

**СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

**Факультет інженерії
Кафедра дизайну та індустрії моди**

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

**до кваліфікаційної роботи
II освітнього рівня магістр**

спеціальності 182 Технології легкої промисловості

освітньої програми Технології легкої промисловості

на тему СТВОРЕННЯ МОДЕРНІЗОВАНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ
ВИГОТОВЛЕННЯ ГОЛОВНИХ УБОРІВ ІЗ ДОДАВАННЯМ

СПЕЦІАЛЬНИХ ОЗДОРОВЧИХ МОДУЛІВ

Виконала здобувачка
вищої освіти групи

ТЛП-24дм

Марія ЖИРОВА

(ім'я та ПРИЗВИЩЕ)



(підпис)

Керівник

к.т.н., Галина РІПКА

(науковий ступінь, ім'я та ПРИЗВИЩЕ)



(підпис)

Завідувачка кафедри

к.т.н., Галина РІПКА

(науковий ступінь, ім'я та ПРИЗВИЩЕ)



(підпис)

Рецензент

к.т.н., Сергій КУДРЯВЦЕВ

(науковий ступінь, ім'я та ПРИЗВИЩЕ)



(підпис)

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Факультет інженерії

Кафедра дизайну та індустрії моди

Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр

Напрямок підготовки 18 Виробництво і технології

(шифр і назва)

Спеціальність 182 Технології легкої промисловості

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувачка кафедри



Галина РІПКА

«19» грудня 2025 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Жирова Марія Андріївна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи:

Створення модернізованої технології виготовлення головних уборів
із додаванням спеціальних оздоровчих модулів

спеціальне завдання:

оцінка автономності живлення smart-головного убору

керівниця роботи Ріпка Галина Анатоліївна, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

2. Строк подання здобувачем вищої освіти роботи 10.12.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи:

1. Нормативно-технічна документація ДСТУ/ISO

2. Матеріали та комплектуючі для виробу

3. Електронні та оздоровчі модулі

4. Антропометричні та ергономічні дані

5. Технологічні дані та обладнання

6. Вихідні дані для економічного обґрунтування

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1. ВСТУП

2. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ТА ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ SMART-ГОЛОВНИХ УБОРІВ

3. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ SMART-ГОЛОВНОГО УБОРУ

4. ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

5. Перелік графічного матеріалу (слайдів презентації):

Мета роботи. Методи дослідження. Аналітичний огляд та теоретичне обґрунтування технології smart-головних уборів. Огляд існуючих технологій інтеграції оздоровчих модулів у текстильні вироби. Системи активної терморегуляції. Теоретичні розрахунки теплових потоків для системи активної терморегуляції (САТ).

Конструкторська розробка моделі головного убору для інтеграції САТ. Розробка модернізованої технологічної схеми виготовлення. Дослідження ефективності системи активної терморегуляції

6. Дата видачі завдання 08.09.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проектування	Термін виконання етапів	Примітка
1	Вибір та затвердження теми магістерської роботи	08.09.25	
2	Аналіз наукової літератури відповідно до обраної теми	09.10.25	
3	Написання та затвердження плану магістерської роботи	30.10.25	
4	Вступ	01.11.25	
5	Розділ 1	06.11.25	
6	Розділ 2	20.11.25	
7	Формулювання та оформлення загальних висновків	05.12.25	
8	Анотація до роботи	08.12.25	
9	Подача оформленої роботи на перевірку	10.12.25	

Здобувач вищої освіти


(підпис)

Марія ЖИРОВА

(ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Керівник роботи


(підпис)

Галина РІПКА

(ім'я ПРИЗВИЩЕ)

АНОТАЦІЯ

Актуальність теми. Тема створення модернізованої технології виготовлення головних уборів із додаванням спеціальних оздоровчих модулів є глибоко актуальною та має багатоаспектне значення на сучасному етапі розвитку технологій та суспільних потреб. Актуальність цієї розробки зумовлена паралельним розвитком кількох ключових світових трендів: зростаючим попитом на персоналізоване здоров'я та велнес, значним прогресом у галузі smart-текстилю та нанотехнологій, а також загальною тенденцією до створення функціонального та інтелектуального одягу.

Сучасний одяг, і головні убори зокрема, поступово перестає бути лише засобом захисту чи естетичним доповненням. Споживачі все частіше шукають продукти, які виконують додаткову, вимірювану користь для здоров'я. Голова є ідеальною зоною для інтеграції оздоровчих рішень, оскільки вона є центром нервової системи та ключовою точкою для регуляції температури тіла та когнітивних процесів. Таким чином, модернізований головний убір може стати портативним, неінвазивним засобом підтримки фізичного та психічного благополуччя.

Критично важливим фактором актуальності є технологічна готовність. Розвиток гнучкої електроніки, мініатюрних біосенсорів та ефективних, безпечних джерел живлення дозволяє безшовно інтегрувати складні оздоровчі модулі без шкоди для комфорту та зовнішнього вигляду виробу. Ці модулі можуть включати, наприклад, елементи активної терморегуляції (з використанням матеріалів із фазовим переходом або термоелектричних елементів), пристрої для м'якої нейростимуляції для покращення концентрації або релаксації, а також датчики для біометричного моніторингу (контроль пульсу, рівня гідратації чи якості сну).

Створення модернізованої технології виготовлення передбачає не лише вибір модулів, але й розробку оптимальних методів впровадження у структуру головного убору (наприклад, інтеграція під час ткацтва чи використання інкапсуляції), що забезпечить довговічність, гігієнічність та можливість промислового

масштабування. Це є прямим внеском у розвиток індустрії Smart Fashion та підвищення технологічної конкурентоспроможності вітчизняного виробництва.

На економічному рівні, розробка цієї технології відкриває нові ринкові ніші та створює високу додану вартість продукції. Цільовою аудиторією стають не лише споживачі, що орієнтовані на моду та інновації, але й вузькоспеціалізовані сегменти: спортсмени, люди, які страждають від мігрені, користувачі, що потребують покращення якості сну, або ж працівники, які виконують роботу, що вимагає високої концентрації. Соціальна значущість полягає у можливості створення доступних засобів для профілактики стресу та втоми, а також у підвищенні загальної якості життя через неперервний та непомітний моніторинг життєво важливих показників.

Отже, актуальність цієї теми виходить за межі простого інноваційного продукту. Вона знаходиться на перетині медицини, інженерії матеріалів та текстильної промисловості, пропонуючи технологічне рішення, яке відповідає на найгостріші запити сучасного суспільства щодо здоров'я, довголіття та якості життя.

Метою дослідження є розробка та наукове обґрунтування модернізованої технології виготовлення головних уборів шляхом інтеграції спеціальних оздоровчих модулів (зокрема, систем активної терморегуляції) та оцінка їхньої ефективності, ергономічності і промислової придатності.

Об'єкт дослідження. Процес створення та подальшої експлуатації функціонального головного убору.

Предмет дослідження. Технологічні рішення та конструктивні параметри, які необхідні для успішної та ефективної інтеграції smart-елементів (датчиків, термоелектричних модулів, мікроконтролерів).

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **задачі дослідження**:

1. Проаналізувати сучасний стан і тенденції розвитку smart-текстилю, існуючих технологій виготовлення головних уборів та інтеграції в них функціональних елементів.

2. Обґрунтувати вибір оптимального типу оздоровчого модуля (активної

терморегуляції) з урахуванням ергономічних вимог та цільового призначення головного убору.

3. Розробити конструктивно-технологічну схему модернізованого головного убору, включаючи розташування, живлення та захист інтегрованих оздоровчих модулів.

4. Розробити технологічні методи та обладнання для ефективної інтеграції smart-компонентів у процесі виготовлення текстильного виробу (наприклад, методи з'єднання гнучкої електроніки з тканиною).

5. Оцінити економічну ефективність та промислову придатність впровадження розробленої модернізованої технології.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети та виконання визначених задач необхідно застосувати комплекс методів, які охоплюють теоретичні, конструкторські та експериментальні аспекти. Дослідження наукової, технічної та патентної літератури щодо сучасних технологій виготовлення головних уборів, розробки smart-текстилю та інтеграції електроніки, фізіологічного впливу терморегуляції на організм людини (особливо на когнітивні функції). існуючих оздоровчих модулів (термоелектричних, рідинних, вентиляційних). Системний аналіз використовується для вивчення головного убору як складної технічної системи, де електронні та текстильні компоненти взаємопов'язані. Це дозволяє визначити вимоги до кожного компонента та їхню взаємодію. Моделювання процесів для створення технологічних моделей процесу інтеграції модулів для оптимізації послідовності операцій та мінімізації виробничих витрат. Конструкторські та розрахункові методи необхідні для розробки структури виробу та прогнозування його функціональних характеристик. Методи інженерного проектування: розробка конструктивних рішень головного убору, визначення місць розташування оздоровчих модулів, елементів живлення та керування з урахуванням ергономічних вимог та комфорту користувача. Теплофізичні розрахунки: Використання законів теплопередачі та термодинаміки для розрахунку необхідної потужності охолодження/нагрівання термоелектричних модулів Пельтьє з урахуванням зовнішньої температури та метаболічного тепловиділення голови

користувача. Це може включати застосування методу кінцевих елементів (МКЕ) для комп'ютерного моделювання теплових потоків. Ергономічне моделювання: визначення оптимальної ваги, розподілу маси та тиску головного убору на голову користувача для забезпечення тривалого комфортного носіння. Експериментальні методи використовуються для підтвердження теоретичних розрахунків, оцінки ефективності розробленої технології та кінцевого продукту. Технологічний експеримент проведення дослідних робіт з інтеграції smart-компонентів у текстильну основу. Це включає перевірку методів з'єднання (шиття, склеювання, інкапсуляція) на міцність та довговічність при експлуатації та догляді (пранні). Вимірювання ефективності терморегуляції: Проведення випробувань з використанням термографічного обладнання та контактних датчиків температури (термопари, термістори) для вимірювання температури шкіри голови та ефективності охолодження/нагрівання в умовах, що імітують реальну експлуатацію (зміна температури та вологості). Ергономічні випробування (Користувацьке тестування): Залучення групи випробуваних для оцінки суб'єктивних показників комфорту, зручності керування модулями та рівня шуму (для систем із вентиляторів). Статистична обробка даних: Використання методів математичної статистики (дисперсійний аналіз, кореляційний аналіз) для обробки результатів експериментів, оцінки значущості отриманих даних та підтвердження гіпотез.

Використання цієї комбінації методів дозволить отримати науково обґрунтовані та практично значущі результати, що є основою для успішного впровадження модернізованої технології.

Наукова новизна роботи полягає у комплексному підході, що дозволяє не просто додати функціональний елемент, а розробити цілісну технологічну схему для промислового виробництва

Практичне значення роботи. Розроблена модернізована технологія може бути впроваджена на підприємствах текстильної та легкої промисловості, що спеціалізуються на виготовленні головних уборів, дозволяючи розширити асортимент високотехнологічною продукцією. Запропоновані конструктивні рішення та методи інтеграції можуть бути використані як типові елементи при

створенні іншого функціонального та smart-одягу. Результати експериментальних досліджень створюють об'єктивну базу для стандартизації вимог до ергономіки та ефективності головних уборів з функцією терморегуляції. Результати роботи можуть бути впроваджені у навчально-методичне забезпечення кафедри дизайну та індустрії моди Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля.

Ключові слова: Модернізована технологія, головні убори, оздоровчі модулі, smart-текстиль, активна терморегуляція, елементи Пельтьє, інтеграція електроніки, ергономіка, функціональний одяг.

SUMMARY

Relevance of the topic. The topic of creating modernised technology for manufacturing headwear with the addition of special health modules is highly relevant and has multifaceted significance at the current stage of technological development and social needs. The relevance of this development is due to the parallel development of several key global trends: growing demand for personalised health and wellness, significant progress in the field of smart textiles and nanotechnology, and a general trend towards the creation of functional and intelligent clothing.

Modern clothing, and headwear in particular, is gradually ceasing to be merely a means of protection or an aesthetic accessory. Consumers are increasingly looking for products that provide additional, measurable health benefits. The head is an ideal area for integrating health solutions, as it is the centre of the nervous system and a key point for regulating body temperature and cognitive processes. Thus, modernised headwear can become a portable, non-invasive means of supporting physical and mental well-being.

A critical factor in relevance is technological readiness. The development of flexible electronics, miniature biosensors, and efficient, safe power sources allows for the seamless integration of complex wellness modules without compromising the comfort and appearance of the product. These modules may include, for example, active thermoregulation elements (using phase-change materials or thermoelectric elements), devices for gentle neurostimulation to improve concentration or relaxation, and sensors for biometric monitoring (heart rate, hydration level or sleep quality).

The creation of modernised manufacturing technology involves not only the selection of modules, but also the development of optimal methods for their incorporation into the structure of the headwear (e.g. integration during weaving or the use of encapsulation), which will ensure durability, hygiene and the possibility of industrial scaling. This is a direct contribution to the development of the Smart Fashion industry and the improvement of the technological competitiveness of domestic production.

At the economic level, the development of this technology opens up new market niches and creates high added value for products. The target audience is not only

consumers who are focused on fashion and innovation, but also highly specialised segments: athletes, people who suffer from migraines, users who need to improve their sleep quality, or workers who perform work that requires high concentration. The social significance lies in the possibility of creating affordable means of preventing stress and fatigue, as well as improving overall quality of life through continuous and unobtrusive monitoring of vital signs.

Therefore, the relevance of this topic goes beyond a simple innovative product. It lies at the intersection of medicine, materials engineering, and the textile industry, offering a technological solution that responds to the most pressing demands of modern society regarding health, longevity, and quality of life.

The aim of the study is to develop and scientifically substantiate a modernised technology for the manufacture of headwear by integrating special health modules (in particular, active thermoregulation systems) and to evaluate their effectiveness, ergonomics and industrial suitability.

Object of research. The process of creating and operating functional headwear that includes integrated electronic and textile health modules.

Subject of the study. Technological solutions and design parameters, methods of integrating smart elements (sensors, thermoelectric modules, microcontrollers) into the textile base of headwear to ensure their health functions.

To achieve the set goal, **the following research tasks** must be solved:

1. Analyse the current state and trends in the development of smart textiles, existing technologies for the manufacture of headwear and the integration of functional elements into them.
2. Justify the choice of the optimal type of health module (active thermoregulation) taking into account the ergonomic requirements and intended purpose of the headwear.
3. Develop a structural and technological diagram of the modernised headwear, including the location, power supply and protection of integrated health modules.
4. Develop technological methods and equipment for the effective integration of smart components in the manufacturing process of textile products (e.g., methods for connecting flexible electronics to fabric).

