

# КОМПЕНСАЦІЙНА МОДЕЛЬ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ ДРУКОВАНИХ ТЕКСТИЛЬНИХ СЕНСОРІВ У БАГАТОРІВНЕВИХ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМАХ

**Пановик У.П.**

к.т.н., доцент,

кафедра «Комп'ютерних технологій у видавничо-поліграфічних процесах»,

Національний університет «Львівська політехніка»

ORCID ID: 0000-0002-9663-4328

***Анотація.** Досліджено друковані текстильні сенсори, сформовані методами друкованої електроніки, та особливості обробки їх сигналів у багаторівневих інформаційно-вимірювальних системах. Запропоновано математичну модель формування сигналу з урахуванням параметрів друкованого елемента, механічних деформацій і впливу середовища. Розроблено адаптивний алгоритм обробки сигналу, що забезпечує компенсацію шуму та дрейфу і підвищення точності вимірювань.*

***Ключові слова:** друковані текстильні сенсори, друкована електроніка, обробка сигналів, адаптивна модель, інформаційно-вимірювальні системи, імітаційне моделювання.*

## **Вступ**

Сучасний розвиток інформаційних технологій характеризується інтеграцією цифрових рішень у фізичні об'єкти, що формує концепції інтернету речей (IoT) та кіберфізичних систем. У цьому контексті важливе місце займають носимі технології, які забезпечують безперервний збір, передачу та аналіз даних. Одним із перспективних напрямів є Smart Textile – інтелектуальні текстильні матеріали, здатні виконувати сенсорні функції та взаємодіяти з користувачем. На відміну від традиційних електронних пристроїв, Smart Textile системи передбачають інтеграцію функціональних елементів безпосередньо у структуру матеріалу, що забезпечує гнучкість, ергономічність і можливість роботи в реальному часі. Це відкриває широкі перспективи їх застосування у медичних, спортивних, промислових і безпекових системах.

Ключовим напрямом розвитку Smart Textile систем є перехід від дискретної інтеграції електроніки до формування функціональних структур безпосередньо на текстильних носіях. У цьому контексті важливу роль відіграють технології друкованої електроніки, які забезпечують нанесення провідних і сенсорних елементів на тканину, масштабованість виробництва та створення багатофункціональних сенсорних систем. Разом з тим, залишається низка проблем, пов'язаних із забезпеченням стабільності роботи таких систем у реальних умовах. Основний вплив на характеристики сенсорів мають механічні деформації, температурно-вологісні зміни та нестабільність електричних

контактів. Додаткову складність становить інтеграція даних у інформаційно-вимірювальні системи, що потребує узгодження процесів збору, передачі, обробки та візуалізації інформації.

Сучасні дослідження Smart Textile систем охоплюють розроблення матеріалів, інтеграцію електроніки та створення сенсорних структур у складі носимих систем. Значна частина робіт розглядає електронний текстиль (e-textiles) як багаторівневу систему, що включає волокна, нитки, тканини та інтегровані електронні компоненти [1–3], підкреслюючи роль ієрархічної організації текстильних структур у забезпеченні механічних властивостей і можливості інтеграції функціональних елементів [3]. Окрему увагу приділено інтеграції мікроелектроніки у текстильні середовища, зокрема проблемам надійності контактів і стійкості до деформацій [4, 5]. Показано, що інтерфейс «тканина–електроніка» є критичним елементом, який визначає стабільність передачі сигналу та довговічність системи [4].

Сучасні дослідження значною мірою зосереджені на технологіях друкованої електроніки як основі формування функціональних елементів на текстильних носіях. Розглядаються методи нанесення провідних і сенсорних матеріалів, що забезпечують створення гнучких електричних структур безпосередньо на тканині та можливість масштабування і інтеграції функцій [6, 7]. У дослідженнях текстильних сенсорів особлива увага приділяється пристроям для моніторингу фізіологічних параметрів (температура, тиск, деформації, серцевий ритм) [8, 9]. Сучасні підходи орієнтовані на інтегровані та мультимодальні сенсорні системи, здатні одночасно реєструвати кілька параметрів і працювати в режимі реального часу [10, 11].

Розвиток сенсорних технологій супроводжується формуванням інтегрованих систем моніторингу, у яких текстильні сенсори виступають первинним рівнем збору даних. У таких системах розглядаються питання передачі інформації, взаємодії з мобільними пристроями та інтеграції з цифровими сервісами [9, 11], а також створення інтелектуальних рішень із адаптивною взаємодією з користувачем. Попри значний прогрес, залишаються невирішені проблеми, зокрема обмежена довговічність, нестабільність електричних характеристик у змінних умовах і складність масштабування виробництва [5, 12]. Крім того, більшість підходів зосереджена на окремих компонентах, тоді як питання комплексної інтеграції всіх рівнів системи залишаються недостатньо опрацьованими [1, 6].

Незважаючи на активний розвиток Smart Textile систем, сучасні підходи до їх створення залишаються фрагментованими та орієнтованими переважно на окремі компоненти, тоді як питання їх комплексної інтеграції в межах єдиної інформаційно-вимірювальної системи розглядається недостатньо системно. Властивості текстильного середовища, зокрема гнучкість і чутливість до зовнішніх факторів, зумовлюють нестабільність електричних характеристик сенсорів і зниження точності вимірювань. Додатковою проблемою є відсутність узагальненого підходу до побудови архітектури таких систем, що охоплював би

всі етапи – від формування сенсорних структур до передачі, обробки та візуалізації даних. Це ускладнює створення масштабованих і надійних рішень, що визначає актуальність розроблення комплексного підходу до побудови друкованих текстильних сенсорних систем.

### **Мета та задачі дослідження**

Метою даної роботи є розроблення узагальненого підходу до створення текстильних сенсорних систем на основі технологій друкованої електроніки з їх подальшою інтеграцією в інформаційно-вимірювальні системи.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати аналіз сучасних Smart Textile систем із визначенням основних напрямів їх розвитку та обмежень, дослідити технології друкованої електроніки для формування сенсорних структур на текстильних носіях і особливості інтеграції електронних компонентів у текстильне середовище. Необхідно розробити узагальнену архітектуру друкованої текстильної сенсорної системи з урахуванням багаторівневого функціонування, проаналізувати характеристики сигналів і визначити основні джерела похибок, а також розглянути методи їх обробки та фільтрації. Окрім цього, необхідно обґрунтувати підходи до передачі, обробки та візуалізації даних у складі інформаційно-вимірювальних систем.

### **Основна частина**

Розвиток Smart Textile систем безпосередньо пов'язаний із формуванням нових підходів до організації носимих інформаційно-вимірювальних рішень, орієнтованих на інтеграцію цифрових технологій у повсякденне середовище людини. У цьому контексті ключовою є концепція Smart Body, яка визначає напрям використання текстильних сенсорних систем як складової частини комплексних цифрових рішень.

Концепція Smart Body формується на перетині розвитку носимих електронних систем, інтернету речей та сенсорних технологій і передбачає інтеграцію функціональних елементів безпосередньо у середовище взаємодії з людиною. У межах цієї концепції тіло людини розглядається як платформа для безперервного збору, передачі та інтерпретації даних, що відображають фізіологічний стан, рівень активності та параметри навколишнього середовища.

На відміну від традиційних підходів, де сенсорні пристрої реалізуються у вигляді окремих електронних модулів, концепція Smart Body орієнтована на їх інтеграцію у повсякденні об'єкти, передусім у текстильні вироби. Такий підхід забезпечує природність взаємодії користувача з системою, мінімізацію втручання у його діяльність та можливість тривалого моніторингу без необхідності використання спеціалізованих пристроїв.

Функціональна структура Smart Body систем включає декілька взаємопов'язаних рівнів: сенсорний рівень, на якому здійснюється реєстрація

фізичних або біофізичних параметрів; рівень первинної обробки сигналів, що забезпечує перетворення та підготовку даних; комунікаційний рівень, відповідальний за передачу інформації; а також рівень візуалізації та інтерпретації результатів. Така багаторівнева організація визначає необхідність узгодження різних технологічних компонентів у межах єдиної системи.

Особливе місце в реалізації концепції Smart Body займають текстильні сенсорні системи, які дають можливість поєднати функції носія та вимірювального елемента. Інтеграція сенсорів у текстильні структури відкриває можливості для створення гнучких і адаптивних систем, здатних функціонувати в умовах постійних механічних впливів та змін середовища. При цьому текстиль виступає не лише як пасивна основа, але як активний компонент системи, що впливає на характеристики сигналів та ефективність їх передачі.

Подальший розвиток концепції Smart Body безпосередньо пов'язаний із формуванням понятійного апарату, що описує інтеграцію електронних функцій у текстильні матеріали. У науковій літературі для позначення таких систем використовуються терміни *Smart Textile* та *e-textiles*, які, незважаючи на схожість, відображають різні рівні функціональності та інтеграції.

Під терміном *e-textiles* (electronic textiles) зазвичай розуміють текстильні матеріали, в які інтегровані електронні компоненти або провідні елементи, що забезпечують виконання окремих функцій, таких як передача сигналів, нагрівання або реєстрація параметрів. У цьому випадку текстиль виступає як носій або середовище розміщення електроніки, а функціональність системи визначається переважно характеристиками інтегрованих компонентів. Натомість поняття *Smart Textile* має ширший зміст і охоплює системи, здатні не лише реєструвати сигнали, але й здійснювати їх обробку, адаптацію та взаємодію з користувачем або зовнішніми системами. У таких матеріалах текстильна структура стає активним елементом системи, що бере участь у формуванні, передачі та перетворенні інформації. Таким чином, Smart Textile системи характеризуються наявністю функціональної інтеграції на рівні матеріалу, а не лише на рівні доданих електронних модулів.

Важливою ознакою Smart Textile є рівень інтеграції функціональних елементів, який може реалізовуватися на різних структурних рівнях текстилю: на рівні волокон, ниток, тканин або поверхневих шарів. Залежно від цього виділяють декілька підходів до створення таких систем: інтеграція готових електронних компонентів у текстильну структуру; формування провідних і сенсорних елементів безпосередньо в процесі виготовлення текстилю; а також використання технологій нанесення функціональних матеріалів, зокрема методів друкованої електроніки.

