Y48.282986 Z-0.400000 G01 X30.569089 Y48.282986 Z-0.400000 G02 X28.426659 Y48.425184 Z-0.400000 I0.000000 J16.210521 G02 X28.029090 Y48.621652 Z-0.400000 I0.091389 J0.685424 G02 X27.847190 Y49.025253 Z-0.400000 I0.441993 J0.441994 G02 X27.690423 Y54.124986 Z-0.400000 I82.870695 J5.099732 G01 X27.690423 Y59.289652 Z-0.400000 G01 X28.678200 Y59.289652 Z-0.400000 G01 X29.665978 Y59.289652 Z-0.400000 G01 X29.665978 Y54.774097 Z-0.400000 G01 X29.665978 Y50.258541 Z-0.400000 G01 X31.867311 Y50.258541 Z-0.400000 G02 X34.009741 Y50.116342 Z-0.400000 I-0.000000 J-16.210521 G02 X34.407312 Y49.919874 Z-0.400000 I-0.091390 J-0.685428 G02 X34.584190 Y49.514190 Z-0.400000 I-0.428018 J-0.428018 G02 X34.745978 Y40.747652 Z-0.400000 I-237.428338 J-8.766538 G01 X34.745978 Y31.914097 Z-0.400000 G01 X33.758200 Y31.914097 Z-0.400000 G01 X33.758200 Y31.914097 Z-0.400000 G00 Z5.000000

510

(End cutting path id: path3347)

(Start cutting path id: path3347)

(Change tool to Default tool)

G00 Z5.000000

G00 X40.182843 Y9.054085

G01 Z-0.400000 F100.0(Penetrate) G01 X21.894278 Y9.054085 Z-0.400000 F400.000000 G01 X19.147906 Y11.810804 Z-0.400000 G01 X16.401534 Y14.567522 Z-0.400000 G01 X16.401534 Y42.855257 Z-0.400000 G01 X16.401534 Y71.142986 Z-0.400000 G01 X15.328008 Y71.142986 Z-0.400000 G02 X14.347382 Y71.362402 Z-0.400000 I-0.000000 J2.301044 G02 X13.352453 Y72.073644 Z-0.400000 I1.452568 J3.083444 G01 X12.450423 Y73.004300 Z-0.400000 G01 X12.450423 Y78.399416 Z-0.400000 G01 X12.450423 Y83.794528 Z-0.400000 G01 X13.433215 Y84.806535 Z-0.400000 G02 X14.545934 Y85.511253 Z-0.400000 I2.024970 J-1.966514 G02 X16.396549 Y85.818541 Z-0.400000 II.850614 J-5.418923 G01 X18.377090 Y85.818541 Z-0.400000 G01 X18.377090 Y84.830763 Z-0.400000 G01 X18.377090 Y83.842986 Z-0.400000 G01 X16.868609 Y83.842986 Z-0.400000 G03 X15.441479 Y83.659645 Z-0.400000 I0.000000 J-5.646073 G03 X14.893053 Y83.326875 Z-0.400000 I0.283663 J-1.085800 G03 X14.631400 Y82.731611 Z-0.400000 I0.763033 J-0.690535 G03 X14.425979 Y78.303319 Z-0.400000 I47.627892 J-4.428292 G03 X14.581045 Y73.860104 Z-0.400000 I63.734713 J-0.000000