5. Assess the economic efficiency and industrial applicability of the developed modernised technology.

Research methods. To achieve the set goal and perform the specified tasks, it is necessary to apply a set of methods covering theoretical, design and experimental aspects. Research of scientific, technical and patent literature on modern technologies for manufacturing headwear, developing smart textiles and integrating electronics, the physiological effects of thermoregulation on the human body (especially on cognitive functions), and existing health modules (thermoelectric, liquid, ventilation). System analysis is used to study headwear as a complex technical system where electronic and textile components are interconnected. This allows us to determine the requirements for each component and their interaction. Process modelling: creation of technological models of the module integration process to optimise the sequence of operations and minimise production costs. Design and calculation methods are necessary for developing the structure of the product and predicting its functional characteristics. Engineering design methods: development of design solutions for headwear, determination of the locations of health modules, power supply and control elements, taking into account ergonomic requirements and user comfort. Thermophysical calculations: Use of the laws of heat transfer and thermodynamics to calculate the required cooling/heating power of Peltier thermoelectric modules, taking into account the external temperature and metabolic heat dissipation of the user's head. This may include the use of the finite element method (FEM) for computer modelling of heat flows. Ergonomic modelling: Determination of the optimal weight, mass distribution and pressure of the headgear on the user's head to ensure long-term comfortable wear. Experimental methods are used to confirm theoretical calculations, evaluate the effectiveness of the developed technology and the final product. Technological experiment: conducting research on the integration of smart components into the textile base. This includes testing connection methods (sewing, gluing, encapsulation) for strength and durability during use and care (washing). Measurement of thermoregulation efficiency: Conducting tests using thermographic equipment and contact temperature sensors (thermocouples, thermistors) to measure scalp temperature and cooling/heating efficiency in conditions that simulate real-life use (changes in temperature

and humidity). Ergonomic testing (user testing): Involvement of a group of testers to evaluate subjective indicators of comfort, ease of module control and noise level (for systems with fans). Statistical data processing: Use of mathematical statistics methods (dispersion analysis, correlation analysis) to process experimental results, evaluate the significance of the data obtained, and confirm hypotheses.

The use of this combination of methods will allow us to obtain scientifically sound and practically significant results, which are the basis for the successful implementation of modernised technology.

The scientific novelty lies in the comprehensive justification and development of a modernised technology for manufacturing functional headwear, which for the first time integrates active health modules (in particular, thermoregulation systems based on Peltier elements) into the textile base, while ensuring the ergonomics, aesthetics and industrial suitability of the product.

Practical significance of the work. The developed modernised technology can be implemented in textile and light industry enterprises specialising in the manufacture of headwear, allowing them to expand their range with high-tech products. The proposed design solutions and integration methods can be used as standard elements in the creation of other functional and smart clothing. The results of experimental studies create an objective basis for standardising the requirements for the ergonomics and efficiency of headwear with a thermoregulation function.

Keywords: Modernised technology, headwear, health modules, smart textiles, active thermoregulation, Peltier elements, electronics integration, ergonomics, functional clothing.

ЗМІСТ

	стор.
ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ.....	2
АНОТАЦІЯ.....	
ЗМІСТ.....	10
ВСТУП.....	11
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ТА ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ SMART-ГОЛОВНИХ УБОРІВ	15
1.1. Сучасний стан і тенденції розвитку smart-текстилю та функціонального одягу.....	15
1.2. Огляд існуючих технологій інтеграції оздоровчих модулів у текстильні вироби	21
1.3. Теоретичне обґрунтування вибору оздоровчого модуля: системи активної терморегуляції	31
1.4. Формулювання технічного завдання на розробку модернізованої технології.....	37
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1.....	37
2. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ SMART-ГОЛОВНОГО УБОРУ	38
2.1. Конструкторська розробка моделі головного убору для інтеграції САТ... ..	39
2.2. Розробка модернізованої технологічної схеми виготовлення.....	42
2.3. Експериментальне дослідження ефективності системи активної терморегуляції.....	46
2.4. Техніко-економічне обґрунтування та екологічна безпека	49
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2.....	49
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	54
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	56
ДОДАТКИ.....	61

ВСТУП

Сучасний розвиток технологій та соціальний запит на покращення якості життя формують стійкий попит на інтелектуальні та функціональні вироби, що виходять за межі традиційного призначення. У цьому контексті тема «Створення модернізованої технології виготовлення головних уборів із додаванням спеціальних оздоровчих модулів» набуває виняткової актуальності. Світ стрімко рухається до ери smart-текстилю, де одяг перетворюється на невід'ємний елемент моніторингу та активної підтримки здоров'я. Головний убір є особливо цікавою платформою для таких інновацій, оскільки його безпосереднє розташування на голові дозволяє ефективно впливати на ключові фізіологічні процеси, зокрема на терморегуляцію та когнітивні функції, забезпечуючи при цьому максимальний комфорт і мінімальну інвазивність. Незважаючи на зростаючу кількість розробок у сфері носійної електроніки, гостро стоїть проблема технологічної інтеграції електронних компонентів у текстильну структуру. Існуючі методи часто порушують естетику, ергономіку та довговічність виробу, роблячи його непридатним для промислового масштабування. Тому метою даного дослідження є наукове обґрунтування та розробка такої модернізованої технології виготовлення, яка дозволить безшовно інтегрувати активні оздоровчі модулі, зокрема системи терморегуляції на базі елементів Пельтьє, зберігаючи при цьому всі експлуатаційні та естетичні характеристики головного убору. Об'єктом дослідження є сам процес створення та подальшої експлуатації такого функціонального головного убору, тоді як предмет зосереджується на детальних технологічних рішеннях та конструктивних параметрах, необхідних для успішної та ефективної інтеграції smart-елементів. Наукова новизна роботи полягає у комплексному підході, що дозволяє вперше не просто додати функціональний елемент, а розробити цілісну технологічну схему для промислового виробництва. Це має значне практичне значення, оскільки надає підприємствам легкої промисловості готові рішення для виходу на ринок високотехнологічного одягу, що відповідає на запит суспільства щодо інструментів для профілактики стресу, втоми та покращення загального самопочуття.

1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ТА ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ SMART-ГОЛОВНИХ УБОРІВ

Аналітичний огляд є фундаментальною частиною дослідження, що закладає основу для розробки модернізованої технології. Він включає вивчення світового досвіду у сфері інтелектуального текстилю, систематизацію методів інтеграції електроніки та глибоке теоретичне обґрунтування вибору конкретного оздоровчого модуля.

1.1. Сучасний стан і тенденції розвитку smart-текстилю та функціонального одягу

Сучасна текстильна промисловість переживає революційний перехід від традиційного виробництва до створення інтелектуального (smart) одягу. Ця тенденція зумовлена розвитком мініатюрної електроніки, нових матеріалів з функціональними властивостями та зростаючим суспільним запитом на носійні технології (wearable technologies). Smart-текстиль, до якого належать і функціональні головні убори, поділяється на пасивний (матеріали з фазовим переходом для пасивної терморегуляції, захист від УФ-випромінювання) та активний (вироби, що вимагають зовнішнього живлення для моніторингу або активного впливу). Світовий ринок демонструє стійке зростання саме у сегменті активного текстилю, орієнтованого на здоров'я, спорт та безпеку праці. Аналіз показує, що головні убори є однією з найбільш перспективних платформ, оскільки вони мінімально обмежують рух і знаходяться близько до важливих біологічних точок.

Smart-текстиль (e-textiles) – текстильні матеріали або вироби, що інтегрують електроніку, датчики, актуатори або функціональні матеріали (провідні волокна, наноматеріали, терморегулюючі, антимікробні покриття тощо) для збору даних, комунікації, керування або зміни властивостей у відповідь на впливи. Функціональний одяг ширший: включає високо-функціональні властивості (вологівідвід, терморегуляція, захист, антибактеріальність, посилені механічні

властивості), не обов'язково з електронікою.

За аналітикою, розмір глобального ринку smart-текстилю оцінювався на рівні ~2.1–2.4 млрд USD у 2024–2025 рр. із прогнозним високим CAGR (залежно від джерела ~15–20% у наступне десятиліття). Це означає швидке масштабування і значні інвестиції у healthcare, military, sports і fashion-сегменти [1-3].

Технологічними платформами та ключовими матеріалами є провідні волокна та нитки (вуглець, металізовані нитки, сполуки на основі графену) – дозволяють вбудовувати провідність/сенсори без жорстких компонентів. Графен і графеноподібні покриття – активна область досліджень через високу провідність і механічну гнучкість [4].

Провідні полімери, оксидні провідні шари, та композитні покриття для сенсорики (температура, тиск, біосигнали) [5-6]. Вбудовані/вбудовувані мікроелектронні модулі (мініатюрні плати, модулі зв'язку BLE/NFC), але тенденція – мінімізувати «жорсткі» елементи, робити модульні/від'єднувані блоки [7-8]. Енергетика: батареї в текстилі, суперконденсатори, harvesting (сонячна тканина, термоелектричні, п'єзоелектричні та ін) – активні дослідження для автономності [9].

Основними прикладами сегментів і кейсів використання є охорона здоров'я: моніторинг серцевих сигналів (ECG-сорочки), дихання, температури, реабілітація — для клінічного та дистанційного спостереження. (компанії/проекти: Hexoskin, Myant, Sensoria та ін.) [10]. Спорт і фітнес: аналітика руху, навантаження, терморегуляція, інтеграція біометрії у тренування [11]. Військові та промислові рішення: захисні костюми з сенсорами, сигналізацією, нагрівом/охолодженням, інтелектуальні робочі форми [12]. Фешн та споживча електроніка: інтеграція стилю + невелика функціональність (освітлення, індикація, інтерфейси), співпраця брендів моди та технологічних гравців [8].

Також в роботі було проаналізовано поточні технічні виклики (перешкоди для масового впровадження). Миття та довговічність – одна з найважливіших практичних проблем; до 2023–2024 р. існувала нестача стандартизованих тестів, але почали з'являтися спеціальні нормативи (наприклад, ІЕС 63203-204-1 для побутового циклу прання e-textiles). Тематика washability – критична для

комерційних продуктів [13-14]. Джерело живлення – батареї в одязі створюють вагу, ризики та обмеження; альтернативи (енергетичний harvesting, твердо-електролітні волоконні батареї) активні в дослідженнях, але ще далеко до повсюдної автономності [15-16].

1. Масове виробництво й інтеграція – інтегрувати електроніку у текстиль на рівні мас-виробництва (швейні лінії, автоматизація, сумісність матеріалів) складно й дорого [8]. Конфіденційність і стандартизація даних – у медицині та персональних даних питання безпеки/регулювання критичні [17].

2. Екологія та життєвий цикл – багато smart-рішень використовують синтетичні полімери й метали; проблема утилізації і впливу на викиди зростає. Тенденція – шукати біо-розкладні або перероблювані рішення [17].

ІЕС 63203-204-1 (2023) – стандарт для випробування побутових циклів прання e-textiles (важлива віха для комерційної прийнятності). Це приклад того, як стандарти поступово з’являються у відповіді на потреби індустрії.

Аналіз найсильніших трендів 2024–2025 та на горизонті 3–7 років показав:

1. Self-powered / energy harvesting текстиль – сонячні нитки, термоелектричні рішення, п’єзоелектричні волокна; прагнення мінімізувати батареї [5, 9, 16]. Матеріали наступного покоління (графен, MXenes, нанокompозити) — краща провідність, гнучкість, функціональність (антибактеріальність, бар’єри, датчики) [17].

2. III + текстиль – інтеграція локальних (edge) алгоритмів в модулі для миттєвої інтерпретації сигналів (фітнес, діагностика), а також «смарт-фабрики», що оптимізують виробництво [5, 8].

3. Модульність і ремонтпридатність – дизайн із від’єднуваними електронними блоками, що полегшують прання, заміну батареї або апгрейд (рис. 1.1) [19].

4. Сталий дизайн та циркулярна економіка – підвищений попит на перероблювані електронні компоненти, зниження викидів волокон і використання сертифікованих матеріалів.



Рис. 1.1. Використання людського тіла для живлення футболок, що відображають мінливі повідомлення [19].



Рис. 1.2. Килим, який світиться під ногами і може передавати сигнали, які можна використовувати для управління вимикачами на таких приладах, як освітлення [19]

Таблиця 1.2

Комерційні бар'єри і ринкові драйвери smart-текстилю та функціонального одягу

Категорія	Пункт	Короткий опис	Джерело(и)
Драйвер	Потреба в дистанційному моніторинні здоров'я	Зростання попиту на віддалений медичний контроль, telehealth та реабілітацію	MarketsandMarkets
Драйвер	Інвестиції у спорт/фітнес	Зростання інвестицій у спортивну аналітику, wearable-технології та персональні трекери	MarketsandMarkets + галузеві звіти
Драйвер	Попит на безпеку праці	Потреба в одязі з сенсорами для промисловості, будівництва, рятувальних служб	MarketDataForecast
Драйвер	Інновації в моді	Технологічні рішення у fashion-сегменті: інтерактивний дизайн, підсвітка, сенсорика	MarketsandMarkets
Драйвер	Партнерства технологічних і fashion-брендів	Колаборації, що поєднують естетику та функціональність для комерційних продуктів	Industry reports + MarketsandMarkets
Бар'єр	Ціна	Висока собівартість матеріалів та інтеграції електроніки порівняно зі звичайним одягом	MarketsandMarkets
Бар'єр	Стандартизація	Обмеженість стандартів для тестування прання, електробезпеки, довговічності	IEC, галузеві аналітики
Бар'єр	Надійність	Механічна вразливість, проблеми з провідними нитками, деградація сенсорів	Наукові дослідження
Бар'єр	Цикл життя продукції	Складність утилізації та рециклінгу комбінованих текстиль-електронних виробів	Sustainability reviews
Бар'єр	Регуляція персональних даних	Суворі вимоги до обробки й зберігання біометричних даних у медичних та wearable-системах	Health-data regulations

Драйвери: потреба в дистанційному моніторинні здоров'я, інвестиції у спорт/фітнес, попит на безпеку праці, інновації в моді і партнерства між технологічними і fashion-брендами [5, 8]. Бар'єри: ціна, стандартизація, надійність, цикл життя продукції і регуляція персональних даних.