З позиції функціональності Smart Textile системи доцільно розглядати як багаторівневі структури, що включають сенсорний рівень, рівень передачі сигналів та рівень обробки даних. При цьому текстиль може виконувати одночасно декілька ролей: механічного носія, провідного середовища та

сенсорного елемента. Така багатофункціональність відрізняє Smart Textile від традиційних матеріалів і визначає специфіку їх проектування та використання.

Сучасні Smart Textile системи вже реалізовані у вигляді комерційних рішень для моніторингу фізіологічних параметрів і рухової активності, що демонструє можливості інтеграції сенсорів у текстильні вироби. Показовим прикладом є система Hexoskin – «розумний» одяг із вбудованими сенсорами серцевого ритму, дихання та активності, які інтегровані у тканину та працюють разом із електронним модулем обробки і передачі даних до мобільних або хмарних сервісів у режимі реального часу.

Іншим прикладом є система Sensoria, орієнтована на аналіз рухової активності, зокрема параметрів ходи та бігу. Сенсори інтегруються у текстиль (наприклад, шкарпетки) та забезпечують визначення розподілу тиску і характеристик контакту стопи з поверхнею, а обробка даних здійснюється через мобільні додатки. Окрім цього, є рішення для медичного, спортивного та промислового моніторингу, які відрізняються типами сенсорів, способами інтеграції та архітектурою. У більшості випадків застосовується гібридний підхід, коли текстиль виконує сенсорну функцію, а обробка сигналів здійснюється окремим електронним модулем.

Для узагальнення характеристик наявних Smart Textile систем доцільно провести їх порівняння за ключовими параметрами, що визначають ефективність функціонування (табл. 1).

Таблиця 1 – Порівняння сучасних Smart Textile систем

<b>Система</b>	<b>Тип виробу</b>	<b>Вимірювані параметри</b>	<b>Спосіб інтеграції</b>	<b>Обробка даних</b>	<b>Особливості</b>
Hexoskin	Футболка	ЧСС, дихання, активність	Вбудовані сенсори та модуль	Мобільний/хмарний	Безперервний моніторинг
Sensoria	Шкарпетки	Тиск, параметри ходи	Текстильні сенсори та модуль	Мобільний додаток	Аналіз руху
Інші системи	Одяг/аксесуари	Температура, рух, біометрія	Гібридна інтеграція	Зовнішні системи	Залежить від задачі

Аналіз наявних рішень показує, що сучасні Smart Textile системи здебільшого реалізуються як гібридні структури, у яких текстильні сенсори поєднуються з окремими електронними модулями. Такий підхід спрощує реалізацію систем, проте обмежує рівень інтеграції та створює додаткові вимоги до надійності з'єднань між текстильними та електронними компонентами. Крім того, більшість присутніх систем орієнтована на вирішення конкретних прикладних задач і не забезпечує універсального підходу до побудови текстильних сенсорних систем. Це ускладнює їх масштабування та адаптацію до інших сфер застосування.

Незважаючи на активний розвиток Smart Textile систем та наявність комерційно реалізованих рішень, їх широке впровадження обмежується низкою технологічних, конструктивних та експлуатаційних факторів. Аналіз сучасних

систем свідчить про наявність системних обмежень, що виникають на різних рівнях їх побудови – від матеріального до інформаційного.

Однією з основних проблем є нестабільність електричних характеристик текстильних сенсорів, зумовлена гнучкістю, деформацією та неоднорідністю текстильного середовища, а також впливом зовнішніх факторів. Це призводить до зміни параметрів сенсорних елементів, зниження точності вимірювань і ускладнення відтворюваності результатів. Додаткові обмеження пов'язані з надійністю інтерфейсу «тканина–електроніка», який має забезпечувати одночасно електричну провідність і механічну стійкість. Недостатня надійність таких з'єднань може спричинити втрату сигналу та деградацію функціонування системи. Суттєві обмеження пов'язані з технологіями формування функціональних структур на текстильних матеріалах. Властивості текстильних носіїв (пористість, шорсткість, вбирання) впливають на якість нанесення провідних шарів, їх геометрію та електричні характеристики, що визначає ефективність роботи сенсорів. Додатковою проблемою є енергозабезпечення систем, оскільки інтеграція джерел живлення у текстиль ускладнюється вимогами гнучкості, безпеки та зручності. Тому у більшості рішень використовуються зовнішні або знімні модулі, що знижує рівень інтеграції.

На рівні обробки даних і інтеграції в інформаційні системи також спостерігається ряд обмежень. Нестабільність сигналів, наявність шумів та варіацій параметрів сенсорів ускладнюють застосування стандартних методів обробки інформації. Це вимагає використання адаптивних алгоритмів та спеціалізованих підходів до аналізу даних, які враховують специфіку текстильних сенсорних систем.

Результати аналізу сучасних Smart Textile систем показали, що ключовим фактором їх розвитку є можливість інтеграції функціональних елементів безпосередньо у текстильні матеріали. При цьому традиційні підходи до побудови електронних систем, що базуються на використанні дискретних компонентів і жорстких підкладок, є обмеженими з точки зору гнучкості, адаптивності та сумісності з текстильним середовищем. У зв'язку з цим особливого значення набувають технології друкованої електроніки, які забезпечують формування електронних структур шляхом нанесення функціональних матеріалів безпосередньо на поверхню або в структуру текстильного носія. Такий підхід дає змогу перейти від монтажу окремих компонентів до створення інтегрованих функціональних елементів, що є складовою частиною матеріалу.

Основним принципом друкованої електроніки є адитивне формування електронних структур, при якому провідні, напівпровідникові або сенсорні матеріали наносяться у вигляді тонких шарів відповідно до заданої геометрії. Функціональні властивості сформованих елементів визначаються як характеристиками матеріалів, так і параметрами процесу нанесення, включаючи товщину шару, рівномірність покриття та якість адгезії до підкладки.

На відміну від субтрактивних технологій, що передбачають видалення матеріалу для формування структури, друкована електроніка базується на локалізованому додаванні матеріалу лише в необхідних ділянках. Це забезпечує зменшення втрат матеріалів, спрощення технологічного процесу та можливість роботи з гнучкими і пористими носіями, зокрема текстильними.

Технологічний процес друкованої електроніки включає декілька взаємопов'язаних етапів: підготовку текстильного носія, нанесення функціонального матеріалу, його фіксацію (сушіння або полімеризацію) та формування стабільної електронної структури. Кожен із цих етапів має суттєвий вплив на кінцеві характеристики сенсорних елементів, особливо з урахуванням специфіки текстильного середовища (рис. 1).

ПІДГОТОВКА ТЕКСТИЛЬНОГО НОСІЯ	НАНЕСЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО МАТЕРІАЛУ	ФІКСАЦІЯ ТА СТАБІЛІЗАЦІЯ	ФОРМУВАННЯ БАГАТОШАРОВОЇ СТРУКТУРИ
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Очищення поверхні</i></li> <li>• <i>Функція:</i> видалення забруднень, підвищення адгезії матеріалів</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Методи:</i> трафаретний друк (screen printing); струминний друк (inkjet printing); флексографічний друк (flexographic printing)</li> <li>• <i>Функція:</i> формування провідних або сенсорних елементів</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Методи:</i> сушіння; термообробка; УФ-полімеризація</li> <li>• <i>Функція:</i> закріплення матеріалу, формування електричних властивостей</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Операції:</i> нанесення наступних шарів вирівнювання стабілізація</li> <li>• <i>Функція:</i> створення повноцінної електронної структури</li> </ul>

Рисунок 1 – Принцип формування електронних структур методами друкованої електроніки

Важливою особливістю є те, що методи друкованої електроніки базуються на технологічних принципах, близьких до поліграфічного виробництва. Використання процесів нанесення шарів, контроль товщини покриття та формування структур за допомогою друкарських технологій дозволяє розглядати друковану електроніку як розвиток поліграфічних процесів у напрямі створення функціональних матеріалів і електронних систем.

Розглянуті принципи друкованої електроніки реалізуються на практиці за допомогою конкретних технологічних методів нанесення функціональних матеріалів. Саме вибір методу друку визначає точність формування електронних структур, товщину функціональних шарів, а також їх електричні та механічні властивості. У випадку текстильних носіїв цей вибір додатково ускладнюється специфікою поверхні матеріалу, зокрема її пористістю, шорсткістю та здатністю до деформації. Серед найбільш поширених методів друку, що застосовуються у друкованій електроніці для створення текстильних сенсорних систем, виділяють трафаретний, струминний та флексографічний друк (рис. 2). Кожен із цих методів характеризується власними технологічними особливостями, що визначають область його ефективного застосування (табл. 2).

Трафаретний друк (screen printing) є одним із найбільш поширених методів завдяки можливості нанесення товстих шарів функціональних матеріалів із високою концентрацією провідних частинок. Це дає можливість формувати елементи з низьким електричним опором, що є важливим для сенсорних та провідних структур. Крім того, цей метод добре адаптується до текстильних поверхонь, однак обмежується відносно невисокою роздільною здатністю.

Струминний друк (inkjet printing) забезпечує високу точність нанесення матеріалу та можливість формування дрібних геометричних структур без використання друкарських форм. Це робить його придатним для створення складних сенсорних елементів. Водночас ефективність цього методу значною мірою залежить від властивостей чорнил і рівномірності їх розподілу на текстильній поверхні, що може бути обмежуючим фактором.

Флексографічний друк (flexographic printing) орієнтований на високошвидкісне виробництво та добре підходить для масштабованих технологічних процесів. Завдяки використанню гнучких друкарських форм цей метод може застосовуватися для обробки рулонних текстильних матеріалів, що є важливим для промислового виробництва Smart Textile систем. Разом з тим, забезпечення стабільних електричних характеристик потребує точного контролю технологічних параметрів.



