

Київський національний університет технологій та дизайну
Міністерство освіти і науки України

Київський національний університет технологій та дизайну
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ЛЕОНОВА ДАРИНА РУСЛАНІВНА

УДК 677.025:677.014.7:677.017.6:677.017.8

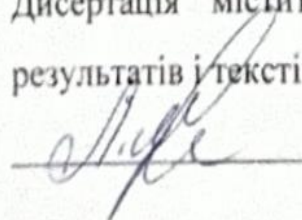
ДИСЕРТАЦІЯ

**РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЙ ВИГОТОВЛЕННЯ ЕКРАНУЮЧИХ
ТРИКОТАЖНИХ МАТЕРІАЛІВ ЩОДО ДІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО
ВИПРОМІНЮВАННЯ РАДІОЧАСТОТНОГО ДІАПАЗОНУ**

Спеціальність 182 Технології легкої промисловості
Галузь знань 18 Виробництво та технології

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

 Д.Р. Леонова

Науковий керівник Кизимчук Олена Павлівна
доктор технічних наук, професор

Київ – 2025

АНОТАЦІЯ

Леонова Д.Р. Розробка технології виготовлення екрануючих трикотажних матеріалів щодо дії електромагнітного випромінювання радіочастотного діапазону. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії у галузі знань 18 Виробництво та технології за спеціальністю 182 Технології легкої промисловості. – Київський національний університет технологій та дизайну, Київ, 2025.

Дисертація присвячена розробці технології виготовлення екрануючих гібридних трикотажних матеріалів щодо дії електромагнітного випромінювання радіочастотного діапазону із заданими параметрами структури та властивостями, що забезпечують комфортність їх експлуатації.

Мета дослідження. Метою роботи є розробка технології виготовлення гібридних трикотажних матеріалів для захисту від електромагнітного випромінювання шляхом уведення в структуру трикотажу металевго дроту та дослідження їх комфортних характеристик для використання у одязі.

Завдання дослідження:

1. Теоретично дослідити способи надання текстильним матеріалам екрануючих властивостей щодо дії електромагнітного випромінювання.
2. Розробити технологію виготовлення гібридних трикотажних матеріалів шляхом уведення в структуру переплетення металевго дроту, які окрім здатності до екранування матимуть високі показники комфорту.
3. Дослідити ефективність екранування та його складові (відбиття та поглинання) розроблених гібридних трикотажних матеріалів. Встановити вплив структури трикотажу на показники екранування.
4. Встановити закономірності впливу параметрів структури розроблених гібридних трикотажних матеріалів на їх теплофізичні та проникні

властивості. Визначити рівень комфортності одержаних трикотажних матеріалів.

5. Визначити найкращий варіант структури переплетення гібридного трикотажного матеріалу з функцією екранування та високим рівнем комфортності.
6. Запропонувати асортимент виробів з функцією захисту від електромагнітного випромінювання, який може бути реалізований в умовах швейного виробництва з використанням розроблених трикотажних матеріалів.

Об'єкт дослідження – процес виготовлення екрануючих гібридних трикотажних матеріалів, які здатні захищати від електромагнітного випромінювання.

Предмет дослідження – гібридні трикотажні матеріали для захисту від електромагнітного випромінювання, виготовлені шляхом введення у петельну структуру металевго дроту з нержавіючої сталі.

Наукова новизна отриманих результатів. Отримані у процесі дослідження наукові результати в сукупності дозволили сформуувати технологічні засади одержання трикотажних матеріалів з функцією захисту від електромагнітного випромінювання. При цьому вперше:

- розроблено технологію виготовлення гібридних трикотажних матеріалів, екрануючі властивості яких базуються на механізмі відбиття електромагнітних хвиль, а отже, можуть бути використані як відбивачі.

- встановлено, що найкращі екрануючі властивості має трикотаж, в якому металевий дріт пров'язаний у петельну структуру переплетення напівміланський ластик, яка забезпечує двошарове розташування структурних елементів (петель) з металевго дроту та формування в одному з шарів подовжених петель з додатковими протяжками за ними.

- запропоновано чергування в структурі трикотажного матеріалу рядів з бавовняної пряжі та металевого дроту, що забезпечує не тільки функцію екранування, а й високий рівень показників комфортності.

Практичне значення отриманих результатів роботи полягає у тому, що:

- створено новий асортимент гібридних трикотажних матеріалів для захисту від електромагнітного випромінювання з функцією відбивача;
- визначено раціональні параметри виготовлення гібридного трикотажного матеріалу, який за показниками комфортності не поступається трикотажу з бавовняної пряжі;
- визначено асортимент виробів з функцією захисту від електромагнітного випромінювання, який може бути реалізований в умовах швейного виробництва з використанням розроблених трикотажних матеріалів.

Рекомендації, представлені у дисертаційному дослідженні, знайшли практичне застосування в умовах виробництва ТОВ «Науково-виробниче об'єднання «ЕКМА-СТО», а саме, розроблено новий асортимент моделей одягу з елементами захисту від електромагнітного випромінювання, що підтверджено Актом про впровадження результатів дисертаційної роботи від 05.05.2025 №05/05-1.

Дисертація виконана згідно завдань перспективного плану розвитку наукового напрямку "Технічні науки" Київського національного університету технологій та дизайну на 2025 рік (Державний реєстраційний номер: 0122U000138). Додаткова угода № БФ/4-2025 від 01.03.2025 до Договору БФ/19-2021 від 01.06.2025.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та задачі дослідження, визначено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Наведено відомості щодо апробації роботи,

особистого внеску здобувача та публікацій. Зазначено зв'язок роботи з науковими програмами та темами.

У **першому розділі** наведено огляд робіт за тематикою дисертаційної роботи, а саме: узагальнено результати досліджень щодо принципів дії захисних екранів від електромагнітного випромінювання; вивчено досвід науковців щодо способів надання текстильним матеріалам екрануючих властивостей, при цьому найбільша увага приділена аналізу технологій надання екрануючих властивостей трикотажним матеріалам; проаналізовано методи дослідження екрануючих властивостей матеріалів. На підставі проведеного аналізу науково-технічної літератури визначено напрямки та основні задачі дослідження.

Другий розділ присвячений аналізу та пошуку структур трикотажних екранів, які зможуть забезпечити найкращі екрануючі властивості щодо дії електромагнітного випромінювання; характеристики запропонованих гібридних трикотажних матеріалів та використаних у роботі методів дослідження.

Третій розділ присвячено дослідженню ефективності екранування електромагнітного випромінювання гібридними трикотажними матеріалами з визначенням факторів, що впливають на цю здатність, окремо вивчені складові ефективності екранування, а саме, механізм відбиття та поглинання; встановлені закономірності зміни екрануючих властивостей полотен від їх сировинного складу, структурних характеристик та доведена ефективність використання сендвіч структур під час проєктування текстильних екранів.

Четвертий розділ присвячено визначенню факторів, а саме, параметрів структури трикотажних полотен, що впливають на екрануючі та споживчі властивості запропонованих полотен; встановлено шляхом реалізації експериментальних досліджень теплофізичних та проникних властивостей рівень комфортності запропонованих полотен; запропоновано асортимент повсякденних виробів з функцією захисту від електромагнітного випромінювання.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 8 наукових праць, в яких відображені основні результати дисертації, з них 2 статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України категорії Б, 2 статті у періодичних наукових виданнях, що входить до наукометричної бази Scopus, 4 тез доповідей у збірниках матеріалів міжнародних конференцій. Наукові публікації відповідають вимогам п. 8-9 Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. №44.

Апробація отриманих результатів. Основні положення та результати дисертації доповідались, обговорювались та здобули позитивну оцінку на VI Міжнародній науково-практичній конференції текстильних та фешн технологій «KyivTex&Fashion» (20 жовтня 2022 р., Київ, КНУТД); на VII Міжнародній науково-практичній конференції текстильних та фешн технологій «KyivTex&Fashion» (19 жовтня 2023 р., Київ, КНУТД); на V Міжнародному симпозиумі креативних технологій маркетингу (31 березня 2023 р., Кишинів, Молдова, Технічний університет Молдови; на VIII Міжнародній науково-практичній конференції текстильних та фешн технологій «KyivTex&Fashion» (17 жовтня 2024 р., Київ, КНУТД).

Ключові слова: текстильний матеріал, трикотажний матеріал, текстильні екрани, метаматеріали, напівміланський ластик, електромагнітне випромінювання, ефективність екранування, поглинання, відбиття, хвилі, параметри структури, металевий дрот, бавовняна пряжа, модифікація, теплофізичні властивості, проникність, пористість, комфорт.

ANNOTATION

Leonova D. R. Development of technology for manufacturing shielding knitted materials against the effects of electromagnetic radiation in the radio frequency range. – Qualifying scientific paperwork with the manuscript copyright.

The thesis for a Doctor of Philosophy in the field of knowledge 18 «Production and Technologies», a specialty 182 Consumer industry technologies – Kyiv National University of Technologies and Design, Kyiv, 2025.

The thesis is devoted to the development of a technology for manufacturing shielding hybrid knitted materials against the effects of electromagnetic radiation in the radio frequency range with specified structural parameters and properties that ensure the comfort of their operation.

The research purpose. The purpose of the research is to develop the technology for the production of hybrid knitted materials for protection against electromagnetic radiation by introducing a metal wire into the knit structure and researching their comfortable characteristics for use in clothing.

The research objectives:

1. Theoretically investigate ways to provide textile materials with shielding properties against the effects of electromagnetic radiation.
2. To develop a technology for manufacturing hybrid knitted materials by introducing metal wire into the weave structure, which, in addition to their shielding ability, will have high comfort indicators.
3. To investigate the shielding efficiency and its components (reflection and absorption) of the developed hybrid knitted materials. To establish the influence of the knitted fabric structure on the shielding performance.
4. To establish the regularities of influence of the structure parameters of the developed hybrid knitted materials on their thermophysical and permeable properties. To determine the level of comfort of the obtained knitted materials.
5. To determine the best variant of the interweaving structure of the hybrid knitted material with the shielding function and a high level of comfort.

6. To offer an assortment of products with the function of protection against electromagnetic radiation, which can be implemented in the conditions of sewing production using developed knitted materials.

The object of research – the process of manufacturing shielding hybrid knitted materials that can protect against electromagnetic radiation.

The subject of research – hybrid knitted materials for protection against electromagnetic radiation, made by inserting stainless steel metal wire into a loop structure.

Scientific novelty of the results obtained. The scientific results obtained in the process of the research in the aggregate made it possible to form the technological principles of obtaining knitted materials with the function of protection against electromagnetic radiation. At the same time, for the first time:

- a technology for manufacturing hybrid knitted materials was developed, the shielding properties of which are based on the mechanism of reflection of electromagnetic waves, and therefore can be used as reflectors.

- it has been established that the best shielding properties are possessed by knitwear in which the metal wire is knitted into a looped weave structure called a halfmilan lastic, which provides a two-layer arrangement of structural elements (loops) made of metal wire and the formation of elongated loops with additional broaches behind them in one of the layers.

- an alternation of rows of cotton yarn and metal wire in the structure of the knitted material is proposed, which provides not only the shielding function, but also a high level of comfort indicators.

The practical significance of the obtained results of thesis consists in the fact that:

- created a new range of hybrid knitted materials for protection against electromagnetic radiation with a reflector function;

- rational parameters for the production of hybrid knitted material have been determined, which in terms of comfort is not inferior to knitwear made from cotton

yarn;

- the assortment of products with the function of protection against electromagnetic radiation, which can be implemented in the conditions of sewing production using the developed knitted materials, is defined.

The recommendations presented in the dissertation research found practical application in the conditions of production of Scientific and Production Association "EKMA-STO", namely, a new assortment of clothing models with elements of protection against electromagnetic radiation was developed, which was confirmed by the Act on the implementation of the results of the dissertation work dated 05.05.2025 No. 05/05-1.

The dissertation was completed in accordance with the tasks of the perspective development plan of the scientific direction "Technical Sciences" of the Kyiv National University of Technology and Design for 2025 (State registration number: 0122U000138). Additional agreement No. BF/4-2025 dated 01.03.2025 to the Agreement BF/19-2021 dated 01.06.2025.

The introduction substantiates the relevance of the dissertation topic, formulates the goal and objectives of the research, determines the scientific novelty and practical significance of the results obtained. Information is provided on the approbation of the work, the personal contribution of the applicant and publications. The connection of the work with scientific programs and topics is indicated.

Chapter 1 provides an overview of works on the subject of the dissertation, namely: summarized the results of research on the principles of the protective screens against electromagnetic radiation; the experience of scientists on methods of providing textile materials with shielding properties is studied, with the greatest attention being paid to the analysis of technologies for providing shielding properties to knitted materials; the methods of researching shielding properties of materials are analyzed. Based on the analysis of scientific and technical literature, the direction and main tasks of the research are determined.

Chapter 2 is devoted to the analysis and search for structures of knitted screens that will be able to provide the best shielding properties in relation to electromagnetic radiation; the characteristics of the proposed hybrid knitted materials and the research methods used in the work.

Chapter 3 is devoted to the study of the efficiency of electromagnetic radiation shielding by hybrid knitted materials with the definition of factors affecting this ability, the components of the shielding efficiency are separately studied, namely, the mechanism of reflection and absorption; the patterns of changes in the shielding properties of fabrics depending on their raw material composition and structural characteristics are established, and the effectiveness of using sandwich structures when designing textile screens is proven.

Chapter 4 is devoted to determining the factors, namely, the parameters of the structure of knitted fabrics, which affect the shielding and consumer properties of the proposed fabrics; the level of comfort of the proposed fabrics is established by implementing experimental studies of thermophysical and permeable properties; an assortment of everyday products with the function of protection against electromagnetic radiation is proposed.

Publications. The main provisions and results of the dissertation research are reflected in 8 scientific papers, including: 2 articles in scientific professional journals of Ukraine of the 'B' category, 2 articles in the journals included in the international scientometric Scopus database; 4 in the collection of materials of an international conference. The scientific publications meet the requirements of clauses 8-9 of the "Procedure for awarding the Doctor of Philosophy degree and canceling the decision of a one-time specialized academic council of a higher education institution, scientific institution on awarding the degree of Doctor of Philosophy", approved by the Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 44 of 12 January 2022.

Approbation of the obtained results. The main provisions and results of the dissertation were reported, discussed and received a positive assessment at the VI International Scientific and Practical Conference on Textile and Fashion

Technologies "KyivTex&Fashion" (October 20, 2022, Kyiv, KNUTD); at the VII International Scientific and Practical Conference on Textile and Fashion Technologies "KyivTex&Fashion" (October 19, 2023, Kyiv, KNUTD); at the V International Symposium on Creative Marketing Technologies (March 31, 2023, Chisinau, Moldova, Technical University of Moldova; at the VIII International Scientific and Practical Conference on Textile and Fashion Technologies "KyivTex&Fashion" (October 17, 2024, Kyiv, KNUTD).

Keywords: textile material, knitted material, textile screens, metamaterials, halfmilano latic, electromagnetic radiation, shielding efficiency, absorption, reflection, waves, structure parameters, metal wire, cotton yarn, modification, thermo-physical properties, permeability, porosity, comfort.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, у яких відображені основні наукові результати дисертації

1. Bajzik V, Kyzymchuk O, Ocheretna L, Tunak M, Arabuli A, Levytska D. (Leonova D.) Hybrid knitted fabric for electromagnetic radiation shielding: thermo-physical properties. *Textile Research Journal*. 2024. №94(7-8). P. 814-828. <https://doi/10.1177/00405175231218741> *Особистий внесок: виготовлення дослідних зразків, проведення експериментальних досліджень, статистична обробка одержаних результатів, узагальнення одержаних результатів,*
2. Kyzymchuk O., Stefashyna O., Melnyk L., Holovnia O., Arabuli S., & Levytska D. (Leonova D.) (2021). Rib knitted fabrics with tuck stitches: structure and properties. *Vlakna a textile*, №3, P. 43-52. *Особистий внесок: виготовлення дослідних зразків, проведення експериментальних досліджень, узагальнення одержаних результатів*
3. Левицька Д.Р., Кизимчук О.П. Трикотажні полотна для захисту від електромагнітного випромінювання: будова, принцип екранування та комфортність. *Індустрія моди*. 2022. №1. С.28-37. <https://doi.org/10.30857/2706-5898.2022.1.2> *Особистий внесок: постановка та реалізація експериментальних досліджень, формулювання висновків.*
4. Леонова Д., Кизимчук О. Вплив методу введення металевих дротів на властивості трикотажу переплетення напівміланський ластик. Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. 2025. 347 (1). С. 227-237. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-347-30> *Особистий внесок: постановка та реалізація експериментальних досліджень, формулювання висновків.*

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

1. Леонова Д. Одяг та аксесуари з трикотажного полотна яке містить металевий дріт». Збірник тез доповідей VIII International Scientific-Practical Conference in Textile and Fashion "Kyiv Tex&Fashion", м. Київ, 17 жовтня 2024 р. – Київ: КНУТД, 2024. С.286-288.

2. Леонова Д. Деформаційні характеристики трикотажних полотен з вмістом металевого дроту. Збірник тез доповідей VII International Scientific-Practical Conference in Textile and Fashion "Kyiv Tex&Fashion", м. Київ, 19 жовтня 2023 р. – Київ: КНУТД, 2023. С. 216-217.
3. Leonova D. Protection of personnel and military equipment against electromagnetic attacks by using shielding textile materials. Збірник тез доповідей V-th International Symposium Creativity. Technology. Marketing, м. Кишинів, Молдова, 31 березня 2023 р. – Chisinau: TUM, 2023.- с. 133-135.
4. Arabuli A., Bajzik V., Kyzymchuk O., Levytska D. (Leonova D.) Study of the EMR shielding effectiveness by the textile screen. Збірник тез доповідей VI International Scientific Conference in Textile and Fashion "Kyiv Tex&Fashion", м. Київ, 20 жовтня 2022 р. – Київ: КНУТД, 2022. Р. 20-21.

ЗМІСТ

ВСТУП	16
1 РОЗДІЛ. ТЕКСТИЛЬНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ЗАХИСТУ ВІД ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ.....	21
1.1 Електромагнітне випромінювання: його природа та джерела	21
1.2 Принцип дії захисних екранів.....	26
1.3 Способи надання текстильним матеріалам екрануючих властивостей	31
1.4 Трикотажні матеріали з екрануючими властивостями.....	37
1.5 Методи дослідження екрануючих властивостей матеріалів	44
Висновки до розділу 1	49
Список використаних джерел до розділу 1	51
2 РОЗДІЛ. ОБ’ЄКТ, ПРЕДМЕТ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ	62
2.1 Об’єкт та предмет дослідження	62
2.2 Елементи петельної структури трикотажних екранів	62
2.3 Гібридні трикотажні матеріали для екранування електромагнітного випромінювання	68
2.4 Метод дослідження екрануючих властивостей матеріалів	70
2.5 Методи дослідження структури та теплофізичних характеристик гібридних трикотажних матеріалів.....	72
Висновки до розділу 2	76
Список використаних джерел до розділу 2	77
3 РОЗДІЛ. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКРАНУЮЧИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГІБРИДНИХ ТРИКОТАЖНИХ МАТЕРІАЛІВ	81
3.1 Сировинний склад досліджуваних трикотажних матеріалів	81
3.2 Оцінка екрануючих властивостей трикотажних полотен	83

	15
3.2.1 Контрольні полотна.....	83
3.2.2 Гібридні трикотажні полотна.....	85
3.3 Ефективність екранування металовмісними трикотажними сендвіч структурами	95
Висновки до розділу 3.....	96
Список використаних джерел до розділу 3.....	98
4 РОЗДІЛ. ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГІБРИДНИХ ТРИКОТАЖНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	100
4.1 Параметри структури трикотажного полотна.....	100
4.1.1 Щільність трикотажного полотна.....	100
4.1.2 Довжина нитки в петлі	102
4.1.3 Товщина трикотажу.....	103
4.1.4 Поверхнева густина	104
4.2 Пористість трикотажних матеріалів.....	105
4.3 Дослідження показників комфорту гібридних трикотажних матеріалів	108
4.3.1 Теплофізичні властивості трикотажних полотен.....	108
4.3.2 Паропроникні властивості трикотажних полотен	115
4.3.3 Асортимент виробів з функцією захисту від електромагнітного випромінювання	119
Висновки до розділу 4.....	122
Список використаних джерел до розділу 4.....	124
ВИСНОВКИ.....	126
ДОДАТКИ	128

ВСТУП

Актуальність роботи. У сучасних умовах зростає значення захисту від електромагнітного випромінювання. Неминучість його впливу на населення та навколишнє природне середовище є даниною сучасного технологічного прогресу. Концентрація електромагнетизму в навколишньому середовищі постійно зростає, перетворюючись на своєрідне електромагнітне забруднення. В останні роки забруднення електромагнітним випромінюванням зросло більш ніж у десятки тисяч разів, досягши глобального характеру та перевищивши значення хімічних та радіаційних факторів. Висока біологічна активність електромагнітного випромінювання у всіх діапазонах частот набагато вища за природний рівень, встановлений у процесі розвитку біосистем і завдяки впливу природного випромінювання. Усі діапазони техногенного випромінювання, спричинені людиною, мають інтенсивний вплив на її здоров'я та стан навколишнього середовища. Високий ступінь їх небезпеки посилюється тим, що наслідки можуть виникати протягом тривалого періоду часу і негативно впливати на імунну та генетичну стійкість наступних поколінь.

Захист від постійно зростаючого електромагнітного випромінювання навколо нас стає загальним завданням не лише для обмеженої кількості людей, які працюють із ризиком електромагнітного опромінення на промислових підприємствах, але й у повсякденному житті кожного з нас, хто постійно використовує смартфони, комп'ютери та різні гаджети як на роботі, так і вдома. Таким чином, текстиль для електромагнітного екранування переміщується з області промислового текстилю і спеціального одягу до повсякденного одягу і побутових матеріалів. Нагальним завданням дослідників стає поєднання в текстильних матеріалах функціональних властивостей захисту від електромагнітного випромінювання та високих характеристик комфорту.

Зв'язок теми дослідження з планами науково-дослідних робіт.

Дисертація виконана згідно завдань перспективного плану розвитку наукового напрямку "Технічні науки" Київського національного університету технологій та дизайну на 2025 рік (Державний реєстраційний номер: 0122U000138). Додаткова угода № БФ/4-2025 від 01.03.2025 до Договору БФ/19-2021 від 01.06.2025.

Мета дослідження. Метою роботи є розробка технології виготовлення гібридних трикотажних матеріалів для захисту від електромагнітного випромінювання шляхом уведення в структуру трикотажу металевго дроту та дослідження їх комфортних характеристик для використання у одязі.

Завдання дослідження:

1. Теоретично дослідити способи надання текстильним матеріалам екрануючих властивостей щодо дії електромагнітного випромінювання.
2. Розробити технологію виготовлення гібридних трикотажних матеріалів шляхом уведення в структуру переплетення металевго дроту, які окрім здатності до екранування матимуть високі показники комфорту.
3. Дослідити ефективність екранування та його складові (відбиття та поглинання) розроблених гібридних трикотажних матеріалів. Встановити вплив структури трикотажу на показники екранування.
4. Встановити закономірності впливу параметрів структури розроблених гібридних трикотажних матеріалів на їх теплофізичні та проникні властивості. Визначити рівень комфортності одержаних трикотажних матеріалів.
5. Визначити найкращий варіант структури переплетення гібридного трикотажного матеріалу з функцією екранування та високим рівнем комфортності.
6. Запропонувати асортимент виробів з функцією захисту від електромагнітного випромінювання, який може бути реалізований в умовах швейного виробництва з використанням розроблених трикотажних матеріалів.

Методи дослідження: аналіз наукової літератури та узагальнення теоретичних даних; ефективність екранування оцінювали згідно стандарту ASTM 4935-10; параметри структури розроблених трикотажних матеріалів визначали за стандартними методами; пористість, проникні та теплофізичні властивості досліджували та розраховували за загальновідомими в текстильному матеріалознавстві методиками.

Об'єкт дослідження – процес виготовлення екрануючих гібридних трикотажних матеріалів, які здатні захищати від електромагнітного випромінювання.

Предмет дослідження – гібридні трикотажні матеріали для захисту від електромагнітного випромінювання, виготовлені шляхом введення у петельну структуру металевго дроту з нержавіючої сталі.

Наукова новизна отриманих результатів. Отримані у процесі дослідження наукові результати в сукупності дозволили сформувати технологічні засади одержання трикотажних матеріалів з функцією захисту від електромагнітного випромінювання. При цьому вперше:

- розроблено технологію виготовлення гібридних трикотажних матеріалів, екрануючі властивості яких базуються на механізмі відбиття електромагнітних хвиль, а отже, можуть бути використані як відбивачі.

- встановлено, що найкращі екрануючі властивості має трикотаж, в якому металевий дріт пров'язаний у петельну структуру переплетення напівміланський ластик, яка забезпечує двошарове розташування структурних елементів (петель) з металевго дроту та формування в одному з шарів подовжених петель з додатковими протяжками за ними.

- запропоновано чергування в структурі трикотажного матеріалу рядів з бавовняної пряжі та металевго дроту, що забезпечує не тільки функцію екранування, а й високий рівень показників комфортності.

Практичне значення отриманих результатів роботи полягає у тому, що:

- створено новий асортимент гібридних трикотажних матеріалів для захисту від електромагнітного випромінювання з функцією відбивача;
- визначено раціональні параметри виготовлення гібридного трикотажного матеріалу, який за показниками комфортності не поступається трикотажу з бавовняної пряжі;
- визначено асортимент виробів з функцією захисту від електромагнітного випромінювання, який може бути реалізований в умовах швейного виробництва з використанням розроблених трикотажних матеріалів.

Рекомендації, представлені у дисертаційному дослідженні, знайшли практичне застосування в умовах виробництва ТОВ «Науково-виробниче об'єднання «ЕКМА-СТО», а саме, розроблено новий асортимент моделей одягу з елементами захисту від електромагнітного випромінювання, що підтверджено Актом про впровадження результатів дисертаційної роботи від 05.05.2025 №05/05-1.

Особистий внесок здобувача. Особистий внесок аспірантки включає аналіз науково-технічної та патентної літератури за темою дисертаційного дослідження, виконання дослідних та експериментальних робіт, математичну обробку та статистичний аналіз отриманих результатів. Аспіранткою самостійно сформовані мета, завдання, теоретичні положення та висновки до дисертаційної роботи. Аспірантка брала участь у створенні дослідних зразків гібридних трикотажних матеріалів, їх випробуваннях та оцінці екрануючих, проникних та теплофізичних характеристик. У наукових публікаціях, підготовлених у співавторстві, здобувач відповідав за отримання та аналіз експериментальних даних, формулювання ключових наукових положень і висновків. Постановка завдань дослідження та обговорення результатів здійснювалися спільно з науковим керівником.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 8 наукових праць, в яких відображені основні результати дисертації, з них 2 статті у наукових

виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України категорії Б, 2 статті у періодичних наукових виданнях, що входять до наукометричної бази Scopus, 4 тез доповідей у збірниках матеріалів міжнародних конференцій. Наукові публікації відповідають вимогам п. 8-9 Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. №44.

Апробація отриманих результатів. Основні положення та результати дисертації доповідались, обговорювались та здобули позитивну оцінку на VI Міжнародній науково-практичній конференції текстильних та фешн технологій «KyivTex&Fashion» (20 жовтня 2022 р., Київ, КНУТД); на VII Міжнародній науково-практичній конференції текстильних та фешн технологій «KyivTex&Fashion» (19 жовтня 2023 р., Київ, КНУТД); на V Міжнародному симпозиумі креативних технологій маркетингу (31 березня 2023 р., Кишинів, Молдова, Технічний університет Молдови; на VIII Міжнародній науково-практичній конференції текстильних та фешн технологій «KyivTex&Fashion» (17 жовтня 2024 р., Київ, КНУТД).

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел (156 найменувань на 19 сторінках), 2 додатків (на 3 сторінках), містить 8 таблиць та 35 рисунків. Основний текст роботи викладено на 112 сторінках. Загальний обсяг роботи становить 131 сторінку.

1 РОЗДІЛ. ТЕКСТИЛЬНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ЗАХИСТУ ВІД ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

1.1 Електромагнітне випромінювання: його природа та джерела

Електромагнітне випромінювання є однією з особливих форм матерії, яку характеризують спільними характеристиками електричних і магнітних властивостей та полів. Будь-яка система, прилад або обладнання, які виробляють, розподіляють та споживають електроенергію, створюють електромагнітне випромінювання, яке в свою чергу створює всередині джерела і навколо нього електромагнітне поле.

Електромагнітне поле являє собою поєднання електричного і магнітного полів. При цьому електричне поле (створюється електричними зарядами), що постійно змінюється у часі, створює магнітне поле (яке утворюється при русі електричних зарядів по провіднику), яке вже при своїй трансформації, в свою чергу, створює вихрове електричне поле. Ці складові – електричне та магнітне поля – при постійній дії провокують взаємне збурення, в процесі якого і відбувається збільшення швидкості руху частинок.

Електромагнітне випромінювання поширюється з постійною швидкістю у формі хвиль. Його хвильові властивості визначаються співвідношенням між швидкістю, довжиною хвилі (відстань, яку проходить одна хвиля за цикл) та частотою (кількість циклів за секунду, вимірюється в герцах, Гц) [1]. Електромагнітне випромінювання поділяється на спектр за довжиною хвиль. Радіохвилі характеризуються найбільшою довжиною хвилі та найнижчою частотою. Гамма-промені, навпаки, мають найкоротшу довжину хвилі, найвищу частоту і найвищий рівень енергії.

Електромагнітне випромінювання навколо людини походить як від природних, так і від штучних джерел (рис.1.1). Серед природних джерел можна виділити:

- випромінювання сонця, яке генерує потік потужністю близько 1400 Вт/м^2 у широкому діапазоні радіочастот над атмосферою Землі, а на поверхні Землі – до 100 Вт/м^2 ;
- електростатичні (до кількох В/м) і магнітні (до 40 А/м) поля, що виникають від земних джерел;
- електромагнітні хвилі, спричинені природними явищами, такими як блискавки або турбулентні процеси в іоносфері.

Природні джерела випромінювання протягом усього існування людства на Землі формували електромагнітний фон, що не перевищує 1 мкВт/см^2 , до якого люди вже давно адаптувалися.



Рисунок 1.1 – Природні і штучні джерела електромагнітного випромінювання [2]

За останнє століття відбулося значне підвищення рівня електромагнітного фону, що пов'язано з стрімким розвитком і поширенням штучних джерел електромагнітного випромінювання. В цілому їх можна поділити на дві великі групи:

- радіосистеми, такі як радіо- і телевізійні станції, радары, радіонавігаційні системи, радіорелейні лінії зв'язку, мобільний зв'язок, промислові технологічні установки, фізіотерапевтичне обладнання тощо;

- пристрої, що не призначені для випромінювання електромагнітної енергії, але генерують електромагнітні поля через плин електричного струму: трансформаторні підстанції, високовольні лінії електропередач, електроплити, обігрівачі, холодильники, телевізори, мікрохвильові печі та інші побутові прилади.

На сучасному етапі властивості електромагнітного випромінювання знаходять застосування в інтернет-зв'язку, радіо- та мобільному зв'язку, телебаченні, радіолокації та радіонавігації. Вони також використовуються в медицині, а також у різних промислових сферах, таких як металургія, деревообробка, текстильна, легка та харчова промисловість.

Існує сім видів електромагнітного випромінювання [3], які мають однакову фізичну природу, але різняться частотою, що, у свою чергу, визначає їх довжину хвилі. Саме це пояснює різницю у властивостях електромагнітних хвиль, які можуть суттєво варіюватися в залежності від їх частоти та довжини хвилі. Шкала електромагнітних хвиль (або спектр) (рис.1.2) являє собою безперервну послідовність частот і довжин хвиль, що існують у природі. Межі між різними діапазонами є умовними, тому сусідні області можуть частково перекриватися одна з одною. Усі ці види випромінювання мають спільну характеристику — їхнє виникнення зумовлене електричними зарядами. Різниця між ними обумовлена умовами середовища та обставинами, в яких заряди реагують на частоту випромінювання.

У діапазоні частот до 1012 герц електромагнітного спектра вільні електричні заряди або електрони, що рухаються в металевих компонентах антен і в просторі, спричиняють утворення радіохвиль, радіолокаційних хвиль та мікрохвиль. На частотах від 1012 до 5070 герц, в інфрачервоній області спектра, рух зарядів переважно пов'язаний з рухом молекул атомів у

речовині. Електромагнітне випромінювання від видимого світла до рентгенівських променів характеризується частотами, що відповідають взаємодії зарядів всередині атомів. Гамма-випромінювання має частоти, що відповідають процесам в атомних ядрах.



Рисунок 1.2 – Шкала електромагнітних хвиль [4]

Радіочастотне випромінювання застосовується для передачі радіо-, теле- та мобільних сигналів. В залежності від довжини хвилі, воно поділяється на довгі хвилі, середні хвилі та короткі хвилі. Усі сучасні передавачі телевізійних і мобільних телефонних сигналів функціонують в ультракороткому діапазоні. Оскільки такі хвилі значно поглинаються атмосферою, для їх ефективної передачі необхідні ретранслятори, які мають бути розташовані в зоні прямої видимості.

Міжнародне агентство з дослідження раку Всесвітньої організації охорони здоров'я класифікує радіочастотні електромагнітні випромінювання як потенційно канцерогенні для людей, відносячи їх до групи 2В [5].

Отже випромінювання має як корисні, так і потенційно шкідливі ефекти, що залежать від інтенсивності та тривалості впливу. Так,

електромагнітні хвилі знайшли широке застосування у побутових пристроях, що значно полегшило повсякденне життя, проте й викликало дискусії щодо їхнього впливу на здоров'я. Зокрема, мікрохвильові печі, мобільні телефони, Wi-Fi роутери та інші пристрої випромінюють електромагнітні хвилі різної частоти і потужності. У мікрохвильових печах хвилі використовуються для швидкого нагрівання їжі, у мобільних телефонах і Wi-Fi роутерах — для передачі сигналу.

Відповідно до даних Всесвітньої організації охорони здоров'я [6], зростання кількості джерел електромагнітного випромінювання призводить до збільшення кількості повідомлень про проблеми зі здоров'ям, які можуть бути спричинені впливом електромагнітного випромінювання. Це явище відоме як «електромагнітна гіперчутливість». Симптоми, пов'язані з впливом електромагнітного випромінювання, включають:

- дерматологічні: почервоніння, поколювання та відчуття печіння;
- неврастенічні та вегетативні: стомлюваність, труднощі з концентрацією уваги, запаморочення, нудота, пришвидшене серцебиття, травні розлади.