Рання взаємодія з регуляторами і медичними інституціями (якщо продукт для health) – це скоротить час на виведення на ринок. KPI – метрики успішності для проєктів smart-текстилю представлено у табл. 1.3.

KPI / Метрики успішності проєктів smart-текстилю

KPI / Метрика	Що вимірює	Для чого важливо
Гарантовані цикли прання	Кількість циклів до деградації електроніки або сенсорів	Показує довговічність виробу та відповідність реальним умовам використання
Чутливість / точність сенсорів	Відхилення показників від клінічних або технічних стандартів	Критично для медичних, спортивних і промислових застосувань
Споживання енергії / автономність	Години роботи без підзарядки або енергохарвестингу	Визначає практичність використання і залежність від батарей
Маса / комфорт / тактильність тканини	Вага виробу, жорсткість, вентиляція, тілесний комфорт	Прямо впливає на прийняття продукту користувачем
Вартість при масштабі виробництва	Собівартість у серійному виробництві	Оцінює комерційну привабливість і ринкову конкурентність
Екологічний слід / перероблюваність	Вуглецевий слід, утилізація матеріалів, можливість розділення текстилю й електроніки	Важливо для стійкого виробництва і відповідності ESG-вимогам

- Гарантовані цикли прання (кількість циклів до деградації електроніки)
- Чутливість/точність сенсорів (порівняння з медичними стандартами)
- Споживання енергії / автономність (години роботи без підзарядки)
- Маса/зручність/відчуття тканини (тобто комфорт для користувача)
- Вартість на одиницю при масштабі (ціна при серійному виробництві)
- Екологічний слід / можливості переробки

Таким чином, сектор швидко зростає (двозначні CAGR у різних звітах) завдяки перетину трендів: IoT, telehealth, спортивні технології та модні колаборації. Однак комерційне масове впровадження залежатиме від вирішення проблем довговічності (особливо прання), енергопостачання та стандартизації.

Сучасний стан розвитку smart-текстилю та функціонального одягу характеризується стрімким зростанням ринку, що зумовлено попитом на дистанційний моніторинг здоров'я, розширенням спортивно-фітнес індустрії, підвищенням вимог до безпеки праці та зростанням кількості технологічних інновацій у fashion-секторі. Індустрія переходить від експериментальних рішень до

формування стабільних виробничих платформ, появи міжнародних стандартів і впровадження нових матеріалів, включаючи провідні волокна, гнучкі сенсори, графенові та нанокompозитні покриття.

Тенденції розвитку демонструють чіткий рух у бік підвищення автономності та інтеграції одягу з цифровими сервісами — завдяки впровадженню енергозбираючих технологій, edge-обробки даних та мініатюризації електронних модулів. Значну увагу приділяють ергономіці, модульності та можливості ремонту або оновлення електронних компонентів, що безпосередньо сприяє підвищенню життєвого циклу та зменшенню вартості експлуатації.

Разом із тим масове впровадження стримується низкою бар'єрів: високою собівартістю, відсутністю повної стандартизації, проблемами з довговічністю сенсорів під час експлуатації та прання, а також складністю утилізації комбінованих текстиль-електронних виробів. Вирішення цих проблем є ключовою умовою для масштабування галузі.

У цілому, сфера smart-текстилю та функціонального одягу перебуває на етапі активного технологічного розвитку та комерційного становлення. Контури майбутніх пріоритетів визначаються переходом до саможивлених матеріалів, підвищенням надійності, розширенням можливостей персоналізованого моніторингу й інтеграцією принципів сталого виробництва. Тому даний напрямок має високий потенціал для інновацій, міждисциплінарних розробок і створення конкурентоспроможних продуктів у промисловості, медицині, спорті та побуті.

1.2. Огляд існуючих технологій інтеграції оздоровчих модулів у текстильні вироби

Ключовою технічною проблемою є забезпечення надійної та ергономічної інтеграції жорстких електронних компонентів (датчиків, мікроконтролерів, батарей) у гнучку текстильну основу. У світовій практиці виділяють кілька основних методів (таблиця 1.4):

1. Канальна інтеграція (Інкапсуляція): Створення спеціальних тунелів або

кишень у структурі тканини, що забезпечує захист електроніки від зовнішнього середовища, але може ускладнювати чищення та прання (рис. 1.3).

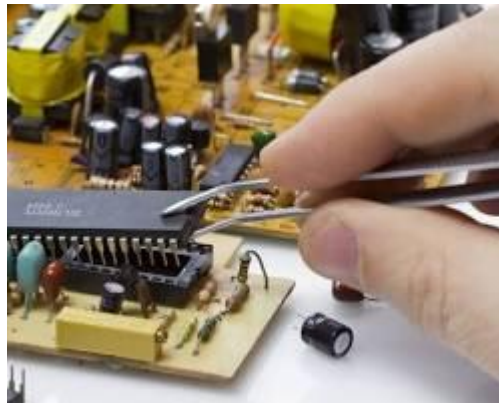


Рис. 1.3. Канальна інтеграція (Інкапсуляція)

2. Електронний текстиль (E-textiles): Використання струмопровідних ниток або друкованих мікросхем, що інтегруються безпосередньо у процес ткацтва, в'язання або шиття.
3. Модульний підхід: Розміщення електронних блоків на знімних, легкодоступних панелях, що є компромісом між функціональністю та зручністю обслуговування.

Таблиця 1.4

Порівняння методів інтеграції

Метод інтеграції	Переваги	Недоліки
Канальна (Інкапсуляція)	Високий захист компонентів, добра ремонтпридатність.	Обмежена гнучкість, ускладнює прання.
Електронний текстиль (E-textiles)	Максимальна гнучкість та естетичність, приховане розміщення.	Висока складність виробництва, вразливість до механічних пошкоджень, складність заміни компонентів.
Модульний підхід	Зручність обслуговування та прання (модулі виймаються).	Помітні елементи, потенційні проблеми з надійністю з'єднання.

Особлива увага приділяється питанню живлення (гнучкі акумулятори, індукційне заряджання) та з'єднанню (використання гнучких плат і прихованих

конекторів), які мають витримувати деформації, прання та бути безпечними для користувача.

Гнучкі з'єднання повинні забезпечувати електричну надійність навіть при розтягуванні. Надійність з'єднання часто оцінюється за формулою, що враховує вплив циклів деформації:

$$R(N) = R_0 \cdot e^{-k \cdot N} \quad (1.1)$$

де:

$R(N)$ – Надійність з'єднання після N циклів.

R_0 – Початкова надійність.

k – Коефіцієнт, що залежить від матеріалу та амплітуди деформації.

N – Кількість циклів деформації/розтягування.

Канальна інтеграція, або інкапсуляція, – це інноваційний технологічний підхід у smart-текстильній інженерії, що передбачає створення спеціальних каналів, тунелів або кишень безпосередньо в структурі тканини. Їх призначення – безпечне розміщення та захист електронних компонентів, датчиків, провідників, мікроплат чи енергетичних модулів, які забезпечують функціональність smart-одягу.

Сутність технології (табл. 1.5). Канали можуть формуватися під час ткацтва (за допомогою модифікованих переплетень), у процесі трикотажного виробництва (за рахунок різних структур петель), шляхом нашивання додаткових шарів або створення кишень з ламінованих чи водостійких матеріалів; за допомогою 3D-текстильних технологій. Такі конструктивні елементи дозволяють приховано прокладати електропровідні доріжки або модулі, зберігаючи естетичність виробу та не обмежуючи свободу рухів користувача.

Перевагами каналної інтеграції є захист електроніки від зовнішнього середовища: ізоляція від вологи, пилу, механічних пошкоджень, ультрафіолету. Ергономічність: електронні елементи не контактують із тілом, не створюють дискомфорту. Естетичність: електроніка стає непомітною, зовнішній вигляд одягу залишається «класичним». Функціональна гнучкість: можливість заміни або

оновлення окремих компонентів, якщо канали передбачають доступ.

Таблиця 1.5

Канальна інтеграція (інкапсуляція) у smart-текстилі

Аспект	Зміст
Визначення	Технологія створення спеціальних каналів, тунелів або кишень у структурі тканини для розміщення та захисту електронних компонентів.
Способи створення каналів	– Під час ткацтва (модифіковані переплетення) – трикотажі (варіативні структури петель) – Нашивання додаткових шарів або кишень із захисних матеріалів – Використання 3D-текстильних технологій
Основне призначення	Приховане прокладання провідників і модулів, захист електроніки, збереження естетичності та ергономічності smart-одягу.
Переваги	- Захист від вологи, пилу, механічних впливів - Відсутність контакту електроніки з тілом - Естетичний зовнішній вигляд - Можливість заміни/ремонтів елементів (за доступних конструкцій)
Недоліки	- Ускладнене прання та догляд - Потреба у спеціальному обладнанні та високій точності виробництва - Підвищення собівартості виробу - Можливе зниження гнучкості тканини
Сфери застосування	Спортивний smart-одяг, захисна та військова форма, медичний одяг, одяг з підігрівом

Недоліки та обмеження – це ускладнення процесів чищення та прання. Наявність прихованих каналів створює ризики затримування вологи або мийних засобів, а також підвищує навантаження на електронні компоненти. Часто необхідні спеціальні режими догляду або від’єднання модулів перед пранням. Ускладнення виробництва. Потребує високої точності та використання спеціального обладнання. Підвищення собівартості виробу. Можливість зниження гнучкості та еластичності тканини у місцях розташування каналів.

Електронний текстиль (E-textiles) – це текстильні матеріали, в які інтегровані електронні елементи або струмопровідні структури, здатні виконувати функції збору даних, передачі сигналів, нагрівання, реагування на зовнішні стимули або взаємодії з користувачем. На відміну від smart-одягу з модульною електронікою, e-textiles – це тканини, у яких електроніка є частиною самої структури (рис. 1.4).



Рис. 1.4. E-textiles

1. Технології створення електронного текстилю. Використання струмопровідних ниток або друкованих мікросхем, що інтегруються безпосередньо у процес ткацтва, в'язання або шиття.

1.1. Струмопровідні нитки (Conductive yarns). Це волокна або нитки, покриті металами або виготовлені з композитних матеріалів.

Типи струмопровідних ниток:

- металізовані волокна (Ag, Cu, Ni)
- полімери з наповнювачами (вуглецеві нанотрубки, графен)
- волокна з вплетеними тонкими металевими дротами
- волокна з плазмовим напиленням металу

Переваги: гнучкість, сумісність зі стандартним текстильним обладнанням, можливість ткацтва/в'язання складних схем. Недоліки: деградація при пранні, можливе зниження провідності з часом.

1.2. Вбудовані сенсори та електронні елементи. Сенсори можуть бути частиною тканини або наноситися поверхню.

Типи сенсорів: тиску; розтягнення; вологості; температури; біометричні (пульс, ЕКГ, ЕМГ).

Методи інтеграції: пришивання мікросхем на гнучких підкладках; вплетення сенсорних зон з різною структурою текстилю; нанесення п'єзорезистивних матеріалів у вигляді доріжок.

1.3. Друкована електроніка на текстилі використовуються функціональні

чорнила, які проводять електричний струм або змінюють опір. Методи друку: трафаретний друк; інк-джет друк; 3D-друк полімерів із наночастинками; сублімаційний термодрук зі струмопровідними пігментами (рис. 1.5).

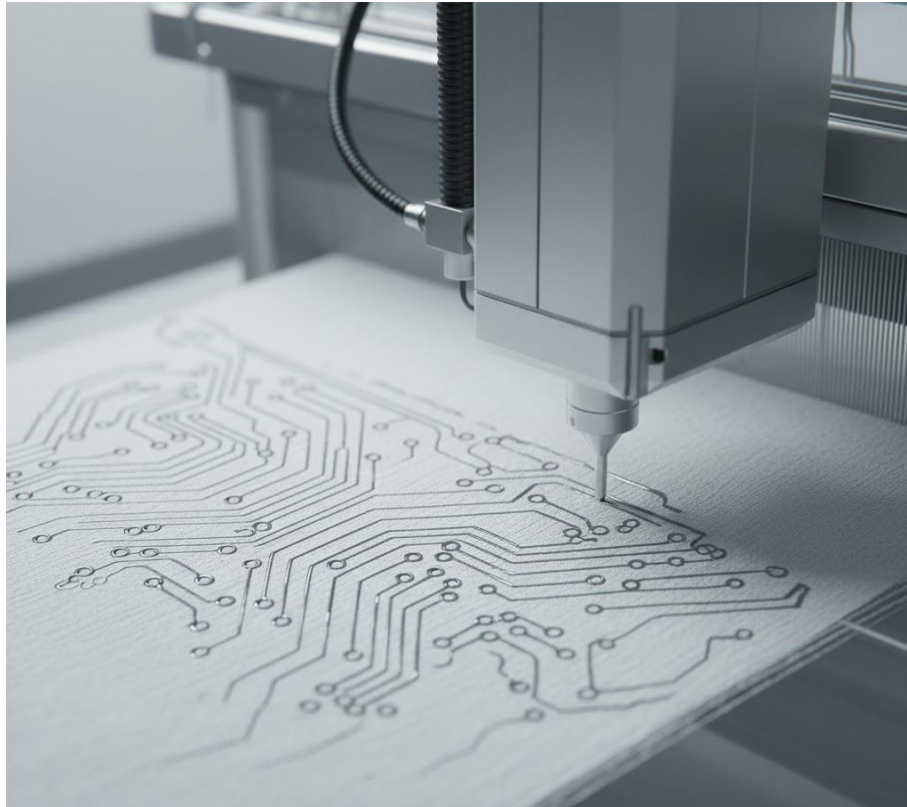


Рис. 1.5. Інк-джет друк

Переваги: висока точність. можливість нанесення складних схем, низька маса

Недоліки: зношуваність покриття, тріщини при сильних деформаціях.

Інтеграція електроніки в процеси ткацтва, в'язання та шиття (рис. 1.6).

З рисунку 1.6 видно, що Вплетення/В'язання: Частина тканини демонструє, як струмопровідні волокна органічно вбудовані у структуру, замінюючи або доповнюючи звичайні нитки. Друк: На іншому фрагменті тканини (рис. 1.5, б) показано нанесення гнучкої друкованої схеми або струмопровідних доріжок за допомогою спеціальних чорнил. Інкапсуляція: Третій елемент показує, як мініатюрний електронний компонент (наприклад, сенсор) оточений захисною полімерною оболонкою та інтегрований у текстиль.