Рисунок 2 – Методи друку в друкованій електроніці для текстильних сенсорних систем

Таблиця 2 – Порівняння методів друку в друкованій електроніці для текстильних сенсорних систем

Метод друку	Принцип нанесення	Переваги	Обмеження
<b>Трафаретний (screen printing)</b>	Продавлювання функціонального матеріалу через трафаретну форму	– можливість нанесення товстих шарів – низький електричний опір – технологічна простота	– обмежена роздільна здатність – складність формування дрібних елементів
<b>Струминний (inkjet printing)</b>	Безконтактне нанесення крапель матеріалу через сопла	– висока точність – відсутність друкарських форм – гнучкість у формуванні структур	– високі вимоги до чорнил – нерівномірність на пористих поверхнях
<b>Флексографічний (flexographic printing)</b>	Нанесення матеріалу за допомогою гнучкої друкарської форми (кліше)	– висока швидкість друку – придатність до рулонного виробництва – масштабованість	– складність налаштування процесу – обмежена точність для дрібних структур

Ефективність реалізації розглянутих методів друку в значній мірі визначається властивостями функціональних матеріалів, що використовуються

для формування електронних структур. Якщо технології друку задають геометрію та спосіб нанесення елементів, то саме матеріали визначають їх електричні, механічні та експлуатаційні характеристики. У контексті створення текстильних сенсорних систем це набуває особливого значення, оскільки матеріали мають бути сумісними з гнучкими та деформованими носіями.

Основу друкованої електроніки складають провідні матеріали, які використовуються для формування струмопровідних доріжок, електродів та сенсорних елементів (рис. 3). Найбільш поширеними є металеві чорнила, полімерні провідні композиції та вуглецеві матеріали, кожна з яких має свої особливості застосування. Металеві чорнила, зокрема на основі срібла, забезпечують високий рівень електропровідності та широко застосовуються для формування електричних з'єднань. Вони дають змогу отримувати стабільні провідні структури навіть при відносно невеликій товщині шару. Водночас їх використання обмежується високою вартістю та необхідністю забезпечення відповідних умов фіксації матеріалу.

Полімерні провідні матеріали характеризуються високою гнучкістю та кращою сумісністю з текстильними поверхнями. Вони можуть витримувати механічні деформації без значної втрати провідності, що є критично важливим для Smart Textile систем. Проте їх електропровідність, як правило, є нижчою порівняно з металевими матеріалами. Вуглецеві матеріали, зокрема графен та вуглецеві нанотрубки, поєднують хорошу провідність із механічною гнучкістю та стійкістю до зовнішніх впливів. Це робить їх перспективними для використання у сенсорних структурах, особливо у випадках, коли необхідна висока чутливість до змін параметрів середовища.

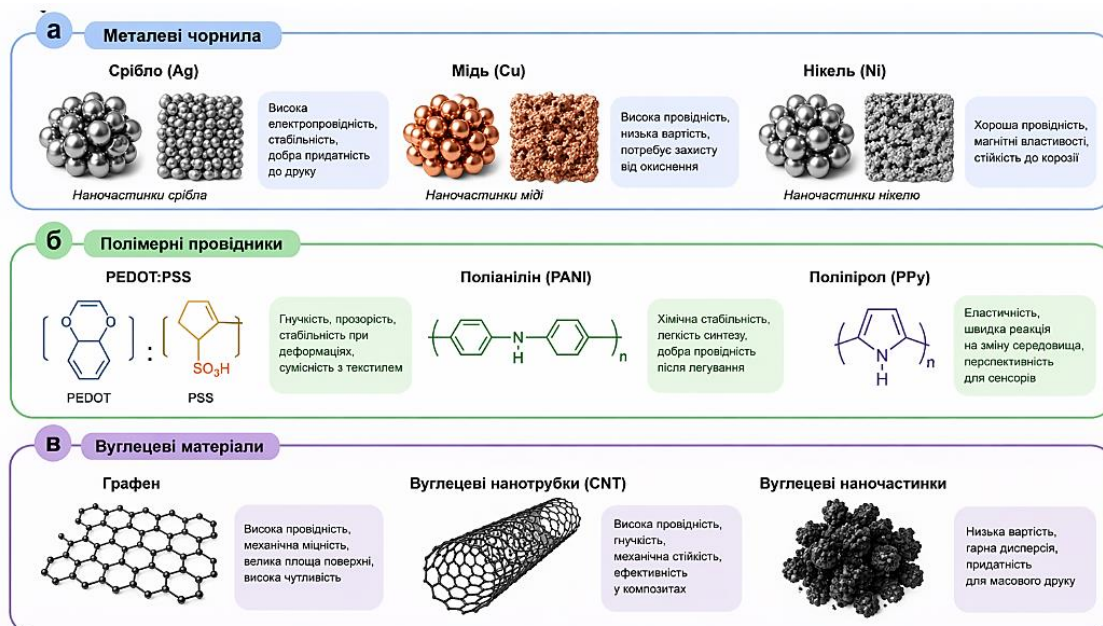


Рисунок 3 – Основні типи провідних матеріалів у друкованій електроніці для текстильних сенсорних систем: а) металеві чорнила; б) полімерні провідники; в) вуглецеві матеріали

Важливим аспектом є також реологічні властивості матеріалів, які визначають можливість їх використання у конкретних методах друку. В'язкість,

поверхневий натяг та здатність до змочування впливають на якість нанесення матеріалу, рівномірність шару та адгезію до текстильного носія. Таким чином, вибір матеріалу тісно пов'язаний із технологією друку і має здійснюватися з урахуванням їх взаємної сумісності (табл. 3).

Таблиця 3 – Характеристики основних провідних матеріалів у друкованій електроніці

Тип матеріалу	Приклади	Електропровідність	Сумісність з текстилем	Особливості
Металеві чорнила	Срібло (Ag), мідь (Cu)	Висока	Середня	Висока провідність, стабільність
Полімерні провідники	PEDOT:PSS	Середня	Висока	Гнучкість, стабільність при деформаціях
Вуглецеві матеріали	Графен, CNT	Середня/висока	Висока	Висока чутливість, перспективність

Розглянуті методи друку та провідні матеріали визначають технологічну основу створення електронних елементів, однак їх функціональне призначення реалізується лише на рівні сенсорних структур. Саме на цьому етапі відбувається перехід від пасивних провідних елементів до функціональних компонентів, здатних реагувати на зовнішні впливи та генерувати електричні сигнали.

Формування сенсорних структур у текстильних матеріалах базується на створенні конфігурацій провідних або функціональних шарів, параметри яких змінюються під дією фізичних величин. До таких величин належать механічні деформації, тиск, температура, вологість та інші фактори, характерні для середовища експлуатації Smart Textile систем. У більшості випадків сенсорна функція реалізується через зміну електричних характеристик – опору, ємності або провідності. Найбільш поширеним є підхід до формування резистивних сенсорів, у яких провідні елементи створюються шляхом нанесення функціональних матеріалів на текстильну основу відповідно до заданої геометрії. Електричний опір такого елемента визначається співвідношенням:

$$R = \rho \cdot L / A, \quad (1)$$

де  $R$  – електричний опір;  
 $\rho$  – питомий опір матеріалу;  
 $L$  – довжина провідного елемента;  
 $A$  – площа його поперечного перерізу.

У процесі деформації текстильного матеріалу змінюються геометричні параметри провідного шару або структура контактів між частинками матеріалу, що призводить до зміни опору. Відносна зміна опору може бути описана як:

$$\Delta R / R = k \cdot \varepsilon, \quad (2)$$

де  $\varepsilon$  – відносна деформація;  
 $k$  – коефіцієнт чутливості сенсора.

Така залежність лежить в основі роботи сенсорів деформації та тиску.

Іншим поширеним типом є ємнісні сенсорні структури, що формуються у вигляді багат шарових систем із двома провідними електродами та діелектричним шаром між ними. Ємність такої структури визначається співвідношенням:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r S / d, \quad (3)$$

де  $C$  – ємність;  
 $\varepsilon_0$  – електрична стала;  
 $\varepsilon_r$  – відносна діелектрична проникність середовища;  
 $S$  – площа електродів;  
 $d$  – відстань між ними.

Під дією зовнішнього тиску або деформації текстильного матеріалу відбувається зміна відстані між електродами або властивостей діелектрика, що призводить до зміни ємності. Це дає можливість використовувати такі структури для реєстрації дотику, тиску або руху.

Окрему групу становлять сенсорні структури, функціонування яких базується на зміні електропровідності матеріалу під впливом зовнішніх факторів. У цьому випадку залежність може бути узагальнено подана як:

$$\sigma = f(X), \quad (4)$$

де  $\sigma$  – електропровідність;  
 $X$  – зовнішній вплив (вологість, температура, концентрація газів тощо).

Такі сенсори широко застосовуються для моніторингу параметрів навколишнього середовища.

Особливістю формування сенсорних структур у текстильних системах є необхідність врахування механічної поведінки носія. Деформації, згинання та розтягнення можуть впливати як на геометрію провідних елементів, так і на внутрішню структуру матеріалу, що визначає стабільність сенсорних характеристик. Тому при проектуванні сенсорів необхідно забезпечити баланс між електричними властивостями, чутливістю та механічною стійкістю.

Таким чином, формування сенсорних структур у друкованій електроніці є процесом, що поєднує технологічні можливості методів друку, властивості матеріалів та фізичні принципи перетворення сигналів. Отримані структури виступають базовими елементами інформаційно-вимірвальних систем, забезпечуючи перехід від фізичного впливу до електричного сигналу (рис. 4).

Для узагальнення особливостей формування сенсорних структур доцільно представити відповідність між типом сенсора, фізичним впливом та електричними параметрами, що змінюються у процесі функціонування (табл. 4).

Розглянуті принципи формування сенсорних структур та їх математичний опис базуються на припущенні про стабільність геометричних і фізичних параметрів системи. Проте у випадку текстильних носіїв ці припущення не виконуються в повній мірі, що обумовлює суттєвий вплив середовища на функціональні характеристики сенсорів.