- G03 X14.764646 Y73.457208 Z-0.400000 I0.630561 J0.044066
- G03 X15.159043 Y73.253088 Z-0.400000 I0.518229 J0.518229
- G03 X16.740201 Y73.118541 Z-0.400000 I1.581158 J9.223421
- G01 X18.377090 Y73.118541 Z-0.400000
- G01 X18.377090 Y44.254698 Z-0.400000
- G01 X18.377090 Y15.390855 Z-0.400000
- G01 X20.570556 Y13.210259 Z-0.400000
- G01 X22.764022 Y11.029641 Z-0.400000
- G01 X40.312831 Y11.029641 Z-0.400000
- G03 X57.827554 Y11.186651 Z-0.400000 I0.000000 J976.973822
- G03 X58.580478 Y11.357188 Z-0.400000 I-0.034024 J1.897573
- G01 X59.299312 Y11.684707 Z-0.400000
- G01 X59.299312 Y18.178468 Z-0.400000
- G01 X59.299312 Y24.672240 Z-0.400000
- G01 X57.464867 Y26.572395 Z-0.400000
- G01 X55.630423 Y28.472549 Z-0.400000
- G01 X55.630423 Y32.956783 Z-0.400000
- G01 X55.630423 Y37.441018 Z-0.400000
- G01 X54.360423 Y38.687430 Z-0.400000
- G01 X53.090423 Y39.933842 Z-0.400000
- G01 X53.090423 Y49.611747 Z-0.400000
- G01 X53.090423 Y59.289652 Z-0.400000
- G01 X54.078201 Y59.289652 Z-0.400000
- G01 X55.065978 Y59.289652 Z-0.400000
- G01 X55.065978 Y50.035080 Z-0.400000
- G01 X55.065978 Y40.780508 Z-0.400000
- G01 X56.335978 Y39.534097 Z-0.400000
- G01 X57.605978 Y38.287685 Z-0.400000
- G01 X57.605978 Y33.847914 Z-0.400000
- G01 X57.605978 Y29.408141 Z-0.400000
- G01 X59.440423 Y27.591660 Z-0.400000
- G01 X61.274867 Y25.775179 Z-0.400000
- G01 X61.274867 Y18.124947 Z-0.400000
- G01 X61.274867 Y10.474707 Z-0.400000

G01 X59.873137 Y9.764410 Z-0.400000 G01 X58.471410 Y9.054085 Z-0.400000 G01 X40.182843 Y9.054085 Z-0.400000 G01 X40.182843 Y9.054085 Z-0.400000 G00 Z5.000000

(End cutting path id: path3347)

(Start cutting path id: path3347) (Change tool to Default tool)

G00 Z5.000000 G00 X6.985802 Y4.820752

#### G01 Z-0.400000 F100.0(Penetrate)

G02 X6.863390 Y4.862022 Z-0.400000 I0.000000 J0.202177 F400.000000 G02 X6.402804 Y5.264264 Z-0.400000 I2.743601 J3.606373 G02 X6.060111 Y5.749467 Z-0.400000 I1.237602 J1.237725 G02 X5.959312 Y6.195597 Z-0.400000 I0.936873 J0.446130 G02 X6.048139 Y6.646632 Z-0.400000 I1.189522 J0.000000 G02 X6.297979 Y7.022085 Z-0.400000 I1.059410 J-0.434117 G02 X6.678293 Y7.260207 Z-0.400000 I0.707988 J-0.707988 G02 X7.275827 Y7.360752 Z-0.400000 I0.597534 J-1.725289 G02 X7.825769 Y7.211766 Z-0.400000 I-0.000000 J-1.089478 G02 X8.206148 Y6.816768 Z-0.400000 I-0.509451 J-0.871246 G02 X8.379492 Y6.265380 Z-0.400000 I-1.372112 J-0.734302 G02 X8.323986 Y5.821145 Z-0.400000 I-0.927175 J-0.109737 G02 X8.079356 Y5.432462 Z-0.400000 I-1.104584 J0.423880 G02 X7.637996 Y5.095156 Z-0.400000 I-1.258013 J1.188686 G02 X7.118587 Y4.847547 Z-0.400000 I-2.913865 J5.443801 G02 X6.985802 Y4.820752 Z-0.400000 I-0.132785 J0.315618 G01 X6.985802 Y4.820752 Z-0.400000 G00 Z5.000000

(End cutting path id: path3347)

(Start cutting path id: path3347)

(Change tool to Default tool)

G00 Z5.000000

G00 X78.067090 Y14.134085

G01 Z-0.400000 F100.0(Penetrate)