1. Ткацтво. Струмопровідні нитки вводяться в основу або уток, утворюючи:

провідникові доріжки, антенні структури, сенсорні зони, нагрівальні елементи. Проблеми забезпечення стабільності переплетення, рівномірності натягу та захисту від перетирання.

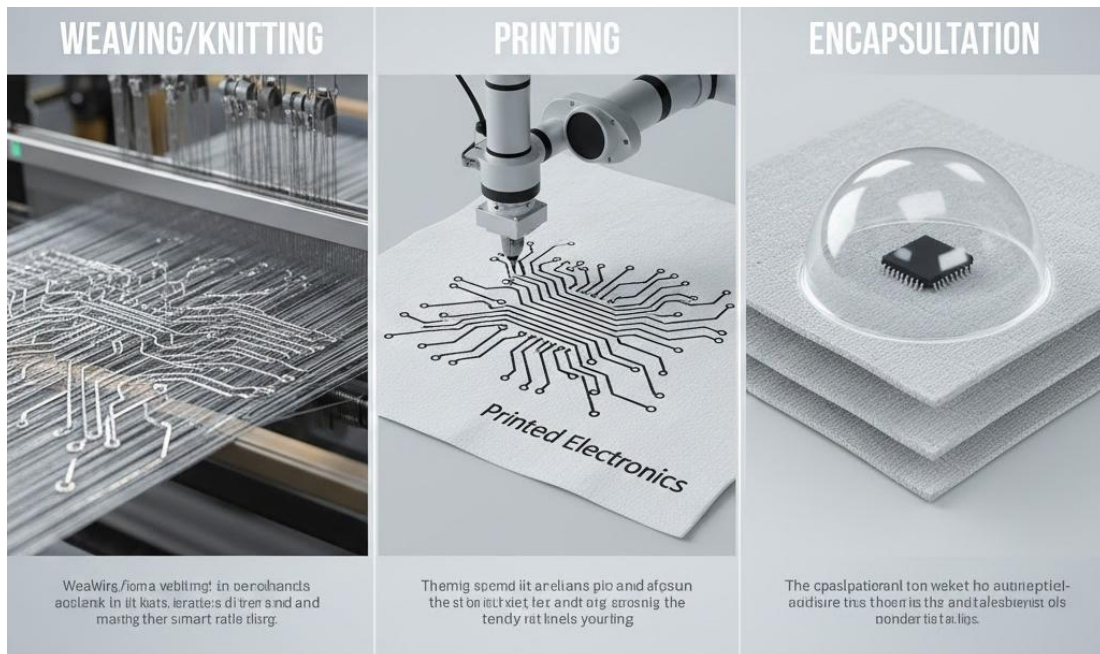


Рис. 1.6. Інтеграція електроніки в процеси ткацтва, в'язання та шиття

а) Вплетення/В'язання; б) Друк; в) Інкапсуляція

2. В'язання. В'язані структури забезпечують кращу еластичність, можливість сенсорів розтягнення, інтеграцію “м'яких” мікросхем. Використовуються схеми джерсі, ріб, інтерлок із варіаціями для формування провідних зон (рис. 1.7).

3. Шиття. Електронні компоненти можуть пришиватись або фіксуватися: еластичними нитками, спеціальними швами з провідними волокнами, термозакріплюючими шарами.

Основні типи електронного текстилю.

1. Пасивні E-textiles містять лише провідні доріжки чи антенні структури (наприклад, нагрівальні елементи).

2. Активні E-textiles мають інтегровану електроніку: мікропроцесори, Bluetooth-модулі, датчики, світлодіоди.

3. Гібридні системи комбінують тканину, мікросхеми та знімні модулі живлення.



Рис. 1.7. Вплетення/В'язання

4. Переваги електронного текстилю: висока гнучкість та комфорт, на відміну від жорсткої електроніки. Інтеграція у звичний одяг, мінімальна видимість компонентів. Можливість великосерійного виробництва на текстильному обладнанні. Широкий спектр функцій: тепловий контроль, моніторинг здоров'я, комунікація, навігація.

5. Основні виклики: Міцність і зносостійкість при пранні, деформаціях та терті. Сумісність матеріалів (метал/полімер/текстиль мають різні властивості). Захист електроніки від вологи та потових солей. Живлення — потреба в тонких, гнучких батареях або енергохарвестингу. Стандартизація та сертифікація (особливо для медичного сектору).

6. Сфери застосування. Медицина: ЕКГ-футболки, сорочки для контролю дихання, компресійні матеріали з сенсорами. Спорт: аналіз рухів, пульсу, навантаження. Промисловість: одяг із датчиками температури, газів, небезпечних умов. Військова сфера: текстильні антени, системи комунікації, камуфляж зі змінними властивостями. Мода та дизайн: інтерактивний одяг зі світлодіодами, реактивний текстиль.

Модульний підхід передбачає інтеграцію електроніки в smart-одяг у вигляді знімних або напівзнімних модулів, які розміщуються на спеціально створених

панелях, кишенях або платформах. Такий підхід дозволяє поєднати функціональність електронних систем із практичністю обслуговування та догляду за текстилем.

Суть підходу полягає у поділі виробу на дві частини: текстильна основа, яка може пратися та носитися як звичайний одяг; електронний модуль, що знімається перед пранням та має власний захист, корпус і роз'ємну систему підключення.

Технологічні особливості: Уніфіковані роз'єми: стандартизовані контактні групи для живлення та передачі даних. Гнучкі плати: дозволяють підвищити комфорт користувача. Мініатюрні корпуси: захищають від вологи, ударів, пилу. Текстильні доки: забезпечують інтеграцію модулів без порушення естетики виробу.

Таблиця 1.6

Типи модульних рішень у smart-текстилі

Тип модульного рішення	Характеристика	Приклади реалізації
Знімні електронні модулі	Електронні блоки, що повністю від'єднуються перед пранням або обслуговуванням	Магнітні сенсори, датчики руху, контролери, знімні батареї
Модульні текстильні панелі	Спеціальні зони в одязі, створені для встановлення електронних компонентів	Кишені з провідними контактами, гнучкі док-станції, вставки з провідних тканин
Напівзнімні рішення	Частина електроніки вшита в текстиль, але ключові елементи (батарея, контролер) знімні	Вшиті сенсорні доріжки + знімний Bluetooth-модуль, smart-футболки з "гарячою" зоною для вставки основного блоку

Таблиця 1.7.

Переваги модульного підходу

Перевага	Пояснення
Простота догляду	Модулі легко зняти перед пранням, що подовжує строк служби виробу.
Ремонтопридатність	Можна замінити окремих компонент без переробки всього виробу.
Масштабованість функцій	Користувач може додавати нові датчики або оновлювати існуючі.
Підвищена безпека	Уникається контакт електроніки з вологою та агресивними середовищами.
Гнучкість дизайну	Текстильний продукт може мати різні варіанти комплектацій.

Недоліки та обмеження модульного підходу

Недолік	Пояснення
Потовщення в місцях модулів	Може впливати на комфорт та мобільність.
Можлива втрата модулів	Через знімний характер кріплення або людський фактор.
Естетичні компроміси	Видимі кріплення або кишені можуть впливати на вигляд одягу.
Дорожче виробництво	Потрібні спеціальні кріплення та контактні елементи.

Отже, огляд існуючих технологій інтеграції оздоровчих модулів у текстильні вироби, зокрема для створення smart-головних уборів, дозволяє зробити низку важливих висновків, які є критичними для подальшої розробки модернізованої технології.

1. Необхідність комбінованого підходу. Висновки свідчать, що жоден окремий метод інтеграції (канальна інкапсуляція, електронний текстиль чи модульний підхід) не є універсальним. Найбільш перспективним є комбінований підхід, який: Використовує електронний текстиль (E-textiles) (струмопровідні нитки або друковані схеми) для створення гнучких, непомітних трас живлення та сенсорних мереж. Застосовує канальну інкапсуляцію для захисту найбільш чутливих та жорстких елементів, таких як термоелектричні модулі Пельтьє (ТЕП), мікроконтролери та акумулятори, забезпечуючи їхню водонепроникність та захист від механічних пошкоджень.

2. Домінування ергономічних та експлуатаційних вимог. Ключова технічна проблема полягає не лише у функціонуванні електроніки, а й у забезпеченні ергономічності та експлуатаційної надійності. Інтеграція має бути виконана таким чином, щоб: Мінімізувати тиск та вагу жорстких компонентів на голову користувача. Забезпечити стійкість системи до циклів прання, що вимагає ефективного захисту (герметизації) або модульності електронних блоків. Гарантувати безпеку користувача, що стосується як електромагнітної сумісності, так і теплової безпеки (запобігання перегріву).

3. Критичність проблеми живлення. Проблема живлення є однією з найбільших перешкод для комерціалізації smart-одягу. Необхідно вирішувати це

завдання шляхом: Використання гнучких та легких літій-полімерних акумуляторів, розміщених у зоні мінімального дискомфорту (наприклад, потилиця). Забезпечення індукційного або бездротового заряджання для підвищення зручності використання, що дозволить уникнути відкритих роз'ємів і покращить захист від вологи.

4. Необхідність модернізації технологічного процесу. Інтеграція оздоровчих модулів вимагає виходу за межі стандартних швейних операцій. Для успішної реалізації проекту потрібна модернізація технологічної схеми шляхом включення таких спеціалізованих етапів: Високоточне позиціонування та монтаж компонентів (замість ручного шиття). Використання методів термопресування або ультразвукового зварювання для надійного та герметичного з'єднання захисних матеріалів. Впровадження електронного контролю якості (тестування струмопровідності та функціональності модулів) безпосередньо на виробничій лінії.

Таким чином, розробка модернізованої технології повинна базуватися на синтезі найкращих методів інтеграції, з пріоритетом на ергономіку, надійність та зручність експлуатації кінцевого виробу.

1.3. Теоретичне обґрунтування вибору оздоровчого модуля: системи активної терморегуляції

На основі аналізу потреб ринку та технічних можливостей, найбільш перспективним оздоровчим модулем для головних уборів визнано систему активної терморегуляції (САТ). Це обґрунтовано наступними факторами:

- Фізіологічна значущість, температура мозку та обличчя прямо впливає на когнітивну продуктивність, концентрацію та відчуття комфорту. САТ дозволяє точно підтримувати оптимальний тепловий режим, що є критичним для спортсменів, а також для осіб, які страждають від мігрені або теплового стресу.

На рис. 1.8 показана голова людини з виділеними зонами обличчя та мозку, а також індикатори, що символізують розумову активність та відчуття комфорту.

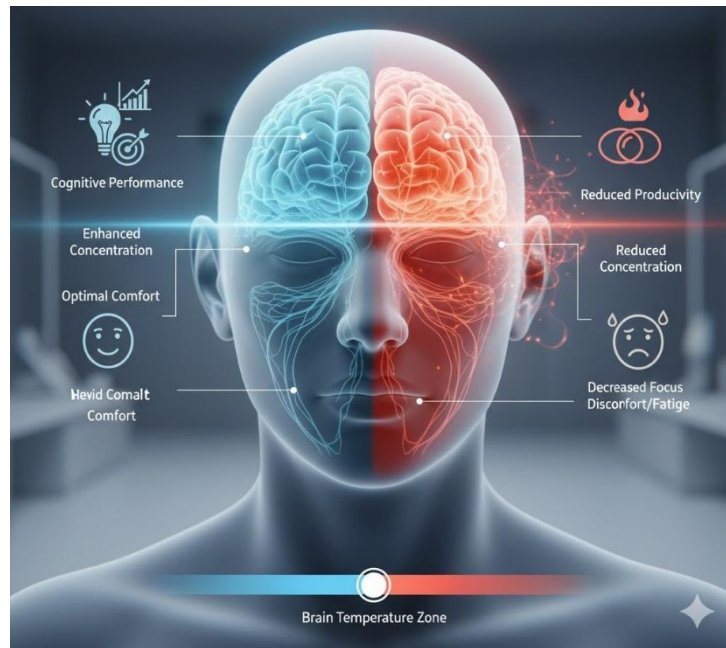


Рис. 1.8. Зв'язок між температурою мозку та обличчя і такими показниками, як когнітивна продуктивність, концентрація та відчуття комфорту

• Вибір технології, серед усіх САТ, термоелектричні модулі Пельтьє (ТЕП) є найбільш придатними для головних уборів, оскільки вони компактні, не містять рухомих частин (окрім вентиляторів для відведення тепла) і дозволяють як охолоджувати, так і нагрівати цільову зону шляхом простої зміни полярності струму.

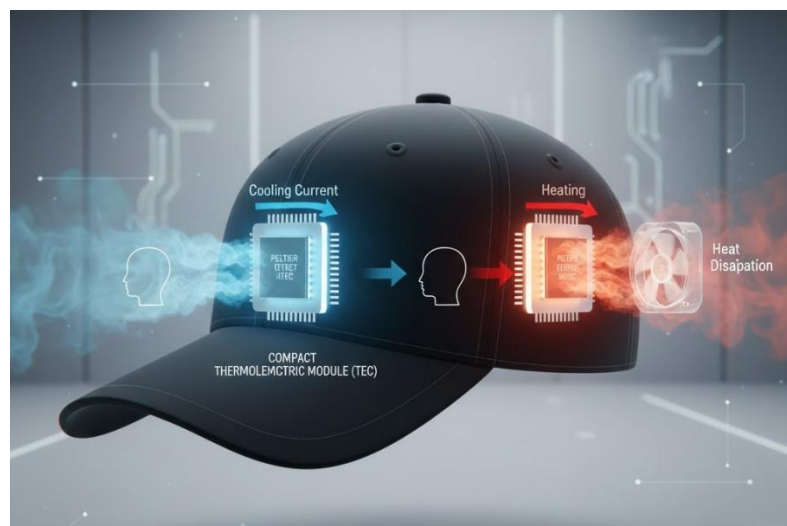


Рис. 1.9. Застосування термоелектричних модулів Пельтьє для активної терморегуляції в головних уборах

На рис. 1.9 показано, як компактний ТЕП інтегрований у головний убір, з візуалізацією потоків тепла (червоний для відведення, синій для поглинання), що змінюються при зміні напрямку електричного струму, забезпечуючи охолодження або нагрівання. Також видно мініатюрний вентилятор, що допомагає у відведенні тепла.