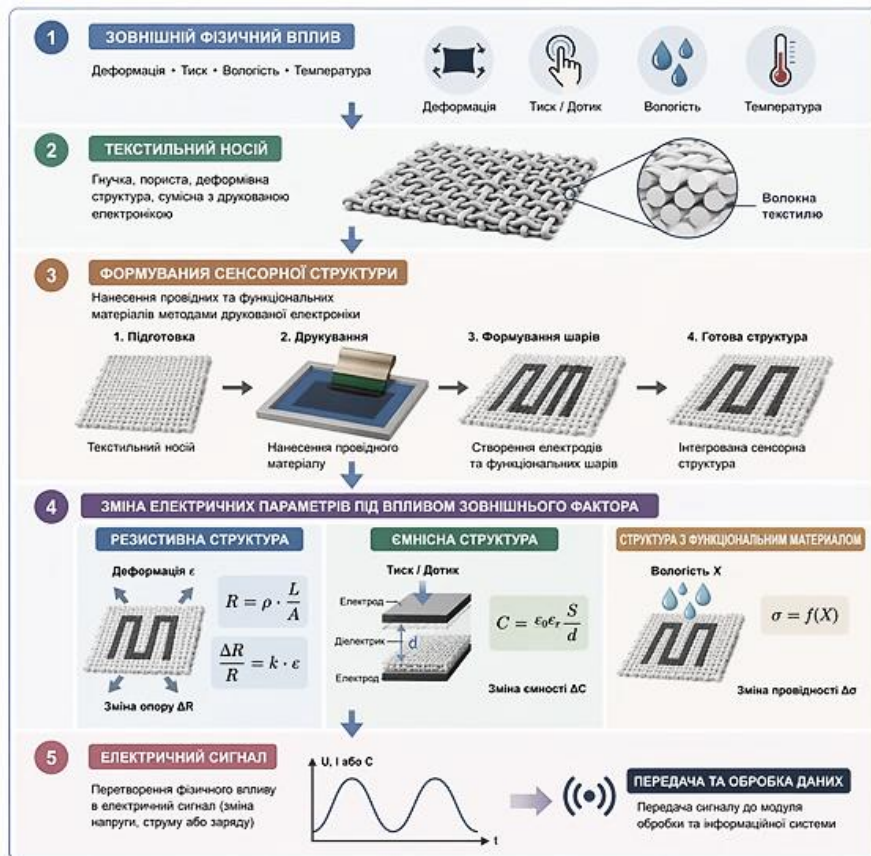


Рисунок 4 – Принципи формування друкованих сенсорних структур у текстильних системах

Таблиця 4 – Відповідність типу сенсорної структури, електричних параметрів та функціонального призначення

Тип сенсорної структури	Фізичний вплив	Змінюваний параметр	Типова конфігурація	Область застосування
Резистивна (strain/pressure)	Деформація, тиск	Опір $R$	Провідні доріжки, сітки	Моніторинг руху, біомеханіка
Ємнісна	Тиск, дотик	Ємність $C$	Два електроди та діелектрик	Сенсорні поверхні, wearable UI
П'єзорезистивна	Деформація	Опір $R$ (нелінійна зміна)	Композитні матеріали	Високочутливі датчики тиску
Гігроскопічна	Вологість	Провідність $\sigma$	Полімерні/вуглецеві шари	Контроль мікроклімату
Температурна	Температура	Опір $R(T)$	Металеві/полімерні плівки	Біомоніторинг, медицина

Текстильні матеріали характеризуються складною внутрішньою структурою, що включає волокна, між волоконні пори та неоднорідні контактні області. Така структура зумовлює нестабільність електричних параметрів провідних і сенсорних елементів, особливо при зміні умов експлуатації. У результаті реальні залежності, наведені у попередньому підпункті, набувають вигляду функцій з додатковими змінними:

$$R = f(\varepsilon, T, H, t), C = f(d, \varepsilon_r, P, H), \quad (5)$$

де  $T$  – температура;  
 $H$  – вологість;  
 $P$  – тиск;  
 $t$  – час експлуатації.

Одним із основних факторів є механічна деформація текстильного носія. Розтягнення, згинання та скручування призводять до зміни геометрії провідних елементів, а також до перебудови контактів між частинками провідного матеріалу. Це викликає не лише зміну електричного опору, але й появу гістерезису та нелінійності у характеристиках сенсора.

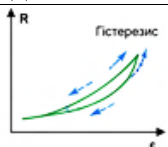
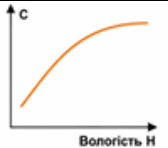
Вологість є ще одним критичним фактором, що впливає на роботу текстильних сенсорних систем. Поглинання вологи текстильними волокнами змінює їх діелектричні властивості, що особливо важливо для ємнісних сенсорів. Крім того, волога може впливати на провідність матеріалів, що призводить до дрейфу сигналу. Температурні зміни впливають як на електропровідність матеріалів, так і на механічні властивості текстильного носія. У результаті змінюються параметри сенсорних структур, що може призводити до похибок вимірювання. Для резистивних сенсорів це може бути описано як:

$$R(T) = R_0(1 + \alpha T), \quad (6)$$

де  $\alpha$  – температурний коефіцієнт опору.

Окрім зовнішніх факторів, значний вплив має часовий аспект експлуатації. Повторні механічні навантаження, старіння матеріалів та деградація провідних шарів призводять до поступової зміни характеристик сенсорів. Це обумовлює необхідність врахування фактору стабільності та довговічності при проектуванні систем (табл. 5).

Таблиця 5 – Основні фактори впливу текстильного середовища на друковані сенсорні характеристики

Фактор	Вплив на структуру	Вплив на параметри	Наслідок
Деформація	Зміна геометрії та контактів провідних елементів	Нелінійна зміна опору: $\Delta R$ , $\Delta C$	Нелінійність, гістерезис 
Вологість	Зміна діелектричних властивостей та провідності	Збільшення ємності: $\Delta C$ , $\Delta \sigma$	Дрейф сигналу 
Температура	Зміна електропровідності матеріалу	Зростання опору з температурою $R(T)$	Похибки вимірювання 
Час експлуатації (старіння)	Деградація матеріалу та зміна характеристик	Дрейф параметрів у часі	Зниження стабільності 

Друкована текстильна сенсорна система являє собою багаторівневу структуру, що забезпечує повний цикл обробки інформації – від реєстрації фізичного впливу до формування даних, придатних для аналізу та візуалізації. Така система поєднує у собі сенсорні елементи, електронні модулі, канали передачі даних та програмні компоненти (табл. 6). На базовому рівні структура системи включає текстильний сенсорний шар, який інтегрується безпосередньо у матеріал і виконує функцію первинного перетворення фізичних величин у електричні сигнали. Цей рівень характеризується високою чутливістю до зовнішніх впливів, але водночас є найбільш нестабільним через вплив текстильного середовища.

Таблиця 6 – Рівні архітектури текстильної сенсорної системи

<b>Рівень системи</b>	<b>Функція</b>	<b>Основні компоненти</b>
<b>Сенсорний</b>	Перетворення фізичного впливу у електричний сигнал	Друковані текстильні сенсори (тиск, деформація, температура, вологість)
<b>Апаратний (електронний)</b>	Підсилення, фільтрація та оцифрування сигналу	Мікроконтролер, підсилювач, фільтри, АЦП
<b>Комунікаційний</b>	Передача даних між модулями системи	BLE, Wi-Fi, провідні інтерфейси
<b>Програмний</b>	Обробка, аналіз і візуалізація даних	Мобільні додатки, сервери, аналітичні модулі
<b>Інформаційний (системний)</b>	Інтеграція, інтерпретація та прийняття рішень	Інформаційні системи, хмарні сервіси, UI

Наступним рівнем є електронний модуль, який виконує функції обробки сигналів, їх підсилення та перетворення у цифрову форму. Як правило, на цьому рівні використовуються мікроконтролери або спеціалізовані інтегральні схеми, що забезпечують первинну обробку даних та підготовку до передачі. Передача даних реалізується за допомогою бездротових або дротових каналів зв'язку. У сучасних Smart Textile системах переважають бездротові технології, такі як Bluetooth Low Energy або Wi-Fi, що забезпечують мобільність та зручність використання. Верхній рівень системи представлений програмним забезпеченням, яке здійснює обробку, аналіз та візуалізацію отриманих даних. Це можуть бути мобільні додатки, веб-інтерфейси або спеціалізовані інформаційні системи, що дозволяють інтерпретувати результати вимірювання.

Однією з ключових задач при розробленні текстильних сенсорних систем є інтеграція електронного модуля з текстильним носієм. На відміну від традиційних електронних систем, де компоненти розміщуються на жорстких друкованих платах, у Smart Textile системах необхідно забезпечити поєднання електроніки з гнучким, деформованим середовищем без втрати функціональності. Електронний модуль виконує функції підсилення, фільтрації, аналого-цифрового перетворення та передачі сигналів. Як правило, він реалізується на базі мікроконтролера з інтегрованими периферійними блоками, такими як АЦП, модулі зв'язку та інтерфейси підключення сенсорів. Основною вимогою до такого модуля є мінімізація розмірів, енергоспоживання та

забезпечення стабільної роботи в умовах механічних впливів. Побуває декілька підходів до інтеграції електронного модуля у текстильні системи (табл. 7).

Таблиця 7 – Порівняння підходів до інтеграції електронного модуля

Підхід	Переваги	Недоліки	Область застосування
Знімний модуль	Простота, ремонтпридатність	Додаткові з'єднання	Комерційні wearable
Часткова інтеграція	Менше контактів	Складність виготовлення	Дослідні системи
Повна інтеграція	Компактність	Технологічна складність	Перспективні рішення

*Перший підхід* передбачає використання окремого знімного електронного блока, який підключається до текстильного сенсорного шару через контактні з'єднання. Такий варіант є найбільш поширеним у сучасних комерційних рішеннях, оскільки дозволяє відокремити чутливу електроніку від текстильного середовища. Це спрощує обслуговування, заряджання та заміну компонентів.

*Другий підхід* полягає у частковій інтеграції електронних компонентів у структуру текстилю. У цьому випадку провідні доріжки формуються безпосередньо у тканині, а окремі компоненти (датчики, контакти) розміщуються у спеціальних зонах. Це дає можливість зменшити кількість зовнішніх з'єднань, однак ускладнює технологію виготовлення.

*Третій підхід* – повністю інтегровані системи, у яких електронні компоненти, включаючи мікросхеми, вбудовуються у текстильну структуру. Незважаючи на перспективність, цей підхід залишається обмеженим через складність реалізації, проблеми тепловідведення та забезпечення надійності.

Особливу роль відіграють інтерфейси з'єднання між текстильним сенсорним шаром і електронним модулем. Вони можуть бути реалізовані у вигляді гнучких контактів, провідних ниток або спеціальних конекторів (рис. 5). Надійність цих з'єднань безпосередньо впливає на якість сигналу та стабільність роботи системи.