Мобільні телефони є одним з найпоширеніших джерел радіочастотного електромагнітного випромінювання в наш час. Випромінювання мобільних телефонів розташоване в низькочастотній області електромагнітного спектра. У дослідженні [7] зазначено, що телефони другої, третьої та четвертої генерації (2G, 3G, 4G) випромінюють радіочастоти в діапазоні від 700 до 2700 МГц, тоді як телефони п'ятої генерації (5G) можуть випромінювати в діапазоні до 80 ГГц.

Варто зазначити, що мобільні телефони та смарт годинники можуть впливати на кардіостимулятори та інші імплантовані медичні пристрої [8], оскільки вони генерують високочастотні магнітні поля. Наприклад, після виходу на ринок Apple iPhone 12, який має потужний магніт для швидкого бездротового заряду MagSafe, кардіолог Інституту кардіології та судин Генрі Форда, Гурджіт Сінгх, провів дослідження [9]. Під час цього дослідження

iPhone був наближений до грудей пацієнта з імплантованим кардіодефібрилятором. У результаті наближення пристрій вимкнувся, але після віддалення телефону він відновив свою роботу. Це дослідження було опубліковане у журналі «HeartRhythm», після чого компанія Apple опублікувала перелік пристроїв, що містять магніти.

Австралійське агентство з радіаційного захисту та ядерної безпеки пропонує три підходи для зменшення впливу радіочастотного електромагнітного випромінювання мобільних телефонів [10]:

1. Відстань: щоб зменшити вплив випромінювання, найкраще збільшити відстань між мобільним телефоном і людиною використовуючи навушники або режим гучномовця під час розмов, а також тримаючи телефон на відстані від вуха.

2. Час: зменшити вплив випромінювання можна, записуючи короткі голосові повідомлення.

3. Потужність сигналу: телефон зазвичай випромінює менше в місцях з добрим сигналом, ніж у зонах зі слабким сигналом.

Електромагнітне випромінювання супроводжує все наше життя, навіть більше, – ми залежні від нього. Тому проблема захисту від електромобільного випромінювання з кожним роком набуває все більшої актуальності.

1.2 Принцип дії захисних екранів

На сьогодні захист людини від електромагнітного випромінювання здійснюють, здебільшого, шляхом використання наступних чотирьох принципів [11]: захист у часі (дотримання дози гігієнічних нормативів шляхом обмеження тривалості перебування у місцях підвищеного рівня електромагнітного поля); захист відстанню (збільшення відстані від джерела тривалого електромагнітного випромінювання), використання засобів індивідуального та колективного захисту (використання персоналом

радіоекрануючих матеріалів), використання захисних екранів (екранування безпосередньо місця перебування людини).

Електромагнітне екранування – це процес зменшення дисперсії електромагнітних хвиль у простір за допомогою створення щита для хвиль із провідного матеріалу. Захисні екрани є важливим засобом для зменшення впливу електромагнітного випромінювання як на електронне обладнання, так і на організм людини. Принцип дії таких екранів (рис.1.3) ґрунтується на здатності матеріалів відбивати, поглинати або розсіювати електромагнітну енергію. Ефективність екрана залежить від матеріалу, його товщини, частоти випромінювання та умов експлуатації.

Відбиття електромагнітних хвиль [12] (рис.1.3.а) відбувається завдяки поверхням з високою електропровідністю, таким як мідь, алюміній або інші метали. Для відбиття матеріал повинен мати рухливі носії заряду, такі як вільні електрони, які взаємодіють з електромагнітним випромінюванням. Для зменшення електричних полів, металічні екрани створюють контур для провідного струму, який нейтралізує дію зовнішнього електромагнітного поля, запобігаючи його впливу на чутливі пристрої всередині. Відбиття хвиль є основним механізмом екранування на високих частотах. При цьому хвилі змінюють свій напрямок і не проникають крізь екран.

Коефіцієнт відбиття характеризує, яку частину електромагнітної хвилі буде відбито від поверхні екрану. Коефіцієнт відбиття розраховується за формулою:

$$R = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 \quad (1.1)$$

де Z_1 – імпеданс середовища, з якого падає хвиля (наприклад, повітря або вакуум);

Z_2 – імпеданс матеріалу екрану.

Якщо матеріал екрану має низький імпеданс, відбиття буде високим. Це властиво для металевих матеріалів, таких як мідь або алюміній, які ефективно відбивають високочастотні електромагнітні хвилі.

Поглинання електромагнітної енергії [12] (рис.1.3.б) вимагає наявності електричних або магнітних диполів для взаємодії з електромагнітним випромінюванням. Екрануючі матеріали, зокрема композити з магнітними або діелектричними властивостями, здатні поглинати частину енергії хвиль. Це особливо важливо на низьких частотах, де відбиття менш ефективне. Поглинання викликає зменшення інтенсивності хвиль всередині матеріалу, перетворюючи їх енергію на тепло.

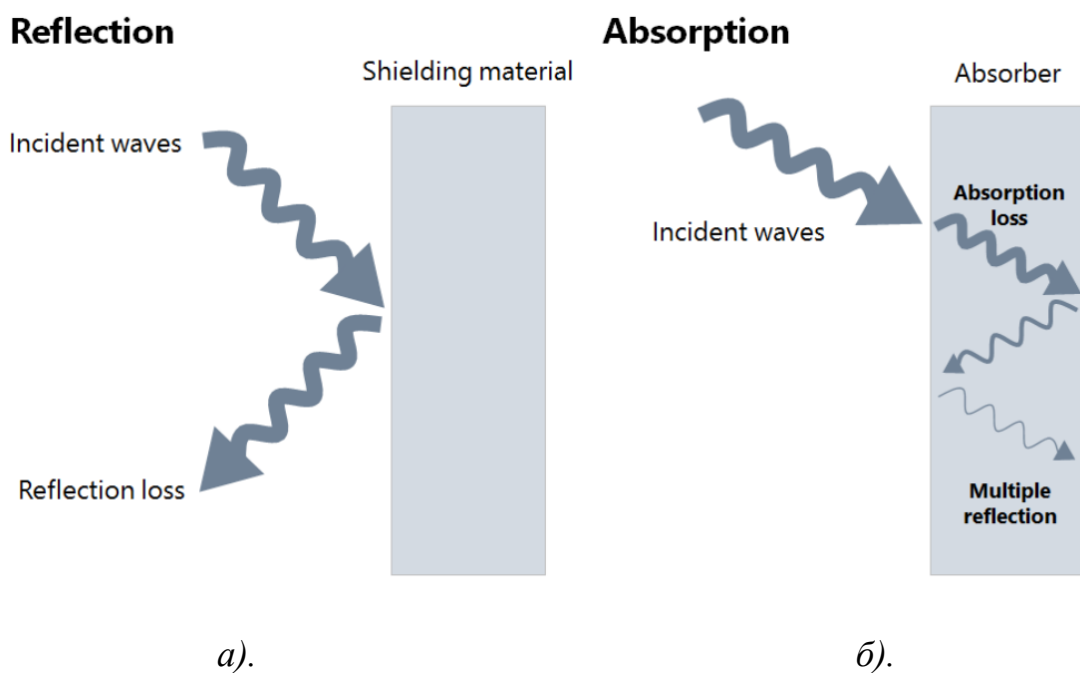


Рисунок 1.3 – Відбиття (reflection) і поглинання (absorption) електромагнітних хвиль [13]

Для матеріалів, що поглинають електромагнітні хвилі, важливим параметром є шар глибинного проникнення (δ), що визначає, на яку глибину в матеріал може проникати хвиля перед тим, як її інтенсивність знизиться до $1/e$. Цей ефект описується наступною формулою [14]:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu\omega}} \quad (1.2)$$

де p – електричний опір матеріалу;

μ – магнітна проникність матеріалу;

ω – кутова частота хвилі ($\omega = 2\pi f$, де f – частота хвилі).

Чим вища частота хвилі, тим менша глибина проникнення, тому високочастотні хвилі зупиняються на поверхні матеріалу, ефективно відбиваючись або поглинаючись.

Третім механізмом є багаторазові відбиття, які є відбиттями на різних поверхнях або на межі розділу матеріалу. Матеріали, які мають великі специфічні ділянки внутрішньої поверхні або композити з наповнювачами, реалізують механізм багаторазового відбиття. Коли відбиття відбуваються на різних поверхнях або краях екрану, то частина хвилі реплікується, а інша частина розповсюджується і зменшується при її проходженні через середовище. Цей механізм вимагає наявності великої інтерфейсної області в екрані, наприклад пористий матеріал або піна [12].

Для екранів з отворами чи решіток, ефективність захисту також залежить від дифракції, яка може пропускати частину хвилі через отвори. Диференціація електромагнітних хвиль на перфораціях визначається за допомогою співвідношення:

$$\sin(\theta) = \frac{n\lambda}{d} \quad (1.3)$$

де λ – довжина хвилі;

d – розмір отвору;

n – порядок дифракції.

Формула показує, як розмір отворів і довжина хвилі взаємодіють для визначення того, наскільки сильно хвиля буде дифрагувати через перфорації екрану.

Захисні матеріали вибирають залежно від частоти та сили електромагнітного випромінювання: Метали: мідь, алюміній і сталь є одними з найпоширеніших матеріалів для екранування через їх високу

електропровідність. Метали ефективно відбивають електромагнітні хвилі, особливо на високих частотах.

У роботі І. Шорсткі та М. Сосніна [15] досліджені властивості поглинання та відбиття мікрохвиль у композитних діелектричних поглиначах. За результатом дослідження було виявлено, що різні типи та концентрації наповнювачів впливають на поглинання та відбиття мікрохвиль. Металеві частинки можуть підвищувати поглинання, а ферити можуть зменшувати відбиття. Такі поглиначі використовуються для зменшення електромагнітних перешкод і захисту чутливих компонентів, поліпшення якості сигналів шляхом зменшення відбиття і контролювання напрямку хвиль, у телекомунікаційних системах для зменшення негативного впливу електромагнітного випромінювання на інші системи. Важливо обрати оптимальний склад і структуру для досягнення бажаних електромагнітних характеристик.

До засобів захисту від електромагнітного випромінювання відносять: огорожі електромагнітного випромінювання, покриття від електромагнітного випромінювання, фільтри, прокладки, поглиначі радіочастот та провідні фільтри. Існує велике різноманіття матеріалів, що використовують для екранування [16]. За останнє десятиліття з'явилася велика кількість інноваційних матеріалів, розроблених для екранування електромагнітного випромінювання, включаючи металеві наноматеріали, вуглецеві матеріали, 2D матеріали (наприклад, графен) і полімерні композити. Ці матеріали демонструють різноманітну морфологію, структуру, внутрішні фізико-хімічні властивості, виробничу сумісність та функціональні можливості.

З точки зору захисту від електромагнітного випромінювання, сировина відіграє ключову роль у визначенні характеристик екранування та функціональності екранів. Тим часом, вибір матеріалу також безпосередньо впливає на вибір методу виробництва та вартість виробництва.

Рішення для захисту від електромагнітного випромінювання традиційно базуються на використанні металів (таких як мідь, алюміній,

залізо, нікель), оскільки ці матеріали мають високу електропровідність, що дозволяє їм ефективно відбивати та поглинати електромагнітні хвилі. Однак метали важкі та схильні до корозії, а труднощі з їхньою обробкою створюють труднощі у виробництві. Ці внутрішні недоліки серйозно обмежили розробку рішень для екранування електромагнітних екранів наступного покоління на основі металів. Таким чином, деякі нові металеві наноматеріали (наприклад, металеві нановолокна та наночастинки) були розроблені для створення функціональних рішень для екранування [17]. Ці металеві наноматеріали можна легко диспергувати в рідких середовищах для обробки розчину або використовувати як наповнювачі для виготовлення електропровідних композитів [18]. Одне з рішень для екрануючого покриття від електромагнітних хвиль було розроблено [19] шляхом диспергування наночастинок срібла та покритих сріблом мікрочастинок міді в епоксидній смолі, що демонструє хорошу здатність екранувати електромагнітні хвилі (>60 дБ при 8 мкм), а також чудову адгезію до поверхні.

1.3 Способи надання текстильним матеріалам екрануючих властивостей

Серед різноманіття засобів екранування електромагнітного випромінювання особливу групу становлять гнучкі екрани на основі текстильних матеріалів. Екрануючі текстильні матеріали використовують для виробництва багатофункціональних та інтерактивних структур нового покоління [20], оскільки вони блокують радіацію низької щільності та радіовипромінювання пристроїв мобільного зв'язку, а також захищають електронне обладнання від втрати сигналу. Текстиль завдяки своїй гнучкості [21] та малій вазі [22] є широко поширеним матеріалом для виготовлення високотехнологічних екранів та інтерактивних конструкцій, що захищає від електромагнітного випромінювання. Окрім захисту від радіочастотних перешкод [23], переваги текстилю полягають у високих комфортних

характеристиках [24], таких як узгодженість теплового розширення та проникності [25], розтяжність тощо. Звичайний текстиль не має екрануючих властивостей для захисту від електромагнітного випромінювання, однак сучасні технології дозволяють успішно перетворити його на захисний матеріал, змінивши сировинний склад, створивши новий виробничий процес або адаптувавши існуючу технологію [20].

Залежно від сфери використання захисних текстильних матеріалів існує відмінність у вимогах стосовно ефективності екранування [26]. Загалом виділяють дві великі групи (таб.1.1): професійний захист та загальне використання. Перша група охоплює текстильні матеріали, які застосовують для виготовлення захисного спецодягу, медичного обладнання, електронного комплексу тощо. До виробів загального користування відносять повсякденний одяг та офісну форму, одяг для вагітних, фартухи, споживчі електронні товари тощо.

Таблиця 1.1 – Вимоги до ефективності екранування текстильних матеріалів [26]

Застосування	Ступінь екранування				
	5 відмінне	4 дуже добре	3 добре	2 середнє	1 низьке
Професійний захист	$SE > 60\text{dB}$	$60\text{dB} \geq SE > 50\text{dB}$	$50\text{dB} \geq SE > 40\text{dB}$	$40\text{dB} \geq SE > 30\text{dB}$	$30\text{dB} \geq SE > 20\text{dB}$
Загальне використання	$SE > 30\text{dB}$	$30\text{dB} \geq SE > 20\text{dB}$	$20\text{dB} \geq SE > 10\text{dB}$	$10\text{dB} \geq SE > 7\text{dB}$	$10\text{dB} \geq SE > 7\text{dB}$

Найпоширенішими способами створення текстильних матеріалів для захисту від електромагнітного випромінювання є покриття текстилю струмопровідними матеріалами (поверхнева обробка) та використання струмопровідних наповнювачів (волокон, пряжі, ниток, металевих дроту).

На сьогоднішній день у дослідженнях електромагнітних захисних матеріалів основний акцент робиться на використанні легких, тонких і м'яких тканин, які створюються шляхом вставки металевих волокон [27],

використання металевої піни [28] та застосування методів металевого покриття [29].

Загалом, технології фінішної обробки текстилю шляхом полімеризації поліаніліну *in situ* та нікелювання трикотажного полотна демонструють можливість виготовлення екрануючої високоефективної тканини, яку можна застосувати як екранування конференц-залів, електронної техніки та створення або захисних екранів складної конструкції [30]. Нові електропровідні тканини були розроблені шляхом полімеризації аніліну на поліамідних трикотажних полотнах [31] за рахунок формування поліаніліну, зв'язаного з поліамідними волокнами. В іншому дослідженні [32] виробляється трикотажне та ткане полотно з графеновим покриттям. Встановлено, що трикотаж має кращі показники з точки зору основних властивостей (питомий поверхневий опір, додатковий відсоток, повітропроникність, розмір пор, паропроникність, ніж у тканого полотна).

Авторами [33] розроблено технологію виготовлення текстильного матеріалу з вмістом феромагнітних наночастинок для екранування електромагнітного випромінювання. Дослідження показали, що найбільш ефективним методом зчеплення наночастинок з волокнами текстильного матеріалу є нанесення магнітної рідини з наночастинками на матеріал та витримка його у неоднорідному постійному магнітному полі. За умов напруженості магнітного поля 450 А/м та його впливу протягом 12 годин імплантація наночастинок у льняну тканину стає практично незворотною. У дослідженні [34] встановлено, що перспективним є застосування електронного парамагнітного резонансу для створення провідних текстильних матеріалів, що містять наночастинки, особливо наночастинки поліаніліну з високим ступенем окислення.

У роботі [35] композити з багат шарового льняного полотна/поліфенілпірролу/нікелю (LF/PPy/Ni) були виготовлені шляхом поєднання хімічного полімеризаційного методу та електролітного осадження. В результаті порівняльного аналізу встановлено, що найвища ефективність

екранування в діапазоні частот від 30 до 1000 МГц була досягнута у зразку з покриттям нікель/поліпіррол, який відповідає стандартам цивільної продукції.

Автори роботи [36] розробили та виготовили провідні тканини з достатніми властивостями екранування електромагнітного випромінювання, покривши їх двома різними провідними покриттями, що містять провідний полімер (PEDOT-PSS) та електрично провідний наповнювач (вуглець). Результати вимірювань екранування електромагнітного випромінювання, особливо в діапазоні 2 ГГц – 20 ГГц, показали, що тканини з провідними покриттями мають переваги порівняно з тканинами з металізованими нитками. Тканини з частковим покриттям мають значно нижчу ефективність екранування у діапазоні частот 2 ГГц – 20 ГГц порівняно з повністю покритими тканинами через відкриту (не покриту) структуру, що дозволяє електромагнітному випромінюванню проходити через структуру на коротших хвилях, тобто на вищих частотах. В діапазоні нижчих частот, між 20 кГц і 50 кГц, не спостерігалось значної різниці в значеннях ефективності екранування між повністю покритими та частково покритими тканинами.

Однак обробка поверхні часто займає багато часу, трудомісткість і до того ж досить дорога. Отже, провідні наповнювачі у вигляді провідних полімерів, металевих волокон, металевих дротів, покритих металом ниток або комплексних ниток все частіше використовуються для захисту від електромагнітного випромінювання.

Лу з командою у своїй роботі [37] дослідив композитний нетканий матеріал CEF-NF, виготовлений за допомогою двоетапного процесу мокрого папероутворення та термічного склеювання. Результати дослідження ефективності екранування у фланцевій коаксіальній тестовій системі у діапазоні частот 30 – 1500 МГц показали, що ефективність екранування зростає зі збільшенням поверхневої густини матеріалу, довжини волокон і концентрації вуглецевих волокон. За оптимальних параметрів процесу ефективність екранування нетканого матеріалу із вмістом лише 40 %

вуглецевих волокон і поверхневою густиною 50 г/м^2 може досягати загального показника ефективності екранування до 30,29 дБ або $110 \text{ дБ.см}^3/\text{г}$, що відповідає комерційним вимогам до захисту від електромагнітного випромінювання. Результати дослідження показали, що ефективність екранування можна покращити за допомогою довших вуглецевих волокон, більшої поверхневої густини та вищої концентрації вуглецевих волокон.

Авторами роботи [38] було підтверджено, що текстильні структури, виготовлені з традиційних волокон, є прозорими для електромагнітного поля. Ефективність екранування таких матеріалів не перевищує 0,1 дБ у частотному діапазоні від 200 до 1500 МГц незалежно від сировинного складу. З іншого боку, ефективність екранування текстильних структур, що містять різні типи та вміст провідних компонентів, коливається від 1 до 79 дБ у високочастотному діапазоні. Найкращі результати забезпечують зразки з металізованих пряж або волокон, які мають ефективність екранування у діапазоні 50–80 дБ, що відповідає рівню «дуже добре» навіть для професійного використання [26]. Крім того, металізовані текстильні структури демонструють частотно-незалежне екранування, що забезпечує стабільний рівень захисту у визначеному частотному діапазоні. Перспективним підходом є зразки, виготовлені з гібридних пряж (що містять штапельні волокна з нержавіючої сталі), особливо ткані матеріали. Ефективність екранування цих гібридних тканин коливається між 10 і 50 дБ залежно від структури та вмісту металевих волокон. Перевагою змішування провідних і непровідних волокон є приємні тактильні властивості фінального матеріалу, а також збереження зовнішнього вигляду, подібного до традиційних текстильних матеріалів. Ткані матеріали з вуглецевих ровінгів також демонструють дуже хорошу ефективність екранування та достатню повітропроникність, але вони не є придатними для традиційного застосування. Інші матеріалознавчі підходи, такі як покриття непровідних основ провідними полімерами, обробка металонаповненими пастами, включення вуглецевих частинок у неткані структури або додавання

провідних волокон у громіздкі неткані структури, не здаються перспективними, особливо з огляду на їхню низьку функціональність.

В дослідженні [39] було оцінено вплив типу металевого дроту, використаного у виробництві гібридної пряжі, типу ткацького переплетення та багат шаровості структури на ефективність екранування від електромагнітного випромінювання. Аналіз результатів випробувань показав, що тканини, виготовлені з гібридної пряжі з мідною обмоткою, демонстрували зростання значень ефективності екранування зі збільшенням частоти випромінювання до досягнення піку, після чого значення знижувалися. Натомість тканини з гібридною пряжею, обгорненою нержавіючою сталлю, не мали різко виражених піків, а лише незначні локальні підвищення. Багат шарові тканини [40] демонстрували вищі значення ефективності екранування при частотах понад 800 МГц (для мідної пряжі) та понад 400 МГц (для сталевих пряжі); при цьому структури з нержавіючою сталлю мали вищі пікові значення порівняно з одношаровими зразками. Комбінації різних типів металевих дротів та переплетень у двошаровій структурі демонстрували вищі пікові значення ефективності екранування, ніж структури з однаковим типом дроту в межах одного типу переплетення. Використання різних типів металевих дротів у дво- та тришарових структурах демонструвало вищу ефективність екранування лише на низьких частотах.

У роботі [41] проведено детальне дослідження властивостей гібридних пряж з акрилу/нержавіючої сталі та бавовни/акрилу/нержавіючої сталі, а також тканин, які виготовлені з них. Екрануючі властивості тканин полотняного та саржевого переплетень оцінювали у діапазоні частот від 0 до 3000 МГц. Дослідження показало, що тканини полотняного переплетення продемонстрували вищі значення ефективності екранування від електромагнітного випромінювання (понад 20 дБ) на високих частотах порівняно з тканинами виготовленими саржевими переплетенням.

У роботі [42] проаналізовано різні провідні текстильні матеріали – як тканин з інтегрованими провідними нитками, так і з покриттями – у забезпечення ефективності електромагнітного екранування у діапазоні частот від 0,1 до 1000 МГц із використанням ТЕМ-комірки. Результати показали зростання ефективності екранування на 10–25 дБ при введенні срібних ниток у напрямку основи або утку, варіацію у 5–35 дБ між провідними нитками зі срібла та нержавіючої сталі, а також приріст до 12 дБ завдяки нанесенню тонкого мідного покриття методом магнетронної плазми на тканини з провідними нитками.

На думку авторів роботи [43] екрануючі текстильні матеріали, які мають у своєму складі металеві волокна, прості для виробництва, мають відмінні характеристиками захисту від електромагнітного випромінювання та мають широку сферу застосування. Проте досліджень щодо застосування чистих металевих волокон в текстилі є небагато. Наразі, сучасні дослідження текстильних матеріалів з функцією екранування базуються на вивчені факторів, що впливають на ефективність екранування і тим самим дають можливість удосконалити процес їх розробки та виробництва.

1.4 Трикотажні матеріали з екрануючими властивостями

Трикотажні матеріали наразі не широко використовують в екранах електромагнітного випромінювання технічного призначення, але вони мають високий потенціал для захисних виробів, де важливі проникність і еластичність [44]. Слід зазначити, що застосовують обидві технології трикотажного виробництва основов'язання [45-47] та кулірне в'язання [48-49].

Основов'язання дозволяє створювати новітні еластичні матеріали із захисними властивостями, в яких як нитки поперечного утку використовують електропровідні компоненти (бамбукове вугілля/нержавіюча обгортка [45] або багатофункціональна гібридна пряжа [50]). Еластомерні

нитки використовували в якості поздовжнього утку для забезпечення високої еластичності полотна. Отримані еластичні осново-в'язані полотна можна використовувати як медичні пояси для вагітних, які мають хороші властивості пропускання водяної пари, далекого інфрачервоного випромінювання та електромагнітного екранування, а отже є незамінними з точки зору охорони здоров'я.

Щодо кулірного в'язання для виготовлення екрануючих матеріалів зазвичай використовуються три основних переплетення, такі як гладь [51], ластик [52] та інтерлок [53]. Частина розробок присвячена створенню екрануючих трикотажних матеріалів шляхом введення в структуру трикотажу металевих дротів у вигляді уткових ниток [22, 48, 54]. Результати досліджень показують, що такі трикотажні структури мають ефективність екранування 10–40 дБ на частоті 500 МГц [54]. З іншого боку, такі матеріали втрачають гнучкість у напрямку заповнення дроту, що знижує споживчі властивості матеріалів і обмежує сферу їх використання.

Деякі дослідники [55–57] звертають увагу на процес виготовлення електропровідних композиційних ниток з металевих дротів і трикотажних матеріалів на їх основі. Полотна з різних металів мали різні характеристики в різних діапазонах частот. У діапазоні 1–3 ГГц полотна з вмістом нержавіючої сталі мали кращу електромагнітну ефективність екранування, ніж з міддю і сріблом [52]. Інші [58–61] віддають перевагу двокомпонентним волокнам і пряжі «ядро-оболонка». Зазвичай електропровідні композиційні нитки метал/бавовна виробляються за технологією стрижневого прядіння на кільцепрядильній машині, використовуючи мідні дроти, з нержавіючої сталі, міді та срібла з товщиною $0,05 \div 0,12$ мм і звичайними (бавовняними) нитками 100 текс, а також 50 текс.

Tesel з колегами [32] досліджували трикотажне полотно переплетення гладь, яку використовують у виробництві футболок, і яку вироблено з провідних композитних ниток метал/бавовна. Було виявлено, що всі досліджені структури мали ефективність екранування більше ніж 7 дБ для

діапазонів стільникового зв'язку. Встановлено, що кількість бавовняної пряжі має велике значення для ефективності екранування незважаючи на те, що 100% бавовняне полотно не має здатності екранувати електромагнітне випромінювання, полотна з пряжі у 2 кінці мають вищі значення ефективності екранування, ніж полотна з бавовняної пряжі тієї ж лінійної густини але у 1 кінець. Palanisamy з командою [25] досліджували трикотажні полотна переплетень гладь та ластик 1+1, які вироблені з використанням пряжі з срібним покриттям, і виявили, що всі досліджувані полотна мали діапазон ефективності екранування 42–65 дБ для частоти 1,5 ГГц. Водночас встановлено, що полотна подвійних переплетення мають вищу екрануючу здатність порівняно з одинарними щодо дії електромагнітного випромінювання.

У іншому дослідженні [53] було відмічено, що трикотажні полотна, які виготовлено з пряжі низької лінійної густини, показали більшу ефективність екранування щодо дії електромагнітного випромінювання, оскільки була менша ізоляція металу. Вплив типу металевого дроту був дуже значним між 15 і 600 МГц. Збільшення діаметра мідного дроту свідчить про загальне зниження ефективності екранування електромагнітного випромінювання. Зі збільшенням діаметра вигин мідної нитки утруднений, що призводить до більш розрідженої структури трикотажу, а отже нижчої ефективності екранування [53, 60].

Фатма Цекен та Озлем Кайкан дослідили вплив структури трикотажу та кількості провідних ниток на ефективність електромагнітного захисту трикотажних полотен. У роботі [62] розглядаються полотна, виготовлені з мідних та нержавіючих сталевих дротів, які оплетені акриловими нитками. Результати показали, що переплетення трикотажу впливає на ефективність електромагнітного захисту. Крім того, трикотажні полотна, виготовлені на двофонтурних плоских в'язальних машинах з більшою кількістю провідних ниток та більшою поверхневою густиною, не забезпечували очікуваного покращення в значеннях ефективності електромагнітного захисту порівняно з

полотнами, виготовленими на однофонтурних плоских в'язальних машинах. У іншій своїй роботі [63] автори проаналізували різні варіанти переплетення, використовуючи одинарні та подвійні дроти, щоб визначити, як структура полотна впливає на його здатність екранувати електромагнітне випромінювання. В експериментах використовували полотна з мідними та сталевими дротами різного діаметра і кількості шарів. Було визначено, що полотна з подвійними шарами дротів мають значно кращі характеристики електромагнітного екранування на середніх і високих частотах, ніж полотна з одинарними шарами.

Не із командою [64], порівнюючи трикотажні полотна переплетень гладь, ластик 1x1 і 2x2, які містили пряжу з нержавіючої сталі, дійшли висновку, що розташування петель значно впливає на ефективність екранування. Полотна переплетень гладь ластик 2x2 показали подібну ефективність екранування у всіх діапазонах частот з піками 13,35 дБ (450 МГц) та 12,5 дБ (240 МГц) відповідно. Виявлена менша ефективність екранування трикотажного полотна переплетення ластик 1x1 (близько 3 дБ) у порівнянні з ластиком 2x2.

Дослідження [65] впливу виду петель (звичайних, пресових та подовжених з протяжкою поза ними) на ефективність екранування електромагнітних хвиль одинарних трикотажних полотен з бавовняної пряжі та металевого дроту показало, що одинарні трикотажні полотна з використанням дроту з нержавіючої сталі поєднують високу ефективність екранування з нижчою собівартістю виробництва. Останньою розробкою в цій темі було дослідження впливу різних комбінацій петель на ефективність екранування одно- та подвійних трикотажних полотен із композиційної пряжі, яка отримана обкручуванням дроту з нержавіючої сталі поліефірними волокнами [44]. Новий одинарний трикотаж з унікальною петельною структурою та оптимальним розміром отвору продемонстрував найвищу загальну ефективність екранування (до 17 дБ).

Дослідження подвійних трикотажних полотен для екранів електромагнітного випромінювання показали подібний ефект виду петлі на екрануючу здатність. Abdulla та ін. [66] досліджували трикотажні полотна з композиційної трощеної пряжі, що містить металеве волокно та бавовняну пряжу. Найкращі значення ефективності екранування (вище 20 дБ) були отримані для структури міланський ластик. Тунакова та ін. [67] розробили гібридні трикотажні тканини для екранування електромагнітного випромінювання та виявили, що ефективність екранування на низьких частотах була вищою за 10 дБ і залежала від розташування металевих дротів у трикотажній структурі. Такі гібридні трикотажні полотна мали хороший термофізіологічний [24] і сенсорний комфорт [68] разом із задовільними електромагнітними властивостями. Цю ідею наслідували Li та інші [69] у дослідженні подвійного трикотажу зі змішаної пряжі бавовна/дріт з нержавічної сталі. Було виявлено, що ефективність екранування полотна з утоковою ниткою була найпомітнішою серед досліджуваних структур. Результати іншого дослідження [70] показали, що ефективність захисту від електромагнітного випромінювання трикотажних полотен, виготовлених з гібридних ниток, залежить від кількості провідних металів та структури ниток.

Водночас встановлено [45, 49], що коли провідні металеві дроти були сформовані в композитній тканині, вони показали найкращу ефективність екранування від електромагнітного випромінювання, особливо для електромагнітних хвиль високої частоти. Yu з колегами [45] дійшли висновку, що ефективність захисту від електромагнітного випромінювання двошарових композитів залежить від кутів ламінування через те, що металевий дріт утворює структуру сітки в ламінованих структурах. Ozkan I. та Telli A. [40] досліджували вплив кількості шарів на властивості поглинання та відбиття у електромагнітному екрануванні та дійшли висновку, що вплив кількості шарів не був статистично значущим на

поглинуту та відбиту потужність у діапазоні 0,8–2,6 ГГц. Існувала значна різниця у співвідношенні поглиненої потужності для частоти вище 2,6 ГГц.

Грецька з колегами у своїй роботі [71] дослідила ефективність електромагнітного екранування трикотажних матеріалів з металізованими нитками. В експерименті використовувалися три типи металізованих ниток, а вимірювання ефективності екранування проводили на частотах 1,161 ГГц і 870 МГц. Середній результат ефективності екранування для всіх полотен становив 92%. Дослідження допомогло зрозуміти, як різні комбінації ниток і їх розташування впливають на захисні властивості полотна.

У дослідженні [72] було вивчено гібридну пряжу, яка виготовлена з вуглецевих та нержавіючих сталевих волокон за допомогою прядильного верстата Dref-3. Мікроскопічні зображення полотна підтвердили, що в'язання гібридної пряжі з вуглецевих та нержавіючих сталевих волокон не пошкоджує поверхню волокон. Трикотажні полотна переплетення гладь показали гарну ефективність екранування в діапазоні низьких частот. Це дослідження підкреслює, що структура полотна має більший вплив на ефективність екранування, ніж тип матеріалів.

У роботі [73] було розроблено, виготовлено та досліджено десять варіантів трикотажних полотен з електропровідної пряжі, сталевих та мідного дротів, які відрізнялися типом переплетення, структурними параметрами та сировинним складом. Вимірювання захисних властивостей проводилися як у напрямку петельних стовпчиків, так і у напрямку петельних рядів для двох діапазонів частот електромагнітного поля: 2 – 4 ГГц і 4 – 7 ГГц. Було встановлено, що ефективність екранування виготовлених матеріалів залежить від параметрів структури полотна, застосованих типів петель та виду пряжі. Дослідження показало, що всі варіанти трикотажних полотен ефективно ослаблювали електромагнітні хвилі в межах використаних діапазонів частот. Водночас було зафіксовано незначне зниження ефективності екранування зі зростанням частоти, особливо в найвищому діапазоні (7 ГГц). Встановлено, що ефективність

екранування залежить як від виду сировини, так і від структури полотен, а також від орієнтації полотна відносно хвильоводів. Результати дослідження відкривають можливості для створення трикотажних матеріалів, які мають функцію захисту від електромагнітного випромінювання.

Авторами роботи [74] було виготовлено пряжу типу «ядро-обплетення» зі складом мідь/бавовна, де як серцевину використовували мідні дроти різного діаметра (0,06, 0,07, 0,08 мм). Пряжу переробляли на в'язальних машинах 8, 10 і 12 класів у трикотаж переплетень міланський ластик та ластик 1×1. Результати дослідження показали, що важчі й товстіші зразки з більшою щільністю в'язання мають вищі значення ефективності екранування, а також що трикотажне полотно переплетенням міланський ластик забезпечує вищу ефективність екранування порівняно з трикотажним полотном переплетенням ластик 1×1. У роботі [75] досліджено характеристики ефективності екранування гібридних трикотажних полотен виготовлених різними переплетеннями з пряжі, що містить металеві волокна діаметром 50 мкм, такі як мідь, срібло та нержавіюча сталь. Було встановлено, що гібридні полотна переплетеннями міланський ластик, жакардове і піке, які рідко використовують в експериментах, дають кращі результати екранування порівняно з полотнами переплетення ластик за тих самих умов в'язання.