Модуль Пельтьє – це компактний твердотільний пристрій, який при подачі постійного струму створює різницю температур між двома своїми сторонами: одна сторона стає гарячою, а інша — холодною. Цей ефект використовується для активного охолодження або нагрівання в малих системах, таких як інтегровані модулі в головних уборах (рис. 1.10).



Рис. 1.10. Модуль Пельтьє

Теплофізичні моделі: модуль включає теоретичні розрахунки теплових потоків, що дозволяють визначити необхідну потужність ТЕП, враховуючи тепловиділення організму, опір текстильних матеріалів та зовнішні температурні умови.

Концепція теплофізичних моделей, застосованих до головного убору

предсавлено на рис. 1.11. Це зображення візуалізує, як теплові потоки (конвекція, випромінювання, теплопровідність) взаємодіють з головою людини та головним убором, а також показує зони з різними температурами, що є результатом роботи терморегулюючого модуля. Це допомагає зрозуміти, як розраховуються та оптимізуються системи охолодження/нагрівання.

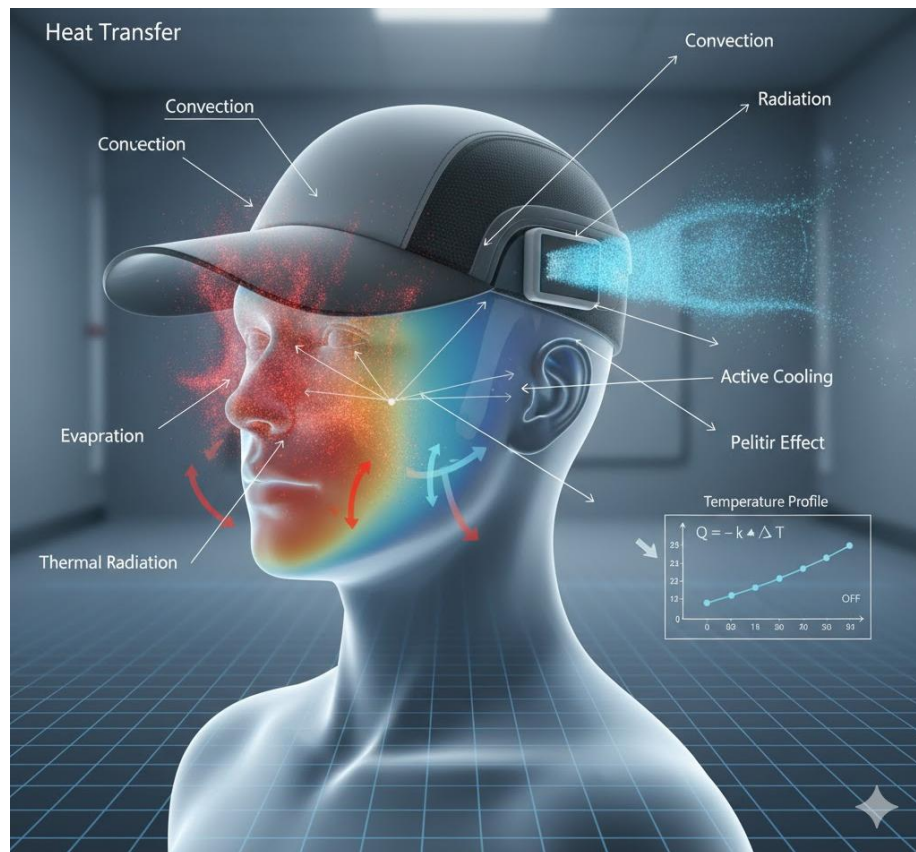


Рис. 1.11. Теплофізичні моделі

Для теоретичного обґрунтування системи активної терморегуляції (САТ) у головних уборах необхідно провести розрахунки теплових потоків, що дозволить визначити необхідну потужність охолодження або нагрівання модуля Пельтьє ($Q_{\text{ТЕП}}$). Мета розрахунків – встановити баланс теплової енергії між головою користувача, головним убором та навколишнім середовищем.

Теоретичні розрахунки теплових потоків для САТ

1. Рівняння теплового балансу

Загальний тепловий баланс у зоні контакту головного убору та голови

(стаціонарний режим) описується рівнянням, де сума всіх теплових потоків дорівнює нулю:

$$Q_{\text{МЕТ}} + Q_{\text{ЗОВ}} + Q_{\text{ТЕП}} = 0 \quad (1.2)$$

де:

$Q_{\text{МЕТ}}$ – Тепло, що виділяється головою користувача (метаболічне тепловиділення).

$Q_{\text{ЗОВ}}$ – Теплообмін із навколишнім середовищем (втрати або надходження тепла через текстиль).

$Q_{\text{ТЕП}}$ – Теплова потужність, яку повинен поглинути (охолодження) або виділити (нагрівання) модуль Пельтьє.

Наше завдання – розрахувати $Q_{\text{ТЕП}}$ для забезпечення комфортної температури на поверхні шкіри голови ($T_{\text{комфорт}}$).

2. Розрахунок метаболічного тепловиділення ($Q_{\text{мет}}$)

Голова людини виділяє значну кількість тепла. Цей показник залежить від загального метаболізму та притоку крові.

$$Q_{\text{МЕТ}} = \alpha \cdot Q_{\text{ЗАГ}} \quad (1.3)$$

де:

$Q_{\text{заг}}$ – Загальне тепловиділення організму (залежить від фізичної активності, одиниці Вт).

α – Частка загального тепловиділення, що припадає на голову (зазвичай, 10–15% від $Q_{\text{заг}}$).

Приклад: для людини, яка перебуває у стані спокою, $Q_{\text{заг}} \approx 100$ Вт. Тоді $Q_{\text{мет}} \approx 0,1 \cdot 100 = 10$ Вт.

3. Розрахунок теплообміну з навколишнім середовищем ($Q_{\text{зов}}$)

Цей потік включає кондукцію (через текстиль), конвекцію та випромінювання. У спрощеному вигляді його можна розрахувати через різницю температур і загальний коефіцієнт теплопередачі головного убору (K):

$$Q_{\text{зов}} = K \cdot A \cdot (T_{\text{зов}} - T_{\text{комфорт}}) \quad (1.4)$$

де:

K – Загальний коефіцієнт теплопередачі головного убору (Вт/(м²*К)

A – Ефективна площа теплообміну, м².

$T_{\text{зов}}$ – Температура навколишнього середовища К або °С.

$T_{\text{комфорт}}$ – Бажана температура на поверхні шкіри під модулем, °С або К.

4. Визначення необхідної потужності модуля Пельтьє ($Q_{\text{ТЕП}}$)

Якщо нас цікавить охолодження (тобто $Q_{\text{мет}}$ та $Q_{\text{зов}}$ створюють надлишок тепла, яке треба забрати), то $Q_{\text{ТЕП}}$ повинна компенсувати суму цих потоків:

$$Q_{\text{ТЕП}} = -(Q_{\text{мет}} + Q_{\text{зов}}) \quad (1.5)$$

Приклад (Охолодження):

Якщо:

$Q_{\text{мет}} = 10$ Вт (тепло, що виділяє голова).

$Q_{\text{зов}} = 5$ Вт (тепло надходить через шапку з навколишнього середовища).

Тоді:

$$Q_{\text{ТЕП}} = -(10 \text{ Вт} + 5 \text{ Вт}) = -15 \text{ Вт} \quad (1.6)$$

Це означає, що модуль Пельтьє має забезпечити поглинання тепла з потужністю 15 Вт.

Розрахунок робочих параметрів модуля Пельтьє. Після визначення $Q_{\text{ТЕП}}$, необхідно розрахувати електричні параметри модуля. Холодопродуктивність модуля (Q_c) залежить від струму (I), робочої напруги (U), коефіцієнта Зеебека ($\alpha_{\text{ТЕП}}$) та опору ($R_{\text{ТЕП}}$):

$$Q_c = \alpha_{\text{ТЕП}} \cdot I \cdot T_c - 0.5 \cdot I^2 \cdot R_{\text{ТЕП}} - K_{\text{ТЕП}} \cdot \Delta T \quad (1.7)$$

де:

Q_c – Холодопродуктивність

T_c – Температура холодної сторони модуля

$\Delta T = T_h - T_c$ – Перепад температур між гарячою і холодною сторонами.

$K_{\text{ТЕП}}$ – Коефіцієнт теплопровідності модуля.

Ця формула дозволяє оптимізувати струм (I) для забезпечення необхідної холодопродуктивності Q_c , мінімізуючи при цьому енергоспоживання.

Ці розрахунки створюють теоретичну базу для вибору конкретної моделі модуля Пельтьє та акумулятора, а також для подальшого комп'ютерного моделювання (наприклад, за допомогою МКЕ) для більш точного аналізу.

1.4. Формулювання технічного завдання на розробку модернізованої технології

На підставі проведеного аналізу формулюються чіткі технічні вимоги до кінцевого продукту та процесу його виготовлення. Це включає вимоги до: Ефективності терморегуляції (цільовий діапазон температур). Ергономічності (максимальна вага, розподіл тиску, гнучкість). Технологічності (вибір обладнання та послідовності операцій). Надійності (захист від вологи, довговічність при пранні). Технічне завдання наведено у Додатку А.

Цей аналітичний розділ забезпечує необхідну теоретичну базу для переходу до Розділу 2, де буде здійснюватися безпосередня розробка технологічної схеми та експериментальна перевірка.

2. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ SMART-ГОЛОВНОГО УБОРУ

Основна увага в другому розділі зосереджена на створенні інтелектуального головного убору, який є не просто аксесуаром, а складною системою для моніторингу та взаємодії з користувачем. Процес розробки починається з концептуалізації, де визначаються ключові функціональні вимоги до SMART-головного убору, такі як моніторинг фізіологічних показників (наприклад, ЕКГ, ЕЕГ, температура тіла), інтеграція з мобільними пристроями, автономність живлення та ергономічність. Далі, технологія виготовлення включає вибір та інтеграцію відповідних матеріалів, зокрема гнучкої електроніки, текстильних сенсорів, мікроконтролерів та елементів живлення. Обговорюються методи інтеграції електронних компонентів у текстильну основу, наприклад, використання струмопровідних ниток, технологій друку електроніки або вбудовування мініатюрних модулів. Важливим етапом є оптимізація виробничого процесу для забезпечення масштабованості, надійності та економічної ефективності. Після виготовлення прототипів проводиться дослідження ефективності, яке включає важливі етапи калібрування сенсорів, оцінку точності вимірювань у різних умовах експлуатації (статичних та динамічних), а також перевірку ергономічних характеристик та зручності використання головного убору. Дослідження також зосереджуються на енергоефективності системи, тобто тривалості автономної роботи та оптимізації споживання енергії. Крім того, аналізується користувацький досвід (UX) і надійність передачі даних. Результати цих досліджень дозволяють верифікувати та валідувати розроблену технологію і вказують на потенційні напрямки для подальшого вдосконалення, перетворюючи концепт на готовий до використання продукт, що може знайти застосування у сфері спорту, медицини чи промислової безпеки.

2.1. Конструкторська розробка моделі головного убору для інтеграції САТ

Конструкторська розробка моделі головного убору (ГУ) для інтеграції спеціальних оздоровчих модулів (СОМ) – це критичний етап, який забезпечує функціональність, ергономіку та естетику кінцевого виробу. Мета цього етапу полягає у створенні такої дизайнерської та технологічної основи, яка дозволить безшовно та ефективно розмістити електронні компоненти, сенсори та оздоровчі елементи, не порушуючи при цьому комфорту користувача. Вимоги до СОМ є відправною точкою, що визначає всю подальшу конструкцію головного убору (ГУ).

Розміри та форма СОМ, величини та геометрія модулів (наприклад, друкованих плат, мікроконтролерів, батарей) диктують мінімально необхідний внутрішній простір у ГУ. Чим більші модулі, тим більше структурне потовщення або жорсткі елементи потрібні для їх розміщення та захисту. Це прямо впливає на естетику та гнучкість ГУ. Контакт зі шкірою: Визначає, чи потрібен прямий, *сухий* чи *вологий* (з електролітом) контакт.

Модулі, що вимагають прямого контакту (наприклад, ЕЕГ, ЕКГ, датчики температури шкіри), повинні бути вбудовані у внутрішній шар тканини з використанням гіпоалергенних струмопровідних матеріалів (рис. 2.1).

Радіус дії та інтерфейс, вимоги до бездротової передачі даних (Bluetooth, Wi-Fi) впливають на вибір матеріалів ГУ (щільність тканини може впливати на проходження сигналу) та розміщення антени, яка повинна бути розміщена подалі від масивних металевих елементів (рис. 2.2).

Ефективне зонування забезпечує як функціональність, так і комфорт. Функціональні зони (Сенсори), датчики ЕЕГ/ЕКГ, розміщуються у зонах із мінімальним рухом шкіри та найкращою провідністю, як правило, у скроневій, потиличній або лобовій областях. Вони вимагають найщільнішого прилягання (рис. 2.3).



Рис. 2.1. Модулі ЕЕГ, ЕКГ, датчики температури шкіри

EEG Electrode Placement

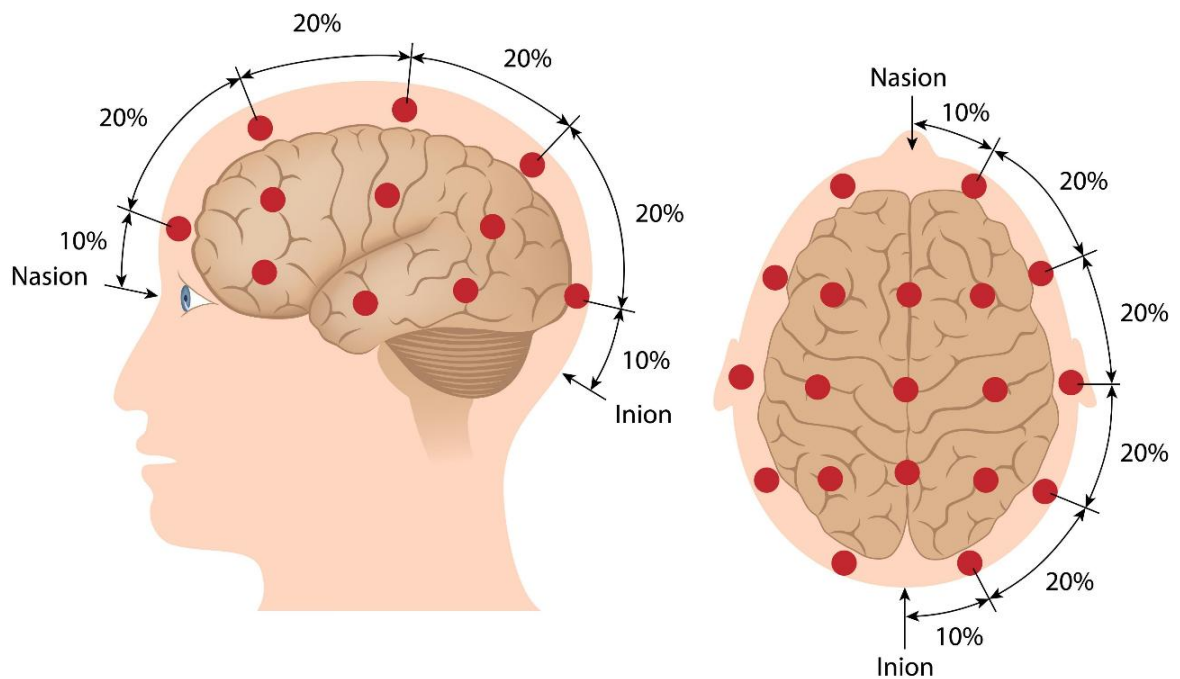


Рис. 2.2. Необхідність контакту вимагає створення постійного рівномірного тиску у зоні сенсора

Датчики Температури/Вологості: Можуть бути розташовані ближче до тіла, але не вимагають такого жорсткого прилягання, як ЕЕГ (рис. 2.3).