G01 X77.079312 Y14.134085 Z-0.400000 F400.000000

G01 X77.079312 Y16.636036 Z-0.400000

G02 X77.290609 Y19.064833 Z-0.400000 I14.064806 J-0.000000

G02 X77.643756 Y19.855551 Z-0.400000 I1.747976 J-0.306455

G03 X77.957128 Y20.660040 Z-0.400000 I-1.166735 J0.917756

G03 X78.208201 Y27.231389 Z-0.400000 I-85.870802 J6.571349

G01 X78.208201 Y33.889652 Z-0.400000

G01 X79.337090 Y33.889652 Z-0.400000

G01 X80.465978 Y33.889652 Z-0.400000

G01 X80.465978 Y31.914097 Z-0.400000

G01 X80.465978 Y29.938541 Z-0.400000

G01 X86.392645 Y29.938541 Z-0.400000

G01 X92.319312 Y29.938541 Z-0.400000

G01 X92.319312 Y31.621946 Z-0.400000

G02 X92.530462 Y33.178865 Z-0.400000 I5.845567 J0.000000

G02 X92.865203 Y33.597501 Z-0.400000 I0.655767 J-0.181204

G02 X93.444507 Y33.756400 Z-0.400000 I0.638890 J-1.193780

G02 X99.497425 Y33.889652 Z-0.400000 I6.052918 J-137.409272

G01 X105.583756 Y33.889652 Z-0.400000

G01 X105.583756 Y32.901874 Z-0.400000

G01 X105.583756 Y31.914097 Z-0.400000

G01 X99.939312 Y31.914097 Z-0.400000

G01 X94.294867 Y31.914097 Z-0.400000

G01 X94.294867 Y30.277208 Z-0.400000 G02 X94.160321 Y28.696050 Z-0.400000 I-9.357968 J0.000000 G02 X93.956201 Y28.301652 Z-0.400000 I-0.722349 J0.123831 G02 X93.551540 Y28.122314 Z-0.400000 I-0.434738 J0.434738 G02 X87.041756 Y27.962985 Z-0.400000 I-6.509784 J132.907532 G01 X80.465978 Y27.962985 Z-0.400000 G01 X80.465978 Y23.892418 Z-0.400000 G02 X80.182351 Y19.925302 Z-0.400000 I-27.885964 J-0.000000 G02 X79.760423 Y18.983343 Z-0.400000 I-1.858883 J0.267166 G03 X79.289459 Y18.059270 Z-0.400000 I1.754307 J-1.476153 G03 X79.054867 Y16.139466 Z-0.400000 I7.738150 J-1.919805 G01 X79.054867 Y14.134085 Z-0.400000 G01 X78.067090 Y14.134085 Z-0.400000 G01 X78.067090 Y14.134085 Z-0.400000 G01 X78.067090 Y14.134085 Z-0.400000

(End cutting path id: path3347)

(Start cutting path id: path3347) (Change tool to Default tool)

G00 Z5.000000

G00 X92.530979 Y14.201818

G01 Z-0.400000 F100.0(Penetrate)

G01 X79.619312 Y14.128412 Z-0.400000 F400.000000

G01 X79.619312 Y15.119027 Z-0.400000

G01 X79.619312 Y16.109652 Z-0.400000

G01 X91.613756 Y16.109652 Z-0.400000

G01 X103.608201 Y16.109652 Z-0.400000

G01 X103.608201 Y22.685430 Z-0.400000

G02 X103.767529 Y29.195214 Z-0.400000 I133.066860 J0.000000

G02 X103.946867 Y29.599874 Z-0.400000 I0.614076 J-0.030077

515

G02 X104.333484 Y29.822779 Z-0.400000 I0.608261 J-0.608261 G02 X105.216867 Y29.938541 Z-0.400000 I0.883383 J-3.312687 G01 X106.148201 Y29.938541 Z-0.400000 G01 X106.148201 Y33.084275 Z-0.400000 G01 X106.148201 Y36.230005 Z-0.400000 G01 X104.878201 Y37.587737 Z-0.400000 G01 X103.608201 Y38.945471 Z-0.400000 G01 X103.608201 Y49.117562 Z-0.400000 G01 X103.608201 Y59.289652 Z-0.400000 G01 X104.595979 Y59.289652 Z-0.400000 G01 X105.583756 Y59.289652 Z-0.400000 G01 X105.583756 Y49.470636 Z-0.400000 G01 X105.583756 Y39.651620 Z-0.400000 G01 X106.860434 Y38.398654 Z-0.400000 G01 X108.137111 Y37.145689 Z-0.400000 G01 X108.059878 Y32.624893 Z-0.400000 G01 X107.982645 Y28.104096 Z-0.400000 G01 X106.788182 Y28.017556 Z-0.400000 G01 X105.593719 Y27.931018 Z-0.400000 G01 X105.518182 Y21.103111 Z-0.400000 G01 X105.442645 Y14.275196 Z-0.400000 G01 X92.530979 Y14.201818 Z-0.400000 G01 X92.530979 Y14.201818 Z-0.400000 G00 Z5.000000

(End cutting path id: path3347)

(Start cutting path id: path3347) (Change tool to Default tool)

G00 Z5.000000 G00 X93.307115 Y9.054085

G01 Z-0.400000 F100.0(Penetrate)