Результати дослідження [76] показали, що найвища ефективність екранування на рівні 27,80 дБ на низькій частоті і 28,01 дБ на високій частоті була отримана для полотна, виготовленого з пряжі 30–70% Ag-Co. У цьому діапазоні середні значення ефективності екранування збільшувалися з вмістом провідного матеріалу в структурі. Серед полотен з однаковим вмістом металевих волокон і різною структурою, трикотажні полотна переплетення інтерлок показали вищі значення ефективності екранування порівняно з трикотажними полотнами переплетення ластик, оскільки більша щільність полотна інтерлок забезпечувала кращий захист від

електромагнітних хвиль. Найнижче значення ефективності екранування серед усіх варіантів полотна було у ластика.

Підводячи підсумок вищезгаданого аналізу можна констатувати, що існуючі дослідження електропровідних трикотажних полотен показують, що рапорт переплетення, щільність полотна і довжина нитки у петлі, а також тип дроту, розташування його в структурі та кількість шарів впливають на ефективність екранування від електромагнітного випромінювання.

1.5 Методи дослідження екрануючих властивостей матеріалів

Вивчення екрануючих властивостей текстильних матеріалів є ключовим для розробки ефективних засобів захисту від електромагнітного випромінювання. Показником, який характеризує захисні властивості екранів є ефективність екранування (SE), яка виражається у децибелах (дБ), і є сумою втрат відбиття, втрати поглинання і множинного відбиття. Її визначають відношенням енергії, яку отримано при використанні матеріалу до енергії, яку отримано без його застосування і залежно від типу приймача може бути визначено за наступними формулами:

$$SE = 10 \log P_1/P_0 \text{ або } SE = 20 \log E_1/E_0 \text{ (дБ)} \quad (1.4)$$

де P_1 або E_1 – потужність або напруга, яку отримано при використанні матеріалу;

P_0 або E_0 – потужність або напруга, яку отримано без використання матеріалу

Ефективність екранування є комплексним показником, який залежить від багатьох факторів, класифікацію яких представлено на рис.1.4. Важливим фактором також є метод дослідження екрануючих властивостей.

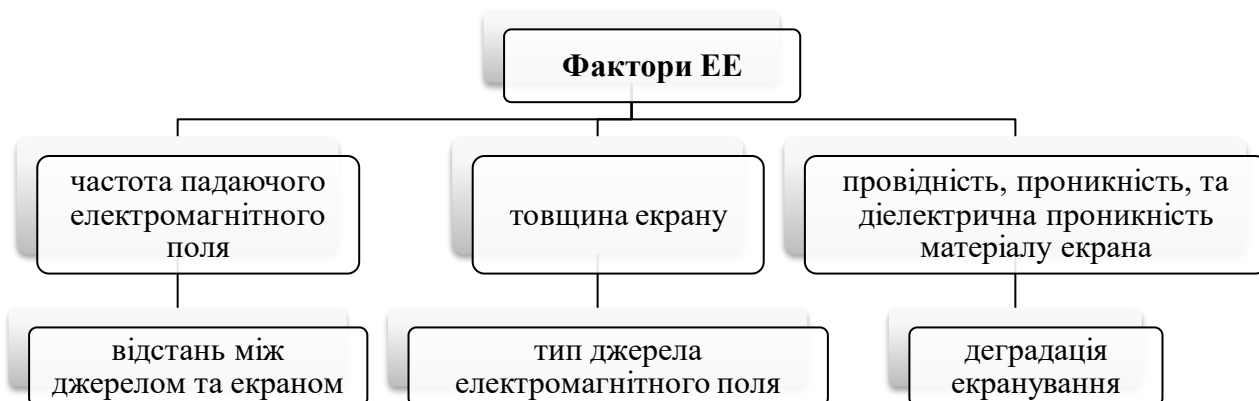


Рисунок 1.4 – Фактори ефективності екранування

Для оцінки ефективності таких матеріалів використовуються різноманітні методи, кожен з яких має свої переваги та обмеження. Тадеуш Венцковський та Ярослав Янукевич у своїй роботі [77] дослідили методи оцінки екрануючої ефективності текстильних матеріалів та виділили головні з них.

1. Метод вимірювання за допомогою коаксіальних вимірювальних камер є поширеним методом для оцінки ефективності екранування на різних частотах. Камера слугує для створення контрольованого середовища, через яке пропускають електромагнітну хвилю. Тестовий зразок поміщається всередину камери, і вимірюється сигнал на вході та виході. Цей метод зазвичай використовують для частот від 30 МГц до 1,5 ГГц, але може працювати й у ширших діапазонах. Перевагами цього методу є простота у використанні та універсальність (підходить для різних матеріалів). Недоліками методу є потреба точного кріплення зразка, щоб уникнути помилок у вимірюваннях, зазвичай використовують для відносно тонких зразків.

2. Випробування за допомогою хвилеводів найчастіше застосовують для випробувань у діапазонах від 1 ГГц до 100 ГГц. Хвилеводи використовують для направленої випромінювання електромагнітних хвиль через зразок текстилю, що дозволяє вимірювати їх відбиття та поглинання.

Хвилевод створює вузький канал для поширення електромагнітної хвилі, що дозволяє оцінювати поведінку матеріалів у контрольованих умовах. Перевагою методу є точне вимірювання височастотного екранування. Недоліками є обмежений частотний діапазон для кожного конкретного хвилеводу та потреба спеціалізованого обладнання.

3. Метод рупорних антен може охоплювати дослідження від низьких (кілька сотень МГц) до високих (кілька ГГц) частот. Цей метод використовує рупорні антени для створення електромагнітного поля і вимірювання екрануючих характеристик матеріалів. Переваги цього методу полягають в тому, що він підходить для великих зразків і тестування на різних частотах, може вимірювати відбиття, поглинання і пропускання електромагнітного випромінювання. Головні недоліки методу полягають у потребі великого простору для випробувань та у складності точного позиціонування зразків для повторюваних вимірювань.

4. Метод на основі випромінюючих і приймальних антен дозволяє досліджувати різні матеріали на конкретних частотах у діапазоні від 200 МГц до 10 ГГц. У цьому методі використовують пару антен — одна випромінює електромагнітне поле, а інша приймає сигнал після того, як він пройшов через зразок текстилю. Оцінку ефективності екранування проводять за рівнем ослаблення сигналу. Перевагами методу є легке адаптування для різних зразків і частот, а також можливість використання великих і складних за формою зразків. Недоліками є нестабільність вимірювання через фактори навколишнього середовища, а також необхідність постійного точного калібрування антен.

5. Метод екранування у замкненому просторі (рефлектометрія) передбачає розташування дослідного зразка в екрановану камеру або ізольований простір. В даному випадку досліджується здатність матеріалу блокувати або знижувати проникнення електромагнітних хвиль всередину або назовні від екранованого простору. Перевагами методу є широкий діапазон хвиль (від 100 МГц до 18 ГГц), точний контроль випромінювання та

мінімальний вплив зовнішніх факторів. Недоліками є досить дорога установка та обмежена кількість одночасно досліджуваних зразків.

6. Метод вимірювання опору або провідності текстильних матеріалів є опосередкованим методом визначення екрануючих властивостей матеріалів. Цей метод оцінює електропровідність текстильних матеріалів через вимірювання їх електричного опору, що є індикатором потенційної екранувальної здатності, оскільки матеріали з високою провідністю зазвичай мають кращі екранувальні властивості. Перевагами методу є простота та швидкість випробування, що можна використати для попереднього оцінювання провідних тканин. Недоліком є недостатнє уявлення про реальні екранувальні властивості матеріалів, особливо в умовах високочастотного випромінювання.

Отже, існують різні методи тестування електромагнітних екранувальних властивостей текстильних матеріалів, які охоплюють широкий спектр частот і використовують різні технічні підходи. І це, в свою чергу, впливає на результати досліджень [32]. Вибір методу залежить від типу матеріалу, його структури та передбачуваної сфери застосування.

З іншого боку, важливим фактором є конкретний план дослідження та/або методика його проведення відповідно до різних стандартів. Так метод вимірювання ефективності екранування від електромагнітного випромінювання за допомогою коаксіальних пристроїв знайшов своє відображення у ASTM D4935-10 [78] та ASTM E57 [79]. У дослідженні [80] встановлено, що велика різниця в значенні ефективності екранування проявляється між подвійною камерою для ASTM E57 та елементом коаксіальної лінії передачі для ASTM D4935.

Сафарова В з колегами [81] виділяє чотири методи, які найчастіше застосовують у дослідженнях екрануючої здатності текстильних матеріалів:

- метод екранованого ящика;
- метод екранованого приміщення;
- метод коаксіальної лінії передачі;

- метод відкритого поля або вільного простору.

Кожен із зазначених методів має певні переваги та обмеження. Наприклад, метод екранованої кімнати [82-84] є найбільш складним [16]. Як правило, джерело сигналу розташовується зовні випробувальної камери, тоді як вимірювальний пристрій знаходиться всередині. Розмір досліджуваного зразка зазвичай становить близько $2,5 \text{ м}^2$, а діапазон частот від 100 кГц до 10 ГГц. Водночас результати випробувань того самого матеріалу, отримані в різних лабораторіях, можуть відрізнятися навіть на кілька дБ [77]. Це є результатом застосування різних отворів в екранованій стінці камери, розмір яких залежить від типу та параметрів антени.

Незважаючи на спроби удосконалити той чи інший метод [85, 86], перевагу в дослідженнях надають методу коаксіальної лінії передачі відповідно ASTM D4935 [78]. Випробування проводять на невеликих зразках у формі «бублика». Незважаючи на те, що підготовка зразків досить трудомістка, результати, отримані в двох різних лабораторіях, порівнюються [81].

Незалежно від того, розробляються нові текстильні матеріали, призначені для електромагнітного екранування, чи модифікуються існуючі матеріали, призначені для цієї мети, щоб перевірити їхні параметри, порівняти їх з іншими матеріалами або оцінити ефект впроваджених модифікацій, завжди слід використовувати той самий метод вимірювання та ту саму геометрію тестової установки. Тільки такий підхід забезпечить достовірні результати для порівняння (відмінності матеріалів, ефекти модифікації тощо).

Висновки до розділу 1

1. Електромагнітне випромінювання є невід'ємною частиною навколишнього середовища, що має як природні, так і штучні джерела. З розвитком технологій рівень електромагнітного випромінювання в побуті значно зріс, що викликає занепокоєння щодо його впливу на здоров'я. Особливо актуальним є питання захисту людини від впливу радіочастотного випромінювання від мобільних телефонів, Wi-Fi пристроїв та інших електронних систем.

2. Захисні екрани є важливим засобом мінімізації впливу електромагнітного випромінювання на електронні пристрої та організм людини. Їхня ефективність визначається матеріалом, товщиною, частотою випромінювання та умовами експлуатації. Основні механізми екранування включають відбиття, поглинання та провідність електричного струму. Металеві матеріали, такі як мідь, сталь і алюміній, забезпечують високу ефективність відбиття, тоді як композитні матеріали можуть оптимізувати поглинання.

3. Текстильні матеріали для захисту від електромагнітного випромінювання виготовляються з провідних волокон або ниток, що включають металеві або вуглецеві компоненти. Трикотажні та ткані матеріали з металовмісними нитками та/або металевим дротом забезпечують високу ефективність захисту від електромагнітного випромінювання. Проте, проблемою залишається недостатня еластичність та комфортність таких матеріалів, що обмежує їх застосування у виробництві одягу.

4. Трикотажні структури можуть бути застосовані у виготовленні захисних екранів щодо дії електромагнітного випромінювання. Аналіз досліджень показав, що ефективність екранування трикотажними полотнами залежать здебільшого від структури трикотажу: виду переплетення, щільності полотна, товщини та поверхневої густини. В той же час, трикотажні матеріали, в порівнянні з тканими та нетканими полотнами

забезпечують вищі комфортні характеристики текстилю, а саме еластичність, драпіруємість, проникність.

5. Вивчення екрануючих властивостей текстильних матеріалів є важливим етапом у розробці ефективних засобів захисту від електромагнітного випромінювання. Для оцінки таких властивостей використовуються різноманітні методи, кожен з яких має свої переваги та обмеження. На підставі проведеного аналізу досліджень та рекомендацій щодо вибору методу, з'ясовано що метод коаксіальної лінії передачі відповідно ASTM D4935 є найбільш розповсюдженим і забезпечує водночас високу достовірність результатів для порівняння.

Список використаних джерел до розділу 1

1. Кундельська Т. В. Дослідження електромагнітного забруднення, ускладненого впливом базових станцій стільникового зв'язку, на урбанізованій території міста Івано-Франківська / Т. В. Кундельська, М. Т. Микицей // Екологічна безпека та природокористування. – 2017. – № 1. – Вип. 2 (23). – С. 21–27.
2. Електромагнітні хвилі. Використання електромагнітних хвиль. URL: <https://uahistory.co/pidruchniki/zasekina-physics-and-astronomy-11-class-2019-standard-level/33.php> (дата звернення 20.06.2024)
3. Fritzsche, H. and Phillips, Melba. "Electromagnetic radiation." Encyclopedia Britannica, June 6, 2024. URL: <https://www.britannica.com/science/electromagnetic-radiation> (дата звернення 20.06.2024)
4. Шкала електромагнітних хвиль. <https://www.miyklas.com.ua/p/fzika/9-klas/mekhanichni-ta-elektromagnitni-khvili-347336/viniknennia-ta-poshirennia-mekhanichnikh-khvil-elektromagnitni-khvili-338893/re-f99cbd97-eea2-42d4-af21-4ad1d29e8904> (дата звернення 28.06.2024)
5. IARC classifies Radiofrequency Electromagnetic Fields as possibly carcinogenic to humans. URL: <https://www.iarc.who.int/pressrelease/iarc-classifies-radiofrequency-electromagnetic-fields-as-possibly-carcinogenic-to-humans/> (дата звернення 20.06.2024)
6. World Health Organization. URL: <https://www.who.int/> (дата звернення 20.06.2024)
7. Rössli M, Lagorio S, Schoemaker MJ, Schüz J, Feychting M. Brain and Salivary Gland Tumors and Mobile Phone Use: Evaluating the Evidence from Various Epidemiological Study Designs. *Annu Rev Public Health*. 2019 Apr 1;40:221-238. doi: 10.1146/annurev-publhealth-040218-044037. Epub 2019 Jan 11. PMID: 30633716.

8. Magnets in Cell Phones and Smart Watches May Affect Pacemakers and Other Implanted Medical Devices. URL: <https://www.fda.gov/radiation-emitting-products/cell-phones/magnets-cell-phones-and-smart-watches-may-affect-pacemakers-and-other-implanted-medical-devices> (дата звернення 20.06.2024)
9. Letter to the Editor—Lifesaving therapy inhibition by phones containing magnets. Greenberg, Joshua C. et al. Heart Rhythm, Volume 18, Issue 6, 1040 – 1041.
10. How to reduce exposure from mobile phones and other wireless devices. URL: <https://www.arpana.gov.au/understanding-radiation/radiation-sources/more-radiation-sources/reducing-exposure-to-mobile-phones> (дата звернення 20.06.2024)
11. Arabuli S. The modern approach to EMR shielding / S. Arabuli, V. Vlasenko, A. Arabuli // Proceedings II International Scientific Conference Contemporary Trends and Innovations in the textile industry (16-17 th May, 2019). – Belgrade: Union of Engineers and Technicians of Serbia, 2019. – pp. 372-377.
12. Advanced Materials for Electromagnetic Shielding: Fundamentals, Properties, and Applications, First Edition./Edited by Maciej Jaroszewski, Sabu Thomas, and Ajay V. Rane. – 2019, John Wiley & Sons, Inc. – 464 с.
13. Electromagnetic wave shielding ink. URL: <https://www.teikokuink.com/en/techreport/20201118/> (дата звернення 01.11.2024)
14. Chung, D.D.L. Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon materials / D.D.L. Chung // Carbon. – 2001, Vol. 39. – pp. 279–285.
15. Microwave absorption and reflection properties of a composite dielectric absorber. I. Shorstkii and M. Sosnin - 2019 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 564 012041.
16. Geetha S. EMI Shielding: Methods and Materials – A review / S. Geetha, K. K. Satheesh Kumar, Chepuri R. K. Rao, M. Vijayan, D. C. Trivedi // Journal of Applied Polymer Science. – 2009, Vol. 112. – pp. 2073–2086.

17. Wu S. et al. Robust and stable Cu nanowire@ graphene core–shell aerogels for ultraeffective electromagnetic interference shielding //Small. – 2018. – Т. 14. – №. 23. – С. 1800634.
18. Lee S. H. et al. Low percolation 3D Cu and Ag shell network composites for EMI shielding and thermal conduction //Composites Science and Technology. – 2019. – Т. 182. – С. 107778.
19. Erickson S., Sakaguchi M. Application of package-level high-performance EMI shield material with a novel nozzleless spray coating technology //2020 IEEE 70th Electronic Components and Technology Conference (ECTC). – IEEE, 2020. – С. 1691-1696.
20. Кизимчук О. П. Текстиль для захисту від електромагнітного випромінювання / О. П. Кизимчук, С. І. Арабулі, В. І. Власенко // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія Технічні науки. - 2019. - № 3 (134). - С. 48-61.
21. Maity, S., Singha, K., Singha, M. Textiles in Electromagnetic Radiation Protection, Journal of Safety Engineering, 2013; 2 (2): 11-19. doi:10.5923/j.safety.20130202.01.
22. Cheng, K.B., Lee, K.C., Ueng, T.H., and Mou, K.J. Electrical and impact properties of the hybrid knitted inlaid fabric reinforced polypropylene composites, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2002; 33 (9): 1219–1226. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(02\)00076-3](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(02)00076-3).
23. Sirková BK, Tunáková V, Tunák M, Jezik K. Influence of woven fabric construction parameters on electromagnetic shielding effectiveness: Part I – weave influence. Textile Research Journal. 2022; 92(21-22): 4020-4040. doi:10.1177/00405175221100390.
24. Tunakova V, Tunak M, Tesinova P, Seidlova M, Prochazka J. Fashion clothing with electromagnetic radiation protection: aesthetic properties and performance. Textile Research Journal. 2020; 90(21-22): 2504-2521. doi:10.1177/0040517520923047.

25. Palanisamy S, Tunakova V, Ornstova J, Vysanska M, Militky J. The effect of tensile deformation of knitted fabrics on their electromagnetic shielding ability, electrical resistance, and porosity. *Journal of Industrial Textiles*. 2024;54. doi:10.1177/15280837241239232.
26. Committee for Conformity Assessment of Accreditation and Certification on Functional and Technical Textiles. Specified requirements of electromagnetic shielding textiles. Taipei/Taiwan, Standard No. FTTS-FA-003, (2005) <http://www.ftts.org.tw/images/fa003E.pdf>
27. Roh J.S. Electromagnetic shielding effectiveness of multifunctional metal composite fabrics. / Roh J.S., Chi Y.S., Kang T.J., and Nam S.W. // *Textile Research Journal*. – 2008, Vol. 78 (9). – pp. 825–835.
28. Xu Z. Electromagnetic interference shielding effectiveness of aluminum foams with different porosity. / Xu Z. and Hao H. // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2014, Vol. 617. – pp. 207–213. DOI: 10.1016/j.jallcom.2014.07.188.
29. Karbownik I. Textile multi-layer systems for protection against electromagnetic radiation / Karbownik I., Malinowska G., and Rybicki E. // *Fibres & Textiles in Eastern Europe*. – 2009, Vol. 17, Iss. 2 (73). – pp. 66-71.
30. Engin, F.Z. and Usta I. Development and characterisation of polyaniline/polyamide (PANI/PA) fabrics for electromagnetic shielding, *The Journal of The Textile Institute*, Vol. 106 (2015) No 8, pp. 872-879, DOI: 10.1080/00405000.2014.950085.
31. Chatterjee, A., Kumar, M. N., & Maity, S. Influence of graphene oxide concentration and dipping cycles on electrical conductivity of coated cotton textiles, *The Journal of The Textile Institute*, Vol. 108 (2017) No 11, pp. 1910-1916, DOI: 10.1080/00405000.2017.1300209.
32. Tezel S, Kavuşturan Y, Vandenbosch GA, Volski V. Comparison of electromagnetic shielding effectiveness of conductive single jersey fabrics with coaxial transmission line and free space measurement techniques. *Textile Research Journal*. 2013;84(5):461-476. doi:10.1177/0040517513503728.

33. Glyva Valentyn, Barabash Oleg, Kasatkina Natalia, Katsman Mykhailo, Levchenko Larysa, Tykhenko Oksana, Nikolaiev Kyrylo, Panova Olena, Khalmuradov Batyr, Khodakovskiy Oleksiy. Studying the shielding of an electromagnetic field by a textile material containing ferromagnetic nanostructures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020 (1). Pages 26-31. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.195232.
34. Red'ko, Y., Brik, A., & Suprun, N. (2017). Investigation of properties of electroconducting nanozones in materials of various nature by the electron paramagnetic resonance method. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(5 (87), 24–30. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.104055>
35. Zhao Hang, Hou Lei, Lu Yinxiang. Electromagnetic interference shielding of layered linen fabric/polypyrrole/Nickel (LF/PPy/Ni) composites. *Materials & Design*. 2016. 95. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.01.088.
36. Vitalija Rubežienė, Julija Baltušnikaitė, Sandra Varnaitė-Žuravlioja, Audronė Sankauskaitė, Aušra Abraitienė, Jonas Matuzas. Development and investigation of electromagnetic shielding fabrics with different electrically conductive additives. *Journal of Electrostatics*. Volume 75, 2015, Pages 90-98. ISSN 0304-3886. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2015.03.009>
37. Longsheng Lu, Di Xing, Kwok Siong Teh, Huilong Liu, Yingxi Xie, Xiaokang Liu, Yong Tang. Structural effects in a composite nonwoven fabric on EMI shielding. *Materials & Design*. Volume 120, 2017, Pages 354-362. ISSN 0264-1275. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.02.025>.
38. Palanisamy Sundaramoorthy, Tunakova Veronika, Militky Jiri. Fiber-based structures for electromagnetic shielding – comparison of different materials and textile structures. *Textile Research Journal*. 2017. 88 (17):004051751771508. DOI: 10.1177/0040517517715085.
39. Okur Nazan, Saricam Canan. Electromagnetic shielding effectiveness of woven fabrics containing cotton/metal-wrapped hybrid yarns. *Journal of Industrial Textiles*. 2016 (46). DOI: 10.1177/1528083715613628.

- 40.Özkan I. and Telli A. The effects of metal type, number of layers, and hybrid yarn placement on the absorption and reflection properties in electromagnetic shielding of woven fabrics. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, Doi: 10.1177/1558925019860961
- 41.Ayşe Bedeloglu. Investigation of electrical, electromagnetic shielding, and usage properties of woven fabrics made from different hybrid yarns containing stainless steel wires. *The Journal of The Textile Institute*. 2013. 104 (12), Pages 1359-1373. DOI: 10.1080/00405000.2013.806049
- 42.Surdu Lilioara, Visileanu Emilia, Costea Marian, Morari Cristian, Rădulescu Ion. Conductive textile structures and their contribution to electromagnetic shielding effectiveness. *Industria textilă*. 2020. V. 71. Pages 432-437. DOI: 10.35530/IT.071.05.1783
- 43.Wu J, Gao Y. Research progress of the electromagnetic shielding material of metal fiber: issues and future scope. *Textile Research Journal*. 2024;94(1-2):286-307. doi:10.1177/00405175231200652
- 44.Usman Ahmed, Tanveer Hussain, Hafiz Shehbaz Ahmad, Novel knitted fabric structures for shielding against electromagnetic and thermal radiation from laptops and mobile phones, *International Journal of Thermal Sciences*, 2023, 194: 108594, <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2023.108594>.
- 45.Yu ZC, He HL, Lin JH, et al. Functional Properties and Electromagnetic Shielding Behaviour of Elastic Warp-knitted Fabrics, *Fibres and Textile in Eastern Europe*, 2015; 23, 5 (113): 78-83.
- 46.Yu ZC, Zhang JF, Lou, CW, et al. Determination of electro-magnetic shielding and antibacterial properties of multifunctional warp-knitted fabrics, *Journal of Textile Institute*. 2015; 106 (11): 1203-1211. DOI: 10.1080/00405000.2014.984444.
- 47.Pušić T, Šaravanja B, Malarić K. Electromagnetic Shielding Properties of Knitted Fabric Made from Polyamide Threads Coated with Silver. *Materials (Basel)*. 2021 Mar 8;14(5):1281. doi: 10.3390/ma14051281. PMID: 33800263; PMCID: PMC7962651.

- 48.Ciesielska-Wróbel I, Grabowska K. Estimation of the EMR Shielding Effectiveness of Knit Structures, Fibres and Textile in Eastern Europe, 2012; 20, 2 (91): 53-60.
- 49.Erdem E. Hybrid rib fabric electromagnetic shielding measurement in X-band. Textile Research Journal. 2024;0(0). doi:10.1177/00405175241288888.
- 50.Lin, J.H., Huang, Y.T., Li, T.T. et al. Manufacture technique and performance evaluation of electromagnetic-shielding/far-infrared elastic warp-knitted composite fabrics, The Journal of the Textile Institute, Vol. 107 (2016) No. 4, pp. 493-503, doi: 10.1080/00405000.2015.1045253.
- 51.Cheng K.B. Production and Electromagnetic Shielding Effectiveness of the Knitted Stainless Steel/Polyester Fabrics, Journal of Textile Engineering, 2000, 46, 42-52 DOI: 10.4188/jte.46.42.
- 52.Özkan I. Investigation of the technical and physical properties of metal composite 1×1 rib knitted fabrics. Industria Textila, 71(01), 41-49, DOI:10.35530/IT.071.01.1693.
- 53.Sancak, E., Akalin, M., Usta, I., Yuksek, M. and Özen, M.S. The Effects of Fabric and Conductive Wire Properties on Electromagnetic Shielding Effectiveness and Surface Resistivity of Interlock Knitted Fabrics, Fibers and Polymers, Vol.19 (2018) No. 4, p. 843-853, DOI: 10.1007/s12221-018-7906-8.
- 54.Soyaslan, D., Çömlekçi, S. and Göktepe, Ö. Determination of electromagnetic shielding performance of plain knitting and 1x1 rib structures with coaxial test fixture relating to ASTM D4935, The Journal of The Textile Institute, Vol. 101 (2010) No 10, pp. 890-897,, DOI: 10.1080/00405000902945360.
- 55.Jagatheesan, K., Ramasamy, A., Das, A. & Basu, A.A. Electromagnetic shielding effectiveness of carbon/ stainless steel/polypropylene hybrid yarn-based knitted fabrics and their composites, The Journal of The Textile Institute, Vol. 109 (2018) No 11, pp. 1445-1457, DOI: 10.1080/00405000.2018.1423883.
- 56.Palanisamy, S., Tunakova, V. & Militky, J. Fiber-based structures for electromagnetic shielding – comparison of different materials and textile

- structures, *Textile Research Journal*, Vol. 88 (2018) No. 17, pp. 1992-2012, doi: 10.1177/0040517517715085.
- 57.Özkan I., İlhan I., Yazar A. Y. Investigation on electromagnetic interference properties, surface resistivity and antibacterial activity of woven fabrics produced by cotton/metal composite yarns. *Tekstil ve Mühendis*, 26(115), 281-288, Doi:10.7216/1300759920192611508.
- 58.Celen, R. and Ulcay, Y. Investigating electromagnetic shielding effectiveness of knitted fabrics made by barium titanate/polyester bicomponent yarn, *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, Vol.14 (2019), DOI: 10.1177/1558925019837806.
- 59.Mofarah, H. M., Najar, S.S., & Etrati, S.M. Investigating the electromagnetic shielding effectiveness of copper/cotton full Milano and 1 × 1 rib weft-knitted fabrics, *The Journal of The Textile Institute*, Vol. 110 (2019) No 6, pp. 891-900, DOI: 10.1080/00405000.2018.1531743.
- 60.Perumalraj, R., and Dasaradan, B.S. Electromagnetic shielding effectiveness of copper core yarn knitted fabrics, *Indian Journal of Fibre and Textile Research*, Vol. 34 (2009) No. 2, pp. 149-154.
- 61.Bedeloglu, A. Electrical, electromagnetic shielding, and some physical properties of hybrid yarn-based knitted fabrics, *The Journal of the Textile Institute*, Vol. 104. (2013) pp. 1247–1257,
- 62.Çeken, F., Kayacan, Ö., Özkurt, A., & Uğurlu, Ş. S. (2011). The electromagnetic shielding properties of some conductive knitted fabrics produced on single or double needle bed of a flat knitting machine. *The Journal of The Textile Institute*, 103(9), 968–979. <https://doi.org/10.1080/00405000.2011.639514>
- 63.Çeken, F et al.: (2011) The electromagnetic shielding properties of copper and stainless steel knitted fabrics, *Tekstil* 60 (7) 321-328.
- 64.He S, Liu Z, Wang H, Wang X. Effect of needle loops on shielding effectiveness of electromagnetic shielding knitted fabrics. *Textile Research Journal*. 2023; 93(3-4): 691-700. doi: 10.1177/00405175221122579.

65. Tezel, S., Kavuştur, Y., Vandenbosch, G. A., Volski, V. (2023). Influence of Knitting Structure and Metal Wire Amount on Electromagnetic Shielding Effectiveness of Knitted Fabrics. *Textile and Apparel*, 33(1), 37-44. <https://doi.org/10.32710/tekstilvekonfeksiyon.987174>
66. Ruslan Abdulla, Ediz Delihasanlar, Fidan Gamze Kizilcay Abdulla, and Ahmet Hayrettin Yuzer, "Electromagnetic Shielding Characterization of Conductive Knitted Fabrics," *Progress In Electromagnetics Research M*, Vol. 56, 33-41, 2017. doi:10.2528/PIERM17011305.
67. Tunakova V, Tunak M, Bajzik V, et al. Hybrid knitted fabric for electromagnetic radiation shielding. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. 2020; 15: 1-9. doi:10.1177/1558925020925397.
68. Arabuli S, Arabuli A, Bajzik V, Tunakova V, Kyzymchuk O. Tensile properties of knitted fabrics for EMR shielding. *Book of proceedings: AUTEX 2024 World Conference*, (2024) ISBN 978-80-7494-705-6.
69. Li, Ning, Liu, Tianjiao, Tian, Mengqi, Duan, Junrui, Yao, Mu and Sun, Runjun. "Comprehensive performance evaluation based on electromagnetic shielding properties of the weft-knitted fabrics made by stainless steel/cotton blended yarn" *e-Polymers*, vol. 23, no. 1, 2023, pp. 20230065. <https://doi.org/10.1515/epoly-2023-0065>.
70. Ortlek HG, Alpyildiz T, Kilic G. Determination of electromagnetic shielding performance of hybrid yarn knitted fabrics with anechoic chamber method. *Textile Research Journal*. 2013;83(1):90-99. doi:10.1177/0040517512456758.
71. Grecka, Marianna, et al. "EMF Shielding Effectiveness of Knitted Fabrics of Metallized Threads." *Materials Science. Textile and Clothing Technology* 9 (2014): 50-55.
72. Krishnasamy Jagatheesan, Alagirusamy Ramasamy, Apurba Das & Ananjan Basu. Electromagnetic shielding effectiveness of carbon/stainless steel/polypropylene hybrid yarn-based knitted fabrics and their composites. *The Journal of The Textile Institute*. 2018. 109 (3). Pages 1-13. DOI: 10.1080/00405000.2018.1423883.

73. Mikołajczyk Z, Nowak I, Januszkiewicz Ł, Szewczyk M, Junak J. Modern Electromagnetic-Radiation-Shielding Materials Made Using Different Knitting Techniques. *Materials*. 2024; 17(13):3052. <https://doi.org/10.3390/ma17133052>
74. Mohammadi Mofarah, Hamed & Najar, Saeed & Etrati, Seyed Mohammad. Investigating the electromagnetic shielding effectiveness of copper/cotton full Milano and 1 × 1 rib weft-knitted fabrics. *The Journal of The Textile Institute*. 2018. V. 110. Pages 1-10. DOI: 10.1080/00405000.2018.1531743.
75. Yuzer Ahmet, Abdulla Ruslan, Erdem Ediz, Abdulla Fidan. Electromagnetic shielding characterization of conductive knitted fabrics. *Progress In Electromagnetics Research M*. 2017. V. 56. Pages 33-41. DOI: 10.2528/PIERM17011305
76. Kaya Deniz, Oglakcioglu Nida, Sari Burak, Aktekeli Yılmaz, Hatice. Electromagnetic Shielding and Comfort Properties of Knitted Fabrics Produced by Electrically Conductive Fibers. *Fibers and Polymers*. 2023. V. 24. DOI:10.1007/s12221-023-00200-0.
77. Tadeusz W. Wieckowski, Jarosław M. Janukiewicz (2005). Methods for evaluating the shielding effectiveness of textiles, *Fibres and Textiles in Eastern Europe* 14(5):18-22
78. ASTM-D4935-18 Standard Test Method for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Planar Materials. URL: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/73929/83dd57d06fe945159403480c0559a4dd/ASTM-D4935-10.pdf> (дата звернення 02.09.2024)
79. ASTM E57 Emergency Standard Test Methods for Electromagnetic Shielding Effectiveness of Planar Materials.
80. Chena H.C., Lee K.C., Lin J.H., Koch M. Comparison of electromagnetic shielding effectiveness properties of diverse conductive textiles via various measurement techniques // *Journal of Materials Processing Technology* – 2007, 192-193 – C. 549–554.
81. Šafařová Veronika & Militký Jiří. Comparison of methods for evaluating the electromagnetic shielding of textiles // *Vlákna a Textil*. – 2012, 19 (3). – 50-56

- 82.MIL-STD-285, Military Standard: Attenuation Measurements for Enclosures, Electromagnetic Shielding, for Electronic Test Purposes.
- 83.IEEE-STD-299-2006 Standard Method for Measuring the Effectiveness of Electromagnetic Shielding Enclosures URL: <https://www.ledphotometer.com/wp-content/uploads/2020/02/IEEE-STD299-2006-Standard-Free-Download.pdf> (дата звернення 02.09.2024)
- 84.IEC 61000-5-7. Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 5-7: Installation and Mitigation Guidelines - Degrees of Protection Provided by Enclosures Against Electromagnetic Disturbances (EM Code)
- 85.Šafářová V, Tunák M, Truhlář M, Militký J. A new method and apparatus for evaluating the electromagnetic shielding effectiveness of textiles. Textile Research Journal. 2015;86(1):44-56. doi:10.1177/0040517515581587
- 86.Hong Y. K., Lee C. Y., Jeong C. K., Lee D. E., Kim K., Joo J.; Method and apparatus to measure electromagnetic interference shielding efficiency and its shielding characteristics in broadband frequency ranges. Rev. Sci. Instrum. 1 February 2003; 74 (2): 1098–1102. <https://doi.org/10.1063/1.1532540>

2 РОЗДІЛ. ОБ'ЄКТ, ПРЕДМЕТ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Об'єкт та предмет дослідження

Об'єкт дослідження – процес виготовлення екрануючих гібридних трикотажних матеріалів, які здатні захищати від електромагнітного випромінювання.