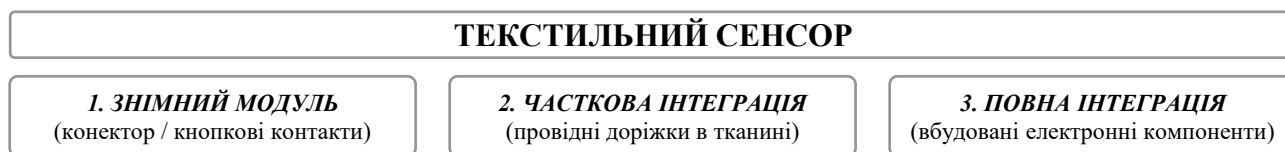


Рисунок 5 – Варіанти інтеграції електронного модуля у текстильні системи

Ефективність функціонування текстильних сенсорних систем значною мірою визначається якістю інтерфейсу між текстильним сенсорним шаром та електронним модулем. На відміну від традиційних електронних систем, де з'єднання реалізуються на жорстких друкованих платах, у Smart Textile системах необхідно забезпечити надійний електричний контакт у середовищі, що піддається постійним механічним деформаціям. Інтерфейс «тканина–електроніка» виконує функцію передачі електричних сигналів від сенсорних структур до електронного модуля, а також може забезпечувати живлення сенсорних елементів. При цьому він має відповідати ряду вимог, серед яких ключовими є

механічна гнучкість, стабільність контактів, низький електричний опір та стійкість до зовнішніх впливів.

Одним із найбільш простих способів реалізації інтерфейсу є використання провідних ниток, які інтегруються у текстильну структуру. Такі нитки можуть виконувати роль електричних з'єднань між сенсорами та електронним модулем. Перевагою цього підходу є його природна сумісність із текстильним середовищем, однак контактні характеристики можуть змінюватися під впливом деформацій. Іншим підходом є застосування друкованих провідних доріжок, сформованих безпосередньо на поверхні текстилю. Це дає можливість створювати більш контрольовані електричні з'єднання, однак такі структури можуть бути чутливими до механічних навантажень і зношування.

Для підключення електронного модуля часто використовуються спеціалізовані контактні елементи, такі як кнопкові з'єднання (snap connectors), гнучкі роз'єми або текстильні конектори. Вони забезпечують можливість знімного підключення електроніки, що є важливим з точки зору обслуговування та експлуатації виробу. У більш складних системах застосовуються гібридні інтерфейси, які поєднують декілька технологій, наприклад друковані доріжки та провідні нитки, що дає змогу підвищити надійність з'єднань та зменшити вплив механічних факторів (рис. 6).

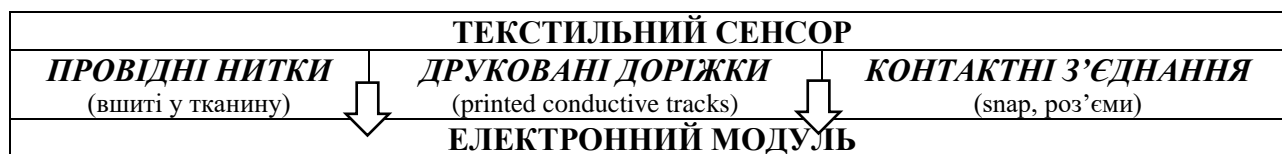


Рисунок 6 – Основні типи інтерфейсів «тканина–електроніка»

З точки зору електричних характеристик інтерфейс може бути описаний як додатковий елемент у вимірювальному колі, що вносить власний опір та шум:

$$R_{total} = R_{sensor} + R_{contact} + R_{interconnect}, \quad (7)$$

де  $R_{contact}$  – опір контактів;

$R_{interconnect}$  – опір з'єднувальних елементів.

Нестабільність контактного опору, зумовлена деформаціями або зношуванням, може призводити до появи шумів і спотворення сигналу (табл. 8). Це особливо критично для сенсорів із малими рівнями сигналів, де навіть незначні зміни можуть впливати на результати вимірювання.

Таблиця 8 – Характеристики інтерфейсів «тканина–електроніка»

Тип інтерфейсу	Переваги	Недоліки	Особливості застосування
Провідні нитки	Гнучкість, інтеграція	Нестабільність контакту	Wearable системи
Друковані доріжки	Точність, контроль	Чутливість до деформацій	Сенсорні структури
Конектори	Надійність	Жорсткість	Знімні модулі
Гібридні рішення	Баланс характеристик	Складність	Просунуті системи

Після формування сенсорних структур та забезпечення надійного інтерфейсу «тканина–електроніка» наступним етапом є організація передачі даних у складі текстильної сенсорної системи. Саме комунікаційний рівень забезпечує інтеграцію Smart Textile рішень у інформаційно-вимірювальні системи, що дозволяє реалізувати віддалений моніторинг, аналіз та візуалізацію даних (рис. 7). Передача даних у таких системах здійснюється з урахуванням обмежень, пов'язаних із енергоспоживанням, габаритами електронного модуля та умовами експлуатації. У більшості випадків перевага надається бездротовим технологіям, які забезпечують мобільність і зручність використання.



Рисунок 7– Архітектура передачі даних у Smart Textile системі

Одним із найбільш поширених протоколів є Bluetooth Low Energy (BLE), який характеризується низьким енергоспоживанням та достатньою пропускну здатністю для передачі сенсорних даних. Це робить його оптимальним для wearable-пристроїв, зокрема текстильних сенсорних систем. BLE дозволяє реалізувати передачу даних у режимі реального часу з мінімальними витратами енергії. Іншим поширеним рішенням є використання технологій Wi-Fi, що забезпечують більшу швидкість передачі даних та можливість прямого підключення до мережі Інтернет. Проте такі системи характеризуються вищим енергоспоживанням, що обмежує їх застосування у автономних текстильних пристроях. У випадках, коли необхідна передача даних на великі відстані або у складних умовах, можуть використовуватися протоколи типу LoRaWAN або інші низькопотужні ширококутові технології. Вони забезпечують значний радіус дії, але мають обмежену швидкість передачі.

Важливим аспектом є також енергетична ефективність передачі даних. Загальні витрати енергії можуть бути оцінені як:

$$E = P \cdot t, \quad (8)$$

де  $E$  – енергія;  
 $P$  – потужність передавача;  
 $t$  – час передачі.

Зменшення часу активної передачі та використання енергоефективних протоколів є ключовими факторами оптимізації системи.

Функціонування текстильних сенсорних систем супроводжується генерацією електричних сигналів, що відображають зміну фізичних параметрів середовища. На відміну від класичних сенсорних систем, у яких сигнал формується у відносно стабільних умовах, сигнали текстильних сенсорів характеризуються підвищеною варіативністю та залежністю від зовнішніх і внутрішніх факторів. Сигнали, що формуються текстильними сенсорами, можуть мати різну фізичну природу залежно від типу сенсорної структури. У резистивних сенсорах сигнал формується у вигляді зміни напруги або струму,

що обумовлено зміною електричного опору. У ємнісних сенсорах сигнал представлений зміною заряду або напруги, пов'язаною зі зміною ємності. У сенсорах на основі функціональних матеріалів сигнал може бути пов'язаний зі зміною провідності або генерацією електричного потенціалу. Загальна модель сигналу текстильного сенсора може бути представлена у вигляді:

$$x(t) = s(t) + n(t), \quad (9)$$

де  $x(t)$  – вимірний сигнал;  
 $s(t)$  – корисний сигнал, що відповідає фізичному впливу;  
 $n(t)$  – шумова складова.

Особливістю текстильних сенсорів є те, що шумова складова має складну структуру і може включати декілька компонентів: механічний шум, викликаний деформаціями тканини; електричний шум, пов'язаний з контактними опорами; зовнішні електромагнітні завади; температурні та вологісні впливи.

У результаті реальний сигнал може бути поданий як:

$$x(t) = s(t) + n_m(t) + n_e(t) + n_{env}(t), \quad (10)$$

де  $n_m(t)$  – механічний шум;  
 $n_e(t)$  – електричний шум;  
 $n_{env}(t)$  – вплив середовища.

З точки зору часових характеристик сигнали текстильних сенсорів можуть бути як квазістатичними (наприклад, температура або вологість), так і динамічними (рух, деформація, пульс). Це визначає вимоги до частоти дискретизації та методів обробки.

Частота дискретизації має відповідати теоремі Найквіста:

$$f_s \geq 2 f_{max}, \quad (11)$$

де  $f_s$  – частота дискретизації;  
 $f_{max}$  – максимальна частота корисного сигналу.

Для більшості текстильних сенсорних систем значення  $f_{max}$  знаходиться в межах 1–50 Гц, що відповідає біомеханічним та фізіологічним процесам. Таким чином, частота дискретизації зазвичай обирається у діапазоні 50-200 Гц. Амплітуда сигналів текстильних сенсорів, як правило, є невеликою і може знаходитись у діапазоні від мікрвольт до мілівольт, що обумовлює необхідність використання підсилювачів та фільтрів.

Важливою характеристикою є також відношення сигнал/шум:

$$SNR = P_s / P_n, \quad (12)$$

де  $P_s$  – потужність корисного сигналу;  
 $P_n$  – потужність шуму.

Низьке значення SNR є типовим для текстильних сенсорів, що ускладнює процес обробки та аналізу даних. Отже, сигнали текстильних сенсорів характеризуються складною структурою, низьким рівнем сигналу та значним впливом шумів (рис. 8, табл. 9). Це обумовлює необхідність застосування спеціалізованих методів обробки сигналів.