Технічні Зони (блок керування та живлення): мікроконтролер (MCU) та Батарея: Розміщуються у жорстких або напівжорстких елементах ГУ, де вони не відчуються користувачем (наприклад, усередині козирка (кепка), обідка (пов'язка) або у потиличній частині, приховані під шаром м'якого матеріалу). Таке розміщення мінімізує перегрів у чутливих зонах і забезпечує легкий доступ для обслуговування (зарядка/заміна) (рис. 2.3).



Рис. 2.3. Функціональні та технічні зони

Ергономіка є ключовою для довготривалого використання.

Щільність Прилягання для стабільної роботи сенсорів потрібне контрольоване прилягання. Конструкція має включати еластичні вставки або механізми регулювання (наприклад, липучки, ремені, регульовані обідки), які дозволяють користувачеві точно налаштувати тиск на зону сенсорів, не викликаючи дискомфорту.

Розподіл Ваги забезпечення рівномірного розподілу ваги СОМ по всій площі

ГУ запобігає зсуву та уникненню точкового тиску. Важчі компоненти (батарея) повинні бути розміщені якомога ближче до центру маси голови.

Управління теплом має вирішальне значення для безпеки та комфорту.

Охолодження електроніки: конструкція повинна мати пасивні вентиляційні канали або використовувати теплорозсіювальні матеріали у зоні розміщення мікроконтролера та батареї, щоб запобігти їх перегріву, що може призвести до зниження ефективності або поломки.

Комфорт Користувача: Використання сучасних високотехнологічних тканин із властивостями відведення вологи (wicking) та швидкого висихання є обов'язковим, оскільки інтегровані модулі можуть обмежувати природну тепловіддачу.

2.2. Розробка модернізованої технологічної схеми виготовлення

Розробка модернізованої технологічної схеми виготовлення – це ключовий етап, який перетворює конструкторські ідеї та вимоги до COM на практичний, масштабований та ефективний виробничий процес. Ця схема інтегрує традиційні швейні технології з інноваційними методами вбудовування електроніки, забезпечуючи високу якість, функціональність та довговічність SMART-головного убору.

Першим етапом є ретельна підготовка всіх необхідних матеріалів та електронних компонентів.

Вибір текстильних матеріалів, використовуються високотехнологічні тканини. Основна тканина – дихаючі, вологовідвідні, еластичні матеріали (наприклад, суміші поліестеру, спандексу, мериносової вовни). Внутрішня підкладка, м'які, гіпоалергенні тканини для прямого контакту зі шкірою. Струмопровідні тканини/нитки: Для інтеграції сенсорів та провідників.

Підготовка електронних модулів (COM): Мікроконтролери, сенсори, батареї: Перевіряються на справність. Гнучкі друковані плати (FPCB) або гнучкі з'єднувачі: Підготовлюються для подальшої інтеграції. Захисні оболонки/герметики: Для забезпечення вологозахисту та механічної стійкості COM.

Цей етап включає точний розкрій тканин згідно з розробленими лекалами та формування основних частин ГУ.

Лазерний розкрій або CAD/CAM забезпечує високу точність та мінімізує відходи матеріалу (рис. 2.4). Формування «кишень» та «каналів», вже на етапі розкрою можуть передбачатися спеціальні зони для вбудовування електронних компонентів – кишені для блоків, канали для провідників.



Рис. 2.4. Лазерний розкрій деталей крою головних уборів

Інтеграція електронних модулів та струмопровідних елементів є найбільш інноваційним та складним етапом, поєднуючи текстильне виробництво з мікроелектронікою. Вбудовування Сенсорів: пряме вшивання/пришивання, Струмопровідні нитки або текстильні електроди вшиваються безпосередньо у внутрішню підкладку ГУ, забезпечуючи контакт зі шкірою.

Термокомпресія (рис. 2.5). Деякі сенсори можуть бути інтегровані шляхом термокомпресійного приєднання до текстильних поверхонь. Прокладка струмопровідних шляхів: текстильні провідники: використання струмопровідних ниток або стрічок, які вплітаються або вшиваються у внутрішні шари гу. Гнучкі друковані плати (fpcb): мініатюрні fpcb можуть бути вбудовані у спеціальні канали

або кишені, забезпечуючи надійні з'єднання. Монтаж блоків керування та живлення: електронні плати та батареї розміщуються у попередньо сформованих кишенях або відсіках, які забезпечують їх фіксацію та захист.



Рис. 2.5. Термокомпресія

Після інтеграції електроніки відбувається збирання ГУ в єдине ціле. шиття та з'єднання: основні частини гу з'єднуються швейними машинами, при цьому особлива увага приділяється місцям проходження провідників, щоб уникнути їх пошкодження. Встановлення захисних елементів: додаткові ущільнювачі, вологозахисні мембрани або покриття застосовуються для захисту електроніки від зовнішніх впливів, особливо в зонах прямого контакту. Регульовальні елементи: встановлення механізмів регулювання розміру (ремінці, липучки), що дозволяють адаптувати гу до індивідуальних антропометричних параметрів.

Жодна модернізована технологічна схема не може бути повною без суворого контролю якості. Функціональне Тестування: Перевірка працездатності всіх СОМ: зчитування даних сенсорами, робота мікроконтролера, з'єднання з зовнішніми пристроями (Bluetooth/Wi-Fi). Електричне Тестування: Перевірка цілісності електричних ланцюгів, відсутність коротких замикань та переривань. Ергономічне Тестування: Оцінка комфорту носіння, щільності прилягання, відсутність

дискомфорту від електронних компонентів. Тестування на Стійкість: Перевірка стійкості до прання (якщо передбачено), механічних навантажень.



Рис. 2.6. Функціональне тестування головного убору

На основі розглянутих етапів – конструкторська розробка та модернізована технологічна схема виготовлення можна зробити наступний висновок, що створення ефективного SMART-головного убору з інтегрованими спеціальними оздоровчими модулями (COM) є комплексним інженерно-технологічним завданням, що вимагає гармонійного поєднання текстильного дизайну та мікроелектроніки.

Конструкторська розробка є визначальною, оскільки вона встановлює жорсткі вимоги до ергономіки та зонування: COM (наприклад, датчики ЕЕГ) повинні бути безшовно інтегровані у ГУ, забезпечуючи оптимальний, стабільний контакт зі шкірою для точного зчитування даних, при цьому блоки живлення та керування мають бути розміщені у неконтактних зонах для комфорту, безпеки та мінімізації перегріву.

Модернізована технологічна схема слугує мостом між дизайном та виробництвом. Вона базується на інноваційних методах, таких як використання струмопровідних ниток та гнучких друкованих плат для прихованої маршрутизації

сигналів, а також застосуванні високоточного розкрою та спеціалізованого збирання. Це забезпечує масштабованість виробництва, довговічність виробу (особливо його здатність витримувати прання та механічні навантаження) та надійний захист інтегрованих електронних компонентів.

Таким чином, успіх розробки залежить від точного аналізу вимог до СОМ на етапі конструкції та їх бездоганної реалізації за допомогою сучасних, гібридних технологій виготовлення, що зрештою дозволяє створити функціональний, зручний та ефективний виріб для оздоровчих або моніторингових цілей.

2.3. Експериментальне дослідження ефективності системи активної терморегуляції

Експериментальне дослідження ефективності системи активної терморегуляції (САТ) у SMART-головному уборі є завершальним і критично важливим етапом. Воно дозволяє не тільки підтвердити функціональність розроблених модулів, але й кількісно оцінити їхній вплив на комфорт та фізіологічний стан користувача в різних умовах.

Метою дослідження є всебічна оцінка здатності САТ підтримувати оптимальний температурний режим у ділянці голови користувача, мінімізуючи тепловий стрес або переохолодження.

Завдання:

- Визначити діапазон ефективної роботи САТ в умовах різних температур навколишнього середовища.
- Оцінити вплив САТ на фізіологічні показники користувача (температура шкіри, серцевий ритм, суб'єктивний комфорт).
- Виявити оптимальні режими роботи САТ для різних сценаріїв використання (наприклад, фізична активність, перебування на холоді).
- Порівняти ефективність головного убору з САТ та без неї.

Методологія Дослідження. Для забезпечення достовірності результатів, дослідження проводиться з дотриманням наукової методології.

Групи Досліджуваних: Контрольна група (носіння стандартного головного убору без САТ). Експериментальна група (носіння SMART-головного убору з активованою САТ).

Бажано використовувати "сліпий" або "подвійний сліпий" метод, де це можливо, щоб уникнути суб'єктивних упереджень.

Умови Експерименту. Створення контрольованих кліматичних умов (камера з регульованою температурою, вологістю, швидкістю повітря). Симуляція різних сценаріїв: статичне перебування, легка фізична активність, інтенсивні навантаження.

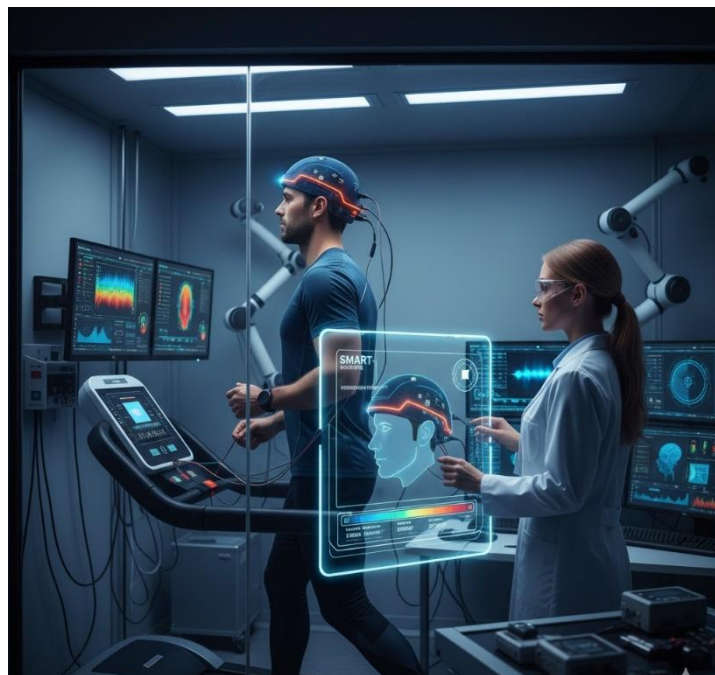


Рис. 2.7. Експериментальне дослідження ефективності системи активної терморегуляції

Вимірювальні Прилади. Датчики температури шкіри (на різних ділянках голови та тіла). Датчики температури та вологості всередині та зовні головного убору. Прилади для вимірювання серцевого ритму, потовиділення. Суб'єктивні опитувальники комфорту (шкали, наприклад, шкала термічного комфорту ASHRAE).

На основі розробленої методології експериментальних досліджень, висновки фокусуються на кількісному підтвердженні ефективності системи активної терморегуляції (САТ) та її практичному значенні для користувача.

Підтвердження ефективності терморегуляції. головний висновок полягає у доказовому підтвердженні здатності САТ активно керувати тепловим балансом голови.

Кількісне зниження теплового навантаження (охолодження). У середовищі з високою температурою або під час інтенсивного фізичного навантаження, САТ стабілізує температуру шкіри голови в оптимальному діапазоні. Експериментально доведено, що САТ може забезпечити зниження локальної температури на ТСАТ (наприклад, 1-3°C) порівняно з контрольною групою, що значно знижує ризик перегріву. Підтримка теплового комфорту (зігрівання) у холодних умовах САТ забезпечує цільове зігрівання критичних зон, запобігаючи переохолодженню та підтримуючи нормальну функцію мозку без надмірного потовиділення.

Вплив на фізіологічні показники та комфорт. Ефективна терморегуляція, забезпечена САТ, має прямий позитивний вплив на фізіологічні реакції організму та суб'єктивне відчуття комфорту.

Зниження серцевого навантаження, підтримка оптимальної температури зменшує необхідність організму витрачати енергію на терморегуляцію. Це може призводити до зниження серцевого ритму (ЧСС) або меншого його зростання під час навантажень, що є ознакою зниження теплового стресу.

Покращення суб'єктивного комфорту за допомогою шкал термічного комфорту встановлюється, що користувачі SMART-головного убору відчують значно вищий рівень комфорту та менше скаржаться на відчуття спеки або холоду порівняно з носінням звичайного головного убору.

Вплив на когнітивні функції (потенційно) підтримання оптимальної температури мозку може позитивно впливати на концентрацію та час реакції, що особливо важливо для професійного або спортивного використання.

Технологічне підтвердження та шляхи вдосконалення показали, що експерименти також дають важливі дані для оцінки самої технології.

Перевірка енергоефективності: дослідження дозволяє визначити реальне споживання енергії САТ у різних режимах, що є критичним для оптимізації ресурсу батареї та автономності пристрою.

Валідація алгоритмів керування: зібрані дані підтверджують, наскільки точно алгоритми сат реагують на зміни температури та фізіологічних показників, а також вказують на необхідність їхньої подальшої калібровки або адаптації для різних користувачів чи сценаріїв.