Предмет дослідження – гібридні трикотажні матеріали для захисту від електромагнітного випромінювання, виготовлені шляхом введення у петельну структуру металевого дроту з нержавіючої сталі.

2.2 Елементи петельної структури трикотажних екранів

Як було з'ясовано у 1 розділі існує можливість отримання захисних текстильних екранів шляхом переробки струмопровідних ниток на в'язальному обладнанні. Трикотажні структури є кращим варіантом для використання в засобах індивідуального захисту (комбінезонах або обмундируванні), що захищають від електромагнітного випромінювання за умови, що вони виготовлені з належного феромагнітного матеріалу, який включено в структуру [1]. Для отримання трикотажних екранів для захисту від електромагнітного випромінювання використовують як кулірне в'язання [2] так і основов'язання [3].

Головними переплетеннями для отримання текстильних екранів на кулірних машинах є гладь, ластик та інтерлок. Полотна переплетення ластик 1+1 демонструють кращі значення ефективності екранування порівняно з полотнами переплетення гладь [4]. В той же час трикотажне полотно переплетення інтерлок має кращу ефективність електромагнітного екранування, ніж ластик та гладь [5].

Усі вищезгадані полотна утворені лише з петель (рис.2.1), які складаються з двох паличок остова петлі, голкової та платинової дуг [6]. У трикотажній структурі петля має чотири зони контакту з сусідніми петлями:

дві у основі петлі (а та d) з петлями попереднього ряду та дві у головці петлі (b та c) з петлями наступного петельного ряду [7].

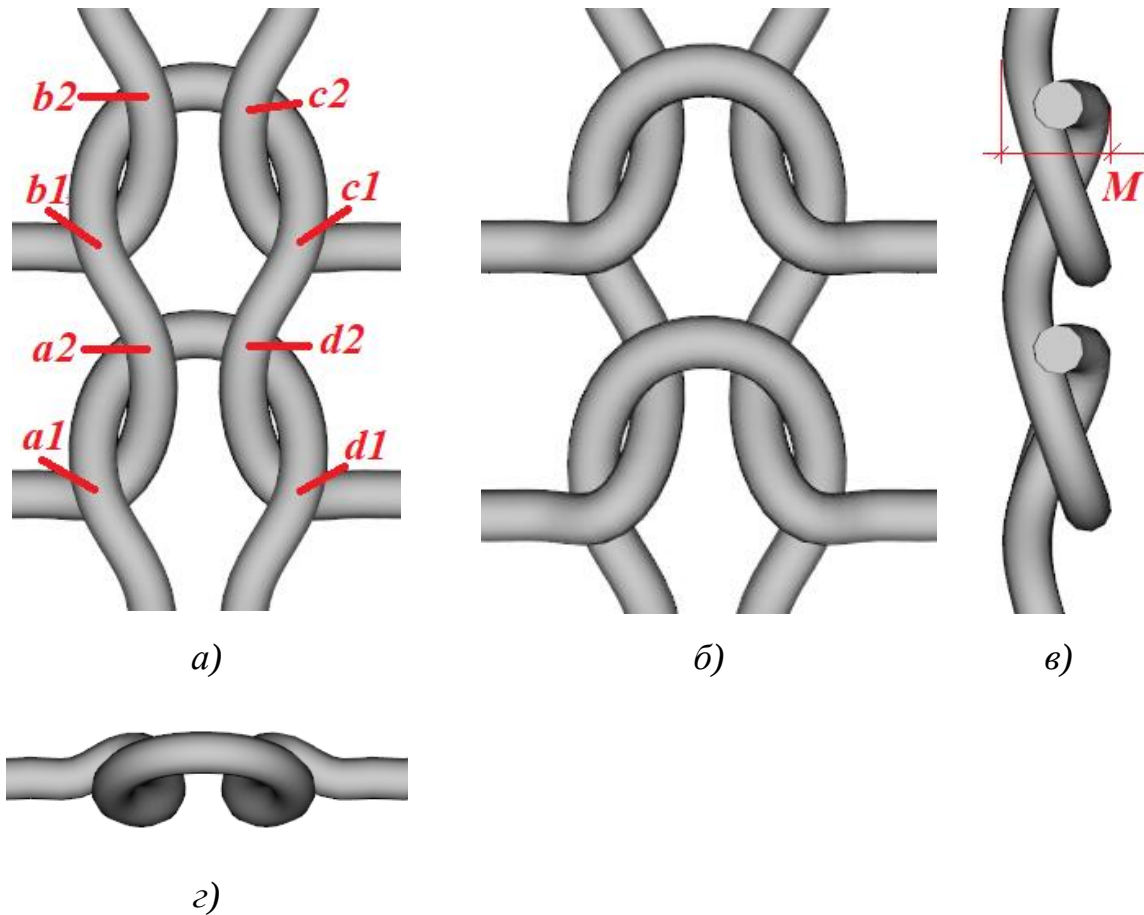


Рисунок 2.1 – Петля кулірного трикотажу: а – лицьова сторона; б – виворітна сторона; в – переріз по петельному стовпчику; г – переріз по петельному ряду

Величина зони контакту залежить від властивостей пряжі (переважно її жорсткості на згин) та виду переплетення (сусідні петлі формуються на голках однієї або різних голочниць) [7]. Так, при формуванні петель з жорстких ниток (мононитки, дроту) в кожній контактній зоні можна виділити дві точки, в яких відбувається контакт (рис.2.1.а). При використанні, наприклад, струмопровідних ниток, це призводить до зростання електропровідності полотна [8].

Слід зазначити, що переплетення гладь утворюється послідовним поєднанням однакових петель, які формуються на голках однієї голочниці. Отже, в разі використання дроту для формування полотна, отримуємо сітчасту структуру (рис.2.2.а), усі петлі якої розташовані в одній площині (рис.2.2.в). Товщина такого полотна (М) становить 2 діаметри (рис.2.1.в).

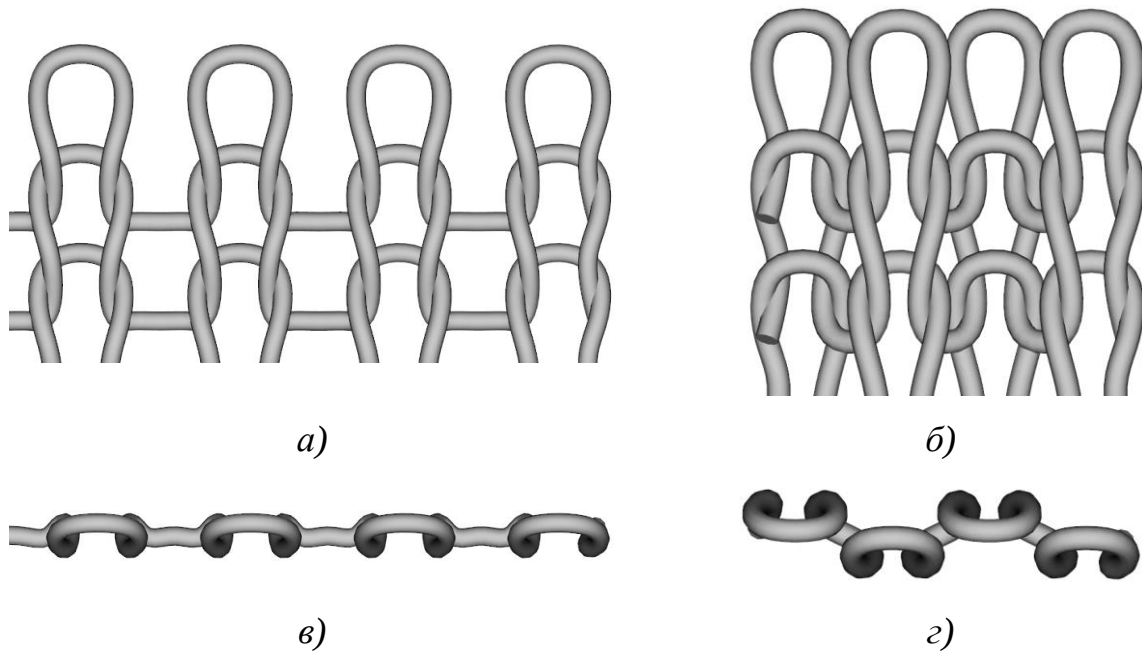


Рисунок 2.2 – Структура трикотажу переплетень гладь (а) та ластик 1+1 (б) та розташування петель по товщині (в та г)

В той же час, трикотаж переплетення ластик 1+1 (рис.2.2.б) отримують чергуванням лицьової та виворітної петель, які формують на голках різних голочниць. В результаті основи петель розташовуються у двох площинах (рис.2.2.г), які поєднані протяжками (платиними дугами). Слід зазначити, що сусідні лицьова та виворітна петлі можуть перекривати одна одну, створюючи так званий телескопічний захід, величина якого залежить від властивостей сировини та умов в'язання [9]. Товщина такого трикотажу збільшується і становить 4 діаметри [6].

Переплетення інтерлок являє собою структуру, яка утворена сполученням двох ластиків, таким чином, що у проміжках між петельними

стовпчиками одного ластика розміщуються петельні стовпчики іншого ластика [6]. Як і у ластикі, петлі переплетення інтерлок розташовані у двох петельних шарах. Відмінністю є те, що в структурі інтерлоку суміжні петельні стовпчики зміщені по висоті один відносно одного, а отже дуги остовів петель одного ластика стикаються з палочками петель іншого ластика.

Використання подвійних переплетень у виробництві захисних екранів від електромагнітного випромінювання призводить до підвищення ефективності екранування [10] завдяки збільшенню на одиницю площі точок контакту між петлями з металевої пряжі та зменшенню розмірів отворів.

D. Soyaslan, S. Çömlekçi and Ö. Göktepe досліджували трикотажні полотна чотирьох переплетень (гладь, ластик 1+1 звичайні та з прокладанням утокових ниток), які виготовлено на плосков'язальній машині 7 класу із застосуванням бавовняних ниток та мідного дроту [11]. Утокові нитки – це додаткові нитки (рис.2.3), які вв'язані між остовами і протяжками петель ґрунту [12]. У трикотажі утокові нитки можуть виконувати роль зв'язуючих, підкладочних, каркасних тощо, водночас змінюючи властивості ґрунтового переплетення. Зокрема, розтяжність трикотажу значно знижується у напрямку прокладання утокових ниток [13]. Наявність утокових ниток уповільнює релаксаційні процеси [14] та знижує проникність ґрунтового переплетення [15]. Щодо екрануючих властивостей, трикотаж переплетення ластик 1+1 з утоковою ниткою з мідного дроту визначено як найкраща структура для роботи обладнання в смузі ультрависокої частоти через наявність додаткових ділянок дроту, збільшення точок контакту та зменшення розміру отворів [11].

Таким чином, ефективністю екранування можна керувати не тільки використанням удосконалених видів сировини, але і зміною структури полотна у бік зменшення отворів та збільшення точок контакту між електропровідними (металовмісними) нитками. І в цьому питанні технологія в'язання є найкращою серед інших текстильних виробництв щодо

формування з провідних ниток не тільки прямолінійних ділянок, а і петель та накидів, а також їх чергування за будь яким рапортом [12].

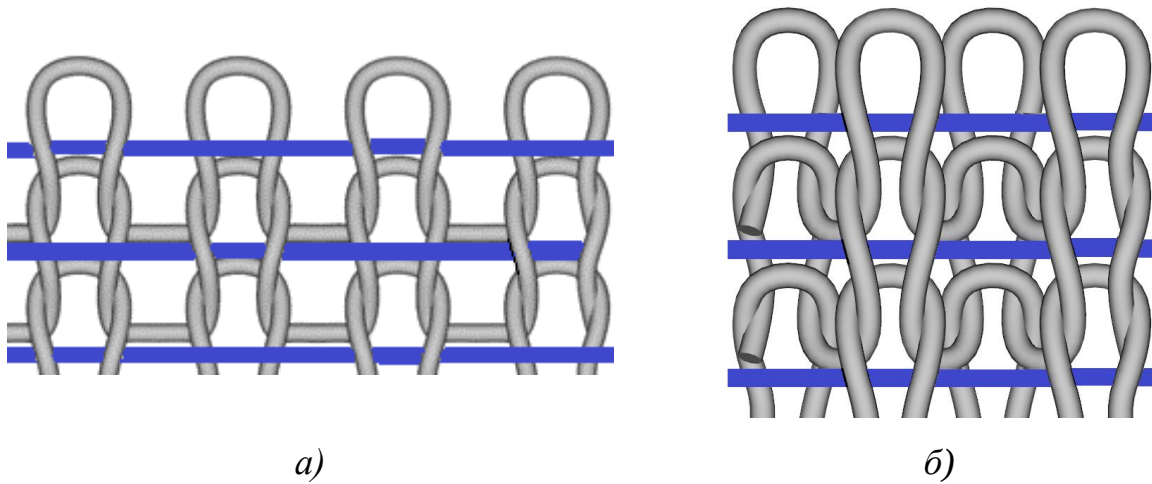


Рисунок 2.3 – Структура трикотажу переплетень гладь (а) та ластик 1+1 (б) з утоковими нитками

Серед можливих елементів петельної структури слід звернути увагу на пресову петлю та подовжену петлю з протяжкою поза нею. Пресова петля (рис.2.4.а) складається саме з подовженої петлі (П) та накиду (Н), який розташований за головою петлі. Очевидно, що в даному випадку маємо збільшену площу контакту між ниткою накиду та ниткою головки петлі. Водночас наявність пресової петлі в структурі трикотажу призводить до зміни конфігурації петель, які розташовані поряд [16]. Петля, яка має накид, подовжується за рахунок перерозподілу нитки з сусідніх петель, а отже вони значно зменшуються. Петлі, які поєднані з накидом, змінюють свою форму внаслідок прояву пружних властивостей зігнутої нитки: остов стає більш округлим. Водночас наявність у структурі трикотажу пресових петель призводить до значних змін властивостей трикотажного полотна, зокрема товщини [17], проникності та деформаційних властивостей [18], а також ефективності екранування електромагнітного випромінювання [19].

Додаткові ділянки з дроту поза петлею можна отримати не лише за рахунок прокладання утокової нитки, а й шляхом вимкнення голок за

рапортом у певних рядах. В результаті отримуємо петлю (П) з протяжкою (Пр) поза нею (рис.2.4.б). Як і у випадку пресових петель, така петля збільшується за рахунок перерозподілу ниток з сусідніх петель. З іншого боку, наявність протяжки поза остовам петлі призводить до створення додаткових точок контакту між нитками та зменшення пористості трикотажу, що в свою чергу призводить до значних змін властивостей трикотажних матеріалів [20–21], і зокрема ефективності екранування ЕМВ [22].

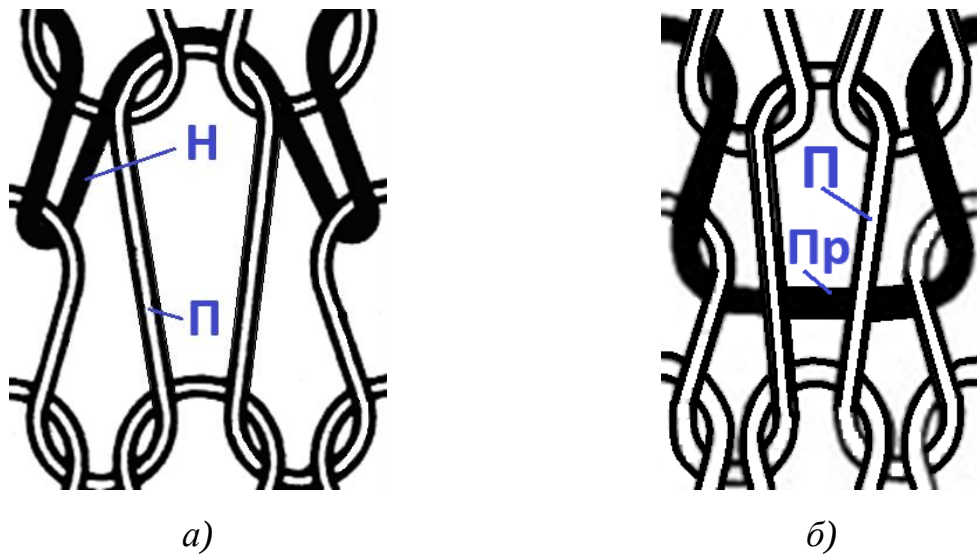


Рисунок 2.4 – Види петель трикотажу: а – пресова петля; б – подовжена петля з протяжкою поза нею

Отже, використання в трикотажній структурі петель різної конфігурації та прямолінійних відрізків з металевих ниток суттєво впливає не тільки на фізико-механічні властивості полотна, а може також значно вдосконалити ефективність екранування електромагнітного випромінювання.

Переважає більшість розроблених та досліджуваних трикотажних екранів для захисту від електромагнітного випромінювання мають рівномірну петельну структуру, яка створена з застосуванням струмопровідних дротів, які обкручені звичайними нитками [23] або стрижневої пряжі з електропровідних ниток [24], а також введенням дроту у якості утоку [11]. Отже струмопровідні елементи в таких структурах

розташовані рівномірно по усій площині матеріалу. Використання полотен здебільшого обмежено технічною сферою, адже наявність струмопровідних елементів призводить до зниження комфортних характеристик. В цьому випадку перспективним напрямом є розробка полотна, в якому б були поєднані комфорт трикотажу та екрануючі властивості металевих ниток.

2.3 Гібридні трикотажні матеріали для екранування електромагнітного випромінювання

В даній роботі пропонуються гібридні кулірні трикотажні полотна (рис.2.5), в яких чергуються 2 петельні ряди зі звичайної пряжі (1 та 2 системи, синя нитка) та 2 петельні ряди (3 та 4 системи, червона нитка) зі струмопровідної. Таким чином, маємо ділянки полотна зі звичайної пряжі та ділянки з струмопровідного матеріалу. Ґрунтовим переплетенням є ластик 1+1. Для визначення впливу розміру ділянки та форми, яку приймає струмопровідний елемент в структурі, на ефективність екранування ЕМВ обрано чотири варіанти переплетень: ластик 1+1; напівміланський ластик; напівфанг; комбіноване з пресовими петлями за рапортом. Таким чином, маємо ділянки зі струмопровідної пряжі:

- з петлями однакового розміру (рис.2.5.а);
- з петлями звичайного розміру та подовженими петлями з протяжками поза ними (рис.2.5.б);
- з петлями різного розміру та форми, а також пресовими петлями, які складаються з подовженої петлі та протяжки (рис.2.5.в);
- з петлями різного розміру та форми, пресовими петлями, які складаються з подовженої петлі та протяжки, а також подовженими петлями з протяжками поза ними (рис.2.5.г).

Усі полотна вироблено на плосков'язальній машині 8 класу з бавовняної пряжі лінійної густини 30 х 2 текс та металевого дроту з нержавіючої сталі діаметром 0,12 мм як струмопровідного елементу, який

надає матеріалам необхідних функціональних властивостей. Діаметр бавовняної пряжі становить 0,31 мм.

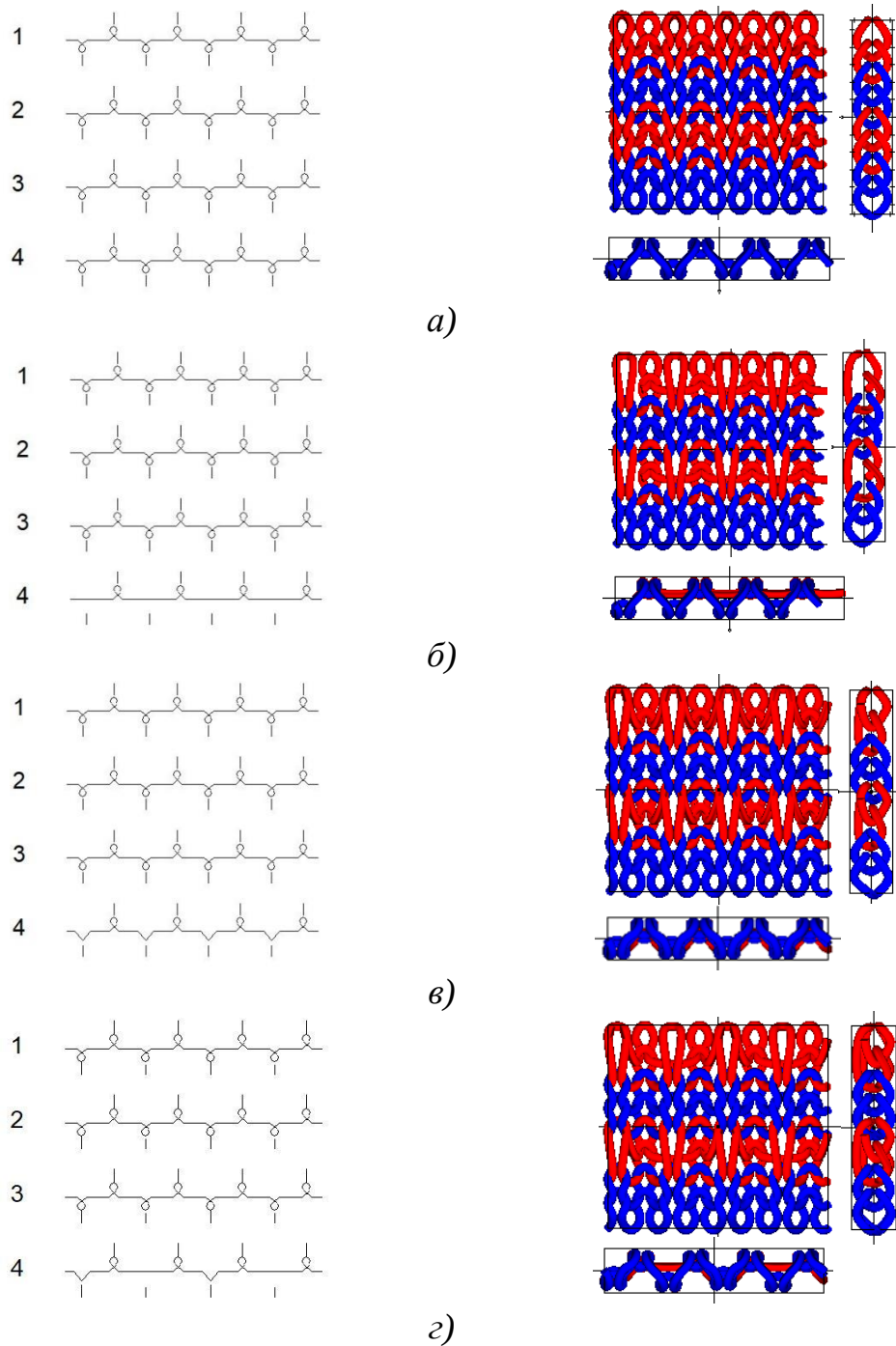


Рисунок 2.5 – Графічний запис та 3D модель структури гібридних трикотажних полотен з різними варіантами уведення струмопровідного елемента: а – ластик 1+1, б – напівміланський ластик, в – напівфанг, г – комбіноване з пресовими петлями за рапортом

Зміна нитководів відбувалася через кожні два ходи каретки (один оберт). В результаті чого з бавовняної пряжі утворено два ряди ластиків 1+1, а з металевих дротів 2 інших ряди, переплетення в яких змінювали відповідно рапорту (рис.2.5). Контрольні зразки полотна для порівняння властивостей виготовлено переплетенням ластиків 1+1 тільки з бавовняної пряжі та тільки з дротів з нержавіючої сталі. Заправні дані наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Кодування досліджуваних трикотажних полотен

Варіант	Бавовняна пряжа		Металевий дріт	
	переплетення	кількість	переплетення	кількість рядів
1	ластик 1+1	усі	—	—
2	—	—	ластик 1+1	усі
3	ластик 1+1	2	ластик 1+1	2
4	ластик 1+1	2	напівміланський ластик	2
5	ластик 1+1	2	напівфанг	2
6	ластик 1+1	2	комбіноване	2

Після в'язання усі полотна приведено в умовно-рівноважний стан шляхом відлежування упродовж 24 годин у стандартних кліматичних умовах відповідно до ISO 139:2005 [25] та наступного прання у пральній машині за програмою «делікатне прання» та сушіння на плоскій поверхні відповідно до ISO 6330:2021 [26].

2.4 Метод дослідження екрануючих властивостей матеріалів

Ефективність екранування текстильних зразків до дії електромагнітного випромінювання вимірювалась в Технічному університеті м. Ліберець (Чеська Республіка) із застосуванням ЕМ-2107А (рис.2.6) від

Electro Metrics [27] відповідно до ASTM D4935-10 [28] в діапазоні частот 30 МГц - 3 ГГц, що відповідає хвилям довжиною від 10 м до 0,1 м відповідно. Цей метод застосовують для вимірювання ефективності електромагнітного екранування плоских матеріалів для плоскої хвилі.

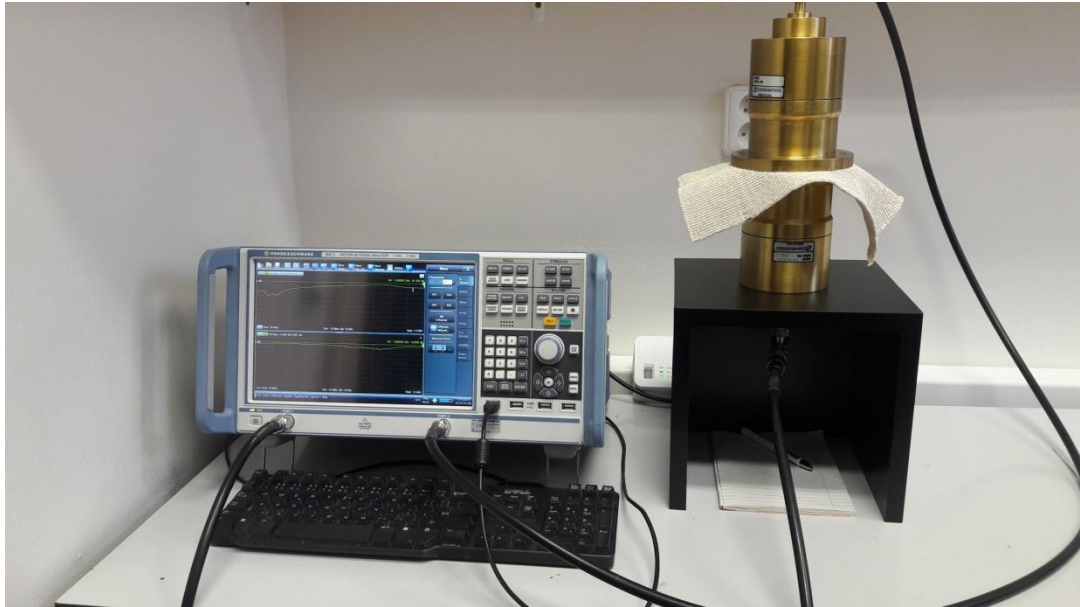


Рисунок 2.6 – Установка для вимірювання ефективності екранування текстильних матеріалів до дії електромагнітного випромінювання

Ефективність екранування визначали шляхом порівняння різниці в згасанні еталонного зразку з тестовим зразком з урахуванням вхідних і вихідних втрат. Процедура вимірювання складається з двох етапів: на першому етапі еталонний зразок розміщують в тестовий адаптер для компенсації ємності зв'язку. Зразок має форму 33-міліметрового кола всередині 133/76-мм кільця. На другому етапі використовують фактичний тестовий зразок.

Дослідження проводили з використанням векторного аналізатора Rohde & Schwarz ZNC3 (діапазон частот від 9 кГц до 3 ГГц).

Ефективність екранування (SE), яка виражається у децибелах [дБ], є сумою втрат відбиття та поглинання. Її визначають відношенням енергії, яку отримано при використанні матеріалу до енергії, яку отримано без його

застосування і залежно від типу приймача може бути визначено за наступними формулами:

$$SE = 10 \log P_1/P_0 \text{ або } SE = 20 \log E_1/E_0 \text{ (dB)} \quad (2.1)$$

де P_1 або E_1 – потужність або напруга, яку отримано при використанні матеріалу;

P_0 або E_0 – потужність або напруга, яку отримано без використання матеріалу

З іншого боку ефективність екранування можна виразити наступною сумою

$$SE = SE_A + SE_R + SE_M \quad (2.2)$$

де SE_A , SE_R , та SE_M – ефективність екранування за механізмами поглинання, відбиття та багаторазового відбиття відповідно.

2.5 Методи дослідження структури та теплофізичних характеристик гібридних трикотажних матеріалів

Для дослідження структури текстильних полотен використовували стандартні методи досліджень. Так, щільність в'язання, яку описують кількістю петельних стовпчиків та петельних рядів на 100 мм визначали відповідно EN 14971:2006 [29] за допомогою текстильної лупи. Дослідження проводили окремо для лицьової та виворітної сторін полотна. Для кожного параметру зроблено по 10 паралельних вимірів у різних частинах полотна.

Петельний крок A (мм) та висоту петельного ряду B (мм) вимірювали за допомогою цифрового мікроскопу Microsafe ShinyVision MM-2288-5X-BN та розраховували за загальновідомими формулами [6]. Дослідження також проводили окремо для лицьової та виворітної сторін полотна.

Довжину нитки в петлі визначали відповідно до EN 14970:2006 [30]. Довжину відрізка нитки, взятого зі зразка трикотажного полотна шляхом

розпуску певної кількості петель, вимірювали за допомогою лінійки під відповідним натягом. Для визначення довжини нитки у петлі застосовували розрахунковий метод, який полягав у поділу виміряної в міліметрах довжини відрізка нитки на кількість розпущених петель. Дослідження проводили окремо для рядів ластику та гладі та окремо для бавовняної пряжі та металевого дроту. Для кожного параметру зроблено по 10 паралельних вимірів

Товщину трикотажу визначали товщиноміром SM-124 (рис.2.7) з робочою площиною 1 см² та тиском 2,5 Н/см² відповідно до ISO 5084:1996 [31]. Для кожного варіанту полотна зроблено по 10 паралельних вимірів. Слід зазначити, що висота ділянки, яка утворена з металевого дроту у полотнах менша за розмір площини вимірювання у товщиноміра, тобто при дослідженні уникнено можливий вплив на показник ділянок різної товщини.



Рисунок 2.7 – Товщиномір SM-124

Поверхневу густину полотна визначали за EN 12127:1997 [32] шляхом зважування зразків m певної площі та подальшого обчислення маси одного квадратного метру m_s використовуючи наступне співвідношення :

$$m_s = 10^4 m / S \quad (2.3)$$

де m – маса зразку в гр.;

S – площа зразку у см^2 .

Вимірювання теплофізичних характеристик текстильних матеріалів здійснювали за спеціальною методикою [33] на приладі «ALAMBETA», Чеська Республіка, (рис.2.8.а) при тиску на текстиль $P = 200$ Па та перепаді температур 10°C . Температура верхньої пластини становила 34°C . Прилад складається з рухомої обігріваної головки та горизонтальної нерухомої станини, на якій закріплений датчик. Отримана інформація надсилається до мікропроцесора, в якому здійснюється обробка даних та результати вимірювання відображаються на дисплеї приладу «ALAMBETA» (рис.2.8.б).



а)



б)

Рисунок 2.8 – Прилад «ALAMBETA»: а – зовнішній вигляд; б – дисплей з результатами виміру

В основу роботи приладу покладений принцип стаціонарного теплового потоку від пластини з постійним у часі температурним полем через текстильний матеріал до пластини з температурою, яка дорівнює температурі навколишнього середовища (24°C). У результаті в зразку трикотажного полотна створюється різниця температур, яка доводиться до сталості і по закінченню вимірювання обчислюються наступні теплофізичні характеристики: товщина, h [мм]; коефіцієнт теплопровідності $\lambda \cdot 10^{-3}$ [Вт/(м·К)]; коефіцієнт температуропроводності, $a \cdot 10^{-6}$ [$\text{м}^2/\text{с}$]; коефіцієнт теплового поглинання, b [$\text{Вт} \cdot \text{с}^{1/2}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$]; тепловий опір, $R \cdot 10^{-3}$ [$\text{К} \cdot \text{м}^2/\text{Вт}$];

щільність теплового потоку, $q \cdot 10^{-3}$ [Вт/м²].

Абсолютну R_{et} та відносну паропроникність P [%] полотен досліджували за спеціальною методикою [34] на приладі «PERMETEST» Чеська Республіка (рис.2.9).



Рисунок 2.9 – Прилад PERMETEST

При дослідженні на приладі PERMETEST пробу текстильного матеріалу діаметром 90 мм розташовують на відстані 1,0 ÷ 1,5 мм від попередньо зволоженої пористої поверхні. Тепловий потік, який генерується під час випаровування рідкої вологи з пористої поверхні, вимірюється датчиком. Час дослідження 2 ÷ 8 хвилин. Для характеристики паропроникності за цим методом використовують показник «відносна паропроникність», P , % (у англійській літературі – Relative Water Vapor Permeability, $RWVP$) – відношення теплових втрат (H), які генеруються при розміщенні проби текстильного матеріалу на пористій поверхні, до теплових втрат (H_2), які генеруються пористою поверхнею не вкритою пробою текстильного матеріалу: $P = 100 H/H_2$. Досліди проводилися при $T_{\text{повітря}} = 22$ °С, відносній вологості повітря $\varphi = 60$ % та швидкості повітря $v = 1,5$ м/с [34].

Висновки до розділу 2

1. Об'єкт дослідження – процес виготовлення екрануючих гібридних трикотажних матеріалів, які здатні захищати від електромагнітного випромінювання.