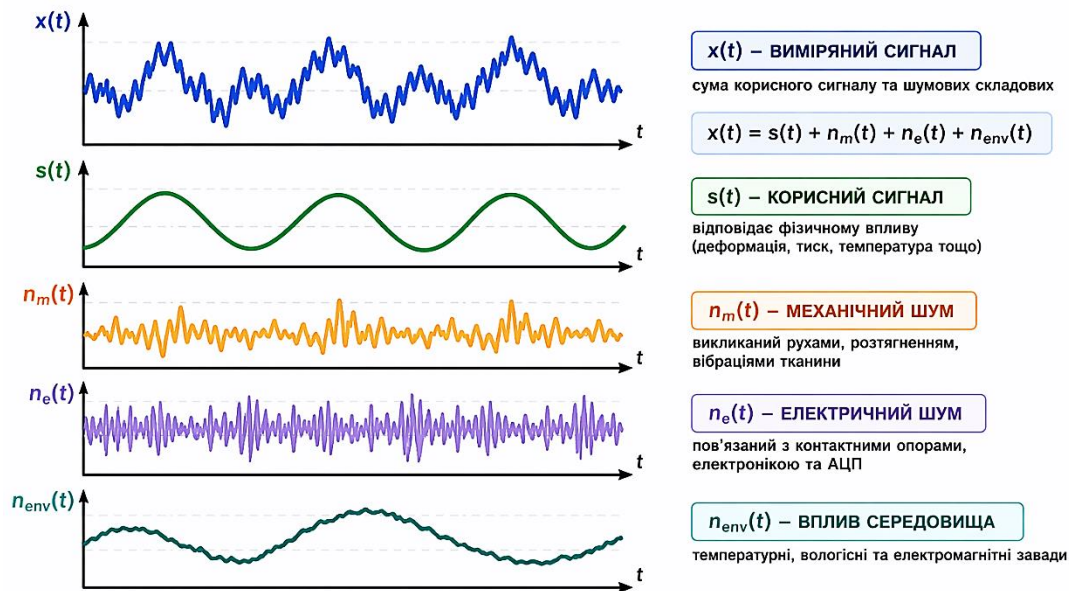


Рисунок 8 – Структура сигналу друкованого текстильного сенсора

Таблиця 9 – Основні характеристики сигналів друкованих текстильних сенсорів

Характеристика	Типове значення	Особливості
Частота сигналу	1-50 Гц	Біомеханічні процеси
Частота дискретизації	50-200 Гц	Згідно Найквіста
Амплітуда	1 мкВ – 10 мВ	Низький рівень
SNR	0-20 дБ	Високий рівень шуму
Тип сигналу	Аналоговий	Потребує АЦП

Однією з ключових особливостей текстильних сенсорних систем є наявність значної кількості похибок, які виникають на різних етапах формування та передачі сигналу. На відміну від традиційних вимірювальних систем, де умови функціонування є відносно стабільними, у Smart Textile системах похибки формуються під впливом як внутрішніх, так і зовнішніх факторів.

Загальна похибка вимірювання може бути представлена як сума окремих складових:

$$\Delta x = \Delta_{sens} + \Delta_{int} + \Delta_{env} + \Delta_{noise}, \quad (13)$$

- де  $\Delta_{sens}$  – похибка сенсорного елемента;  
 $\Delta_{int}$  – похибка інтерфейсу «тканина–електроніка»;  
 $\Delta_{env}$  – вплив зовнішнього середовища;  
 $\Delta_{noise}$  – шумові складові.

*Похибки сенсорного рівня* пов'язані з особливостями формування сенсорних структур та властивостями матеріалів. Основними причинами є неоднорідність нанесення провідних матеріалів; нестабільність контактів між частинками; деградація матеріалів у процесі експлуатації. У випадку резистивних сенсорів це може проявлятися у вигляді дрейфу опору:

$$R(t) = R_0 + \Delta R_{drift(t)}, \quad (14)$$

що призводить до поступового зміщення вимірюваного сигналу.

Інтерфейс «тканина–електроніка» є одним із найбільш нестабільних елементів системи. Контактні опори можуть змінюватися під впливом механічних деформацій, що призводить до появи додаткових *похибок інтерфейсу*:

$$\Delta U = I \cdot \Delta R_{contact}, \quad (15)$$

де  $\Delta R_{contact}$  – зміна контактного опору.

Ці похибки мають випадковий характер і можуть бути джерелом імпульсних шумів.

*Вплив зовнішнього середовища.* Зовнішні фактори, такі як температура, вологість та електромагнітні завади, значною мірою впливають на роботу сенсорних систем. Зміна температури може викликати зміну електричних параметрів матеріалів:

$$\Delta R_T = \alpha \cdot R_0 \cdot \Delta T, \quad (16)$$

де  $\alpha$  – температурний коефіцієнт.

Вологість впливає на діелектричні властивості текстилю, що особливо критично для ємнісних сенсорів.

*Шумові складові.* Шуми у текстильних сенсорних системах мають комплексну природу та включають термічний шум (Johnson noise); контактний шум; механічний шум (викликаний рухом тканини); електромагнітні завади.

Потужність теплового шуму може бути оцінена як:

$$P_n = k T B, \quad (17)$$

де  $k$  – стала Больцмана;

$T$  – температура;

$B$  – ширина смуги частот.

Особливістю текстильних сенсорних систем є те, що похибки (табл. 10) не є незалежними. Вони взаємодіють між собою, що ускладнює їх компенсацію. Наприклад, механічна деформація може одночасно впливати на сенсор, інтерфейс та контактні з'єднання.

У результаті реальний сигнал можна представити як:

$$x(t) = s(t) + \sum_i n_i(t) + \Delta(t), \quad (18)$$

де  $\Delta(t)$  – сумарна похибка системи.

Таблиця 10 – Основні джерела похибок та їх характеристики

Джерело похибки	Причина	Тип похибки	Характер
Сенсор	Неоднорідність матеріалу	Систематична	Дрейф
Інтерфейс	Контактні опори	Випадкова	Імпульсна
Температура	Зміна параметрів	Систематична	Повільна
Вологість	Зміна діелектрика	Систематична	Нелінійна
Механіка	Деформації	Випадкова	Нестаціонарна
ЕМ завади	Зовнішні поля	Випадкова	Високочастотна

Складна структура сигналів текстильних сенсорів, наявність значної кількості шумових компонентів та нестабільність вимірюваних параметрів зумовлюють необхідність застосування ефективних методів фільтрації. Основною метою фільтрації є виділення корисного сигналу  $s(t)$  з виміряного сигналу  $x(t)$  та зменшення впливу шумових складових.

Загальна задача фільтрації може бути сформульована як перетворення:

$$y(t) = F\{x(t)\}, \quad (19)$$

де  $y(t)$  – відфільтрований сигнал;

$F$  – оператор фільтрації.

Для більшості текстильних друкованих сенсорних систем корисний сигнал має низькочастотний характер (1-50 Гц), тоді як значна частина шумів є високочастотною. Це дозволяє ефективно застосовувати *фільтри низьких частот* (Low-pass). У цифровому вигляді простий фільтр може бути реалізований як:

$$y[n] = \alpha x[n] + (1 - \alpha)y[n - 1], \quad (20)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт згладжування.

Такий фільтр дозволяє зменшити високочастотні коливання сигналу, однак може призводити до затримки.

Одним із найпростіших і ефективних методів є *фільтр ковзного середнього* (Moving Average):

$$y[n] = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x[n - i], \quad (21)$$

де  $N$  – розмір вікна.

Цей метод добре пригнічує випадковий шум, однак може згладжувати різкі зміни сигналу, що є критичним для динамічних процесів.

У випадках, коли відома частотна область корисного сигналу (наприклад, біомеханічні коливання), доцільно застосовувати *смугові фільтри* (Band-pass):

$$f_{low} \leq f \leq f_{high}. \quad (22)$$

Це дає можливість одночасно відсікати як низькочастотні дрейфи, так і високочастотні шуми.

У друкованих текстильних сенсорних системах параметри шумів можуть змінюватися у часі, тому статичні фільтри не завжди є ефективними. У таких випадках застосовуються адаптивні методи фільтрації, які змінюють свої параметри залежно від характеристик сигналу.

Загальна модель *адаптивного фільтра* може бути подана як:

$$y[n] = \sum_{k=0}^M w_k[n] \cdot x[n-k], \quad (23)$$

де  $w_k[n]$  – адаптивні коефіцієнти.

Для більш складних систем застосовується *фільтр Калмана*, який дозволяє оцінювати стан системи з урахуванням шумів:

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k-1} + K_k (z_k - \hat{x}_{k-1}), \quad (24)$$

де  $K_k$  – коефіцієнт Калмана.

Цей метод є особливо ефективним для систем із високим рівнем шуму та нестабільними параметрами.

Вибір методу фільтрації залежить від характеру сигналу (стаціонарний / динамічний); рівня шуму; вимог до швидкодії системи; обчислювальних ресурсів електронного модуля (табл. 11). Для більшості друкованих текстильних сенсорних систем доцільно використовувати комбінований підхід, що поєднує прості фільтри (low-pass, moving average) із адаптивними методами.

Таблиця 11 – Порівняння методів фільтрації

Метод	Складність	Ефективність	Затримка	Придатність
Low-pass	Низька	Середня	Невелика	Базові системи
Moving Average	Низька	Висока	Середня	Шумозаглушення
Band-pass	Середня	Висока	Невелика	Частотні сигнали
Адаптивні	Висока	Дуже висока	Змінна	Динамічні системи
Калмана	Висока	Максимальна	Мінімальна	Прецизійні системи

Сигнали текстильних сенсорів формуються під впливом не лише зовнішніх факторів, але й внутрішніх параметрів сенсорного елемента, що визначаються технологією друкованої електроніки. Зокрема, геометричні характеристики провідних доріжок, товщина шару, питомий опір матеріалу та якість нанесення безпосередньо впливають на величину та стабільність сигналу.

У зв'язку з цим класичні методи фільтрації, які не враховують параметри сенсорного елемента, є недостатньо ефективними. Для підвищення точності вимірювання пропонується адаптивна модель обробки сигналу, що враховує як параметри друкованого елемента, так і вплив зовнішнього середовища.

З урахуванням параметрів сенсорної структури сигнал може бути представлений у вигляді:

$$x(t) = f(L, A, \rho, \varepsilon(t), T(t), H(t)) + n(t), \quad (25)$$

де  $L$  – довжина провідного елемента;

$A$  – площа поперечного перерізу;  
 $\rho$  – питомий опір матеріалу;  
 $\varepsilon(t)$ ,  $T(t)$ ,  $H(t)$  – зовнішні фактори.

Для компенсації впливу як геометричних, так і зовнішніх факторів пропонується модель:

$$y(t) = x(t) - f_1(L(t), A(t), \rho(t)) - f_2(\varepsilon(t), T(t), H(t)), \quad (26)$$

де  $f_1$  – оцінка впливу параметрів друкованого елемента;

$f_2$  – оцінка впливу середовища.

У спрощеному вигляді:

$$f_1 = b_1 L(t) + b_2 A(t) + b_3 \rho(t), \quad (27)$$

$$f_2 = a_1 \varepsilon(t) + a_2 T(t) + a_3 H(t). \quad (28)$$

Реалізація запропонованої моделі (рис. 9) передбачає послідовну обробку виміряного сигналу з урахуванням двох груп чинників:

- параметрів друкованого сенсорного елемента;
- впливів зовнішнього середовища та умов експлуатації.