G01 X77.467190 Y9.054085 Z-0.400000 F400.000000

G01 X74.733249 Y11.836796 Z-0.400000

G01 X71.999312 Y14.619479 Z-0.400000

G01 X71.999312 Y23.253320 Z-0.400000

G01 X71.999312 Y31.887164 Z-0.400000

G01 X70.235423 Y31.971184 Z-0.400000

G01 X68.471534 Y32.055208 Z-0.400000

G01 X68.399096 Y52.357388 Z-0.400000

G02 X68.501905 Y72.563598 Z-0.400000 I1167.199069 J4.164654 G02 X68.681318 Y72.884734 Z-0.400000 I0.386623 J-0.005314 G02 X69.063650 Y73.015038 Z-0.400000 I0.460673 J-0.725623 G02 X71.188645 Y73.114220 Z-0.400000 I2.172842 J-23.739720 G02 X73.261811 Y72.948813 Z-0.400000 I0.025680 J-12.753055 G02 X73.681393 Y72.708766 Z-0.400000 I-0.110620 J-0.680075 G02 X73.907780 Y72.269690 Z-0.400000 I-0.884123 J-0.733754 G02 X73.924781 Y71.791544 Z-0.400000 I-1.041679 J-0.276413 G02 X73.653294 Y71.485374 Z-0.400000 I-0.392795 J0.074848 G02 X72.067034 Y71.200074 Z-0.400000 I-1.881892 J5.910834 G01 X70.305978 Y71.116053 Z-0.400000 G01 X70.305978 Y52.502851 Z-0.400000 G01 X70.305978 Y33.889652 Z-0.400000 G01 X71.801756 Y33.889652 Z-0.400000 G02 X73.242894 Y33.757739 Z-0.400000 I0.000000 J-7.938075 G02 X73.636201 Y33.550985 Z-0.400000 I-0.135863 J-0.735923 G02 X73.813016 Y33.145277 Z-0.400000 I-0.427848 J-0.427848 G02 X73.974867 Y24.301587 Z-0.400000 I-241.532511 J-8.843690 G01 X73.974867 Y15.390855 Z-0.400000 G01 X76.170853 Y13.207747 Z-0.400000 G01 X78.366838 Y11.024645 Z-0.400000 G01 X93.456964 Y11.097713 Z-0.400000 G01 X108.547090 Y11.170752 Z-0.400000 G01 X108.619497 Y31.359631 Z-0.400000

G01 X108.691904 Y51.548497 Z-0.400000 G01 X107.420052 Y52.796724 Z-0.400000 G01 X106.148201 Y54.044953 Z-0.400000 G01 X106.148201 Y57.513969 Z-0.400000 G01 X106.148201 Y60.982986 Z-0.400000 G01 X95.847090 Y60.982986 Z-0.400000 G01 X85.545978 Y60.982986 Z-0.400000 G01 X85.545978 Y59.007430 Z-0.400000 G01 X85.545978 Y57.031874 Z-0.400000 G01 X84.389847 Y57.031874 Z-0.400000 G01 X83.233715 Y57.031874 Z-0.400000 G01 X83.331513 Y59.723566 Z-0.400000 G02 X83.605271 Y62.314399 Z-0.400000 I18.893148 J-0.686444 G02 X83.852645 Y62.684323 Z-0.400000 I0.543276 J-0.095624 G02 X84.313636 Y62.822529 Z-0.400000 I0.475509 J-0.748147 G02 X96.129312 Y62.885409 Z-0.400000 I8.751272 J-534.274891 G01 X107.982645 Y62.817430 Z-0.400000 G01 X108.060635 Y58.847227 Z-0.400000 G01 X108.138627 Y54.877026 Z-0.400000 G01 X109.401190 Y53.637912 Z-0.400000 G01 X110.663756 Y52.398796 Z-0.400000 G01 X110.663756 Y31.518000 Z-0.400000 G01 X110.663756 Y10.637211 Z-0.400000 G01 X109.905400 Y9.845662 Z-0.400000 G01 X109.147043 Y9.054085 Z-0.400000 G01 X93.307115 Y9.054085 Z-0.400000 G01 X93.307115 Y9.054085 Z-0.400000 G00 Z5.000000

(End cutting path id: path3347)

(Start cutting path id: path3347) (Change tool to Default tool)