2. Предмет дослідження – гібридні трикотажні матеріали для захисту від електромагнітного випромінювання, виготовлені шляхом введення у петельну структуру металевого дроту з нержавіючої сталі.

3. Аналіз елементів петельної структури трикотажних екранів показав, що найбільш перспективним є застосування в структурі пресових петель та петель з додатковою протяжкою поза остовом петлі, що призводить до збільшення точок контакту між металевими нитками в структурі та зменшення розміру отворів.

4. Для дослідження було виготовлено гібридні кулірні трикотажні полотна, в яких 2 петельні ряди зі звичайної бавовняної пряжі чергуються з 2 петельними рядами зі струмопровідної. Таким чином утворено ділянки полотна зі звичайної пряжі та ділянки з струмопровідного матеріалу.

5. Грунтовим переплетенням є ластик 1+1. Обрано чотири варіанти переплетень: ластик 1+1; напівміланський ластик; напівфанг; комбіноване з пресовими петлями за рапортом.

6. Обрано методи для визначення структурних характеристик, теплофізичних характеристик та ефективності екранування для досліджуваних зразків.

Список використаних джерел до розділу 2

1. Ciesielska-Wróbel I, Grabowska K. Estimation of the EMR Shielding Effectiveness of Knit Structures. *Fibres Text. East. Eur.* 2012; 20, 2 (91): 53-60.
2. Tezel S, Kavusturan Y, Vandenbosch GA and Volski V. Comparison of electromagnetic shielding effectiveness of conductive single jersey fabrics with coaxial transmission line and free space measurement techniques. *Text Res J.* 2013; 84 (5): 461–476. DOI: 10.1177/0040517513503728.
3. Lin JH, Huang YT, Li TT, et al. Manufacture technique and performance evaluation of electromagnetic-shielding/far-infrared elastic warp-knitted composite fabrics. *J. Text. Inst.* 2016; 107 (4): 493-503. DOI: 10.1080/00405000.2015.1045253.
4. Bedeloglu A. Electrical, electromagnetic shielding, and some physical properties of hybrid yarn-based knitted fabrics, *J. Text. Inst.* 2013; 104 (11): 1247–1257. DOI: 10.1080/00405000.2013.796627.
5. Perumalraj R and Dasaradan BS. Electromagnetic shielding effectiveness of copper core yarn knitted fabrics. *Indian J Fibre Text Res.* 2009; 34 (2): 149-154.
6. Крилова, Л. О. Основи теорії в'язання : підручник / Л. О. Крилова, Л. М. Мельник. - Київ : Кафедра, 2015. - 304 с. - ISBN 978-966-2705-96-6.
7. Spencer D.J. Knitting technology: A comprehensive handbook and practical guide // David J Spencer. – Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2001. – 394 p. – ISBN 1 85573 333 1.
8. Ceken F, Pamuk G, Kayacan O, Ozkurt A, Ugurlu ŞS. Electromagnetic Shielding Properties of Plain Knitted Fabrics Containing Conductive Yarns. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics.* 2012;7(4). doi:10.1177/155892501200700404.
9. Kyzymchuk, O., Kyosev, Y., Richter, C., Bendt, E.. (2024). 4.09 – Mechanics of Knitted Fabrics. In book: *Comprehensive Mechanics of Materials. Volume 4*, Pages 194-213 Doi: 10.1016/B978-0-323-90646-3.00018-6.

- 10.He S, Liu Z, Wang H, Wang X. Effect of needle loops on shielding effectiveness of electromagnetic shielding knitted fabrics. *Textile Research Journal*. 2022;93(3-4): 691-700. doi:10.1177/00405175221122579.
- 11.Soyaslan D., Çömlekçi S., Göktepe Ö. Determination of electromagnetic shielding performance of plain knitting and 1X1 rib structures with coaxial test fixture relating to ASTM D4935 // *The Journal of The Textile Institute*. – 2010, Vol. 101, No 10. – P. 890-897.
- 12.Король В.П. Основи теорії в'язання візерункового трикотажу : підручник / В. П. Король, Л. Є. Галавська. – Київ : Кафедра, 2014. – 498 с. - ISBN 978-966-2705-77-5 .
- 13.Fong KW, Li SQ, Liu R. A New Geometric Model of Laid-in Weft-Knitted Fabrics. *Textile Research Journal*. 2021;91(17-18):2087-2105. doi:10.1177/0040517521992765.
- 14.Kyzymchuk O, Melnyk L, Marmaralı A, et al. The effect of weft yarn type and elastomer yarn threading on the properties of elastic warp knitted fabrics. Part 1: Structure and elasticity. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. 2023;18. doi:10.1177/15589250231167405.
- 15.Dias, T., Delkumburewatte, G.B. Changing porosity of knitted structures by changing tightness. *Fibers Polym* 9, 76–79 (2008). <https://doi.org/10.1007/s12221-008-0012-6>.
- 16.Головня О.В. Дослідження структурних ефектів на базі кулірного трикотажу подвійних пресових переплетень / Головня О.В., Кизимчук О.П. // *Вісник КНУТД* – 2019. – № 2(132).– С.60-73.
- 17.Кизимчук О. П., Буряк О. В., Головня О. В. Вплив кількості пресових петель на властивості подвійного трикотажу // *Fashion Industry*. – 2019. – №. 2. – С. 29-34. <https://doi.org/10.30857/2706-5898.2019.2.1>.
- 18.Kyzymchuk O., Stefashyna O., Melnyk L., Holovnia O., Arabuli S. and Levytska D. Rib knitted fabrics with tuck stitches: Structure and Properties // *Vlakna a textil*. – 2021, Vol. 28, No 3. – p. 43-52.

- 19.Ahmed U., Hussain T., Ahmad H.S. Novel knitted fabric structures for shielding against electromagnetic and thermal radiation from laptops and mobile phones / International Journal of Thermal Science. Sci., 194 (2023), Article 108594 <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2023.108594>
- 20.Bukhonka NP, Kyzymchuk OP. The effect of miss stitches on the dimensional and stretch properties of double weft cotton/flax knitted fabrics. Journal of Engineered Fibers and Fabrics. 2023; 18. doi:10.1177/15589250231210954.
- 21.Bukhonka N, Kyzymchuk O. The evaluation of the effect of rib set-outs on the dimensional and stretch properties of double weft knitted cotton/flax fabrics. Journal of Engineered Fibers and Fabrics. 2024; 19. doi:10.1177/15589250241255099.
- 22.Teziel S, Kavusturan Y, Vandenbosch GA and Volski V. Influence of knitting structure and metal wire amount on electromagnetic shielding effectiveness of knitted fabrics. Textil ve konfeksiyon. 2023; 33 (5): 37–45.
- 23.Çeken F, Kayacan O, Özkurt A and Uğurlu SS. The electromagnetic shielding properties of some conductive knitted fabrics produced on single or double needle bed of a flat knitting machine, J. Text. Inst. 2012; 103, 9: 968–979. DOI: 10.1080/00405000.2011.639514.
- 24.Celen R and Ulcay Y. Investigating electromagnetic shielding effectiveness of knitted fabrics made by barium titanate/polyester bicomponent yarn. J Eng Fibers Fabr. 2019; 14. DOI: 10.1177/1558925019837806.
- 25.ISO 139:2005 Textiles — Standard atmospheres for conditioning and testing.
- 26.ISO 6330:2021 Textiles — Domestic washing and drying procedures for textile testing.
- 27.Офіційний портал компанії Electro Metrics Incorporation, USA. Доступ 04.07.2023: <https://electro-metrics.com/>
- 28.ASTM D4935-10. Standard Test Method for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Planar Materials.
- 29.EN 14971:2006 Textiles – Knitted fabrics – Determination of the number of stitches per unit length and unit area .

- 30.EN 14970:2006 Textiles – Knitted fabrics - Determination of stitch length and yarn linear density in weft knitted fabrics.
- 31.ISO 5084:1996 Textiles — Determination of thickness of textiles and textile products.
- 32.EN 12127:1997 Textiles – Fabrics – Determination of mass per unit area using small samples.
- 33.Mangat MM and Hes L. Thermal Resistance of Denim Fabric under Dynamic Moist Condition and its Investigational Confirmation. *Fibres and Text East Eur* 2014; 22(6): 101-105.
- 34.Fung F, Gao C, Hes L and Bajzik V. Water vapor resistance measured on sweating thermal manikin and Permetest skin model in the vertical orientation. *Communications in Development and Assembling of Textile Products*, 2020; 1(1): 65-73.

3 РОЗДІЛ. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКРАНУЮЧИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГІБРИДНИХ ТРИКОТАЖНИХ МАТЕРІАЛІВ

Як показав аналіз наукових публікацій щодо досліджень захисних трикотажних полотен, найважливішими факторами, які впливають на ефективність екранування від електромагнітного випромінювання, є раппорт переплетення [1–2], щільність полотна і довжина нитки в петлі [3], тип дроту [4] та розташування його в структурі [5], а також кількість шарів матеріалу [6]. Немаловажним фактором визнано також вміст металевго компоненту в структурі [7]. Отже дослідження екрануючих властивостей розроблених гібридних трикотажних матеріалів проводили з огляду на структуру трикотажу, розташування металевго дроту та його вмісту в полотні.

3.1 Сировинний склад досліджуваних трикотажних матеріалів

На першому етапі досліджень проведено оцінку зовнішнього виду трикотажних полотен та визначено їх сировинний склад. Фото зразків наведено на рис.3.1. У разі ідентичності обох боків полотна (варіанти 1-3) наведено фото лише однієї сторони, для інших полотен (варіанти 4-6) наведено фото обох сторін. Результати визначення сировинного складу представлено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Сировинний склад трикотажних полотен

Варіант	Переплетення	Вміст сировини, %	
		металевий дріт	бавовна
1	Ластик 1+1	0	100
2	Ластик 1+1	100	0
3	Ластик 1+1	29	71
4	Напівміланський ластик	7	93
5	Напівфанг	30	70
6	Комбіноване з пресовими петлями	51	49

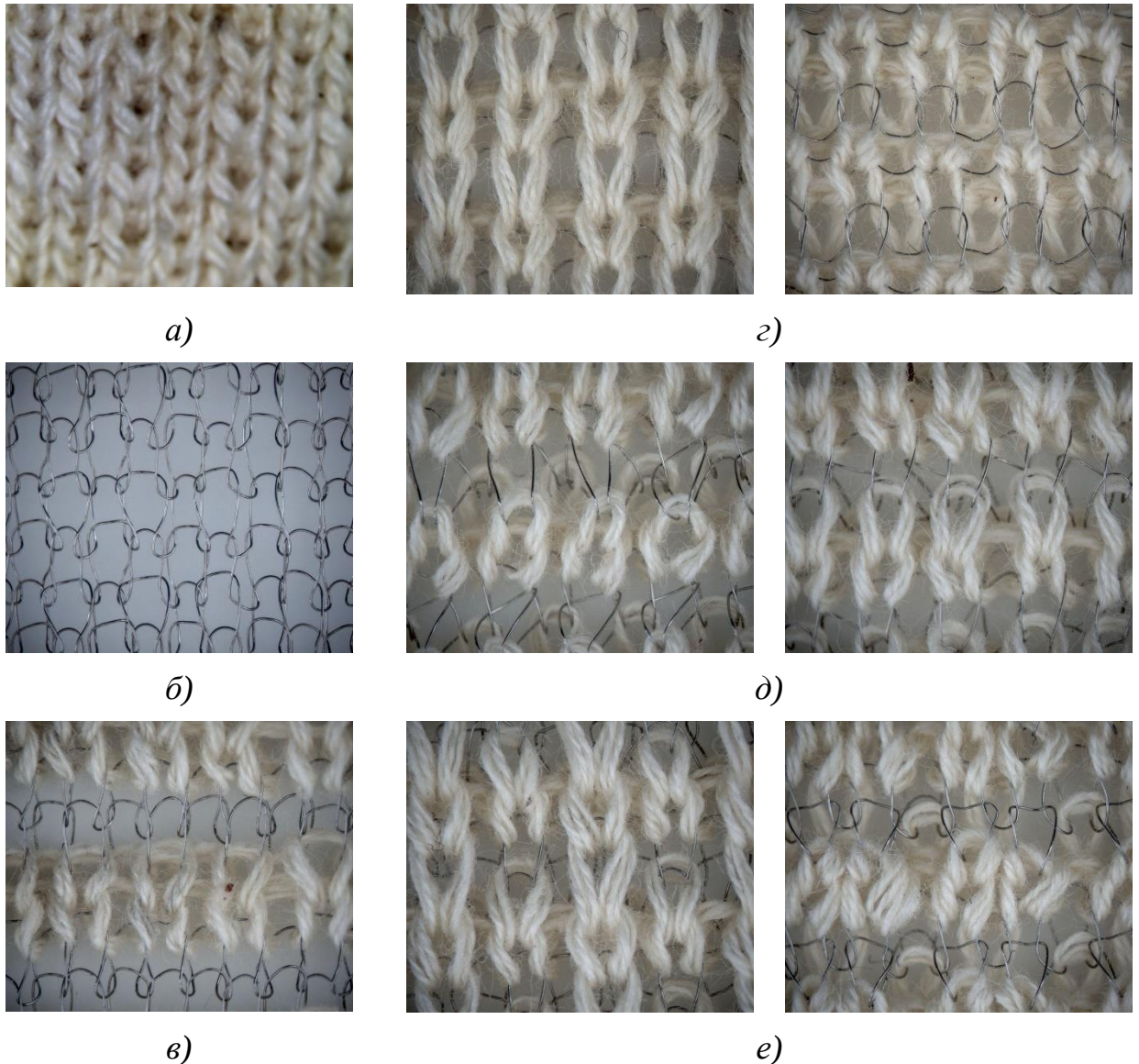


Рисунок 3.1 – Фото трикотажного полотна: а – варіант 1, б – варіант 2, в – варіант 3, г – варіант 4, д – варіант 5, е – варіант 6.

Візуальна оцінка отриманих полотен показала наступне. Усі полотна значно відрізняються один від одного. Трикотаж переплетення ластик 1+1 варіанту 1, який вироблено з бавовняної пряжі (рис.3.1.а) є найбільш щільним. Трикотаж переплетення ластик 1+1 варіанту 2, який вироблено з металевого дроту (рис.3.1.б) , має сітчасту структуру і є розрідженим. Полотна варіантів 3 – 6, які утворені чергуванням рядів з бавовняної пряжі та металевого дроту (рис.3.1.в-е), мають смугасту структуру. Розмір та структура розрідженої ділянки залежить від переплетення, яке використано для металевого дроту.

Очевидно, що найменший розмір ділянки з металевого дроту у полотна варіанту 4, в якому дріт пров'язано переплетенням напівміланський ластик. Це підтверджено найнижчим його вмістом (7 %) у полотні.

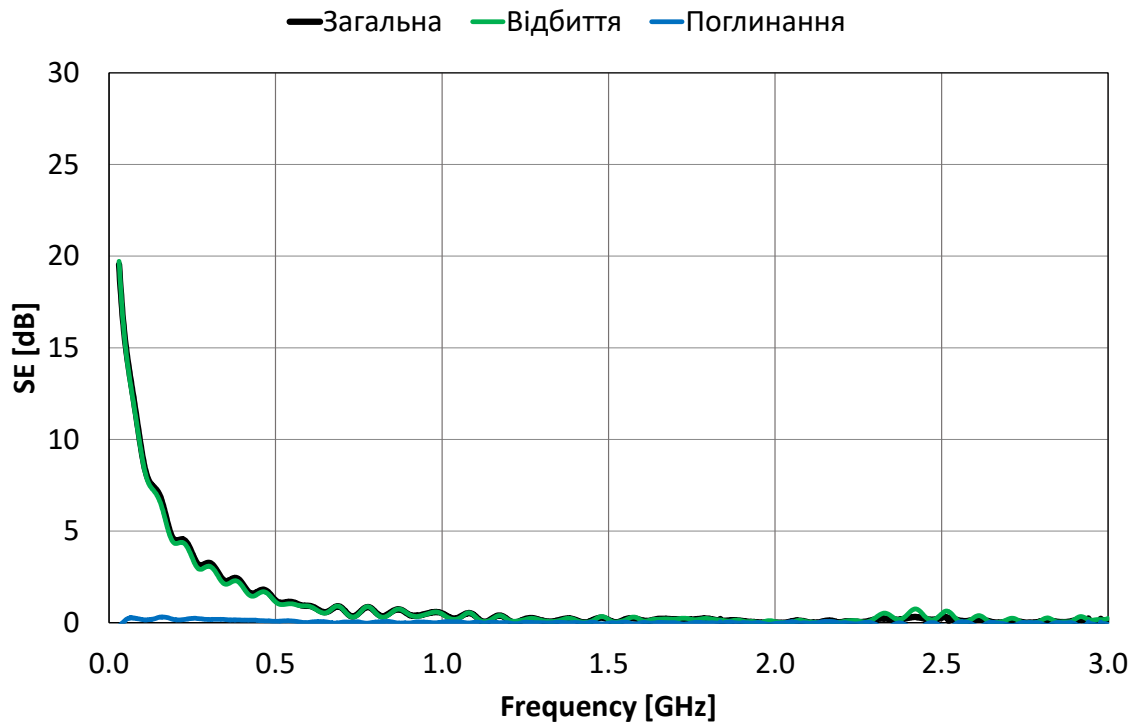
3.2 Оцінка екрануючих властивостей трикотажних полотен

3.2.1 Контрольні полотна

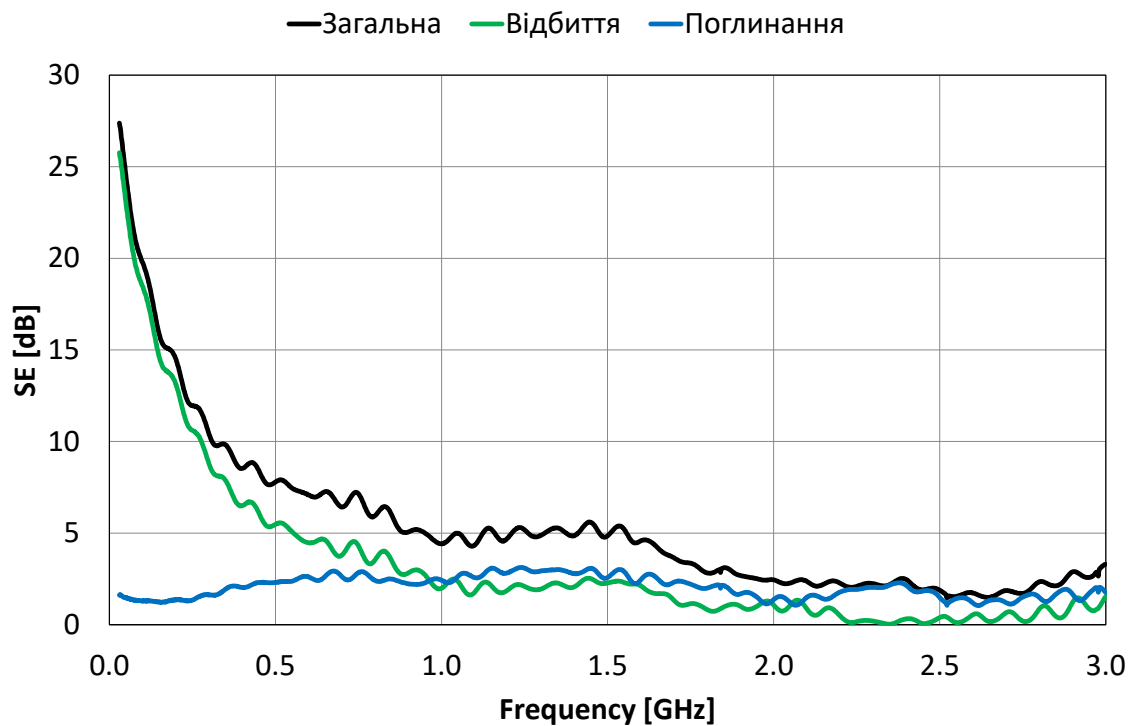
Результати досліджень ефективності екранування електромагнітного випромінювання контрольними трикотажними матеріалами, які вироблено тільки з бавовняної пряжі (варіант 1) та тільки з металевого дроту (варіант 2) представлені на рис.3.2. Загальна ефективність екранування розглядається у розрізі двох основних механізмів ослаблення електромагнітного випромінювання: відбиття та поглинання.

Незважаючи на те, що натуральні волокна, зокрема бавовняні, не мають екрануючих властивостей, контрольний зразок 100% бавовняного трикотажу переплетення ластик (варіант 1) також демонструє здатність екранувати електромагнітне випромінювання. Це відбувається лише у діапазоні частот до 0,2 ГГц (рис.3.2.а). Ефективність екранування становить 15-10 дБ в діапазоні до 0,1 ГГц з подальшим поступовим зниженням до 5 дБ на 0,2 ГГц. Передбачається, що ця здатність в основному пов'язана з об'ємним заповненням структури і забезпечується механізмом багаторазового відбиття [2].

З іншого боку, сумарна ефективність екранування контрольним трикотажним матеріалом варіанту 2, який вироблено тільки з металевого дроту (рис.3.2.б), на низьких частотах (до 0,3 ГГц) перевищує 20 дБ і відповідає рівню «дуже добре» [8]. Значення загальної ефективності екранування на частоті 0,9 ГГц, яка найбільше використовується мобільними операторами 4G в Україні, становить 7 дБ і характеризує текстильний екран як «помірний». У діапазоні від 1 до 3 ГГц загальна ефективність екранування контрольної тканини варіанту 2 становить 5-2,5 дБ.



а)



б)

Рисунок 3.2 – Ефективність екранування контрольних трикотажних матеріалів переплетення ластик 1+1: а – варіант 1 з бавовняної пряжі; б – варіант 2 з металевого дроту

Очевидно, що предомінантним механізмом екранування полотна, який виготовлено з металевого дроту є відбиття. Відсоток механізмів поглинання та відбиття в загальній ефективності для полотна варіанту 2 з нержавіючої сталі були розраховані та представлені на рис.3.3. Результати показують, що механізм екранування на основі відбиття переважає на частотах до 1000 МГц і є визначальним для цієї тканини. Зрівняння відсотків та перевага механізму поглинання у вищому діапазоні частот пов'язаний з загальним падінням ефективності екранування

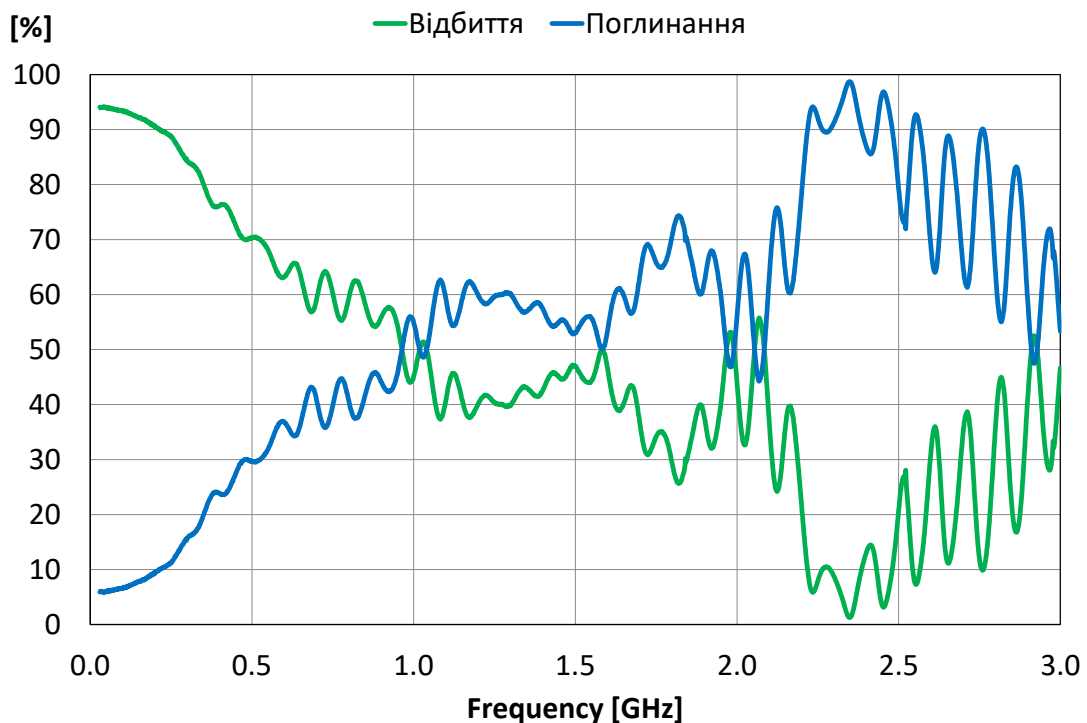


Рисунок 3.3 – Відсотковий вміст механізмів відбиття та поглинання у загальній ефективності екранування контрольного зразка варіанту 2

3.2.2 Гібридні трикотажні полотна

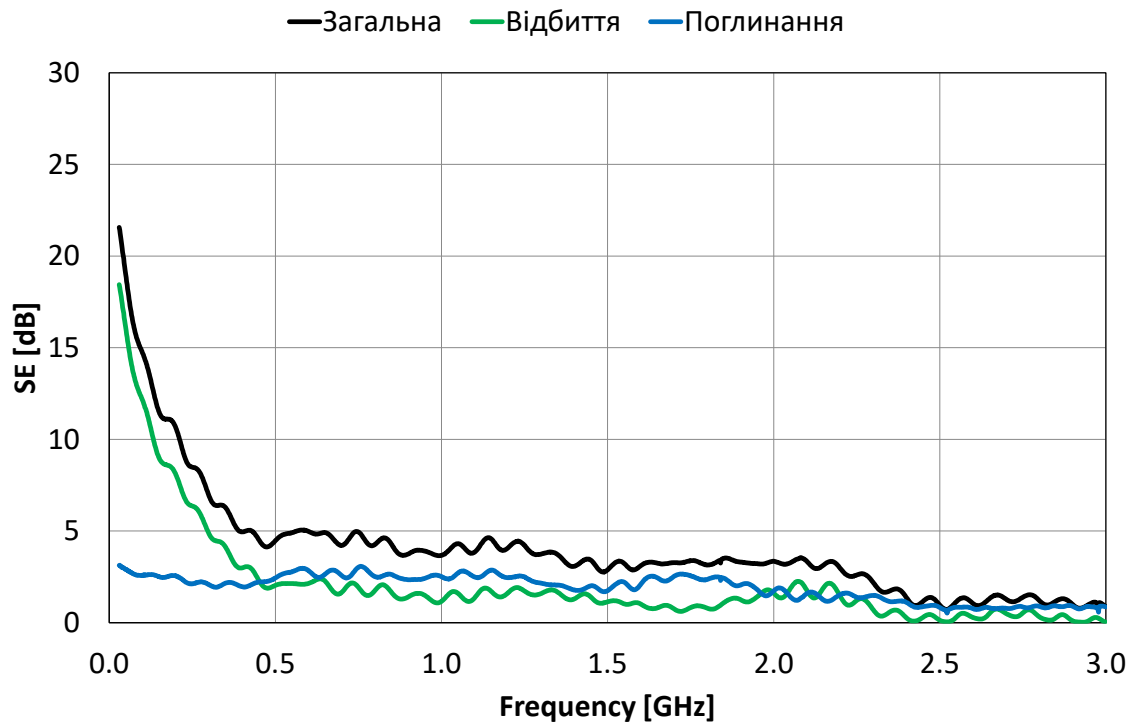
Результати досліджень ефективності екранування електромагнітного випромінювання розробленими гібридними трикотажними матеріалами, які вироблено чергуванням рядів з бавовняної пряжі та металевого дроту представлені на рис.3.4 – 3.7. Загальна ефективність екранування

розглядається у розрізі двох основних механізмів ослаблення електромагнітного випромінювання: відбиття та поглинання.

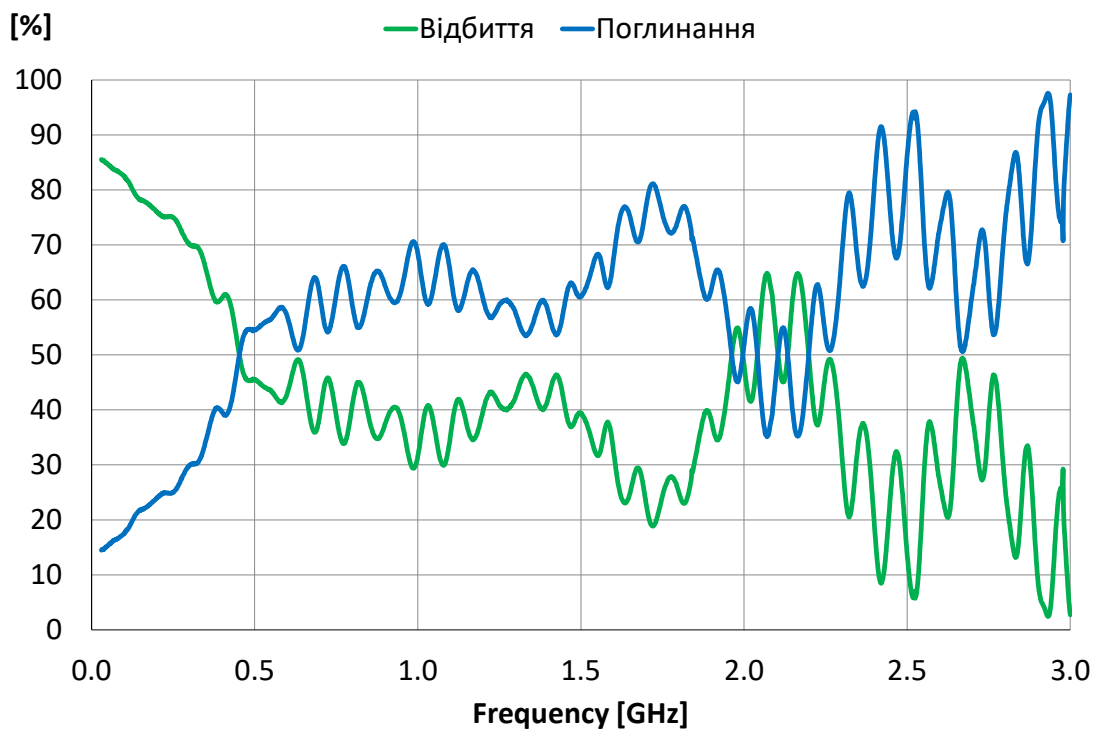
Згідно з літературними даними [9–10], введення нержавіючого дроту в структуру текстильного матеріалу, і трикотажного полотна зокрема, призводить до підвищення його екрануючої здатності щодо електромагнітного випромінювання за механізмом відбиття. Для всіх розроблених гібридних трикотажних полотен спостерігається загальна тенденція. Ефективність екранування зменшується зі збільшенням частоти падіння, що можна вважати результатом менших довжин хвиль на високих частотах. Зі збільшенням частоти довжина електромагнітної хвилі стала коротшою, і падаючі хвилі мають можливість проникнути через отвори на ділянках, які утворено з металевого дроту. Така поведінка подібна до контрольного зразка 2 (рис.3.2.б).

Результати експерименту показують відсутність залежності ефективності екранування від відсоткового вмісту нержавіючого дроту. У досліджуваному частотному діапазоні два зразки трикотажу – варіантів 5 (рис.3.6) та 6 (рис.3.7) демонструють ідентичні властивості незважаючи на різний вміст металевого дроту 30 % та 51 % відповідно (таблиця 3.1). При цьому полотно варіанту 4 (7% металевої складової) має найкращі електромагнітні екрануючі властивості (рис.3.5) серед розроблених гібридних трикотажних полотен. Його ефективність екранування навіть вища за відповідні властивості трикотажу, який повністю вироблено з 100% нержавіючої дроту (рис.3.2.б).

Таким чином, основним фактором, який визначає екрануючу здатність, є розташування металевих компонентів у в'язаній структурі. Так, петлі з нержавіючої дроту гібридного трикотажу варіанту 4 (рис.2.5.б), виготовленого переплетенням напівміланський ластик, розташовані у два шари: один шар виконаний подовженими петлями ластика 1x1, а другий – чергуванням петель гладі та ластика.