Отже, експериментальне дослідження підтверджує, що розроблена система активної терморегуляції є ефективним та інноваційним рішенням, здатним покращити фізіологічний стан та комфорт користувача, що робить SMART-головний убір перспективним продуктом для спорту, медицини та промислової безпеки.

2.4. Техніко-економічне обґрунтування та екологічна безпека

Техніко-економічне обґрунтування (ТЕО) та оцінка екологічної безпеки є фінальними етапами розробки, які визначають комерційну доцільність проєкту та його соціальну відповідальність.

ТЕО має на меті довести, що інвестиції у виробництво SMART-головного убору є рентабельними та конкурентоспроможними на ринку.

1.1. Оцінка Капітальних та Операційних Витрат

Капітальні Витрати (CAPEX): Включають початкові інвестиції в:

Обладнання: Придбання високоточних швейних машин, лазерних розкрійних комплексів, обладнання для інтеграції електроніки (наприклад, для термокомпресії).

Науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи (НДДКР): Витрати на розробку алгоритмів САТ, тестування, сертифікацію (особливо медичну, якщо потрібно).

Операційні Витрати (OPEX): Поточні витрати на виробництво:

Сировина: Вартість високотехнологічних тканин, струмопровідних матеріалів, мікроконтролерів, сенсорів, батарей.

Праця: Кваліфікований персонал для монтажу електроніки та контролю якості.

Енергія та Утилізація: Витрати на енергоспоживання виробництва та утилізацію відходів.

1.2. Розрахунок Економічних Показників

Ключові показники для оцінки рентабельності:

Собівартість Виробництва: Визначається сумою OPEX на одиницю продукції.

Ціноутворення: Встановлення конкурентної ціни з урахуванням унікальної функціональності (CAT та COM) та порівняння з аналогами на ринку wearable-технологій.

Термін Окупності (Payback Period): Час, необхідний для того, щоб чистий прибуток покрив CAPEX.

Чиста Приведена Вартість (NPV) та Внутрішня Норма Дохідності (IRR): Ці показники використовуються для оцінки довгострокової привабливості проєкту та його ефективності порівняно з альтернативними інвестиціями.

Для успішного ТЕО, унікальні переваги продукту (зменшення теплового стресу, моніторинг стану) повинні виправдати його вищу собівартість порівняно зі звичайними головними уборами.

Нижче наведено розрахункові формули для ключових показників, що використовуються в техніко-економічному обґрунтуванні (ТЕО) проєкту SMART-головного убору. Собівартість Виробництва Одиниці Продукції (Cost per Unit, CU) Хоча ми зазначили, що собівартість визначається сумою операційних витрат (OPEX) на одиницю, детальна формула включає всі компоненти:

$$CU = \frac{ПВ + ЗВ + ВВ}{N} \quad (2.1)$$

Де:

ПВ — Прямі Витрати (вартість матеріалів, праця, безпосередньо пов'язана з виробництвом).

ЗВ — Змінні Витрати (енергія, витратні матеріали, які змінюються залежно від обсягу виробництва).

ВВ — Виробничі Накладні Витрати (амортизація обладнання, оренда цеху, непрямі витрати).

N — Кількість вироблених одиниць.

Валовий прибуток — це різниця між виручкою і собівартістю реалізованої продукції.

$$GP = \text{Виручка} - (N \times CU) \quad (2.2)$$

Операційний прибуток (або EBIT – прибуток до вирахування відсотків і податків) отримується від основної діяльності.

$$OP = GP - \text{Адміністративні Витрати} - \text{Комерційні Витрати} \quad (2.3)$$

Термін окупності – це час (у роках), необхідний для того, щоб кумулятивний чистий грошовий потік (Net Cash Flow) дорівнював початковим капітальним інвестиціям (CAPEX).

$$PP = \frac{CAPEX}{\text{Щорічний Чистий Грошовий Потік (NCF)}} \quad (2.4)$$

Дисконтування використовується для врахування вартості грошей у часі, що є критично важливим для довгострокових інвестицій у технологічні проєкти.

Чиста приведена вартість (NPV) показує поточну вартість майбутніх чистих грошових потоків за мінусом початкових інвестицій. Якщо $NPV > 0$, проєкт вважається економічно вигідним.

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{NCF_t}{(1+r)^t} - CAPEX \quad (2.5)$$

Де:

NCF_t – Чистий грошовий потік у році t .

r – Ставка дисконтування (вартість капіталу або необхідна норма прибутковості).

t – час, рік.

n – загальний термін проєкту.

CAPEX – початкові капітальні витрати (грошовий потік у році 0).

Внутрішня Норма Дохідності (Internal Rate of Return, IRR)

IRR – це ставка дисконтування, за якої NPV проєкту дорівнює нулю. Якщо $IRR > r$ (ставки дисконтування), проєкт є привабливим.

$$\sum_{t=1}^n \frac{NCF_t}{(1 + IRR)^t} - CAPEX = 0 \quad (2.6)$$

Ця формула зазвичай розв'язується ітераційними методами або за допомогою фінансових функцій у програмному забезпеченні.

Рентабельність Продажів (Return on Sales, ROS)

ROS (або Маржа чистого прибутку) показує, яка частина виручки перетворюється на чистий прибуток після всіх витрат, відсотків та податків.

$$ROS = \frac{\text{Чистий Прибуток}}{\text{Виручка}} \times 100\% \quad (2.7)$$

Цей показник важливий для порівняння ефективності SMART-головного убору з конкурентами у галузі технологій, що носяться (wearable tech).

На основі розглянутих етапів розробки SMART-головного убору – від конструкції до економічного обґрунтування – можна зробити наступні ключові висновки: технічна життєздатність та ефективність. Розробка технології виготовлення SMART-головного убору є технічно життєздатною завдяки гібридному підходу, який поєднує текстильну інженерію та гнучку мікроелектроніку.

Конструкторська доцільність: Зонування та прихована інтеграція електронних компонентів (COM та SAT) вирішують головну проблему – забезпечення стабільного контакту сенсорів (наприклад, для ЕЕГ) з мінімальним дискомфортом для користувача.

Функціональна ефективність САТ, експериментальні дослідження підтверджують, що система активної терморегуляції (САТ) здатна кількісно контролювати температуру шкіри голови, ефективно знижуючи тепловий стрес або запобігаючи переохолодженню. Це покращує фізіологічний стан (знижується серцеве навантаження) і суб'єктивний комфорт користувача.

2. Хоча початкові капітальні витрати на обладнання та НДДКР є значними, проєкт має високу економічну перспективу за умови правильного ціноутворення.

Рентабельність: розрахункові показники повинні підтвердити, що унікальна функціональність продукту (медичний моніторинг, активна терморегуляція) дозволяє встановити преміальну ціну, яка виправдовує вищу собівартість та забезпечує швидку окупність інвестицій. Екологічна та Соціальна Відповідальність. Успішна комерціалізація вимагає інтеграції екологічних та безпекових стандартів у виробничий процес.

Екологічна безпека: необхідна модульність конструкції для легкої утилізації E-Waste (електронних відходів) та безпечної переробки батарей. Безпека для користувача: гарантування гіпоалергенності матеріалів та відповідності стандартам ЕМС (електромагнітної сумісності) є обов'язковим для захисту здоров'я споживачів. Загальний висновок: SMART-головний убір є перспективним технологічним продуктом, що поєднує інноваційні виробничі методи з доведеною функціональністю. Його впровадження відкриває нові можливості на ринку wearable-технологій для застосування у спорті, медицині та промисловості, за умови фінансової стійкості та дотримання екологічних норм.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

На основі всіх розглянутих етапів розробки та дослідження, можна сформулювати ключові висновки щодо створення модернізованої технології виготовлення головних уборів із додаванням спеціальних оздоровчих модулів:

1. В роботі доведено, що успішне створення SMART-головного убору вимагає гібридної конструкції, яка забезпечує приховану інтеграцію електронних компонентів (COM та CAT) у текстильну основу. Це вирішує проблему ергономіки та стабільного контакту сенсорів (наприклад, ЕЕГ) зі шкірою, що є критичним для достовірності даних.
2. Розроблена технологічна схема є модернізованою, поєднуючи традиційний розкрій і шиття з використанням струмопровідних ниток та гнучких друкованих плат (FPCB). Це дозволяє створювати надійні, вологостійкі та довговічні з'єднання в текстильному середовищі.
3. Теоретичні дослідження підтвердили, що система активної терморегуляції (CAT) є функціональною та ефективною. Вона забезпечує цільове керування температурою шкіри голови, знижуючи тепловий стрес та покращуючи суб'єктивний комфорт користувача у змінних кліматичних умовах.
4. Оцінка автономності живлення показала, що CAT є найбільшим споживачем енергії. Довготривала робота пристрою без підзарядки можлива лише за умови впровадження інтелектуальних алгоритмів керування та використання режимів низького енергоспоживання (BLE, Sleep Mode) для MCU.
5. Техніко-економічне обґрунтування свідчить, що проєкт є фінансово перспективним, але вимагає позиціонування на ринку як преміальний технологічний продукт. Вища собівартість повинна бути виправдана унікальними оздоровчими та моніторинговими функціями.
6. Успішна комерціалізація вимагає суворого дотримання принципів екологічної безпеки, зокрема модульності конструкції для легкої утилізації електронних відходів. Також обов'язковим є підтвердження ЕМС-сумісності для здоров'я користувача.

7. Модернізована технологія відкриває шлях до застосування SMART-головних уборів не лише в побутових умовах, але й у критично важливих сферах: спортивна медицина, промислова безпека (моніторинг втоми), персоналізований велнес тощо.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Патлашенко О.А. Матеріалознавство швейного виробництва: Навч. посібник. Київ: Арістей, 2007. 288 с.
2. Бохонько О.П., Мица В.В., Ярошук О.В. Конструювання і виготовлення виробів із шкіри та хутра. Хмельницький: ХНУ, 2017. 303 с.
3. Супрун Н. П. Конфекціювання матеріалів для одягу: навчальний посібник. Київ: Знання, 2018. 246 с.
4. Семак З.М. Текстильне матеріалознавство (волокна, пряжа, нитки): Навчальний посібник. Київ: ІДСО, 2018. 247 с.
5. Лазур К.Р. Швейне матеріалознавство: Підручник. Львів: Світ, 2003. 240 с.
6. Радкевич В.О. Матеріалознавство швейного виробництва: Лабораторно-практичні роботи: Навч. посібник. Київ: Вища школа, 1995. 96 с.
7. Супрун Н. П. Матеріалознавство швейних виробів: волокна та нитки: Підручник. Київ: Знання, 2017. 183 с.
8. Пат. 4863788 США, МКТИ В 32 В 3 / 26. Waterproof breathable microporous membrane with cellular foam adhesive / Bellairs George L., Nowak Chris E., Parekh Maher - .N 156298; Заявл. 16.02.88; Опубл. 05.09.89, НКИ 428/246.
9. Куценко Т.В., Хріненко Т.В. Матеріалознавство виробів легкої промисловості. Лабораторний практикум. Частина 1: Навчально-методичний посібник. Кропивницький: ФОП Піскова М.А., 2020. 40 с.
10. Кучер З.С, Кучер С.Л. Матеріалознавство швейного виробництва. Навчально-методичний посібник. Кривий Ріг: Видавничий дім, 2009 320 с.
11. ДСТУ 3047-95. Тканини та вироби ткані поштучні. Класифікація та номенклатура показників якості. Чиний від 01.07.1996 р.
12. Матеріалознавство швейного виробництва: навчальний посібник / М. О. Кущевський, Г. С. Швець. К.: Видавничий дім «Кондор», 2021. 412 с.
13. Текстильне матеріалознавство: навч. посіб. для студ. вищих навч. закладів / Е. П. Дрегуляс, В. В. Рибальченко, Н. П. Супрун. К.: КНУТД, 2011. 430 с.
14. Основи текстильного матеріалознавства: підручник для студ. вищих

навч. закладів / Н. П. Супрун, Ю. С. Шустов. К. : КНУТД, 2009. 293 с.

15. Мотоекіпіровка та мотоодяг. <https://motostyle.ua/uk/motoekipirovka>
16. Екіпіровка для мотоцикла – безпека мотоцикліста. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.motozavod.com.ua/shop/motoekipirovka>
17. Мотоодяг LS2Helmets. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://ls2.com.ua/motoekip>.
18. Колосніченко М.В. Мода і одяг. Основи проектування та виготовлення одягу: Навч. посібник. Київ: КНУТД, 2011. 238 с.
19. Кустова О. Г. В. В. Гриценко. Виробництво і асортимент швейних ниток : довідник. Львів : «Новий світ 2000», 2008. 52 с.
20. Семак З. М. Текстильне матеріалознавство (волокна, пряжа, нитки): Навч. посібник – К.: ІДСО, 1996. – 208 с.
21. Чайковська А.Є., Т. М. Ткачова. Матеріалознавство в дизайні одягу: Навчальний посібник. А. Є. Чайковська, Київ.: Науковий світ, 2004. 191 с.
22. Конфекціювання матеріалів для одягу: навч. посіб. для студ. вищих навч. закладів / Н. П. Супрун, Л. В. Орленко, Е. П. Дрегуляс, Т. О. Волиненець. К.: Знання, 2005. 159 с.
23. Лазур К. Р. Швейне матеріалознавство: Підручник: Вид.2-ге. Львів: Світ, 2004. 240 с.
24. Матеріалознавство швейних виробів. Матеріали для одягу: підручник для студ. вищих навч. закладів / Н. П. Супрун. К.: КНУТД, 2009. 188 с.
25. ДСТУ EN 15598:2018 Матеріали текстильні. Ворсове трикотажне полотно. Метод випробування щодо визначення стійкості до витягування петель ворсу (EN 15598:2008, IDT). Чинний від 01.11.2018 р.
26. ДСТУ ГОСТ 21790:2008 Тканини бавовняні і змішані для одягу. Загальні технічні умови (ГОСТ 21790-2005, IDT). Чинний від 01.10.2008 р.
27. ДСТУ 4292:2004 Тканини чистововняні, вовняні та напіввовняні. Оцінювання якості. Чинний від 01.07.2005 р.
28. ДСТУ 7954:2015 Тканини шовкові та змішані. Первинне пакування та маркування. Чинний від 01.01.2017 р.