G00 Z5.000000

G00 X84.417090 Y31.914097

G01 Z-0.400000 F100.0(Penetrate) G01 X83.288201 Y31.914097 Z-0.400000 F400.000000 G01 X83.288201 Y38.828541 Z-0.400000 G01 X83.288201 Y45.742985 Z-0.400000 G01 X81.040351 Y45.742985 Z-0.400000 G02 X78.927005 Y45.967520 Z-0.400000 I0.000000 J10.057819 G02 X78.500351 Y46.288877 Z-0.400000 I0.133494 J0.621139 G02 X78.341719 Y46.868249 Z-0.400000 I1.191377 J0.637602 G02 X78.208201 Y53.062210 Z-0.400000 I143.602842 J6.193961 G01 X78.208201 Y59.289652 Z-0.400000 G01 X79.337090 Y59.289652 Z-0.400000 G01 X80.465978 Y59.289652 Z-0.400000 G01 X80.465978 Y53.504097 Z-0.400000 G01 X80.465978 Y47.718541 Z-0.400000 G01 X82.713828 Y47.718541 Z-0.400000 G02 X84.827174 Y47.494007 Z-0.400000 I0.000000 J-10.057819 G02 X85.253828 Y47.172650 Z-0.400000 I-0.133494 J-0.621139 G02 X85.410668 Y46.592830 Z-0.400000 I-1.175436 J-0.629075 G02 X85.545978 Y39.270428 Z-0.400000 I-198.060023 J-7.322402 G01 X85.545978 Y31.914097 Z-0.400000 G01 X84.417090 Y31.914097 Z-0.400000 G01 X84.417090 Y31.914097 Z-0.400000 G00 Z5.000000

(End cutting path id: path3347)

(Start cutting path id: path3347) (Change tool to Default tool)

G00 Z5.000000

## G00 X109.675979 Y57.031874

G01 Z-0.400000 F100.0(Penetrate) G01 X108.688201 Y57.031874 Z-0.400000 F400.000000 G01 X108.688201 Y64.087430 Z-0.400000 G01 X108.688201 Y71.142986 Z-0.400000 G01 X99.680173 Y71.142986 Z-0.400000 G02 X90.687237 Y71.224450 Z-0.400000 I-0.000000 J496.413038 G02 X90.225728 Y71.314292 Z-0.400000 I0.024579 J1.356538 G02 X89.901633 Y71.569676 Z-0.400000 I0.249325 J0.649743 G02 X89.779312 Y71.963403 Z-0.400000 I0.572501 J0.393727 G02 X89.867223 Y72.404793 Z-0.400000 I1.152035 J-0.000000 G02 X90.117979 Y72.779875 Z-0.400000 I1.069427 J-0.443589 G02 X90.523916 Y72.956130 Z-0.400000 I0.426354 J-0.426354 G02 X100.113784 Y73.118541 Z-0.400000 I9.589869 J-283.045259 G02 X109.755782 Y73.036808 Z-0.400000 I0.000000 J-568.771779 G02 X110.217340 Y72.947235 Z-0.400000 I-0.022924 J-1.352087 G02 X110.449553 Y72.628694 Z-0.400000 I-0.129949 J-0.338642 G02 X110.663756 Y64.903902 Z-0.400000 I-139.181727 J-7.724792 G01 X110.663756 Y57.031874 Z-0.400000 G01 X109.675979 Y57.031874 Z-0.400000 G01 X109.675979 Y57.031874 Z-0.400000 G00 Z5.000000

(End cutting path id: path3347)

(Start cutting path id: path3347) (Change tool to Default tool)

G00 Z5.000000 G00 X95.362793 Y76.288949

G01 Z-0.400000 F100.0(Penetrate)