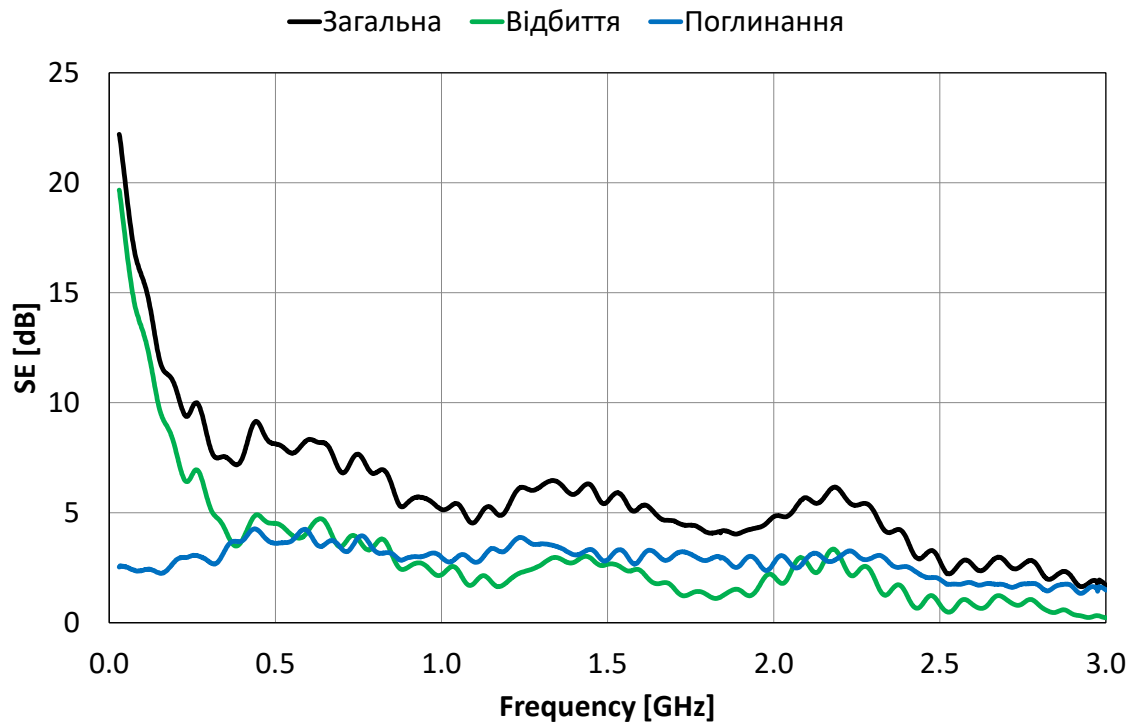


а)

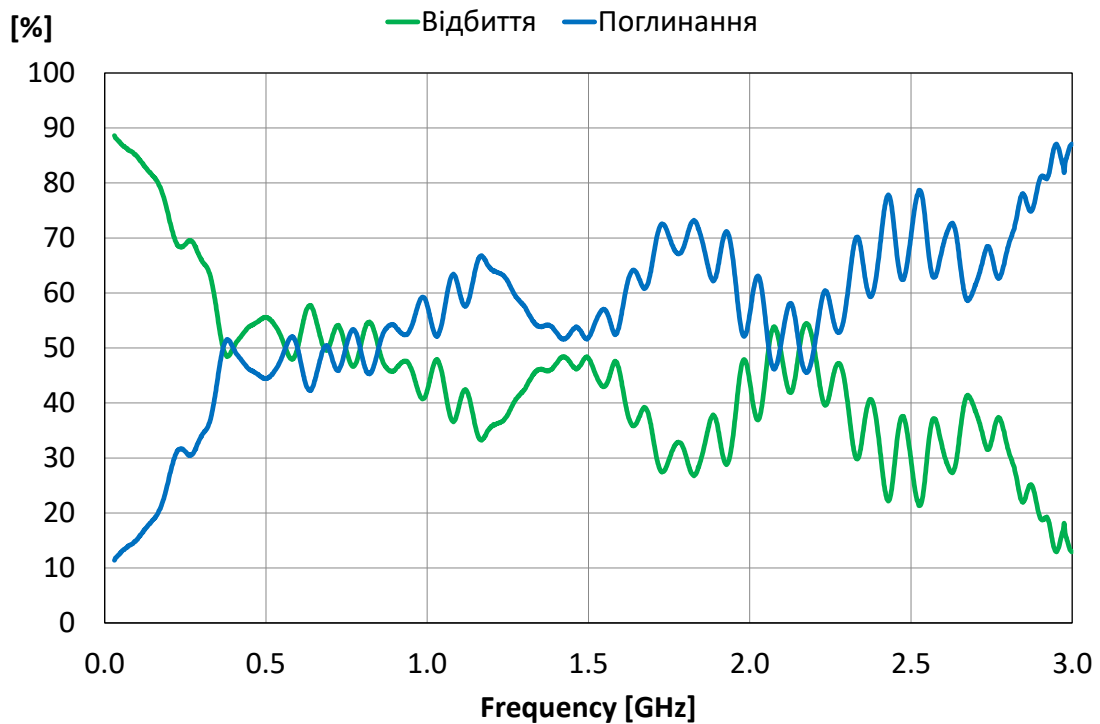


б)

Рисунок 3.4 – Екрануючі властивості гібридного трикотажного полотна варіанту 3 (ластик 1+1): а – ефективність екранування; б – відсотковий вміст механізмів екранування

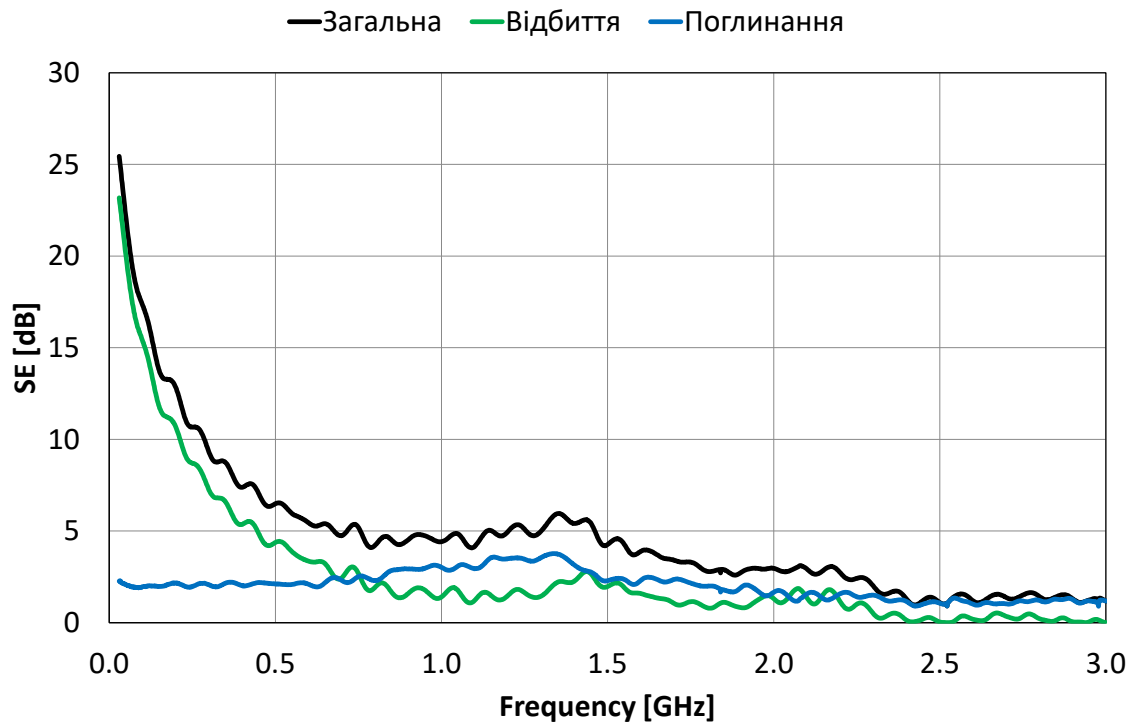


a)

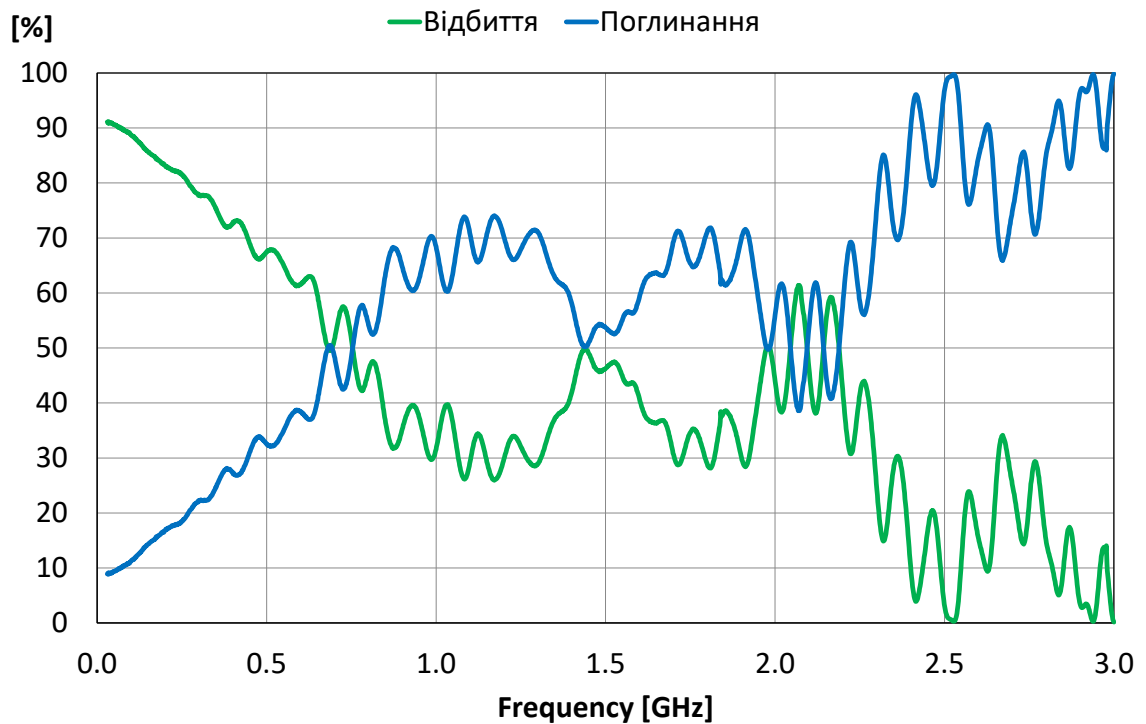


б)

Рисунок 3.5 – Екрануючі властивості гібридного трикотажного полотна варіанту 4: а – ефективність екранування; б – відсотковий вміст механізмів екранування

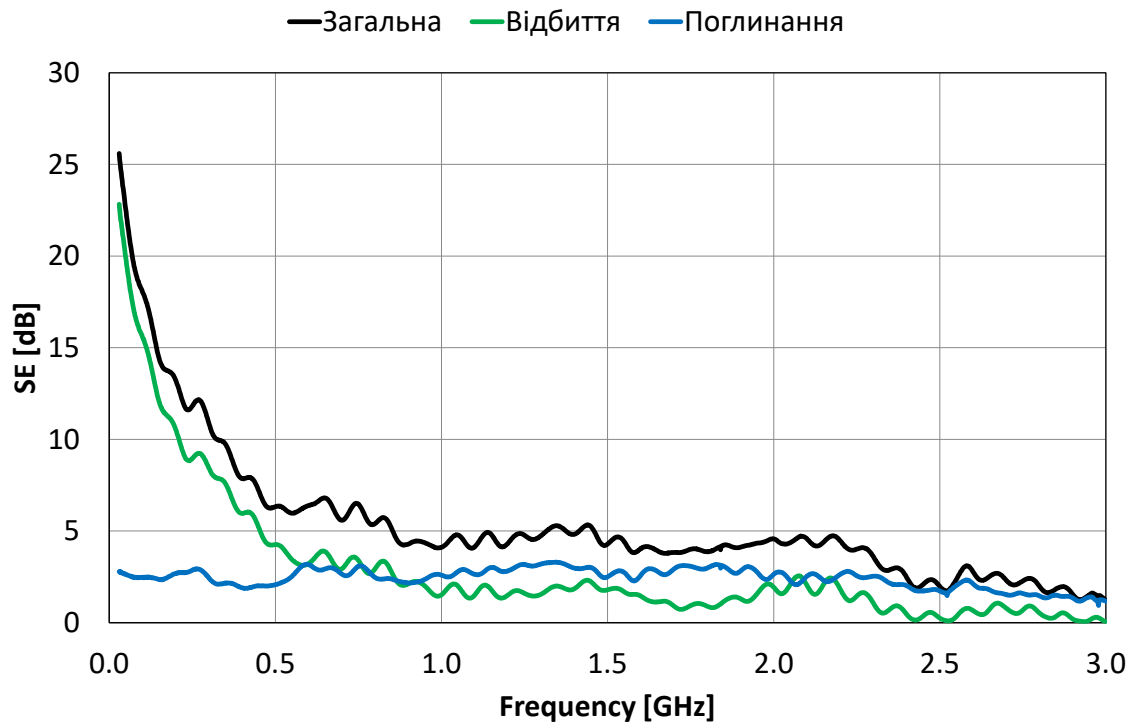


a)

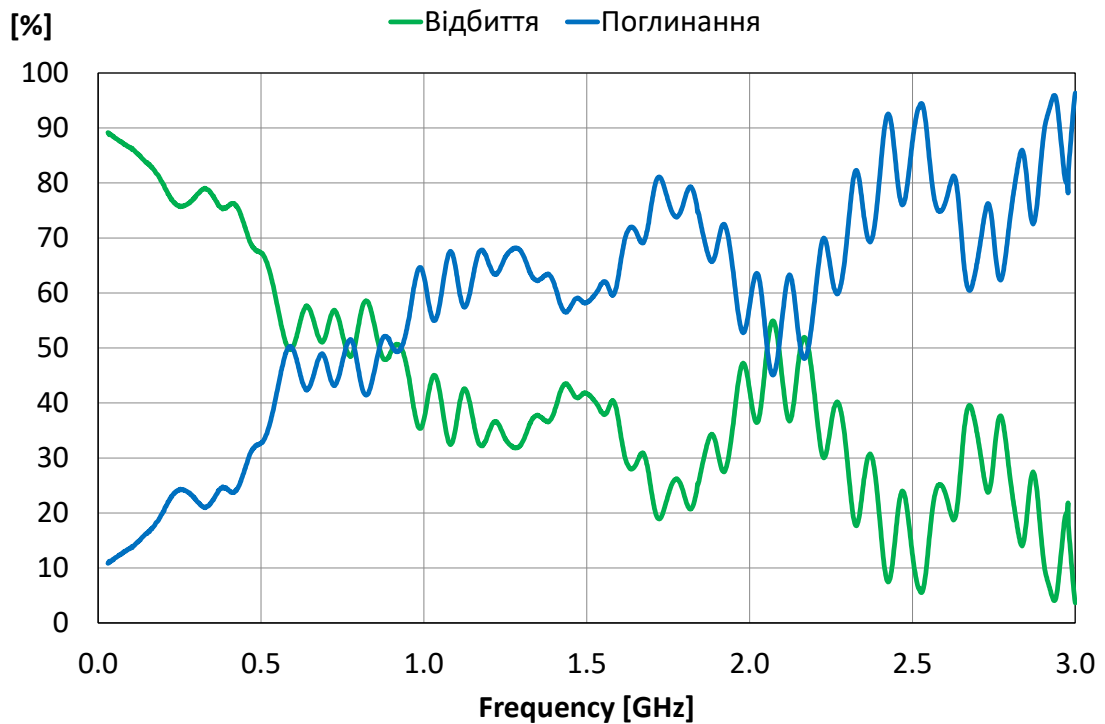


б)

Рисунок 3.6 – Екрануючі властивості гібридного трикотажного полотна варіанту 5: а – ефективність екранування; б – відсотковий вміст механізмів екранування



a)



б)

Рисунок 3.7 – Екрануючі властивості гібридного трикотажного полотна варіанту б: а – ефективність екранування; б – відсотковий вміст механізмів екранування

Таке розташування елементів структури призводить до їх взаємного накладення, що в свою чергу призводить до підвищення ефективності екранування електромагнітного випромінювання.

Порівняльний аналіз екрануючих властивостей розроблених гібридних полотен (рис.3.8) показує наступне. Ефективність екранування гібридного полотна варіанту 3, яке виготовлено переплетенням ластик 1+1 менша, ніж контрольного полотна варіанту 2, виготовленого таким же переплетенням але тільки з металевого дроту. Це пов'язано з наявністю зон з бавовняної пряжі, які не мають екрануючих властивостей. Але слід зазначити, що різниця в значеннях ефективності екранування SE між ними не значна. В той же час гібридне полотно завдяки наявності зон з бавовняної пряжі має вищий потенціал для використання в одязі.

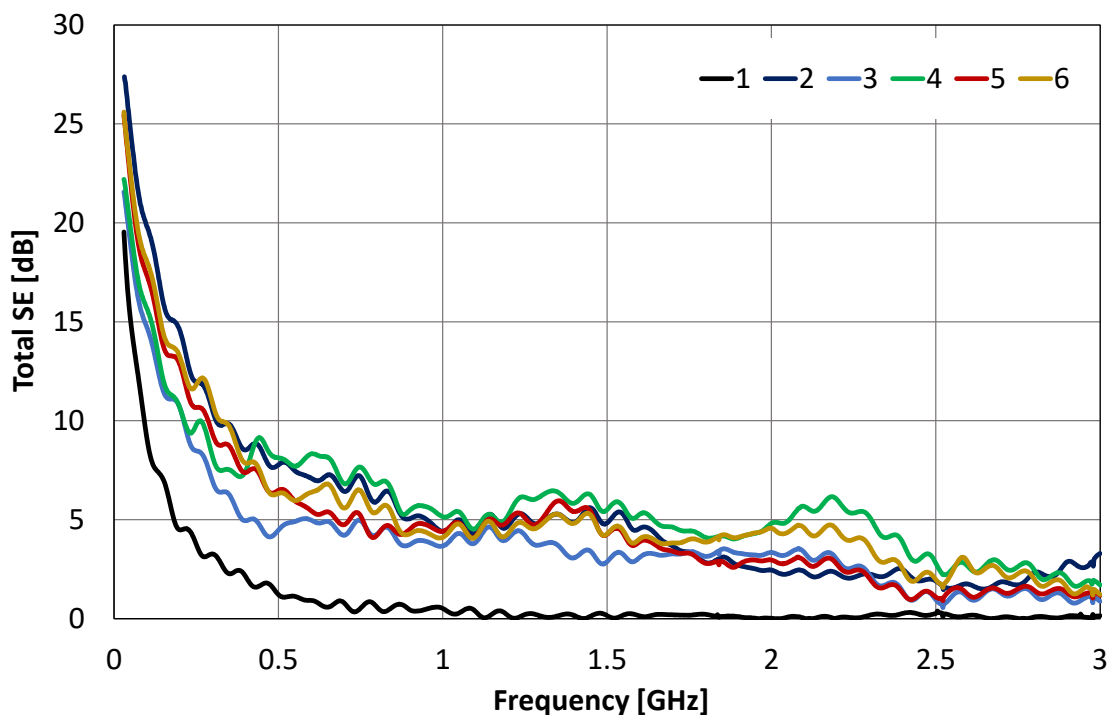


Рисунок 3.8 – Загальна ефективність екранування досліджуваних трикотажних матеріалів

Використання пресових петель у структурі гібридного трикотажу призводить до збільшення ефективності екранування, особливо в діапазоні

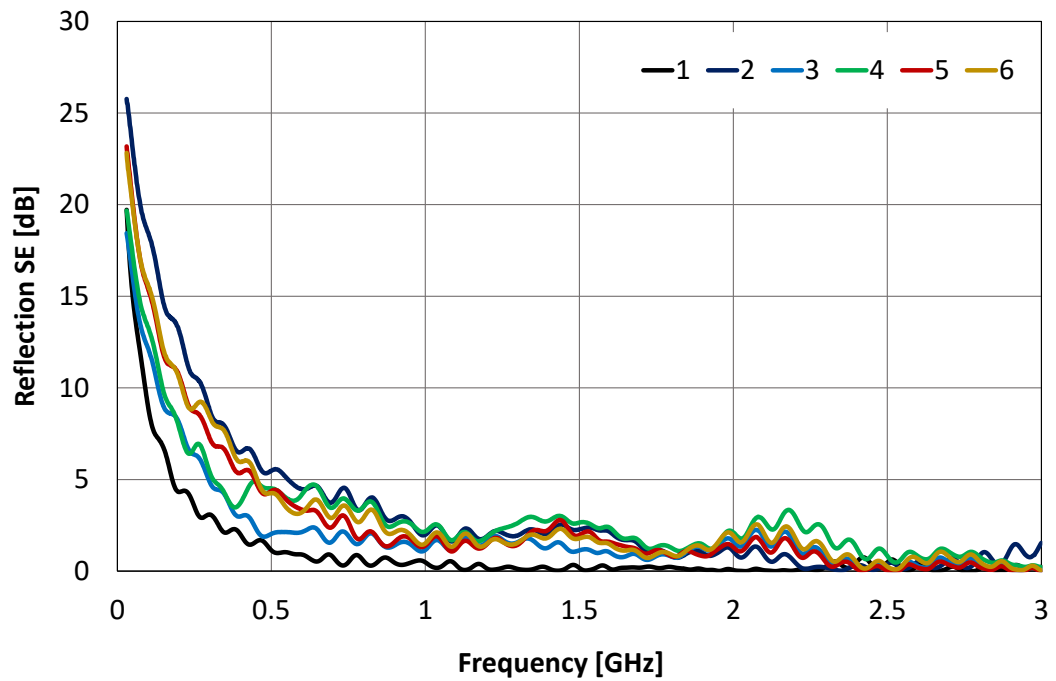
від 1 ГГц до 2 ГГц, тому гібридне полотно варіанту 5 (рис.2.5.в) за екрануючими властивостями подібне до контрольного полотна варіанту 2. Це відповідає попереднім дослідженням [4, 7] і пояснюється відмінностями у формі звичайних і пресових петель. Наявність горизонтальних протяжок з металевого дроту в структурі підвищує екрануючі властивості полотна, що подібне до висновків у [5, 6, 11]. Гібридне трикотажне полотно варіанту 4 має найбільший SE в діапазоні 1,2-2,5 ГГц порівняно як з іншими гібридними полотнами так і з контрольним полотном варіанту 2 з металевого дроту.

Відсотки поглинання та відбиття в загальній SE для гібридних трикотажних полотен, виготовлених із дроту з нержавіючої сталі та бавовняної пряжі, були розраховані та представлені на відповідних рисунках, а порівняльний аналіз на рис.3.9.

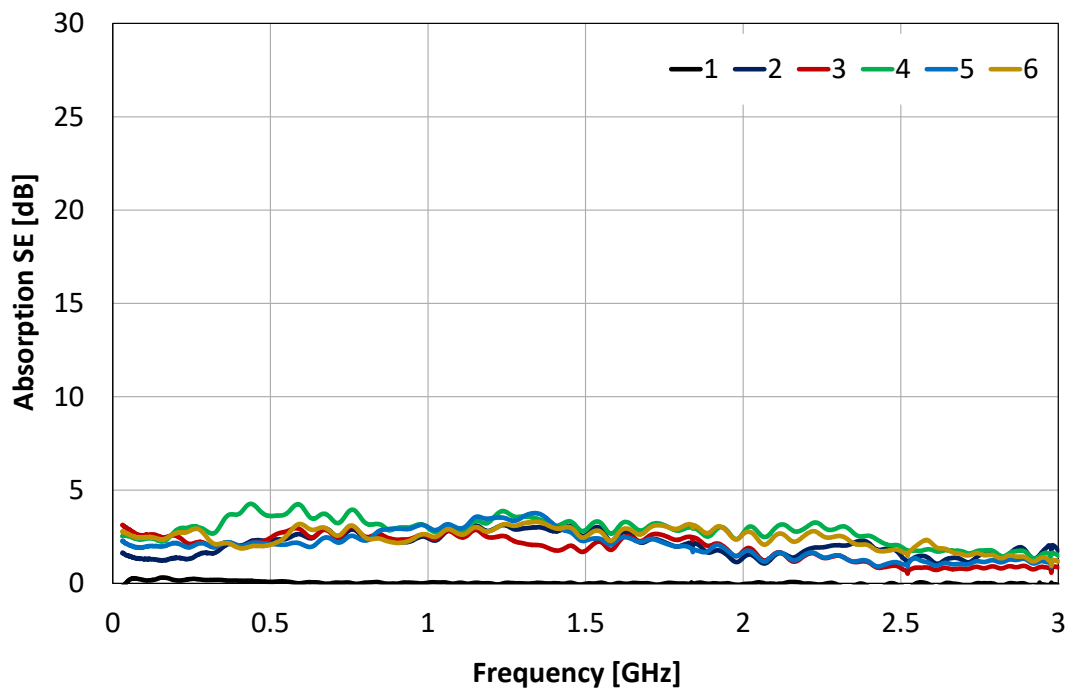
Отримані результати показують, що механізм екранування досліджуваними гібридними трикотажними полотнами подібний до контрольного полотна варіанту 2. На низьких частотах (до 600 МГц) переважає механізм відбиття; тоді як при зростанні частоти випромінювання екранування за рахунок поглинання спостерігався все частіше. Гібридне полотно варіанту 4 (рис.2.5.б), яке виготовлено переплетенням напівміланський ластик має найвищий потенціал для відбиття електромагнітного випромінювання порівняно з іншими досліджуваними матеріалами.

Механізм поглинання електромагнітного випромінювання досліджуваними гібридними трикотажними полотнами є слабо вираженим в досліджуваному діапазоні частот. Більший внесок екранування на основі поглинання спостерігався через загальну тенденцію до зниження ефективності екранування на високих частотах. Результати узгоджуються з літературою [12], де стверджується, що поглинання збільшується зі збільшенням частоти, тоді як відбивання має тенденцію до зменшення зі збільшенням частоти. У відносно низькочастотному діапазоні (тобто до 600 МГц) розроблені гібридні трикотажні полотна з чергуванням бавовняного та нержавіючого шарів можна використовувати як відбивачі електромагнітних

хвиль. Різниця в частотному діапазоні нижче 600 МГц може бути важливою для кінцевого використання такого роду провідних тканин

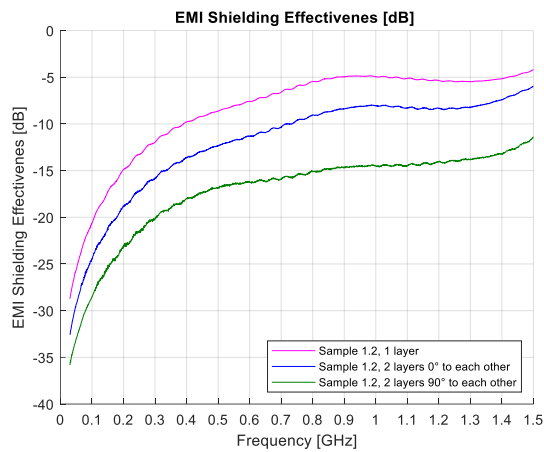


a)

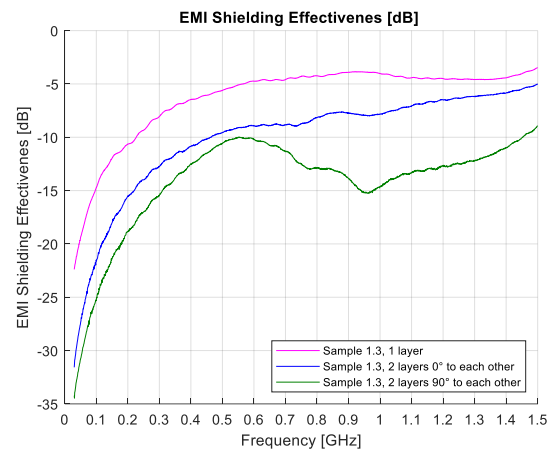


б)

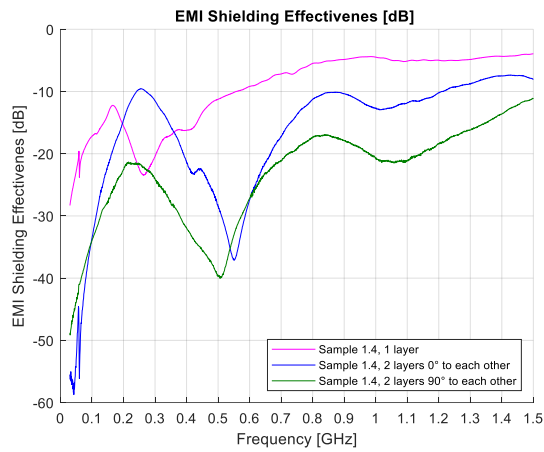
Рисунок 3.9 – Ефективність екранування досліджуваних трикотажних матеріалів за механізмами: а – відбиття; б – поглинання.



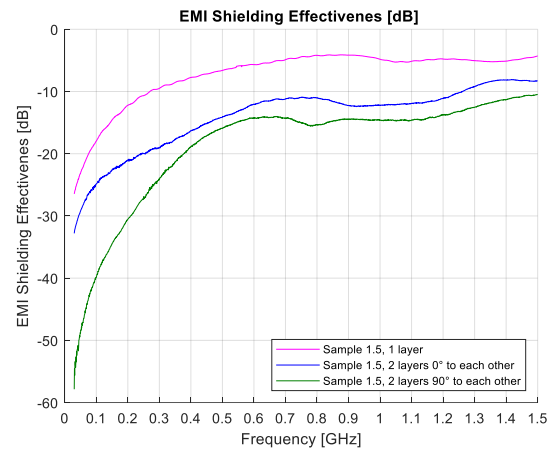
а)



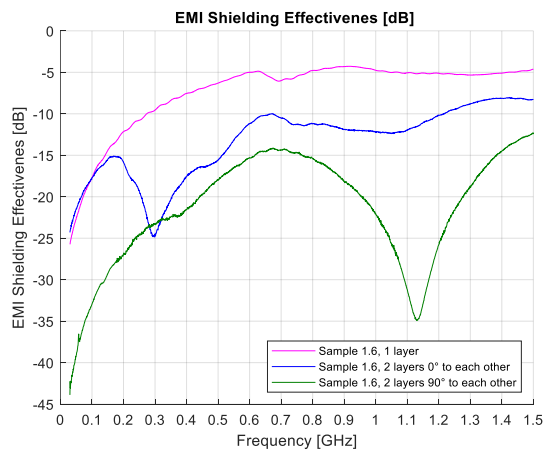
б)



в)



г)



д)

Рисунок 3.10 – Ефективність екранування [dB] одно та двошаровими структурами трикотажних полотен: а – варіант 2, б – варіант 3, в – варіант 4, г – варіант 5, д – варіант 6

3.3 Ефективність екранування металовмісними трикотажними сендвіч структурами

Деякі дослідники [13–14] зробили висновки, що при використанні провідних металевих дротів у ламінованих тканинах, вони демонстрували кращі показники ефективності екранування електромагнітного випромінювання, особливо у високочастотному діапазоні електромагнітних хвиль. Вони дійшли висновку [13], що ефективність екранування електромагнітного випромінювання двошаровими тканинами залежать від кутів накладання завдяки металевому дроту, який утворює сітчасту структуру в багатошарових матеріалах.

Таким чином, для підвищення ефективності екранування розроблених трикотажних матеріалів, ми використовували два шари кожного полотна з орієнтацією $0^\circ / 0^\circ$ та $0^\circ / 90^\circ$. На рис.3.10 показані середні значення SE одношарових зразків порівняно з двошаровими сендвіч-структурами. Очевидно, що двошарові структури з орієнтацією на 0° забезпечують приблизно на 3 - 5 дБ вищий рівень екранування порівняно з одношаровими. Двошарові зразки з орієнтацією на 90° один до одного мають найвищий коефіцієнт ефективності екранування. У цьому випадку ефективність екранування вище приблизно на 10-15 дБ порівняно з одношаровим зразком.

Висновки до розділу 3

1. Спосіб уведення металевго дроту в структуру трикотажного полотна шляхом чергування рядів з бавовняної пряжі та металевго дроту з нержавіючої сталі дозволив отримати ряд гібридних трикотажних полотен з різним вмістом сталевго складовго (від 7% до 100%).

2. Розроблені гібридні трикотажні полотна мають здатність до екранування електромагнітного випромінювання. Ефективність екранування на низьких частотах (до 0,3 ГГц) вища за 10 ДБ і залежить від варіанту полотна. У діапазоні частот від 0,7 до 1,5 ГГц ефективність екранування всіх досліджуваних полотен становить 5 ДБ і практично не залежить від варіанту полотна.

3. Головним чинником, що впливає на ефективність екранування гібридного трикотажного полотна є варіант розташування сталевго дроту в структурі полотна (петля, накид, протяжка). Встановлено, що ефективність екранування в даному випадку не залежить від відсоткового вмісту металевго компоненти.

4. Гібридні трикотажні полотна, виготовлені чергуванням 2 рядів з бавовняної пряжі та 2 рядів з дроту, мають захисні властивості, подібні до трикотажного полотна переплетення ластик 1x1, виготовленого лише з дроту з нержавіючої сталі. Незважаючи на те, що бавовна не є ефективним бар'єром для електромагнітного випромінювання, ефективність екранування такого гібридного полотна лише на 10-15% менше в досліджуваному діапазоні частот від 30 МГц до 3 ГГц.

5. Для усіх розроблених полотен на низьких частотах (до 600 МГц) переважає механізм відбиття хвиль. Більший вплив екранування на основі поглинання спостерігається на високих частотах через загальну тенденцію до зниження ефективності екранування.

6. Гібридне трикотажне полотно, яке виготовлено переплетенням напівміланський ластик, має найвищий потенціал для відбиття

електромагнітного випромінювання і може бути рекомендований для подальшого використання.

7. Використання розроблених гібридних трикотажних матеріалів у сендвіч-структурах з орієнтацією шарів під кутом 90 призводить до зростання ефективності екранування на 10-15 дБ порівняно з одношаровим зразком.

Список використаних джерел до розділу 3

1. He S, Liu Z, Wang H, Wang X. Effect of needle loops on shielding effectiveness of electromagnetic shielding knitted fabrics. *Textile Research Journal*. 2023; 93(3-4): 691-700. doi: 10.1177/00405175221122579.
2. Tezel, S., Kavusturan, Y., Vandenbosch, G.A. and Volski, V. Comparison of electromagnetic shielding effectiveness of conductive single jersey fabrics with coaxial transmission line and free space measurement techniques, *Textile Research Journal*, 2013; 84 (5): 461–476. doi:10.1177/0040517513503728.
3. Ciesielska-Wróbel I, Grabowska K. Estimation of the EMR Shielding Effectiveness of Knit Structures, *Fibres and Textile in Eastern Europe*, 2012; 20, 2 (91): 53-60.
4. Usman Ahmed, Tanveer Hussain, Hafiz Shehbaz Ahmad, Novel knitted fabric structures for shielding against electromagnetic and thermal radiation from laptops and mobile phones, *International Journal of Thermal Sciences*, 2023, 194: 108594, <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2023.108594>.
5. Li, Ning, Liu, Tianjiao, Tian, Mengqi, Duan, Junrui, Yao, Mu and Sun, Runjun. "Comprehensive performance evaluation based on electromagnetic shielding properties of the weft-knitted fabrics made by stainless steel/cotton blended yarn" *e-Polymers*, vol. 23, no. 1, 2023, pp. 20230065. <https://doi.org/10.1515/epoly-2023-0065>.
6. Tunakova V, Tunak M, Bajzik V, et al. Hybrid knitted fabric for electromagnetic radiation shielding. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. 2020; 15: 1-9. doi:10.1177/1558925020925397.
7. Tezel, S., Kavuştur, Y., Vandenbosch, G. A., Volski, V. (2023). Influence of Knitting Structure and Metal Wire Amount on Electromagnetic Shielding Effectiveness of Knitted Fabrics. *Textile and Apparel*, 33(1), 37-44. <https://doi.org/10.32710/tekstilvekonfeksiyon.987174>.