На відміну від звичайної схеми фільтрації, у запропонованому підході виконується не лише придушення шуму, а й компенсація відхилень, пов'язаних із геометрією сенсорної структури, електрофізичними властивостями матеріалу та дією зовнішніх факторів. Це дає змогу перейти від сирого виміряного сигналу до скоригованого сигналу, придатного для подальшого аналізу та візуалізації.

**1. Ініціалізація параметрів системи.** На початковому етапі задаються або зчитуються базові параметри друкованого сенсорного елемента: довжина провідної структури  $L_0$ , площа поперечного перерізу  $A_0$ , питомий опір матеріалу  $\rho_0$ , а також початкові коефіцієнти адаптивної моделі  $a_i$  та  $b_i$ . Додатково встановлюються параметри попередньої фільтрації, частота дискретизації та порогові значення допустимих відхилень.

**2. Зчитування вхідних даних.** У поточний момент часу система отримує: сигнал із текстильного сенсора  $x(t)$ ; дані про деформацію  $\varepsilon(t)$ ; температуру  $T(t)$ ; вологість  $H(t)$ . Таким чином, формується вектор поточного стану системи:

$$u(t) = \{x(t), \varepsilon(t), T(t), H(t), L(t), A(t), \rho(t)\}.$$

**3. Попередня фільтрація сигналу.** Для усунення високочастотних шумів та випадкових імпульсних сплесків застосовується фільтр низьких частот або ковзне середнє. У результаті формується згладжений сигнал:

$$x_f(t) = F_{LP}(x(t)).$$

На цьому етапі усуваються переважно випадкові шуми, але ще не компенсуються систематичні відхилення.

4. **Оцінка внеску параметрів друкованого елемента.** На основі геометричних та матеріальних параметрів сенсорної структури оцінюється складова сигналу, зумовлена особливостями друку та фізичною будовою елемента (27). У більш загальному випадку ця складова може бути нелінійною, однак для практичної реалізації на мікроконтролері доцільно використовувати лінійне наближення.

5. **Оцінка впливу зовнішнього середовища.** На основі поточних значень деформації, температури та вологості обчислюється компенсаційна складова, пов'язана із середовищем (28). Ця оцінка відображає внесок факторів, які змінюють електричні параметри сенсора в процесі експлуатації.

6. **Обчислення скоригованого сигналу.** Після оцінювання обох компенсаційних складових формується вихідний сигнал (26). Отриманий сигнал  $y(t)$  є адаптивно скоригованим і містить менший рівень систематичних похибок порівняно з початковим виміром.

7. **Оцінка похибки моделі.** Якщо система має еталонне значення або прогнозовану оцінку сигналу, визначається похибка:

$$e(t) = x_f(t) - y(t).$$

У практичній реалізації похибка може визначатися також через відхилення від середнього, базової лінії або очікуваного діапазону зміни сигналу.

8. **Адаптація коефіцієнтів моделі.** Коефіцієнти  $a_i$  та  $b_i$  коригуються залежно від похибки, що дозволяє алгоритму підлаштовуватись під зміну умов роботи:

$$a_i(t+1) = a_i(t) + \mu e(t) u_i(t), \quad (29)$$

$$b_i(t+1) = b_i(t) + \mu e(t) v_i(t), \quad (30)$$

де  $u_i(t)$  – чинники середовища;

а  $v_i(t)$  – параметри друкованого елемента;

$\mu$  – коефіцієнт адаптації.

9. **Перевірка стабільності та достовірності результату.** На цьому етапі виконується контроль: виходу сигналу за допустимі межі; надмірної швидкості зміни коефіцієнтів; появи аномальних значень, що можуть бути зумовлені відмовою сенсора або контакту. У разі перевищення порогів можливе повторне калібрування або формування попередження.

10. **Передача результату в систему вищого рівня.** Скоригований сигнал  $y(t)$  передається на наступний рівень архітектури: модуль аналізу, блок візуалізації або комунікаційний інтерфейс.

Узагальнено алгоритм може бути поданий так:

$$y(t) = F_{adapt}(x(t), L(t), A(t), \rho(t), \varepsilon(t), T(t), H(t)), \quad (31)$$

де  $F_{adapt}$  – оператор адаптивної обробки, що включає попередню фільтрацію, компенсацію параметрів друкованого елемента, компенсацію впливу середовища та оновлення коефіцієнтів моделі.

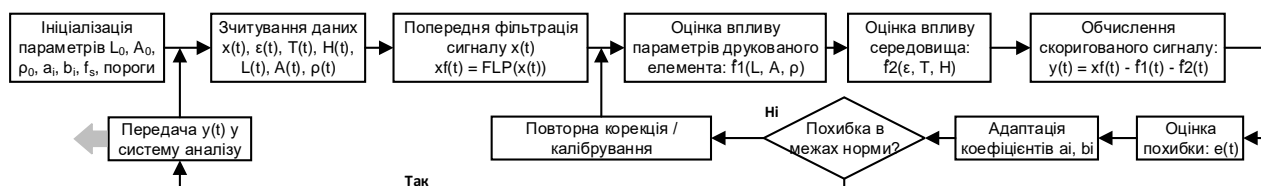


Рисунок 9 – Алгоритм адаптивної обробки сигналу друкованого текстильного сенсора

Запропоновано алгоритм адаптивної обробки сигналів текстильного сенсора, який, на відміну від класичних схем фільтрації, враховує не лише змінні фактори середовища, а й параметри друкованого сенсорного елемента – геометрію провідної структури та електрофізичні характеристики матеріалу.

## Результати досліджень

У межах проведеного дослідження розглянуто конфігурацію друкованого текстильного сенсора резистивного типу, сформованого методом друкованої електроніки на гнучкій текстильній основі. Вибір резистивної сенсорної структури обумовлений її технологічною простотою реалізації, високою чутливістю до механічних деформацій та придатністю до інтеграції у текстильні матеріали.

Сенсорна структура реалізована у вигляді меандрової провідної доріжки, нанесеної на поверхню текстильного носія (рис. 10).

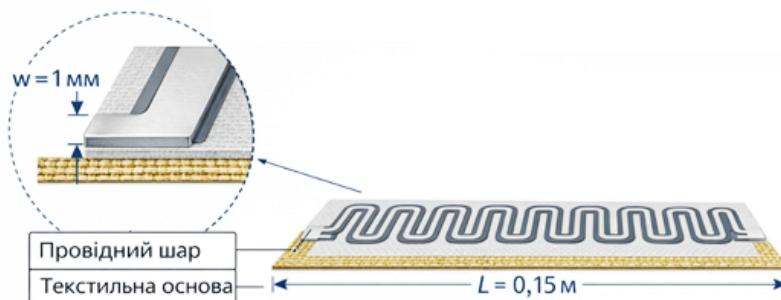


Рисунок 10 – Конфігурація друкованого текстильного сенсора з меандровою структурою

Така геометрія дозволяє збільшити ефективну довжину провідного елемента при обмежених габаритах, що підвищує чутливість сенсора до деформацій. Для моделювання було задано наступні параметри друкованого сенсорного елемента (табл. 12).

На основі цих параметрів базовий електричний опір сенсора визначається відповідно до виразу (1), що відповідає типовим значенням для друкованих провідних структур на текстильних матеріалах. У процесі експлуатації сенсор піддається механічним деформаціям, що призводить до зміни довжини провідного елемента та, відповідно, електричного опору, як у виразі (2). Для дослідження було прийнято значення коефіцієнта чутливості  $k = 2$ , що відповідає типовим характеристикам друкованих резистивних сенсорів.

Таблиця 12 – Параметри моделі друкованого текстильного сенсора

Параметр	Позначення	Значення
Довжина провідника	L	0,15 м
Ширина доріжки	w	1 мм
Товщина шару	h	20 мкм
Площа перерізу	A	$2 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$
Питомий опір	$\rho$	$1,6 \cdot 10^{-7} \text{ Ом}\cdot\text{м}$
Чутливість	k	2

З урахуванням впливу температури та вологості, повний сигнал сенсора було представлено у вигляді:

$$x(t) = R_0(1 + k \varepsilon(t)) + \alpha T(t) + \beta H(t) + n(t),$$

де  $\alpha, \beta$  – коефіцієнти впливу температури та вологості;  
 $n(t)$  – шумова складова.

Отже, сформовано параметризовану модель друкованого текстильного сенсора, яка враховує як геометричні та матеріальні характеристики, так і вплив зовнішнього середовища. Отримана конфігурація використовується у подальшому для імітаційного моделювання сигналів та оцінки ефективності запропонованого алгоритму обробки.

У межах дослідження виконано імітаційне моделювання сигналу друкованого текстильного сенсора з урахуванням геометричних параметрів провідної структури, впливу механічної деформації та факторів зовнішнього середовища. Метою моделювання є формування сигналу, який максимально наближений до реальних умов експлуатації сенсорів, виготовлених методами друкованої електроніки. В якості базової моделі використано залежність електричного опору від геометричних параметрів провідного елемента (1), де зміна довжини  $L(t)$  обумовлена деформацією текстильного носія. З урахуванням відносної деформації  $\varepsilon(t)$  довжина провідного елемента може бути подана як:

$$L(t) = L_0(1 + \varepsilon(t)).$$

Відповідно, зміна опору сенсора описується співвідношенням:

$$R(t) = R_0(1 + k \cdot \varepsilon(t)).$$

Для моделювання сигналу було прийнято, що деформація має періодичний характер і описується гармонічною функцією:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin(2\pi ft),$$

де  $\varepsilon_0 = 0,02$  – амплітуда деформації;  
 $f = 1$  Гц – частота.

Таким чином, базовий сигнал сенсора набуває вигляду:

$$s(t) = R_0(1 + k \varepsilon_0 \sin(2\pi ft)).$$

Для наближення до реальних умов до сигналу додано вплив температури та вологості:

$$s_{env}(t) = s(t) + \alpha T(t) + \beta H(t),$$

де  $\alpha = 0,01$ ,  $\beta = 0,002$ .

Шумова складова сигналу моделюється як випадковий процес:

$$n(t) \sim N(0, \sigma^2),$$

де  $\sigma = 0,01 - 0,05$  та визначає рівень шуму.

У результаті сформовано повний сигнал сенсора:

$$x(t) = s_{env}(t) + n(t),$$

який включає корисну складову (деформація), повільний дрейф (температура, вологість), випадковий шум.