G01 X87.822939 Y76.213802 Z-0.400000 F400.000000

G01 X86.896127 Y77.041213 Z-0.400000

G01 X85.969312 Y77.868621 Z-0.400000

G01 X85.878490 Y82.121509 Z-0.400000

G01 X85.787668 Y86.374398 Z-0.400000

G01 X77.694045 Y86.449246 Z-0.400000

G01 X69.600423 Y86.524097 Z-0.400000

G01 X69.524965 Y93.496544 Z-0.400000

G02 X69.722725 Y100.307329 Z-0.400000 I85.508581 J0.925410

G02 X70.027309 Y100.778221 Z-0.400000 I0.577937 J-0.039870

G02 X70.631840 Y100.965834 Z-0.400000 I0.788770 J-1.473827

G02 X72.049257 Y101.002441 Z-0.400000 I0.924500 J-8.336967

G02 X73.391832 Y100.745915 Z-0.400000 I-0.309817 J-5.263046

G02 X73.803245 Y100.423541 Z-0.400000 I-0.241614 J-0.732058

G02 X73.945511 Y99.929580 Z-0.400000 I-0.788178 J-0.494471

G02 X73.803810 Y99.435764 Z-0.400000 I-0.929528 J-0.000510

G02 X73.403295 Y99.091208 Z-0.400000 I-0.755671 J0.473340

G02 X72.464696 Y98.854281 Z-0.400000 I-1.192312 J2.745797

G01 X71.434867 Y98.766691 Z-0.400000

G01 X71.434867 Y93.562615 Z-0.400000

G01 X71.434867 Y88.358541 Z-0.400000

G01 X79.266534 Y88.354223 Z-0.400000

G02 X87.061787 Y88.224015 Z-0.400000 I-0.138656 J-241.707927

G02 X87.521534 Y88.082943 Z-0.400000 I-0.030147 J-0.917928

G02 X87.756487 Y87.708382 Z-0.400000 I-0.272276 J-0.431763

G02 X88.085978 Y83.077819 Z-0.400000 I-55.913483 J-6.305574

G01 X88.227090 Y78.339655 Z-0.400000

G01 X94.647645 Y78.263802 Z-0.400000

G01 X101.068201 Y78.187947 Z-0.400000

G01 X101.068201 Y107.544358 Z-0.400000

G01 X101.068201 Y136.900764 Z-0.400000

G01 X88.227090 Y136.900764 Z-0.400000

G01 X75.385978 Y136.900764 Z-0.400000

G01 X75.385978 Y128.809470 Z-0.400000

G01 X75.385978 Y120.718175 Z-0.400000 G01 X77.240873 Y118.796840 Z-0.400000 G02 X78.871103 Y116.802690 Z-0.400000 I-11.246192 J-10.857272 G02 X79.004762 Y116.234246 Z-0.400000 I-0.661829 J-0.455551 G02 X78.758428 Y115.748365 Z-0.400000 I-0.836509 J0.118712 G02 X78.251841 Y115.499274 Z-0.400000 I-0.633775 J0.649258 G02 X77.669564 Y115.643983 Z-0.400000 I-0.112186 J0.792421 G02 X75.496364 Y117.499123 Z-0.400000 I10.661416 J14.689756 G01 X73.402803 Y119.592684 Z-0.400000 G01 X73.477168 Y129.163946 Z-0.400000 G01 X73.551534 Y138.735208 Z-0.400000 G01 X88.227090 Y138.735208 Z-0.400000 G01 X102.902645 Y138.735208 Z-0.400000 G01 X102.902645 Y107.549653 Z-0.400000 G01 X102.902645 Y76.364097 Z-0.400000 G01 X95.362793 Y76.288949 Z-0.400000 G01 X95.362793 Y76.288949 Z-0.400000 G00 Z5.000000

(End cutting path id: path3347)

(Start cutting path id: path3347) (Change tool to Default tool)

G00 Z5.000000 G00 X90.897640 Y81.360500

G01 Z-0.400000 F100.0(Penetrate)
G02 X90.211927 Y81.364405 Z-0.400000 I-0.326901 J2.803193 F400.000000
G02 X89.980418 Y81.478093 Z-0.400000 I0.050746 J0.395901
G02 X89.873476 Y81.718327 Z-0.400000 I0.259735 J0.259543
G02 X89.779312 Y85.297113 Z-0.400000 I67.960461 J3.578786
G01 X89.779312 Y88.914945 Z-0.400000