8. Committee for Conformity Assessment of Accreditation and Certification on Functional and Technical Textiles. Specified requirements of electromagnetic shielding textiles. Taipei/Taiwan, Standard No. FTTS-FA-003, (2005).
9. Sancak, E., Akalin, M., Usta, I., Yuksek, M. and Özen, M.S. The Effects of Fabric and Conductive Wire Properties on Electromagnetic Shielding Effectiveness and Surface Resistivity of Interlock Knitted Fabrics, Fibers and Polymers, Vol.19 (2018) No. 4, pp. 843-853, DOI: 10.1007/s12221-018-7906-8.
10. Palanisamy, S., Tunakova, V. & Militky, J. Fiber-based structures for electromagnetic shielding – comparison of different materials and textile structures, Textile Research Journal, Vol. 88 (2018) No. 17, pp. 1992-2012, doi: 10.1177/0040517517715085.
11. Ruslan Abdulla, Ediz Delihasanlar, Fidan Gamze Kizilcay Abdulla, and Ahmet Hayrettin Yuzer, "Electromagnetic Shielding Characterization of Conductive Knitted Fabrics," Progress In Electromagnetics Research M, Vol. 56, 33-41, 2017. doi:10.2528/PIERM17011305.
12. Klemperer CJV and Maharaj D. Composite electromagnetic interference shielding materials for aerospace applications. Composite Structures. 2009; 91 (4): 467–472 <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.04.013>.
13. Yu Z-C, He H-L, Lin J-H, et al. Functional Properties and Electromagnetic Shielding Behaviour of Elastic Warp-knitted Fabrics, Fibres Text. East. Eur, 2015, 23, 5 (113): 78-83, DOI: 10.5604/12303666.1161761.
14. Lin, J.H., Huang, Y.T., Li, T.T. et al. Manufacture technique and performance evaluation of electromagnetic-shielding/far-infrared elastic warp-knitted composite fabrics, The Journal of the Textile Institute, Vol. 107 (2016) No. 4, pp. 493-503, doi: 10.1080/00405000.2015.1045253

4 РОЗДІЛ. ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГІБРИДНИХ ТРИКОТАЖНИХ МАТЕРІАЛІВ

4.1 Параметри структури трикотажного полотна

4.1.1 Щільність трикотажного полотна

Головними параметрами трикотажного полотна, які визначають його щільність є кількість петельних стовпчиків $N_{ст}$ та рядів N_p на 100 см, а їх опосередкованими значеннями є петельний крок A та висота петельного ряду B [1]. Результати дослідження цих показників наведено у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Показники щільності трикотажного полотна

Варіант	Кількість у 100 мм			Петельний крок A , мм	Висота петельного ряду на лицьовій стороні $B_{л}$, мм
	петельних стовпчиків $N_{ст}$	петельних рядів на лицьовому боці $N_{рл}$	петельних рядів на виворотному боці $N_{рв}$		
1	48 ± 1	60 ± 1	60 ± 1	$2,01 \pm 0,10$	$1,67 \pm 0,09$
2	40 ± 1	50 ± 1	50 ± 1	$2,50 \pm 0,12$	$2,00 \pm 0,11$
3	40 ± 1	58 ± 1	58 ± 1	$2,50 \pm 0,09$	$1,72 \pm 0,08$
4	42 ± 1	45 ± 1	60 ± 2	$2,38 \pm 0,11$	$2,22 \pm 0,10$
5	38 ± 1	50 ± 1	62 ± 2	$2,63 \pm 0,11$	$2,00 \pm 0,12$
6	40 ± 1	52 ± 1	61 ± 2	$2,50 \pm 0,10$	$1,92 \pm 0,09$

Очевидно, що за кількістю петельних стовпчиків у 100 мм полотна, а відповідно і петельним кроком контрольні зразки трикотажу відрізняються майже на 20%. Це є результатом різниці у властивостях, зокрема пружності та еластичності, бавовняної пряжі та сталевго дроту. Після в'язання розміри та конфігурація петель полотна варіанту 2, яке виготовлено з металевго дроту, залишаються майже незмінними. В той же час петельна структура полотна варіанту 1, яке виготовлено з бавовняної пряжі, змінюється

внаслідок релаксаційних процесів після зняття навантажень, що діють упродовж циклу в'язання.

Кількість петельних стовпчиків та відповідно петельний крок гібридних трикотажних полотен мають однакові значення, які подібні до відповідних параметрів контрольного полотна 2. Отже визначальним в даному випадку є ділянки полотна, які сформовані зі сталевго дроту. Різниця в показниках у полотен різних варіантів незначна, що можна віднести до похибки досліджень. Що можна пояснити в'язанням полотен на одній тій же самій в'язальній машині при стабільному її налаштуванні.

Кількість петельних рядів у 100 мм вимірювали на обох боках полотна. Очевидно, що для варіантів 1-3 щільність полотна по вертикалі на обох боках однакова. За кількістю петельних рядів у 100 мм полотна контрольні зразки трикотажу відрізняються також майже на 20%. Тобто трикотаж переплетення ластик 1+1 зі сталевго дроту є менш щільним як вздовж петельних стовпчиків так і вздовж петельних рядів по відношенню до аналогічного трикотажу з бавовняної пряжі. Гібридне трикотажне полотно варіанту 3 за кількістю петельних рядів у 100 мм подібне до трикотажу варіанту 1 з бавовняної пряжі, а за кількістю петельних стовпчиків у 100 мм подібне до трикотажу варіанту 2 з металевго дроту.

Для полотен варіантів 4-6 значення на різних боках різняться через те що на ділянках з металевго дроту петлі лицьового боку формуються за два цикли петлетворення, а виворітного – за один. Для детального аналізу на наведено діаграму залежності висоти петельного ряду на лицьовому боці від варіанту полотна (рис.4.1). Отримані дані показують, що вид переплетення та варіант сировини мають суттєвий вплив на показник. Гібридне трикотажне полотно варіанту 4 має найбільшу висоту ряду на лицьовому боці, адже усі петлі зі сталевго дроту подовжені за рахунок перетягування з петель, які утворені на іншій голочниці. У трикотажного полотна варіанту 5 усі петлі зі сталевго дроту на лицьовому боці також подовжені, однак вони мають накид, який обмежує ступінь витягування.

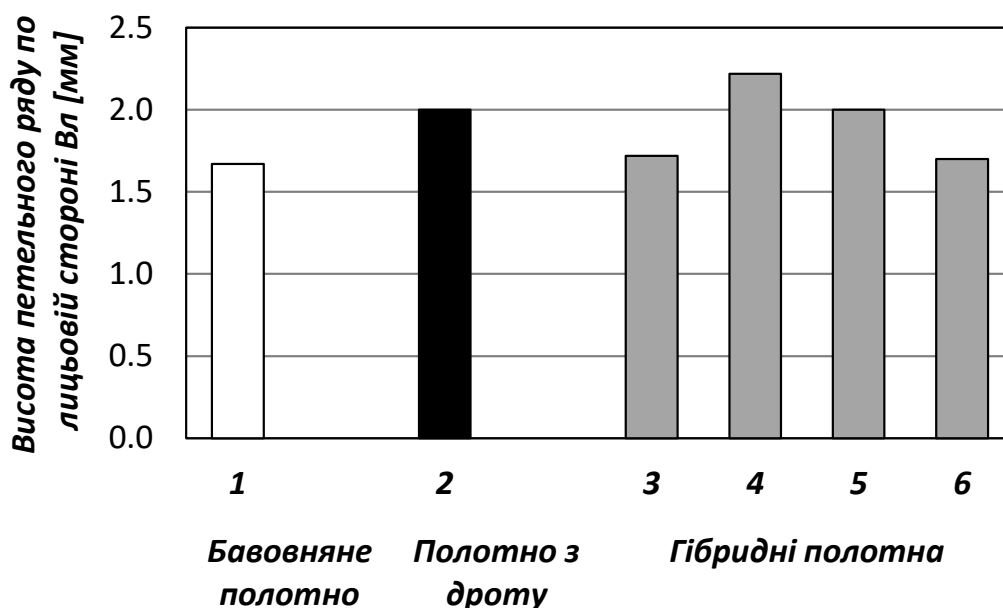


Рисунок 4.1 – Висота петельного ряду по лицьовій стороні

4.1.2 Довжина нитки в петлі

Довжина нитки, яку витрачають на утворення однієї петлі – елемента структури трикотажу – є головним параметром, що впливає на щільність, товщину та поверхневу густину трикотажу, а також на інші властивості полотна. Результати дослідження довжини нитки в петлі для бавовняної пряжі та металевго дроту наведено у таблиці 4.2. Значення параметру можна вважати однаковим для досліджуваних полотен варіантів 1-3. Різниця в значеннях даних лежить у межах похибки дослідження.

Незважаючи на те, що усі полотна було вироблено на одній в'язальній машині при постійних параметрах, існує відмінність у даному показникові у гібридних полотнах варіантів 4-6. Використання металевго дроту на 1 петлю на 8-11 % вище ніж бавовняної пряжі. Різниця пов'язана, перш за все, з різними пружними властивостями сировини. Унаслідок вищої пружності бавовняна пряжа скорочується у період релаксації напруг у структурі полотна, в той час як розмір дроту залишається незмінним. Різниця значень між варіантами полотен є наслідком різної витрати сировини на петлю, накид

чи протяжку, а також якл утворюються петлі: почергово на різних голочницях чи на одній і тій же.

Таблиця 4.2 – Довжина нитки в петлі, товщина та поверхнева густина трикотажу

Варіант	Довжина нитки в петлі, мм		Товщина, мм	Поверхнева густина, г/м ²
	металевий дріт	бавовняна пряжа		
1	—	7,40±0,08	2,58 ± 0,03	420 ± 5
2	7,30±0,09	—	1,24 ± 0,02	160 ± 2
3	7,26±0,07	7,23±0,07	2,16 ± 0,02	245 ± 2
4	8,15±0,09	7,30±0,09	2,23 ± 0,03	300 ± 2
5	7,76±0,10	7,16±0,09	2,87 ± 0,03	285 ± 2
6	8,04±0,08	7,14±0,08	2,55 ± 0,02	290 ± 3

4.1.3 Товщина трикотажу

Вид переплетення, який використано для уведення металевого дроту в структуру трикотажу має суттєвий вплив на товщину гібридного полотна (табл. 4.2, рис.4.2). Досліджувані полотна варіантів 3 та 4 мають подібні товщини 2,16 та 2,23 мм відповідно, що є на 16,3 % та 13,5 % меншим ніж товщина контрольного полотна варіанту 1 з бавовняної пряжі та на 74,2 % та 79,8 % вищим ніж товщина контрольного полотна варіанту 2 зі сталевго дроту. Найтовщим є гібридне трикотажне полотно варіанту 5, яке має пресові петлі з металевго дроту на усіх голках передньої голочниці. Товщина цього варіанту на 11 % вища ніж товщина контрольного полотна варіанту 1 та більш ніж у 2 рази перевищує товщину контрольного полотна варіанту 2. Товщина гібридного трикотажного полотна варіанту 6 нижча ніж варіанту 5, адже пресові петлі формуються не на кожній голці передньої голочниці, а через одну.

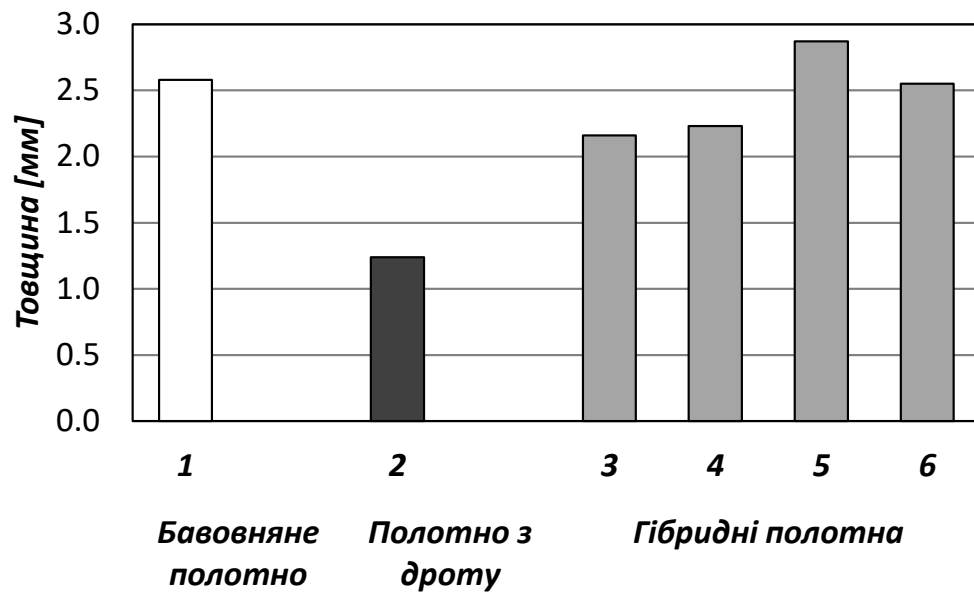


Рисунок 4.2 – Товщина досліджуваних полотен

4.1.4 Поверхнева густина

Загалом, поверхнева густина гібридних трикотажних полотен, які виготовлено чергуванням рядів з бавовняної пряжі та рядів з металевого дроту з нержавіючої сталі є середньою між поверхневими густинами контрольних полотен (табл. 4.2, рис.4.3).

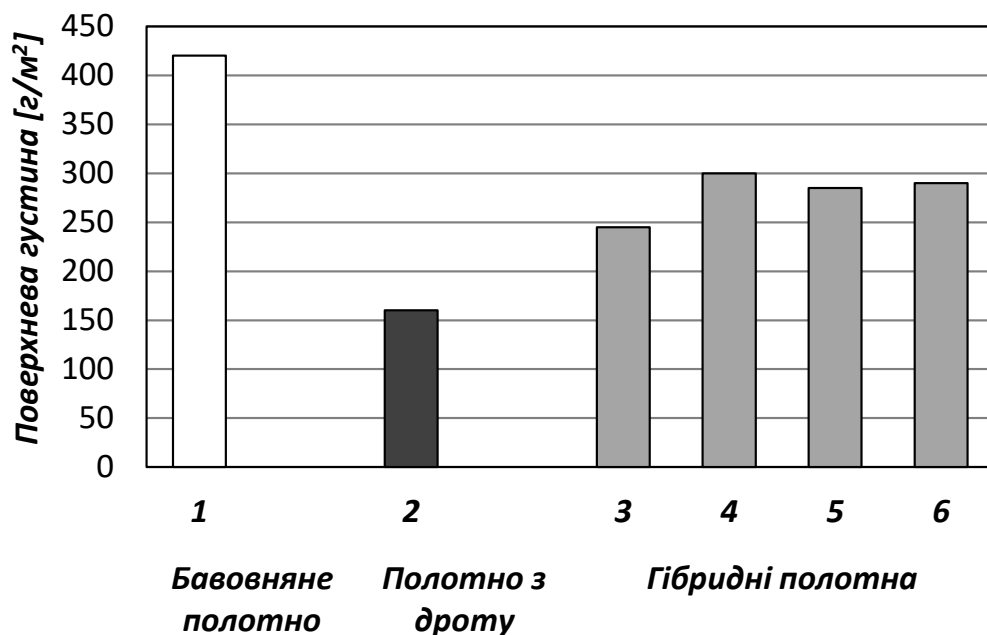


Рисунок 4.3 – Поверхнева густина полотна

Слід зазначити дещо нижчу (на 14-18%) в порівнянні з іншими поверхневу густину гібридного полотна варіанту 3, в якому з металевого дроту сформовані лише петлі. Поверхнева густина гібридного полотна, в якому з металевого дроту сформовані як петлі так і накиди або протяжки, майже однакова для усіх варіантів 4-6. Різницю в показниках (до 5 %) можна віднести до похибки вимірювання.

4.2 Пористість трикотажних матеріалів

Наявність в структурі текстильного матеріалу металевих ниток або волокон суттєво впливає на характеристики структури матеріалу (наприклад форму та розмір петель), що, в свою чергу, призводить до змін властивостей полотна, зокрема проникність. В той же час, проникність текстильних матеріалів, а зокрема трикотажу, залежить від його пористості. Трикотажне полотно має більш відкритий характер у порівнянні з тканим. Пористість в'язаної конструкції впливає на її об'ємну щільність, поглинання вологи, масообмін і теплопровідність.

Nazir [2] встановив, що збільшення довжини нитки в петлі та зменшення класу в'язальної машини призводять до зменшення щільності полотна, що супроводжується збільшенням його товщини та пористості. Mansor [3] виявив, що товщина тканини безпосередньо впливає на їх повітропроникність, у той час як паропроникність та гігроскопічність безпосередньо залежить від вмісту волокон різної природи та структури трикотажу. Ogulata [4] досліджував пористість та повітропроникність трикотажного полотна переплетення гладь, в результаті чого було з'ясовано, що вони є взаємопов'язаними характеристиками. Якщо матеріал має дуже високу пористість, то можна вважати, що він проникний. За результатами дослідження пористості трикотажу переплетення гладь встановлено [5], що пористість трикотажу може бути зменшена за рахунок збільшення його щільності. В той же час кількість рядів та стовпчиків у 100 мм трикотажного

полотна не можна використовувати як єдину характеристику ступеня його заповнення волокнистим матеріалом. Більш пористою в'язаною структурою вважається полотно з максимально вільними зазорами між петлями, а не така, що має більше петель на одиницю площі. Benltoula з колегами [6] встановив, що довжина нитки в петлі має більший вплив на пористість трикотажу, ніж його щільність та товщина.

Текстильний матеріал має дві шкали пор: макропору – простір між нитками в структурі та мікропори – простір між волокнами в пряжі [7–8]. Navlova та Spankova виявили, що характерний розмір міжниткових пор у трикотажі переплетення гладь приблизно в 35-228 разів більший, ніж внутрішньо ниткових [9]. Таким чином, пористістю самих ниток можна знехтувати з точки зору потоку повітря через в'язану структуру.

Для оцінки пористості текстильних матеріалів використовують різні методи: визначення повітропроникності, обробка зображень та геометричне моделювання [6]. Перші два методи мають обмеження у використанні для тих чи інших структур, то геометричне моделювання може бути використано для будь-якої структури.

Існує дві характеристики ідеалізованої пористості текстильного матеріалу на основі його заповнення: поверхнева та об'ємна пористість.

Поверхнева пористість, P_s – це двовимірна інтерпретація пористості за геометрією проекції пряжі [9]:

$$P_s = 1 - \frac{\text{площа проекції пряжі у одиниці площі}}{\text{одиниця площі}} \quad (4.1)$$

$$= 1 - \frac{d * l - 4 * d^2}{A * B}$$

де d – діаметр нитки чи пряжі, мм;

l – довжина нитки в петлі, мм;

A та B – петельний крок та висота петельного ряду, мм.

Об'ємна пористість, P_v – це тривимірна інтерпретація пористості, яка показує відношення об'єму пор у матеріалі до об'єму самого матеріалу. Існує декілька геометричних моделей та відповідних формул для визначення об'ємної пористості трикотажних матеріалів [10–11], але найчастіше застосовують наступну [6]

$$P_v = 1 - \frac{\text{об'єм пряжі}}{\text{загальний об'єм}} = 1 - \frac{\pi * d^2 * 2 * l}{2 * M * A * B} \quad (4.2)$$

де M – товщина трикотажу, мм.

Діаметр пряжі зазвичай розглядається як непроникний циліндр і може бути розрахований як [1]

$$d = 0.0357 \sqrt{T * \delta^{-1}} \quad (4.3)$$

де T – лінійна густина пряжі, текс;

δ – об'ємна щільність ниток, г/см³. Для бавовняної пряжі $\delta=0.75 \div 0.85$ г/см³.

На цьому етапі досліджень за відомими формулами (4.1) та (4.2) було розраховано поверхневу та об'ємну пористості, результати чого наведено у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Пористість досліджуваного трикотажного полотна

Варіант	Поверхнева пористість, P_s , %	Об'ємна пористість, P_v , %
1	8,3	79,2
2	67,3	94,7
3	35,9	86,0
4	55,2	90,8
5	47,3	91,4
6	50,7	91,4

В результаті аналізу отриманих даних становлено, що збільшення вмісту дроту призводить до збільшення пористості полотна, особливо поверхневої пористості P_s . Поверхнева пористість контрольного бавовняного трикотажу (варіант 1) майже у 8 разів менша, ніж контрольного полотна із сталевго дроту (варіант 2) через різницю в діаметрі пряжі та жорсткості дроту на згинання, що призводить до відкритості структури трикотажного полотна. Слід зазначити, що наявність в структурі окрім петель з металевго дроту (варіант 3) ще й протяжок (варіант 4) або накидів (варіанти 5 та 6) призводить до зростання пористості.

Об'ємна пористість в'язаного полотна з рядами, які виготовлено зі сталевго дроту (варіанти 2 ÷ 6), на 20 ÷ 30 відсотків вища, ніж для бавовняного трикотажного полотна (варіант 1).

4.3 Дослідження показників комфорту гібридних трикотажних матеріалів

4.3.1 Теплофізичні властивості трикотажних полотен

Здатність текстильних матеріалів проводити та поглинати тепло характеризують теплопровідністю λ (ступінь інтенсивності проходження тепла через текстильний матеріал), тепловим опором R , температуропровідністю a (швидкістю вирівнювання температури в різних точках текстильного матеріалу). В останній час зі збільшенням для споживачів значення комфортності встала потреба доповнення загальновживаних теплофізичних характеристик новим показником, який би характеризував теплове відчуття людини при доторканні до текстильного матеріалу. На думку Л. Геса [12], який є визнаним авторитетом з питань оцінки комфорту одягу, оцінка цього відчуття може бути здійснена за так званим показником коефіцієнта теплового поглинання, який автор визначає як $b = \frac{\lambda}{\sqrt{a}}$. Проведені автором дослідження вказують на те, що із збільшенням числового значення цього

коефіцієнта підвищуються неприємні холодові відчуття людини при торканні поверхні текстильних матеріалів.

Розроблені гібридні трикотажні полотна для захисту від ЕМВ характеризуються широким діапазоном значень теплофізичних властивостей (табл.4.4). Результати дослідження показали, що за рахунок вплетення сталевго дроту в структуру полотен їх теплофізичні властивості значно змінюються. Це пов'язано зі значною відмінністю коефіцієнта теплопровідності бавовни ($\lambda = 69,0 \cdot 10^{-3} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$) та нержавіючої сталі ($\lambda = 45,5 \cdot \text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$).

Таблиця 4.4 – Теплофізичні властивості гібридних трикотажних полотен

Варіант	Коефіцієнт теплопровідності, $\lambda \cdot 10^{-3}, \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$	Тепловий опір, $\text{г} \cdot 10^{-3}, \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{К} \cdot \text{м}^2$	Коефіцієнт температуро-провідності, $\alpha \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$	Коефіцієнт теплового поглинання, $b, \text{ Вт} \cdot \text{с}^{1/2} / \text{м}^2 \cdot \text{К}$
1	69.0 ± 0.84	37.4 ± 0.53	0.35 ± 0.04	117.3 ± 5.51
2	41.5 ± 1.56	30.0 ± 1.66	0.68 ± 0.04	50.3 ± 1.97
3	53.7 ± 1.97	41.5 ± 1.37	0.46 ± 0.05	85.0 ± 4.40
4	54.6 ± 0.79	39.5 ± 0.51	0.40 ± 0.01	80.8 ± 4.83
5	56.7 ± 1.92	50.8 ± 1.45	0.68 ± 0.08	66.7 ± 5.33
6	55.2 ± 1.73	46.3 ± 1.54	0.47 ± 0.03	80.9 ± 5.06

Коефіцієнт теплопровідності λ характеризує ступінь інтенсивності теплообміну через текстильний матеріал. Чим більше значення коефіцієнта, тим нижче теплоізоляційні властивості.

Слід зазначити, що коефіцієнт теплопровідності контрольного трикотажного полотна переплетення ластик 1+1 лише з бавовняної пряжі (варіант 1) більш ніж у 1,5 рази перевищує коефіцієнт теплопровідності контрольного трикотажного полотна такого ж переплетення лише зі сталевго дроту (варіант 2). Це повністю співпадає з коефіцієнтами теплопровідності бавовни і сталі. Крім того, теплопередача в текстильних

матеріалах відбувається як за рахунок теплопровідності волокна так і повітря, що міститься в закритих порах. Так, зі збільшенням пористості до певного рівня теплопровідність текстильних матеріалів зменшується, оскільки теплопровідність повітря нижча за теплопровідність текстильних волокон.

Теплопровідність гібридних трикотажних матеріалів, які виготовлені чергуванням двох рядів з бавовняної пряжі та двох рядів зі сталевго дроту, знаходиться в діапазоні $54 \div 57 \cdot 10^{-3}$, ($\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$), тобто має середнє значення між контрольними трикотажними полотнами і не залежать від виду переплетення (рис.4.4).

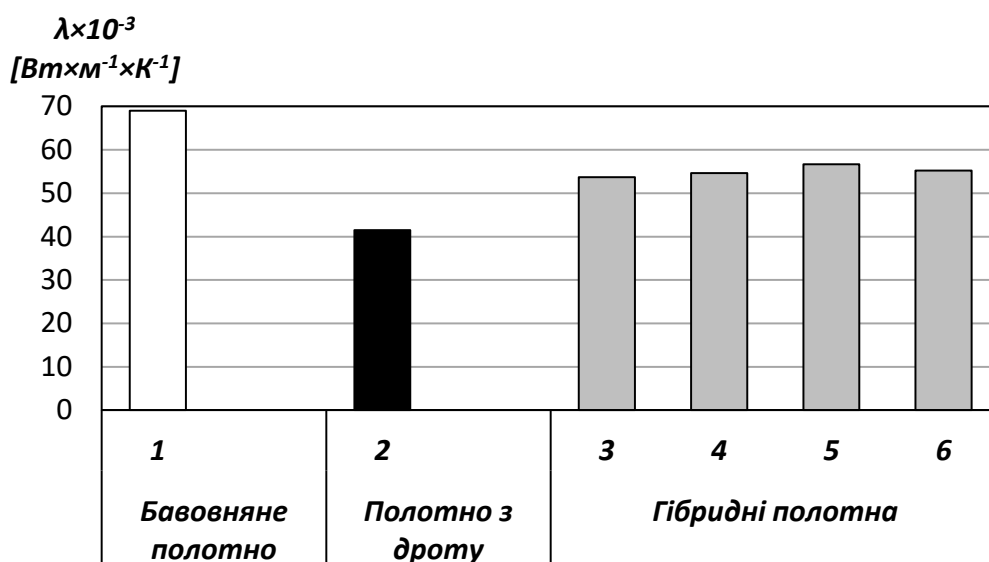


Рисунок 4.4 – Коефіцієнт теплопровідності полотна

Питомий термічний опір матеріалу R визначає його теплозахисні властивості і залежить від складу, товщини і пористості матеріалу, а також від його вологості і температури. Аналіз результатів досліджень (табл.4.4) показує, що значення коефіцієнта питомого термічного опору для контрольного трикотажу з бавовняної пряжі (варіант 1) вище відповідного значення для контрольного трикотажу, виготовленого лише зі сталевго дроту (варіант 2). Це є наслідком значного (майже на 50%) зменшення товщини тканини (табл.4.2),

оскільки саме товщина визнана домінуючим фактором впливу на термостійкість матеріалів. З іншого боку, найвищу поверхневу пористість (табл.4.3) має контрольне трикотажне полотно варіанту 2 із сталевго дроту, а найнижчу – контрольне полотно варіанту 1 з бавовняної пряжі, що також впливає на властивості. Слід зазначити, що питомий термічний опір гібридних трикотажних полотен, виготовлених чергуванням рядів із сталевго дроту і рядів з бавовняної пряжі, вище, ніж обох контрольних трикотажних полотен (рис.4.5).

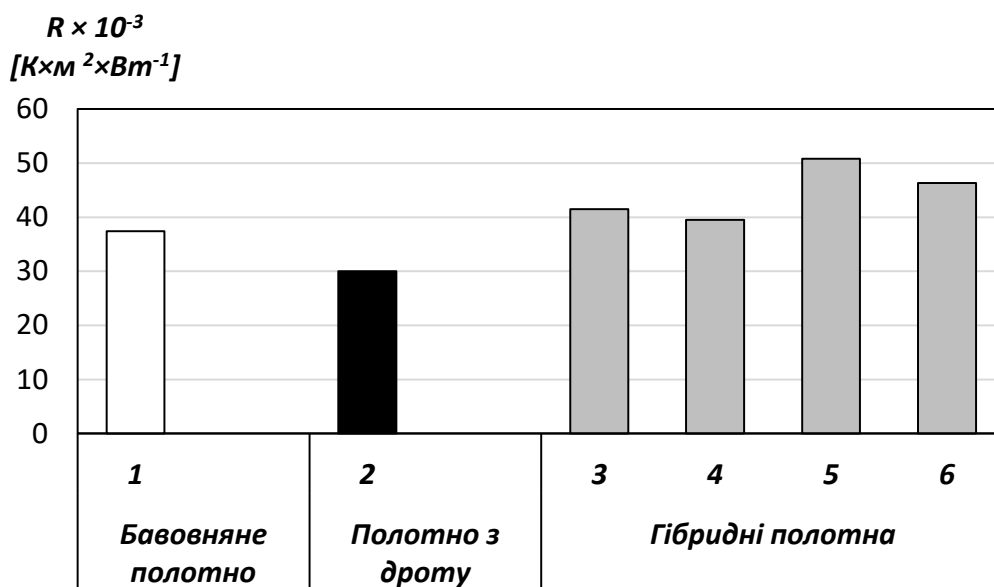


Рисунок 4.5 – Питомий термічний опір трикотажного полотна

Результати досліджень дозволяють встановити вплив виду петель на питомий термічний опір гібридних трикотажних полотен (рис.4.5). Структури з пресовими петлями (варіант 5 та 6) мають вищий термічний опір, який зростає при збільшенні кількості пресових петель у рапорті полотна переплетення напівфанг (варіант 5), де кожна петля на передній голочниці є пресовою (рис.2.5.в) має вищий коефіцієнт R , ніж полотно варіанту 6, в якому пресові петлі утворені на кожній другій голці голочниці (рис.2.5.г).

В результаті математичної обробки експериментальних даних встановлено прямолінійну залежність питомого термічного опору R ($Wt^{-1} \cdot K \cdot m^2$)

від товщини T (мм) трикотажного полотна (рис.4.6), яку можна описати наступним рівнянням ($R^2=0.97$):

$$R = 13.7 + 12.6 T \quad (4.4)$$

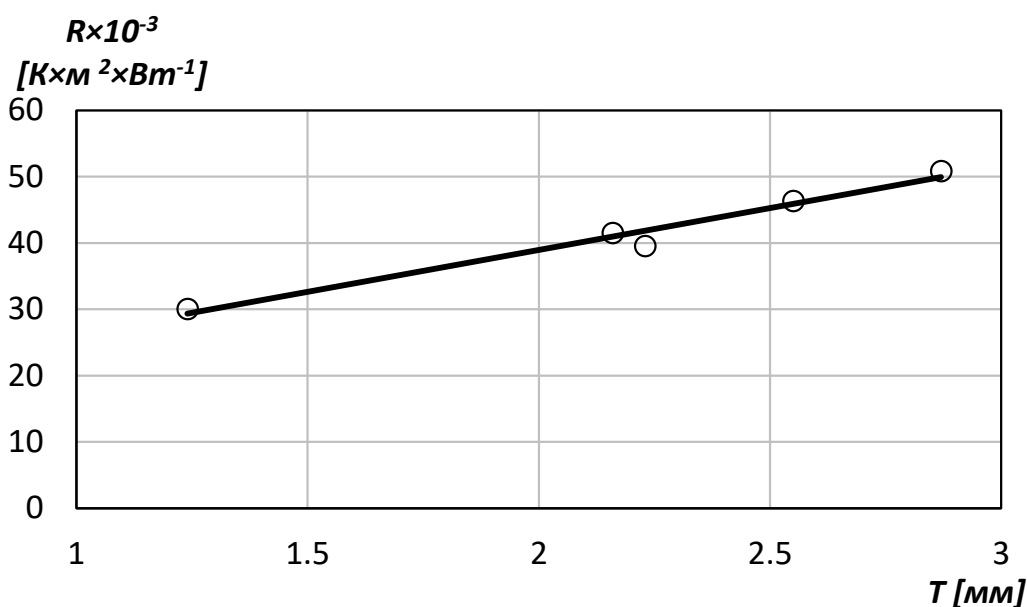


Рисунок 4.6 – Залежність питомого термічного опору від товщини гібридного трикотажного полотна

Коефіцієнт температуропровідності α характеризує швидкість вирівнювання температури в різних точках текстильного матеріалу. Високе значення коефіцієнта вказує на високу швидкість досягнення однакової температури у всьому матеріалі при нагріванні або охолодженні. Встановлено (табл.4.4), що коефіцієнт температуропровідності контрольного трикотажного полотна із сталевго дроту (варіант 2) майже вдвічі вищий, ніж контрольного бавовняного трикотажу (варіант 1). Очевидно, що вид переплетення є основним фактором впливу на температуропровідність гібридних трикотажних полотен (рис.4.7). Найвищий коефіцієнт температуропровідності спостерігається у гібридного трикотажу варіанту 5 із більшою кількістю пресових петель у рапорті.