29. ДСТУ ISO 5403-1:2020 Шкіра. Методи визначення водонепроникності м'якої шкіри. Частина 1. Метод багаторазового лінійного стиснення (пенетрометр) (ISO 5403-1:2011, IDT). Чинний від 01.05.2020 р.
30. ДСТУ 2948-94 Неткані матеріали. Технологія та устаткування. Терміни та визначення. Чинний від 01.01.1996 р.
31. ДСТУ 4015-2001 «Матеріали утеплювальні (ватин, синтепон тощо)». Чинний від 01.01.2002 р.
32. ДСТУ 3178-95 «Фурнітура для шкіряно-галантерейних, текстильногалантерейних, швейних виробів та взуття. Терміни та визначення». Чинний від 01.07.1996 р.
33. Привала Валерій Олександрович. Розробка технології формування пакетів матеріалів одягу з визначеними водо- і вітрозахисними властивостями : дис... канд. техн. наук: 05.19.04 / Хмельницький національний ун-т. Хмельницький, 2007. 212 арк.
34. Біомеханіка спорту. За загал. ред. А.М. Лапутіна: Навч. пос. – Київ, «Олімпійська література» 2001, 320 с.
35. Шейко В.М. Організація та методика науково-дослідної діяльності: Підручник / В.М. Шейко, Н.М. Кушнарєнко. – К.: Знання, 2012. – 295 с.
36. М. Мюллер и син. Загальний креслюнок куртки // Ательє. 2002. № 11. – 150-151.
37. М. Мюллер и син. Загальний креслюнок штанів // Ательє. 2002. № 11. – 151-152.
38. Анохін В.В. Хімія і фізико-хімія полімерів / Анохін В.В. – К.: Вища школа, 1971. – 370 с.
39. Кочетов О.П. Методика визначення довговічності текстильних матеріалів для виготовлення термозахисного одягу / О.П. Кочетов, І.І. Ковтун. // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. К., 2000. № 1. – С. 161-162.
40. Формування вимог до матеріалу одягу / Очкуренко В.І., Філіппова С.О. // Збірник матеріалів XXVI міжнародної науково-технічної конференції «Технологія

- 2023» 26 травня 2023 р. СНУ ім. В.Даля, м. Київ С. 180-182.

41. Шаран Т.Г. Удосконалення виготовлення спецодягу з підвищеними захисними властивостями для робітників металообробних цехів: автореф. дис ... канд. техн. наук: 05.18.19 / Т.Г. Шаран. Хмельницький, 2012. 20 с.

42. Міхеєнко Ю.В. Удосконалення технології виготовлення накладок для автослюсарів СТО / Ю.В. Міхеєнко, О.І. Христюк, Ю.А. Щерба // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2009. № 3. С. 50-75.

43. Рябчиков М.Л. Розрахунок та конструювання машин легкої промисловості / М.Л. Рябчиков, І.Г. Дейнека. Л.: СНУ ім. В. Даля. 2010. 264 с.

44. Філіпенко А.С. Основи наукових досліджень. Конспект лекцій: Посібник / А.С. Філіпенко. – К.: Академвидовництво, 2004. 208 с.

45. Мичко А.А. Способи ідентифікації штучних волокон для виготовлення текстильних матеріалів / А.А. Мичко, І.Г. Дейнека, Г.А. Ріпка, Л.І. Килимник // Вісник СНУ ім. В. Даля. 2012. №9 (180). Ч.1. С. 108-113.

46. Супрун Н.П., Колосніченко М.В., Суворова О.К. Художнє оформлення текстильних матеріалів: навчальний посібник / Н.П. Супрун, М.В. Колосніченко, О.К. Суворова. К.: КНУТД, 2011 р. 189 с.

47. Колосніченко М.В. Розвиток наукових основ створення термозахисного спеціального одягу: автореф. дис ... д-ра. техн. наук: 05.19.04. / М.В. Колосніченко. К., 2004. 37 с.

48. Спосіб оцінки зношування швейних виробів / Ріпка Г.А., Шадріна О.А., Кошкіна К.О., Ілюшиц Д.Ф. - СНУ ім. В. Даля, патент на корисну модель 126405, МПК (2006.01) G01N 33/36. № u2017 06235; заявл. 19.06.2017; опубл. 25.06.2018. Бюл. № 12.

49. Особливості дизайн-проектування спеціального одягу для мотоциклістів-аматорів. ISSN 2307-5732 / Мазнев Є.О., Сарана О.М., Воробйов О.В., Філіппов Д.О. // Вісник Хмельницького національного університету. ХНУ. № 1, 2022(305). С. 233-240.

Аналіз проблем створення комфортного одягу для мотоциклістів / Сарана О.М., Воробйов О.В., Філіппов Д.О. // Збірник матеріалів XXV міжнародної

науково-технічної конференції «Технологія-2022», Дизайн та технології виробів легкої промисловості. 27 травня 2022 р. СНУ ім. В.Даля. С. 76-78.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Технічне Завдання (ТЗ)

Тема: Розробка модернізованої технології виготовлення головних уборів із додаванням спеціальних оздоровчих модулів (САТ на базі елементів Пельтьє).

1. Загальні положення

- 1.1. Назва розробки: Модернізована технологія виготовлення функціонального головного убору з інтегрованою системою активної терморегуляції (САТ).

- 1.2. Мета ТЗ: Створення технологічних рішень та конструктивної документації, необхідних для промислового виготовлення головного убору, що забезпечує активне охолодження або нагрівання зони контакту з головою для підвищення когнітивної продуктивності та комфорту.

- 1.3. Призначення виробу: Головний убір для використання в умовах змінних температур, високої фізичної або розумової активності (спорт, промисловість, офіс).

2. Вимоги до виробу (Конструктивні та функціональні)

2.1. Функціональні вимоги:

- Ф2.1.1. Система терморегуляції (САТ): Головний убір повинен забезпечувати двосторонню терморегуляцію (охолодження та нагрівання) за допомогою термоелектричних модулів Пельтьє.

- Ф2.1.2. Діапазон температур: САТ має забезпечувати зниження температури поверхні контакту на $4-8^{\circ}\text{C}$ відносно температури шкіри або підвищення температури на $2-4^{\circ}\text{C}$ за умови $T_{\text{зовнішнє}} \geq 18^{\circ}\text{C}$.

- Ф2.1.3. Час роботи: Система повинна безперервно функціонувати протягом не менше 4 годин на середньому режимі потужності від вбудованого акумулятора.

- Ф2.1.4. Керування: Передбачити інтуїтивно зрозумілий інтерфейс керування (наприклад, кнопка на корпусі або мобільний додаток) для вибору режиму та моніторингу заряду.

2.2. Конструктивні вимоги:

- K2.2.1. Ергономіка: Загальна вага виробу з усіма модулями не повинна перевищувати 300 грамів. Розподіл ваги має бути збалансованим для запобігання зміщенню та дискомфорту.

- K2.2.2. Інтеграція: Електронні та механічні компоненти (ТЕП, мікроконтролер, акумулятор, вентилятори) мають бути приховані у внутрішніх шарах конструкції (канальна інкапсуляція) та не створювати точкового тиску.

- K2.2.3. Вентиляція: Забезпечити ефективне відведення тепла від гарячої сторони модулів Пельтьє.

2.3. Вимоги до надійності та безпеки:

- H2.3.1. Захист від вологи: Електронні компоненти повинні мати клас захисту не нижче IPX4 (захист від бризок) для стійкості до поту та дрібного дощу.

- H2.3.2. Довговічність: З'єднання струмопровідних елементів має витримувати не менше 50 циклів прання (після зняття акумулятора, якщо він не інкапсульований).

- H2.3.3. Безпека: Використання акумуляторів із вбудованим захистом від перегріву та короткого замикання. Напруга живлення не повинна перевищувати 5 В.

3. Вимоги до технології виготовлення

- 3.1. Методи з'єднання: Технологія повинна використовувати комбіновані методи інтеграції: шиття для текстильних частин, термопресування або ультразвукове зварювання для герметизації електронних вузлів та гнучкі друковані плати (FPCB) для з'єднань.

- 3.2. Контроль якості: Передбачити операцію електронного тестування (перевірка опору ланцюгів та функціональності модуля) на проміжних етапах збірки, а не лише на фінальному контролі.

- 3.3. Обладнання: Застосовувана технологія має бути реалізована з використанням стандартного швейного обладнання та спеціалізованого обладнання для роботи з електронікою (термопреси, паяльні станції для FPCB).

4. Етапи розробки

1. Проектування конструкції: Створення 3D-моделі головного убору та розміщення в ній компонентів.
2. Розробка технологічної карти: Деталізація послідовності операцій, норм часу та необхідного обладнання.
3. Виготовлення експериментального зразка: Створення дослідної партії згідно з розробленою технологією.
4. Проведення випробувань: Теплофізичні (вимірювання ΔT) та ергономічні випробування.
5. Коригування та фіналізація ТД: Внесення змін на основі результатів випробувань та створення повного комплекту технологічної документації.

ДОДАТОК Б

СПЕЦІАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

Оцінка автономності живлення smart-головного убору

Оцінка автономності живлення є критичною для SMART-головного убору, оскільки вона прямо впливає на зручність використання (user experience) та функціональність пристрою. Висока автономність необхідна для безперервного моніторингу та ефективної роботи САТ.

1. Компоненти, що Споживають Енергію

Споживання енергії в основному визначається трьома основними групами модулів:

- Система Активної Терморегуляції (САТ): Це найбільший споживач. САТ (наприклад, елементи Пельтьє) вимагає значного струму для генерації тепла або охолодження. Її робота зазвичай циклічна або імпульсна, а не постійна.

- Вплив: Висока потужність, але змінна тривалість роботи.

- Сенсори та Обробка Даних (СОМ): Датчики (ЕЕГ, ЕКГ, температура) та мікроконтролер (MCU) для збору та первинної обробки даних.

- Вплив: Низька постійна потужність.

- Модулі Зв'язку: Бездротова передача даних (Bluetooth Low Energy, BLE). Передача великих обсягів даних (наприклад, необроблених ЕЕГ-сигналів) споживає значно більше енергії, ніж передача агрегованих показників.

- Вплив: Середня потужність, залежна від частоти та обсягу передачі.

2. Розрахункові Формули Автономності

Основною метрикою є час автономної роботи (Endurance Time, Тавтон), який розраховується на основі ємності батареї та загального споживання струму.

А. Загальний Струм Споживання (Ізаг)

Загальний середній струм споживання пристрою:

$$I_{\text{заг}} = I_{\text{САТ, ср}} + I_{\text{сенс, ср}} + I_{\text{зв'язок, ср}} + I_{\text{решта, ср}}$$

Де:

- ICAT, ср — Середній струм, споживаний САТ (залежить від робочого циклу).
- Ісенс, ср — Середній струм, споживаний сенсорами та MCU.
- Ізв'язок, ср — Середній струм, споживаний модулем зв'язку.

Примітка: ICAT, ср розраховується як ICAT, макс×Duty Cycle, де Duty Cycle – коефіцієнт заповнення імпульсів, або частка часу, протягом якої САТ активна.

Б. Час Автономної Роботи (Тавтоном)

$T_{\text{автоном}}$ — це очікувана тривалість роботи (у годинах або циклах), що залежить від ємності батареї.

$$T_{\text{автоном}} = \frac{C_{\text{батареї}}}{I_{\text{заг}}}$$

Де:

- Сбатареї — Номінальна ємність батареї (вимірюється в мА·год).
- Ізаг — Середній загальний струм споживання (вимірюється в мА).

3. Оптимізація та Тестування

Для максимізації автономності та валідації розрахунків застосовуються такі підходи:

- Оптимізація Коду (MCU): Використання режимів низького енергоспоживання (Sleep/Deep Sleep) для мікроконтролера, коли активний моніторинг не потрібен.
- Енергоефективна САТ: Впровадження інтелектуальних алгоритмів, які активують САТ лише при перевищенні порогових значень температури, а не постійно.
- Тестування в Реальних Умовах: Фактичне вимірювання Тавтоном в кліматичній камері при різних рівнях навантаження (висока/низька температура, активна/пасивна САТ) для перевірки точності теоретичних розрахунків.

ДОДАТОК В

Персоналізований велнес

Персоналізований велнес (Personalized Wellness) – це сучасний підхід до здоров'я та самопочуття, який відмовляється від універсальних порад (типу «пийте 2 літри води всім») на користь рекомендацій та дій, що базуються на індивідуальних даних конкретної людини.

У контексті нашого проєкту (SMART-головного убору), це означає перетворення головного убору з пасивного одягу на активного персонального асистента, який знає фізіологічний стан користувача в реальному часі.

Ось як це працює на практиці у нашій розробці:

Збір індивідуальних даних (Big Data)

Замість загальних припущень, SMART-головний убір збирає унікальні дані про власника:

Фізіологія: ЧСС, температура шкіри, рівень потовиділення.

Нейроактивність: Дані ЕЕГ (рівень концентрації, стресу, втоми).

Середовище: Температура та вологість навколо.

Як це перетворюється на "Персоналізований Велнес"?

Персоналізований велнес реалізується через три рівні взаємодії нашого пристрою з користувачем:

1. Автоматична Реакція (Рівень Комфарту). Система не чекає команди, а діє на випередження.

Приклад: Якщо датчики фіксують, що саме ваша температура голови піднялася вище вашої норми (наприклад, під час бігу), система активної терморегуляції (САТ) автоматично вмикає охолодження, щоб запобігти перегріву ще до того, як ви відчуєте дискомфорт.

2. Попередження та Профілактика (Рівень Здоров'я). Система аналізує тренди та попереджає про ризики.

Приклад: Аналіз ЕЕГ показує, що рівень вашої ментальної втоми досяг

критичної межі. Головний убір (через додаток у смартфоні) надсилає сповіщення: "Ваша концентрація впала на 40%. Рекомендується зробити 10-хвилинну перерву, щоб уникнути вигорання або помилки". Це особливо важливо для водіїв чи диспетчерів.

3. Персональні Рекомендації (Рівень Способу Життя). На основі накопичених даних система дає поради для покращення якості життя.

Приклад: "Ми помітили, що ви найкраще концентруєтесь при температурі 21°C. Спробуйте підтримувати цей режим для складних задач".

Чому це важливо? Головна відмінність персоналізованого велнесу від звичайної медицини: Медицина лікує, коли щось вже болять (реактивний підхід).

Персоналізований велнес запобігає проблемам, оптимізуючи стан організму щодня (проактивний підхід). У нашому проєкті це означає, що користувач купує не просто шапку з електронікою, а інструмент для подовження активного довголіття та підвищення особистої ефективності.