522

G01 X80.963641 Y88.989520 Z-0.400000 G02 X72.364960 Y89.324564 Z-0.400000 I1.194078 J141.152074 G02 X72.042952 Y89.609886 Z-0.400000 I0.024478 J0.351993 G02 X72.097252 Y90.093028 Z-0.400000 I0.802561 J0.154423 G02 X72.445897 Y90.527109 Z-0.400000 I0.981261 J-0.431078 G02 X73.010804 Y90.724196 Z-0.400000 I0.605949 J-0.828686 G02 X81.729005 Y90.898541 Z-0.400000 I8.718201 J-217.890931 G01 X90.504149 Y90.898541 Z-0.400000 G01 X91.976175 Y92.389084 Z-0.400000 G01 X93.448201 Y93.879624 Z-0.400000 G01 X93.448201 Y113.555751 Z-0.400000 G01 X93.448201 Y133.231875 Z-0.400000 G01 X86.251534 Y133.231875 Z-0.400000 G01 X79.054867 Y133.231875 Z-0.400000 G01 X79.054867 Y129.139653 Z-0.400000 G01 X79.054867 Y125.047430 Z-0.400000 G01 X81.030423 Y125.047430 Z-0.400000 G01 X83.005978 Y125.047430 Z-0.400000 G01 X83.005978 Y122.529085 Z-0.400000 G02 X82.755831 Y120.101979 Z-0.400000 I-11.899841 J-0.000000 G02 X82.308644 Y119.182003 Z-0.400000 I-2.047464 J0.426570 G03 X81.881167 Y118.251757 Z-0.400000 I1.475058 J-1.241179 G03 X81.532533 Y114.433129 Z-0.400000 I26.690265 J-4.362000 G01 X81.453756 Y110.512986 Z-0.400000 G01 X79.593175 Y110.430549 Z-0.400000 G02 X77.817177 Y110.539126 Z-0.400000 I-0.374532 J8.453066 G02 X77.351763 Y110.806982 Z-0.400000 I0.127656 J0.760076 G02 X77.156549 Y111.278244 Z-0.400000 I0.664109 J0.551163 G02 X77.265372 Y111.736086 Z-0.400000 I0.731407 J0.068008 G02 X77.648078 Y112.061741 Z-0.400000 I0.706149 J-0.442155 G02 X78.589562 Y112.293913 Z-0.400000 I1.204455 J-2.859205 G01 X79.619312 Y112.381503 Z-0.400000 G01 X79.619312 Y115.848504 Z-0.400000 G02 X79.856632 Y119.210201 Z-0.400000 I23.928251 J-0.000000

# КОПІЇ ПАТЕНТІВ УКРАЇНИ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

#### Ж.1. Копія патенту України на корисну модель № 84211

УКРАЇНА (11) 84211 (13) U (19) UA (51) MITK (2013.01) G01N 29/00 G01N 33/36 (2006.01) ДЕРЖАВНА СЛУЖБА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ (12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ (21) Номер заявки: u 2013 05479 (72) Винахідник(и): Скрипник Юрій Олексійович (UA), Здоренко Валерій Георгійович (UA), Барилко Сергій Віталійович (UA) (22) Дата подання заявки: 29.04.2013 (24) Дата, з якої є чинними 10.10.2013 права на корисну модель: Власник(и): <sup>7</sup> КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ (73) (46) Публікація відомостей 10.10.2013, Бюл. № 19 УНІВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ, про видачу патенту: вул. Немировича-Данченка, 2, м. Київ-11, 01601 (UA) (54) УЛЬТРАЗВУКОВИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПОВЕРХНЕВОЇ ЩІЛЬНОСТІ ТЕКСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ) (57) Pedepar: Ультразвуковий пристрій для вимірювання поверхневої щільності текстильних матеріалів містить генератор синусоїдальної напруги, генератор прямокутних імпульсів, ключ-модулятор, 84211 підсилювач, випромінюючий п'єзоперетворювач, приймаючий п'єзоперетворювач, комутатор, обчислювальний блок, індикатор. Додатково містить роздільно-суміщений п'єзоперетворювач, з випромінюючою та приймаючою частинами, додатковий приймаючий п'єзоперетворювач, підсилювач з автоматичним регульованим підсиленням, детектор, аналого-цифровий перетворювач. Як обчислювальний блок використовується мікро-ЕОМ, а як комутатор -AU мультиплексор.



Ж.2. Копія патенту України на корисну модель № 132500



УНІВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ, вул. Немировича-Данченка, 2, м. Київ-11,

(54) УЛЬТРАЗВУКОВИЙ СПОСІБ ВИЗНАЧЕНЯ ОБ'ЄМНОЇ ЩІЛЬНОСТІ ТЕКСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

01011 (UA)

#### (57) Реферат:

Ультразвуковий спосіб визначення об'ємної щільності текстильних матеріалів, який полягає у тому, що випромінюють в текстильний матеріал перпендикулярно до його поверхні ультразвукові хвилі, приймають ультразвукові хвилі, які пройшли текстильний матеріал, перетворюють прийняті ультразвукові хвилі в електричну напругу і визначають об'ємну щільність текстильного матеріалу. Одночасно з прийомом ультразвукових хвиль, які пройшли текстильного матеріалу. Одночасно з прийомом ультразвукових хвиль, які пройшли текстильного матеріалу. Одночасно з прийомом ультразвукових хвиль, які пройшли текстильний матеріал, приймають ультразвукові хвилі, які відбилися від текстильного матеріалу, перетворюють відбиті ультразвукові хвилі в електричну напругу, за значенням цієї напруги визначають розмір пор і середній діаметр ниток текстильного матеріалу.