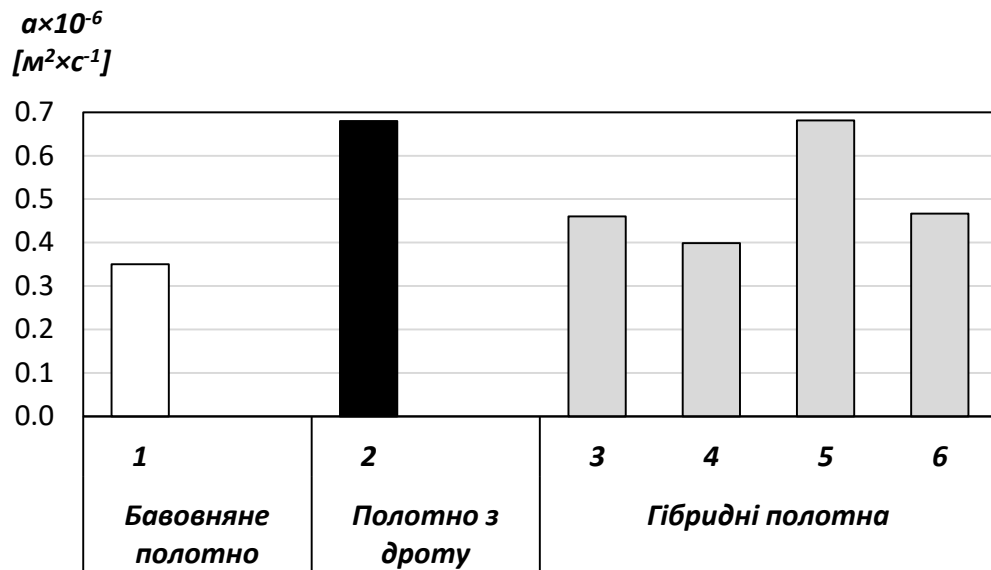


Рисунок 4.7 – Коефіцієнт температуропроводності трикотажу

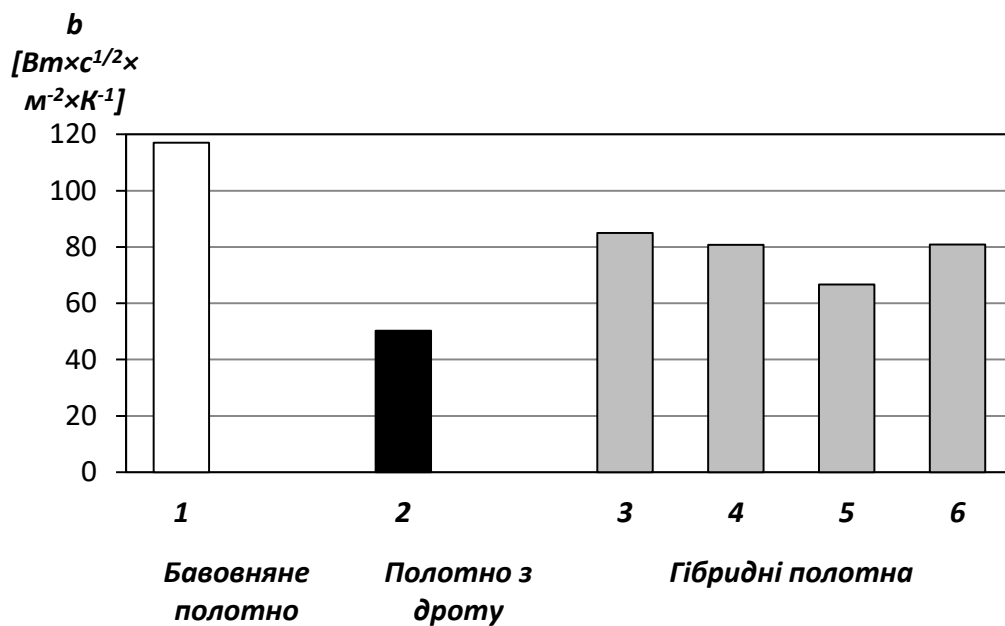
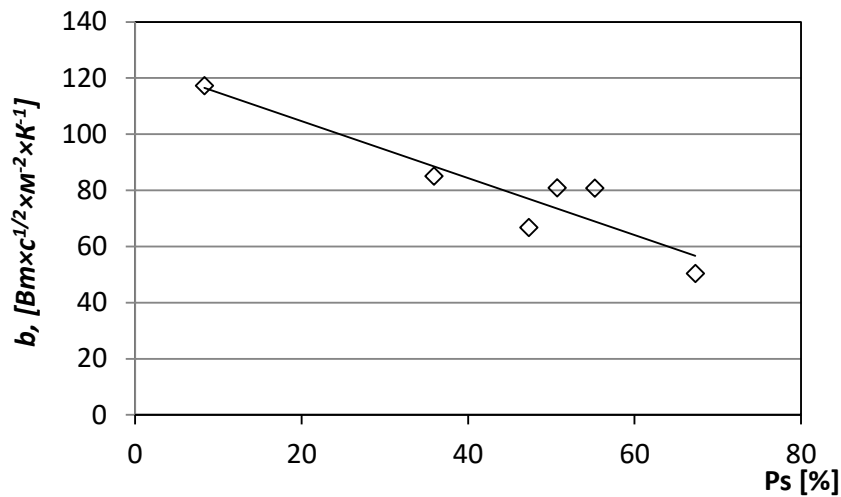


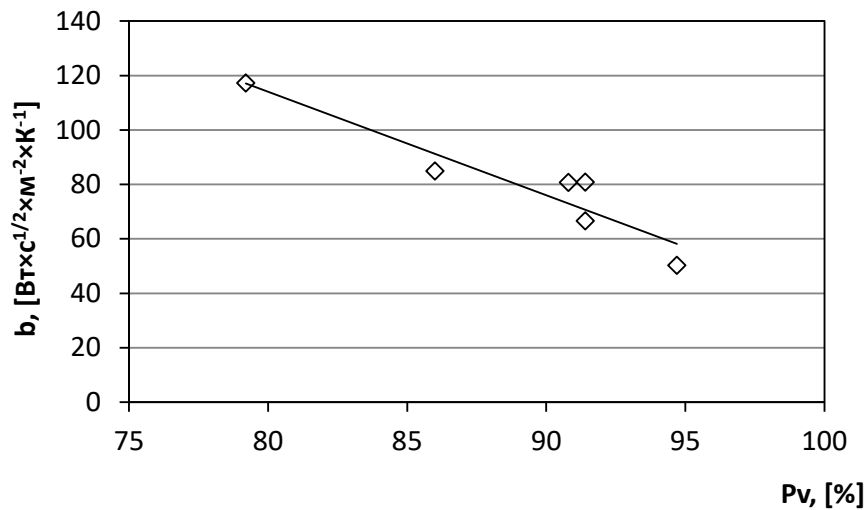
Рисунок 4.8 – Коефіцієнт теплового поглинання трикотажу

У результаті аналізу експериментальних даних (табл.4.4) встановлено, що коефіцієнт теплового поглинання b для контрольного трикотажного полотна з бавовняної пряжі (варіант 1) майже в 2,5 рази вищий, ніж для контрольного трикотажного полотна з металевого дроту (варіант 2). Це означає, що контрольне трикотажне полотно з бавовняної пряжі холодніше на дотик у

порівнянні з металовмісним трикотажем. Вміст сталевго дроту та вид переплетення гібридного трикотажу не призводить до статистично значущих відмінностей коефіцієнта теплового поглинання (рис.4.8). Слід відмітити, що гібридні трикотажні полотна є приємнішими на дотик, у порівнянні з контрольним.



а)



б)

Рисунок 4.9 – Залежність коефіцієнта теплового поглинання трикотажу від пористості: а – поверхневої; б – об'ємної

У результаті математичної обробки експериментальних даних встановлено залежність коефіцієнта теплового поглинання b від поверхневої P_s (рис.4.9.а) та об'ємної P_v (рис.4.9.б) пористості трикотажного полотна.

Отримані залежності можуть бути описані наступними аналітичними рівняннями:

$$R = 124.9 - 1.01 P_s \quad (R^2 = 0.86); \quad (4.5)$$

$$R = 417.8 - 3.8 P_s \quad (R^2 = 0.89). \quad (4.6)$$

Отже, результати досліджень [13] теплофізичних властивостей гібридних трикотажних полотен показали, що чергування рядів з бавовняної пряжі та з металевого дроту з нержавіючої сталі призводить до істотних змін теплофізичних властивостей трикотажу. Існує кілька факторів:

- відмінність механічних властивостей сировини, що зумовлює форму і розмір петлі;
- значна різниця в теплопровідності бавовни і нержавіючої сталі;
- вплив переплетення, зокрема наявність в структурі пресових петель;
- різниця в товщині та пористості досліджуваних матеріалів.

4.3.2 Паропроникні властивості трикотажних полотен

Однією з визначальних характеристик комфортності одягу є паропроникність. Досліджені текстильні матеріали характеризуються широким діапазоном значень паропроникних властивостей (табл. 4.5), що пов'язано з їх здатністю: поглинати вологу із оточуючого середовища та переносити її через свою структуру. Результати дослідження [13] паропроникних властивостей гібридних трикотажних полотен показали, що за рахунок вплетення сталевих дроту в структуру їх паро проникні властивості

значно змінюються в бік «комфортності». Це пов'язано зі значною відмінністю у сорбційних властивостях та набуханні волокон бавовни та сталевго дроту.

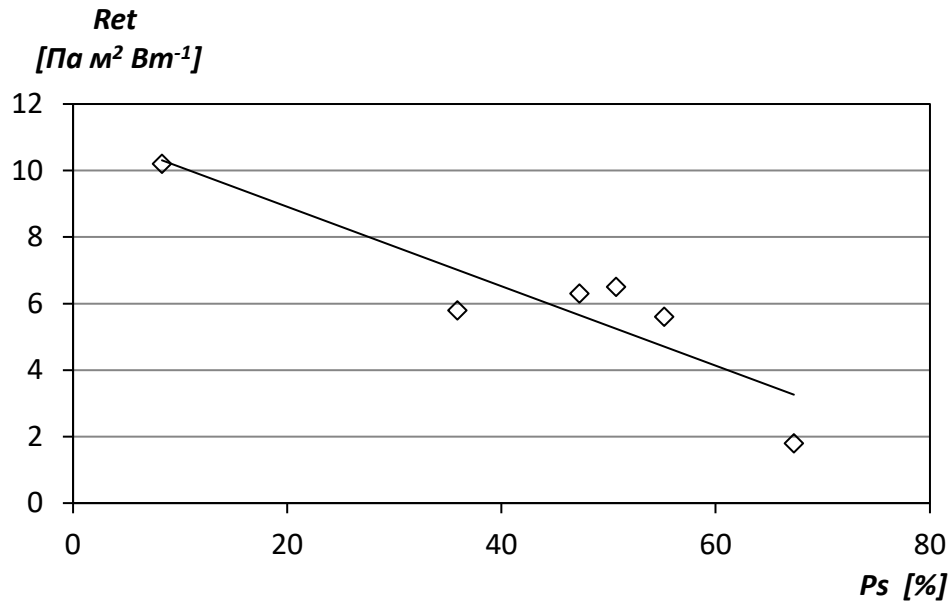
Аналіз отриманих даних (табл.4.5) дає підставу очікувати, що найменш комфортні умови експлуатації одягу створюються при використанні бавовняних полотен. Ці полотна мають високий опір потоку водяної пари чезез їх високу щільність, що призводить до низької паропровідності та паропроникності. Адже для цих полотен значення відносної паропроникності є найменшим, і складає 49,6%. Таким чином, одяг з цих полотен буде перешкоджати проходженню парів вологи від тіла людини у оточуюче середовище, що призведе до накопичення парів вологи у підодяговому шарі та викличе неприємні відчуття, намокання прилеглого шару, та погіршить теплозахисні властивості виробу.

Таблиця 4.5 – Паропроникні властивості трикотажного полотна

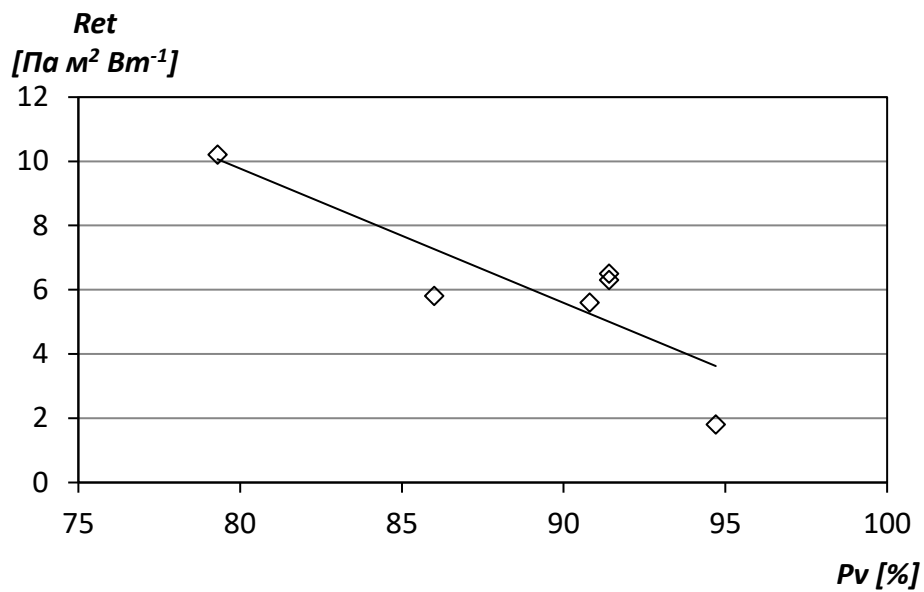
Варіант	Опір випаровуванню, $Ret. Pa \times m^2 \times Bm^{-1}$	Відносна паропроникність, $RWVP \%$
1	10.2 ± 0.04	55.8 ± 1.19
2	1.8 ± 0.03	92.6 ± 2.63
3	5.8 ± 0.02	71.7 ± 0.84
4	5.6 ± 0.01	69.4 ± 0.89
5	6.3 ± 0.03	66.8 ± 0.70
6	6.5 ± 0.05	67.3 ± 1.36

Найбільше значення паропроникності зафіксовано при використанні полотна зі 100% сталевго дроту, який завдяки своїй високій пористості (поверхнева – 67,3%, об'ємна – 94,7%) має кращу паропровідність. Високі показники паропроникності мають і гібридні трикотажні полотна з вмістом сталевго дроту від 7% до 50%. Їх використання у одязі забезпечить постійну

відносну вологість повітря у підодяговому шарі та створить комфортні умови для життєдіяльності людини.



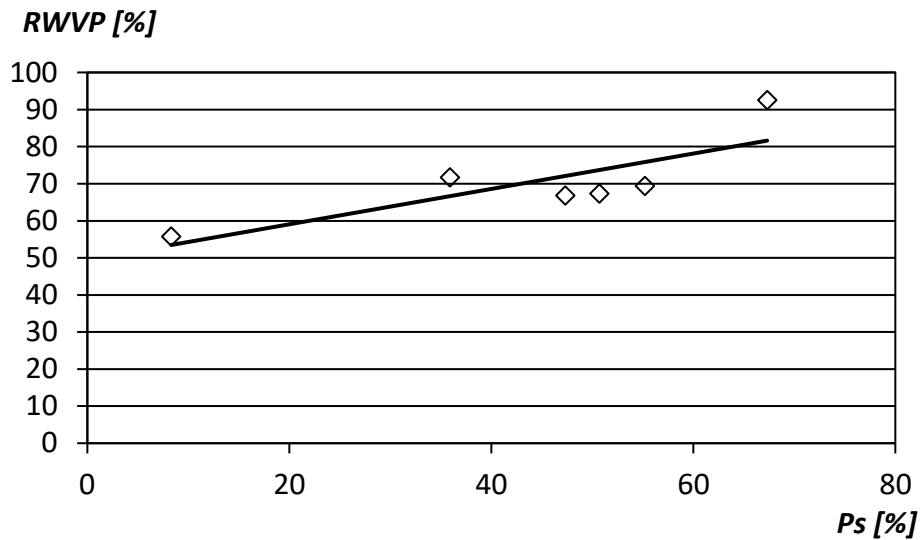
a)



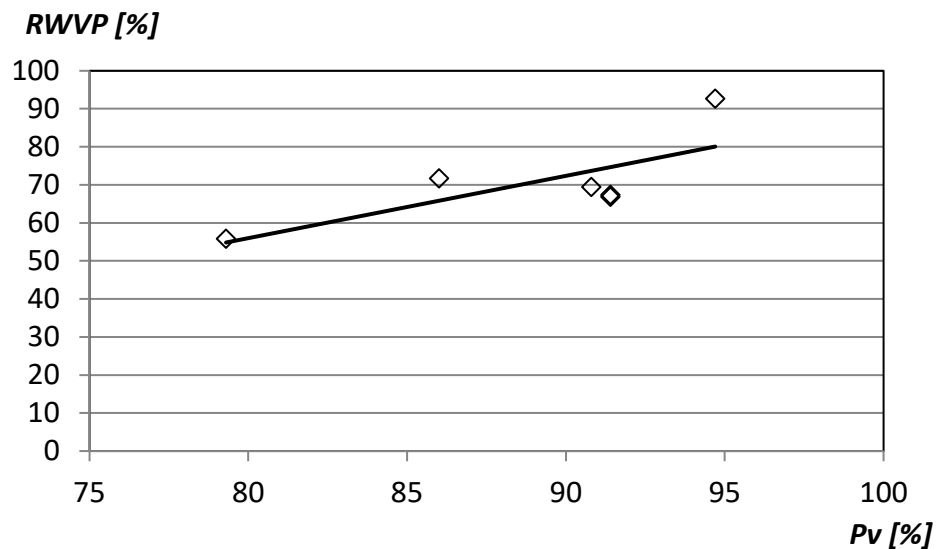
б)

Рисунок 4.10 – Залежність опору випаровування трикотажу від пористості: а – поверхневої; б – об'ємної

Детальний аналіз результатів досліджень показує, що обидва досліджуємі показники (опір випаровуванню та відносна паропроникність) гібридних трикотажних полотен залежать від їх пористості. Опір випаровуванню зменшується (рис.4.10), а відносна паропроникність збільшується (рис.4.11) зі збільшенням як поверхневої (P_s), так і об'ємної (P_v) пористості.



а)



б)

Рисунок 4.11 – Залежність відносної паро проникності трикотажу від пористості: а – поверхневої; б – об'ємної

Отримані аналітичні рівняння з високою достовірністю описують залежності опору випаровуванню від пористості:

$$Ret = 11,3 - 0.12 P_s (R^2 = 0.82) \quad (4.7)$$

$$Ret = 43,2 - 0.42 P_v (R^2 = 0.73) \quad (4.8)$$

Отримані залежності можуть бути використані при розрахунку відповідних параметрів у майбутніх дослідженнях.

4.3.3. Асортимент виробів з функцією захисту від електромагнітного випромінювання

Ряд національних і міжнародних організацій розробили керівні документи щодо захисту від електромагнітного випромінювання, які рекомендують, використовувати одяг як один з найефективніших та найважливіших засобів захисту людини від шкідливої дії електромагнітного випромінювання. Рівень захисту, який пропонує одяг, значно відрізняється і залежить від кількох факторів. Найбільш значущими з них є властивості текстильного матеріалу та дизайн одягу. Небезпечне опромінення зменшується при носінні одягу, але одяг не є гарантією захисту в будь-яких умовах [14]. Захищеними є тільки закриті ділянки, і захист може бути зменшений при деформації та старінні одягу. Виходячи з вищевикладеного встановлено, що чим більша поверхня тіла людини закрыта текстилем з екрануючими властивостями щодо дії електромагнітного випромінювання, тим краще вона захищена від негативного впливу останнього. При цьому слід відмітити, що ринок захисного одягу від дії електромагнітного випромінювання в Україні не розвинений. Наявний на споживчому ринку повсякденний одяг для захисту від електромагнітного випромінювання має низький рівень якості і надійності: не забезпечує належного адекватного

захисту споживача від задекларованих видів небезпек, не повністю відповідає конкретному рівню висунутих до нього вимог, створює додаткові фактори ризику, не завжди забезпечує реалізацію специфічних потреб споживача, а також має невиправдано високу вартість. З огляду на це, в роботі запропонований асортиментний ряд одягу з використанням принципу «зональності».

Принцип «зональності» покладений в основу створення ескізного проєкту виробів з використанням гібридних трикотажних матеріалів, дозволяє по перше: захистити найбільш вразливі органи споживача від негативної дії електромагнітного випромінювання, по-друге: забезпечити комфортність швейних виробів та по-третє: знизити вартість виробів.

Попередні дослідження показали, що введення металевого дроту у структуру бавовняного трикотажу значно впливає на його властивості, зокрема розтяжність [15], пружність, жорсткість тощо. В той же час, такі гібридні трикотажні матеріали забезпечують достатню для повсякденного використання ефективність екранування електромагнітного випромінювання. Використання таких матеріалів надає виробам функціональності, проте їх підвищена жорсткість обмежує їх застосування у цілому виробі, особливо предметах одягу [16].

Ескізи виробів з елементами використання гібридного трикотажного матеріалу наведені на рисунку 4.12.

Концептуальною основою створення асортиментну одягу для захисту від дії електромагнітного випромінювання є різні поєднання параметрів конструкції виробів та їх елементів для підвищення рівня захисту та надійності.



Рисунок 4.12 – Ескізи виробів з елементами використання гібридного трикотажного матеріалу

Висновки до розділу 4

1. На підставі детального аналізу параметрів структури та теплофізичних властивостей розроблених гібридних трикотажних матеріалів, які виготовлено чергуванням рядів з бавовняної пряжі та металевого дроту з нержавіючої сталі, встановлено наступне:

- Кількість петельних стовпчиків у 100 см полотна, а,, відповідно, і петельний крок гібридних полотен є сталою величиною, в той час як кількість петельних рядів у 100 см полотна, а, відповідно і висота петельного ряду залежить від переплетення для металевого дроту.
- Довжина петлі з дроту на 8-11 % вище ніж бавовняної пряжі, що пов'язано з різними пружними властивостями сировини, що потрібно враховувати при проєктуванні потреб у сировині різних видів.
- Вид переплетення, який використано для уведення металевого дроту в структуру трикотажу має суттєвий вплив на товщину гібридного полотна. Найтовщім є гібридне трикотажне полотно, яке виготовлене переплетенням напівфанг. Товщина цього варіанту на 11 % вища ніж товщина контрольного полотна з бавовняної пряжі та більш ніж у 2 рази перевищує товщину контрольного полотна з металевого дроту.
- Вид переплетення не має суттєвого впливу на поверхневу густину розроблених гібридних трикотажних матеріалів, яка в середньому становить 280 г/м².
- Вміст сталевих дроту має суттєвий вплив на пористість трикотажу, особливо на поверхневу пористість, яка зростає при використанні переплетень з накидами та протяжками. Об'ємна пористість гібридних трикотажних полотен на 20-30% відсотків вища ніж у контрольного трикотажу з бавовняної пряжі.
- Коефіцієнт теплопровідності гібридних трикотажних матеріалів становить в середньому близько $55 \cdot 10^{-3}$ [Вт·м⁻¹·°С⁻¹] і значення не

залежить від переплетення, яке використовується для дроту з нержавіючої сталі.

- Коефіцієнт термічного опору залежить від виду переплетення, яке використано для сталевого дроту: гібридні трикотажні полотна з пресовими петлями мають вище значення коефіцієнту. Таким чином, використання у трикотажних структурах пресових петель призводить до підвищення теплозахисних властивостей.
- Коефіцієнт теплового поглинання залежить від переплетення, яке використовують для дроту з нержавіючої сталі, що відображає пористість полотна. Збільшення як поверхневої, так і об'ємної пористості призводить до зростання значення коефіцієнта.
- Пористість гібридних трикотажних полотен має суттєвий вплив на їх паропроникні властивості: відносна паропроникність зростає, а опір випаровуванню зменшується зі збільшенням як поверхневої, так і об'ємної пористості матеріалів.

2. Встановлено, що одяг може бути одним з найефективніших та найважливіших засобів захисту людини в повсякденному житті від електромагнітного випромінювання. Рівень захисту, який пропонує одяг, значно відрізняється і залежить від кількох факторів. Найбільш значущими з них є властивості тканини та дизайн одягу. Небезпечне опромінення зменшується при носінні одягу, але одяг не є гарантією захисту в будь-яких умовах.

3. Запропонований принцип «зональності» швейних виробів для захисту від електромагнітного випромінювання з використанням гібридних трикотажних матеріалів, що забезпечує одночасно достатній захист від дії електромагнітного випромінювання та високий рівень комфорту людини в системі «людина – одяг – навколишнє середовище».

Список використаних джерел до розділу 4

7. Основи теорії в'язання : підручник / Л. О. Крилова, Л. М. Мельник. – Київ : Кафедра, 2015. – 304 с.
8. Nazir T Hussain, Ahmad F and Faheem S. Effect of Knitting Parameters on Moisture Management and Air Permeability of Interlock Fabrics. Autex Research Journal 2014; 14: 39-46.
9. Mansor A, Ghani SA and Yahya MF. Knitted Fabric Parameters in Relation to Comfort Properties. Am. J. Mater. Sci. 2016; 6 (6): 147-151. doi:10.5923/j.materials.20160606.01
10. Ogulata RT and Mavruz S. Investigation of Porosity and Air Permeability Values of Plain Knitted Fabrics. Fibres Text. East. Eur 2010; 18(53): 71-75.
11. Dias T and Delkumburewatte GB. Changing Porosity of Knitted Structures by Changing Tightness. Fibers Polym. 2008; 9 (1): 76-79. <https://doi.org/10.1007/s12221-008-0012-6>
12. Benltoufa S, Fayala F, Cheikhrouhou M and Nasrallah S. Porosity determination of jersey structure. Autex research journal 2007; 7 (1): 63-69.
13. Benltoufa S, Fayala F and BenNasral-lah S. Capillary Rise in Macro and Micro Pores of Jersey Knitting Structure. J. of Engineered Fibers and Fabrics 2008; 3 (3): 47-54. <http://www.jeffjournal.org/papers/Volume3/JEFF08-00007R1Benltoufa.pdf>
14. Turan B, Okur A and Deveci R. Predicting the intra-yarn porosity by image analysis method. Text. Res. J. 2012; 82(16): 1720-1728. <https://doi.org/10.1177/0040517511427971>
15. Havlova M and Spankova J. Porosity of Knitted Fabrics in the Aspect of Air Permeability – Discussion of Selected Assumptions. Fibres Text. East. Eur 2017; 25(3): 86-91. DOI: 10.5604/12303666.1237242
16. Mezarcioz S and Ogulata RT. Modelling of Porosity in Knitted Fabrics. J Fashion Technol Textile Eng 2015; S1. doi:10.4172/2329-9568.S1-005

- 17.Eltahan EAE, Sultan M and Mito AB. Determination of loop length, tightness factor and porosity of single jersey knitted fabric. Alexandria Engineering Journal 2016; 55: 851-856. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.02.006>.
- 18.Hes L, Bogusławska-Baczek M and Geraldес MJ. Thermal comfort of bedsheets under real conditions of their use. J Nat Fibers. 2014; 11(4): 312 – 314.
- 19.Bajzik V, Kyzymchuk O, Ocheretna L, Tunak M, Arabuli A, Levytska D. Hybrid knitted fabric for electromagnetic radiation shielding: thermo-physical properties. Textile Research Journal. 2024; 94(7-8). – p. 814-828. doi:[10.1177/00405175231218741](https://doi.org/10.1177/00405175231218741)
- 20.Арабулі А. Т. Конструкторсько-технологічні рішення одягу для захисту від дії УФ випромінювання / А. Т. Арабулі, С. І. Арабулі, В. І. Власенко // Збірник матеріалів III Міжнародної науково-практичної конференції текстильних та фешн технологій KyivTex&Fashion / за заг. ред. Л. І. Зубкової : (31 жовтня 2019 р., м. Київ). - Київ : КНУТД, 2019. - С. 56-60.
- 21.Леонова Д. Деформаційні характеристики трикотажних полотен з вмістом металевого дроту. Збірник тез доповідей VII International Scientific-Practical Conference in Textile and Fashion "Kyiv Tex&Fashion", м. Київ, 19 жовтня 2023 р. - Київ: КНУТД, 2023.- с. 216-217.
- 22.Леонова Д. Одяг та аксесуари з трикотажного полотна яке містить металевий дріт». Збірник тез доповідей VIII International Scientific-Practical Conference in Textile and Fashion "Kyiv Tex&Fashion", м. Київ, 17 жовтня 2024 р. – Київ: КНУТД, 2024. С.286-288.

ВИСНОВКИ

1. На підставі вивчення способів надання текстильним матеріалам екрануючих властивостей від дії електромагнітного випромінювання та їх детального аналізу встановлено, що переважна більшість досліджень спрямована на створення гнучких екранів шляхом поверхневої модифікації та додавання провідних наповнювачів, а, отже, їх застосування обмежене технічною сферою. У той же час, виявлено, що використання металовмісних ниток або металевого дроту у процесі одержання трикотажних та тканих матеріалів забезпечує високу ефективність захисту від електромагнітного випромінювання. Однак питання поєднання в одному текстильному матеріалі функцій екранування та комфортності вивчене недостатньо.
2. Запропоновано технологію отримання гібридних кулірних трикотажних матеріалів для екранування електромагнітного випромінювання, яка полягає у чергуванні рядів з бавовняної пряжі та сталевго дроту. У результаті дослідження ефективності екранування розроблених матеріалів встановлено, що варіант розташування сталевго дроту в структурі полотна (петля, накид, протяжка) має визначальний вплив на екрануючі властивості. Наявність в структурі окрім петель з металевго дроту ще й накидів або протяжок, посилює екрануючі властивості.
3. Розроблені гібридні трикотажні матеріали мають здатність до екранування електромагнітного випромінювання. Ефективність екранування на низьких частотах (до 0,3 ГГц) вища за 10 ДБ і відповідає рівню «добре», а у діапазоні частот від 0,7 до 3,0 ГГц становить 5 ДБ. Встановлено, що в ефективності електромагнітного екранування переважає механізм відбиття, а отже, розроблені гібридні трикотажні матеріали рекомендовані для використання як відбивачі електромагнітних хвиль.

4. Встановлено, що за показниками проникності та теплофізичних властивостей гібридні трикотажні матеріали з екрануючою здатністю від електромагнітного випромінювання подібні до трикотажу переплетення ластик 1+1 з бавовняної пряжі, а отже мають високі показники комфортності й можуть бути використані у виробництві повсякденного одягу.
5. Визначено, що пров'язування сталевго дроту у петельну структуру переплетення напівміланський ластик забезпечує найкращі екрануючі властивості завдяки двошаровому розташуванню структурних елементів (петель) з металевго дроту та формуванню в одному з шарів подовжених петель з додатковими протяжками за ними. Одержаний гібридний трикотажний матеріал переплетення напівміланський ластик характеризується найкращою ефективністю екранування електромагнітного випромінювання (Ефективність екранування $SE = 5 \div 20$ ДБ) та високими показниками комфортності (Коефіцієнт теплопровідності $\lambda = 54.6 \cdot 10^{-3} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$; Тепловий опір $r = 39.5 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{К} \cdot \text{м}^2$; Коефіцієнт температуропроводності $a = 0.40 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$; Коефіцієнт теплового поглинання $b = 80.8 \text{ Вт} \cdot \text{с}^{1/2} / \text{м}^2 \cdot \text{К}$; Опір випаровуванню $Ret = 5.6 \text{ Па} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{Вт}^{-1}$; Відносна паропроникність $RWVP = 69,4 \%$; Поверхнева пористість $P_s = 55,2 \%$; Об'ємна пористість $P_v = 90,8\%$).
6. Запропоновано асортимент швейних виробів повсякденного призначення з функцією захисту від електромагнітного випромінювання. Використання принципу «зональності» забезпечує одночасно достатній захист від дії електромагнітного випромінювання та високий рівень комфорту людини в системі «людина – одяг – навколишнє середовище».

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, у яких відображені основні наукові результати дисертації

1. Bajzik V, Kyzymchuk O, Ocheretna L, Tunak M, Arabuli A, Levytska D. (Leonova D.) Hybrid knitted fabric for electromagnetic radiation shielding: thermo-physical properties. *Textile Research Journal*. 2024. №94(7-8). P. 814-828. <https://doi/10.1177/00405175231218741> *Особистий внесок: виготовлення дослідних зразків, проведення експериментальних досліджень, статистична обробка одержаних результатів, узагальнення одержаних результатів,*
2. Kyzymchuk O., Stefashyna O., Melnyk L., Holovnia O., Arabuli S., & Levytska D. (Leonova D.) (2021). Rib knitted fabrics with tuck stitches: structure and properties. *Vlakna a textile*, №3, P. 43-52. *Особистий внесок: виготовлення дослідних зразків, проведення експериментальних досліджень, узагальнення одержаних результатів*
3. Левицька Д.Р., Кизимчук О.П. Трикотажні полотна для захисту від електромагнітного випромінювання: будова, принцип екранування та комфортність. *Індустрія моди*. 2022. №1. С.28-37. <https://doi.org/10.30857/2706-5898.2022.1.2> *Особистий внесок: постановка та реалізація експериментальних досліджень, формулювання висновків.*
4. Леонова Д., Кизимчук О. Вплив методу введення металевих дротів на властивості трикотажу переплетення напівміланський ластик. Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. 2025. 347 (1). С. 227-237. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-347-30> *Особистий внесок: постановка та реалізація експериментальних досліджень, формулювання висновків.*

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

5. Леонова Д. Одяг та аксесуари з трикотажного полотна яке містить металевий дріт». Збірник тез доповідей VIII International Scientific-

Practical Conference in Textile and Fashion "Kyiv Tex&Fashion", м. Київ, 17 жовтня 2024 р. – Київ: КНУТД, 2024. С.286-288.

6. Леонова Д. Деформаційні характеристики трикотажних полотен з вмістом металевого дроту. Збірник тез доповідей VII International Scientific-Practical Conference in Textile and Fashion "Kyiv Tex&Fashion", м. Київ, 19 жовтня 2023 р. – Київ: КНУТД, 2023. С. 216-217.

7. Leonova D. Protection of personnel and military equipment against electromagnetic attacks by using shielding textile materials. Збірник тез доповідей V-th International Symposium Creativity. Technology. Marketing, м. Кишинів, Молдова, 31 березня 2023 р. – Chisinau: TUM, 2023.- с. 133-135.

8. Arabuli A., Bajzik V., Kyzymchuk O., Levytska D. (Leonova D.) Study of the EMR shielding effectiveness by the textile screen. Збірник тез доповідей VI International Scientific Conference in Textile and Fashion "Kyiv Tex&Fashion", м. Київ, 20 жовтня 2022 р. – Київ: КНУТД, 2022. Р. 20-21.



Товариство з обмеженою відповідальністю
Науково-виробниче об'єднання
«ЕКМА-СТО»

Тел. +38 (044) 222-53-37; +38 (073) 294-25-68 E-mail: info@ekma.com.ua, <http://ekma.com.ua>.

Вих. № 05/05-1

від « 5 » травня 2025р.

Акт про впровадження

результатів дисертаційної роботи

«РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЙ ВИГОТОВЛЕННЯ ЕКРАНУЮЧИХ ТРИКОТАЖНИХ МАТЕРІАЛІВ ЩОДО ДІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ РАДІОЧАСТОТНОГО ДІАПАЗОНУ»

Леонової Дарини Русланівни

Науково-технічна комісія у складі представників виробництва ТОВ «Науково-виробниче об'єднання «ЕКМА-СТО» (Спеціальний технологічний одяг): директора Гришко Антоніни Стефанівни і Київського національного університету технологій та дизайну: аспірантки Дарини ЛЕОНОВОЇ склали цей акт у тому, що в умовах виробництва ТОВ «Науково-виробниче об'єднання «ЕКМА-СТО» впроваджено результати наукової роботи Дарини ЛЕОНОВОЇ.

Внаслідок апробації результатів наукової роботи аспірантки розроблено новий асортимент моделей одягу з елементами захисту від електромагнітного випромінювання. Елементи одягу виготовлені з гібридних трикотажних матеріалів, модифікованих шляхом введення в структуру трикотажу металевого дроту.

Даний акт не дає підстав для будь-яких грошових виплат і розрахунків.

Київський національний університет
технологій та дизайну

Дарина ЛЕОНОВА

ТОВ «Науково-виробниче об'єднання
«ЕКМА-СТО»

Директор

А.С. Гришко