У межах проведеного дослідження виконано імітаційне моделювання сигналу друкованого текстильного сенсора та здійснено його обробку із застосуванням базових і адаптивних методів. Метою аналізу є оцінка впливу різних підходів до обробки на якість сигналу, зокрема щодо зменшення шумової складової та компенсації дрейфу, спричиненого зміною параметрів середовища.

Сформований сигнал  $x(t)$  характеризується наявністю трьох основних складових: корисної періодичної компоненти, зумовленої деформацією сенсора, повільного дрейфу, спричиненого температурою та вологістю, а також випадкової шумової складової. У часовій області це проявляється у вигляді коливань сигналу з накладеними випадковими відхиленнями та зміщенням базового рівня. Застосування фільтра низьких частот дозволило зменшити амплітуду високочастотного шуму, однак не забезпечило усунення низькочастотного дрейфу. Крім того, у відфільтрованому сигналі спостерігається згладжування піків та незначна фазова затримка, що впливає на точність відтворення динамічних змін.

Використання запропонованого адаптивного алгоритму, який враховує параметри друкованого сенсорного елемента та вплив середовища, дозволило суттєво покращити якість сигналу. Зокрема, спостерігається стабілізація базової лінії, зменшення шумової складової та відновлення амплітудних характеристик корисного сигналу. Отриманий сигнал  $y(t)$  має виражену періодичну структуру, що відповідає заданій деформації, без суттєвих спотворень.

Для кількісної оцінки ефективності обробки проведено аналіз основних параметрів сигналу, включаючи середньоквадратичне відхилення шуму, відношення сигнал/шум та похибку відтворення амплітуди (табл. 13, рис. 11).

Узагальнення отриманих результатів показує, що застосування адаптивного алгоритму забезпечує комплексне покращення характеристик сигналу. Порівняно з базовою фільтрацією, зменшення середньоквадратичного відхилення шуму становить понад 2 рази, тоді як відношення сигнал/шум зростає

більш ніж у два рази. Найбільш суттєвим є зменшення дрейфу базової лінії, що пов'язано з урахуванням температурних і вологісних впливів у моделі обробки.

Таблиця 13 – Кількісні характеристики сигналів після обробки

Параметр	Сирий сигнал $x(t)$	Після LP-фільтра $x_f(t)$	Адаптивний сигнал ( $y(t)$ )
СКВ шуму, $\sigma$	0,032	0,015	0,006
SNR, дБ	8–10	14–16	22–25
Амплітудна похибка, %	12–15	6–8	2–3
Дрейф базової лінії, Ом	0,18	0,12	0,02
Затримка сигналу, мс	0	25–40	10–15

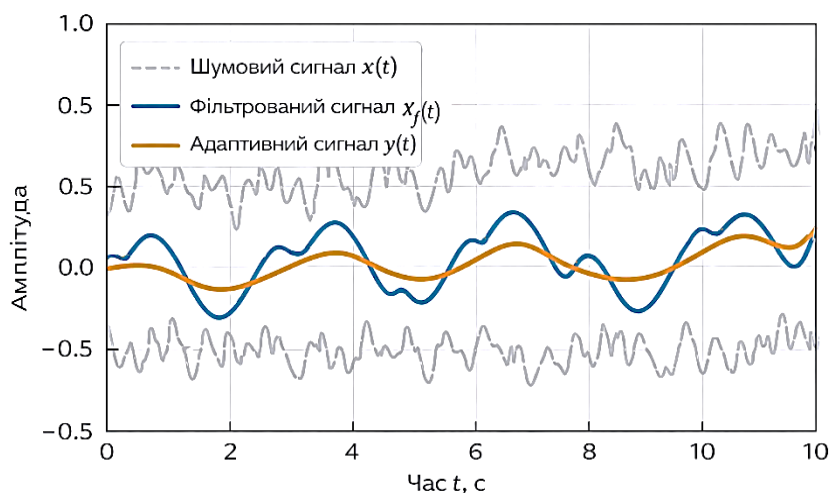


Рисунок 11 – Порівняння сигналів на різних етапах обробки

Отже, результати моделювання підтверджують ефективність запропонованого підходу та доцільність його використання у системах на основі друкованих текстильних сенсорів.

Розроблений адаптивний алгоритм обробки сигналів друкованого текстильного сенсора може бути використаний у системах, де вимірювання здійснюється в умовах змінних механічних та середовищних впливів.

У сценаріях, пов'язаних із вимірюванням деформацій, застосування алгоритму дозволяє відокремити корисну складову сигналу від паразитних впливів та забезпечити стабільність базової лінії. Це підвищує точність визначення амплітуди та частоти сигналу. У системах тривалого моніторингу алгоритм забезпечує зменшення накопичення похибок за рахунок адаптивної компенсації повільних змін параметрів середовища. Це дозволяє отримувати достовірні результати без необхідності частого калібрування. У динамічних умовах експлуатації запропонований підхід забезпечує зменшення шумових складових без спотворення форми сигналу, що є важливим для аналізу швидкозмінних процесів.

Інтеграція алгоритму у інформаційно-вимірювальні системи дозволяє виконувати попередню обробку сигналу безпосередньо на рівні сенсорного модуля, що підвищує ефективність передачі та подальшого аналізу даних.

## Висновки

У результаті дослідження розв'язано актуальну науково-прикладну задачу, пов'язану з підвищенням якості обробки сигналів друкованих текстильних сенсорів у складі інформаційно-вимірювальних систем. Проведено аналіз сучасного стану розвитку Smart Textile систем, що дозволило визначити основні проблеми їх застосування, зокрема нестабільність сигналів, значний вплив зовнішніх факторів та обмеження класичних методів обробки. Встановлено, що традиційні підходи не забезпечують достатньої точності вимірювання в умовах змінного середовища та механічних деформацій. На основі аналізу технологій друкованої електроніки досліджено особливості формування сенсорних структур у текстильних матеріалах. Показано, що геометричні параметри друкованого провідного елемента, властивості матеріалів та умови експлуатації суттєво впливають на характеристики сигналу сенсора.

У роботі розроблено математичну модель сигналу друкованого текстильного сенсора, яка враховує вплив деформації, температури, вологості та шумових складових. Запропонована модель дозволяє адекватно описувати процес формування сигналу в реальних умовах експлуатації. Ключовим результатом дослідження є розроблення адаптивного алгоритму обробки сигналів, який враховує як параметри друкованого сенсорного елемента, так і вплив зовнішнього середовища. Це забезпечує можливість компенсації шуму та дрейфу сигналу у процесі його обробки.

На основі імітаційного моделювання виконано оцінку ефективності запропонованого підходу. Отримані результати показали суттєве зменшення рівня шуму, зниження похибки вимірювання та стабілізацію базової лінії сигналу. Порівняльний аналіз підтвердив переваги адаптивної обробки над традиційною фільтрацією.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості застосування розробленого алгоритму у системах моніторингу, що працюють в умовах змінних механічних та середовищних впливів. Запропонований підхід може бути інтегрований у інформаційно-вимірювальні системи різного призначення, підвищуючи точність та надійність отриманих даних.

Отже, поставлену мету дослідження досягнуто, а отримані результати можуть бути використані як основа для подальших досліджень у напрямі розвитку інтелектуальних друкованих сенсорних систем.

### Список літератури.

1. Komolafe, A., Zaghari, B., Torah, R. et al. (2021). E-Textile Technology Review – From Materials to Application. *IEEE Access*, 9, 97152-97179. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3094303>.
2. Meena, J.S., Choi, S.B., Jung, S.-B., & Kim, J.-W. (2023). Electronic textiles: New age of wearable technology for healthcare and fitness solutions. *Materials Today Bio*, 19, 100565. <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2023.100565>.
3. Chen, J., He, T., Du, Z., & Lee, C. (2023). Review of Textile-based Wearable Electronics: From the Structure of the Multi-level Hierarchy Textiles. *Nano Energy*, 108898. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2023.108898>.

4. Simegnaw, A.A., Malengier, B., Rotich, G., Tadesse, M.G., & Van Langenhove, L. (2021). Review on the Integration of Microelectronics for E-Textile. *Materials*, 14(17), 5113. <https://doi.org/10.3390/ma14175113>.
5. Beeby, S.P., Torah, R.N., Wagih, M., Isaia, B., Black, S., Saunders, J., & Yang, K. (2024). Heterogeneous E-Textiles: Materials, Manufacturing and Sustainability. *Advanced Materials Technologies*. <https://doi.org/10.1002/admt.202400844>.
6. Islam, M.R., Afroj, S., Yin, J., Novoselov, K.S., Chen, J., & Karim, N. (2023). Advances in Printed Electronic Textiles. *Advanced Science*. <https://doi.org/10.1002/advs.202304140>.
7. Abtew, M.A., Ahmmed, A.S., Tadesse, M.G., & Zaman, S.U. (2025). Sensor-embedded and electronics textiles: A review on advanced materials, manufacturing, and applications. *Textile Research Journal*. <https://doi.org/10.1177/00405175251338152>.
8. Smith, A.A., Li, R., Xu, L., & Tse, Z.T.H. (2024). A Narrative Review of In-Textile Sensors in Human Health Applications. *Advanced Materials Technologies*. <https://doi.org/10.1002/admt.202302141>.
9. Huang, F.-C., Sun, X.-D., Shi, Y., & Pan, L.-J. (2024). Textile electronics for ubiquitous health monitoring. *Soft Science*, 4(4). <https://doi.org/10.20517/ss.2024.37>.
10. Liu, H., Shi, Y., Pan, Y., Wang, Z., & Wang, B. (2025). Sensory interactive fibers and textiles. *npj Flexible Electronics*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41528-025-00398-4>.
11. Wei, X., Liang, X., Meng, C., Cao, S., Shi, Q., & Wu, J. (2023). Multimodal electronic textiles for intelligent human-machine interfaces. *Soft Science*, 3(2), 17. <https://doi.org/10.20517/ss.2023.09>.
12. Shi, H.H., Pan, Y., Xu, L., Feng, X., Wang, W., Potluri, P., Hu, L., Hasan, T., & Huang, Y.Y.S. (2023). Sustainable electronic textiles towards scalable commercialization. *Nature Materials*. <https://doi.org/10.1038/s41563-023-01615-z>.