UA 132500

## Додаток З

# КОПІЇ АКТІВ ВПРОВАДЖЕННЯ ТА АПРОБАЦІЇ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОКТОРСЬКОЇ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

## 3.1. Копія акту про апробацію результатів докторської дисертаційної роботи

#### в процесі виробництва

«ЗАТВЕРДЖУЮ» Головний інженер ПРАТ ТФ "РОЗА" 200 911. M. 2021 року АКТ про апробацію результатів докторської дисертаційної роботи Барилка Сергія Віталійовича на тему: "Методологія побудови комп'ютеризованих систем контролю технологічних параметрів текстильних матеріалів" в процесі виробництва Цим актом підтверджується, що була проведена апробація результатів докторської дисертаційної роботи доцента кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій та вимірювальної техніки (КІТВТ) Київського національного університету технологій та дизайну (КНУТД) Барилка С.В. Апробація результатів проводилась із застосуванням запропонованого безконтактного методу контролю технологічних параметрів трикотажного полотна на круглов'язальній двофонтурній машині 16 класу в процесі виробництва. Апробація результатів докторської дисертаційної роботи полягала в наступному: була апробована та перевірена в реальних умовах виробництва методика вимірювального контролю поверхневої густини та пористості трикотажного полотна; апробована та перевірена робота розробленого зразка комп'ютеризованої системи безконтактного ультразвукового контролю нерівномірності поверхневої густини трикотажного полотна та його пористості на технологічному обладнанні. Зазначені отримані результати дають можливість у подальшому проводити безперервний оперативний контроль поверхневої густини та пористості трикотажного полотна в процесі його виробництва, що може зменшити простій текстильних машин при виконанні точкового лабораторного контролю цих параметрів матеріалу та підвищити економічну ефективність готової продукції. Результати апробації дозволяють рекомендувати такі комп'ютеризовані системи контролю технологічних параметрів трикотажних полотен до більш широкого використання на виробництві. Даний акт не може бути використаний для будь-яких фінансово-комерційних операцій і підтверджує безпосередню участь Барилка С.В. як відповідального виконавця вищезазначеної тематики. Головний механік: Фесич С.М. Доцент кафедри КІТВТ КНУТД: Барилко С.В.

## 3.2. Копія акту впровадження результатів докторської дисертаційної роботи у навчальний процес



#### АКТ

#### про впровадження результатів докторської дисертаційної роботи Барилка Сергія Віталійовича

#### на тему: "Методологія побудови комп'ютеризованих систем контролю технологічних параметрів текстильних матеріалів" у навчальний процес кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій та вимірювальної техніки

Комісія у складі завідувача кафедри КІТВТ д.т.н., проф. Здоренка В.Г., к.т.н., доц. Лісовця С.М. та к.т.н., доц. Барилка С.В. склали цей акт про те, що у Київському національному університеті технологій та дизайну при читанні лекцій та під час виконання лабораторних робіт з курсів: "Сучасні засоби керування технологічними процесами виробництва", "Технологічні вимірювання і прилади" для студентів спеціальності 151 "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології" впроваджено такі результати докторської дисертаційної роботи:

- математичні моделі проходження ультразвукових хвиль крізь текстильні матеріали з врахуванням їх розсіювання та згасання;
- математичні моделі, які пов'язують амплітудні співвідношення ультразвукових хвиль як із товщиною текстильних матеріалів, так і безпосередньо з їх поверхневою густиною та пористістю;
- принципи побудови сучасних комп'ютеризованих систем безконтактного контролю технологічних параметрів текстильних матеріалів;
- методика вимірювального контролю поверхневої густини та пористості одношарових тканин та трикотажних полотен;
- комп'ютерна програма "САЗД", яка призначена для керування системою сканування текстильних полотен та для отримання комплексної точкової та усередненої оцінок якості текстильних матеріалів за їх технологічними параметрами в процесі виробництва;
- зразки комп'ютеризованих систем контролю технологічних параметрів текстильних матеріалів.

Члени комісії:

Nes

д.т.н., проф. Здоренко В.Г.

к.т.н., доц. Лісовець С.М.

к.т.н., доц. Барилко С.В.