

УДК 615.825:616-7:681.5

ОЦІНКА ЧУТЛИВОСТІ СЕНСОРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДО ЗОВНІШНІХ ВПЛИВІВ У СИСТЕМАХ КОНТРОЛЮ РУХОВОЇ АКТИВНОСТІ ПАЦІЄНТІВ

Степаненко Ніна Олександрівна¹

stepanenko.nina@lil.kpi.ua

Дубко Андрій Григорович^{1,2}

andreyies17@gmail.com

¹Національний технічний університет України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

м. Київ, Україна

²Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України

Анотація – Системи відстеження рухів людини посідають важливе місце в сучасних реабілітаційних програмах, проте їхня ефективність значною мірою визначається стабільністю роботи сенсорних модулів у реальних умовах експлуатації та клінічного застосування. Метою даного дослідження було проаналізувати, яким чином зовнішні фактори середовища — температура, вологість, електромагнітне випромінювання, механічні й вібраційні впливи, а також дію хімічно агресивних середовищ — впливають на точність та надійність вимірювань біомедичних пристроїв для моніторингу рухів. Окрему увагу приділено оцінці рівня чутливості різних типів сенсорів до зовнішніх впливів. У роботі використано комплексний підхід: проведено систематичний огляд і відбір наукових джерел у провідних базах даних (PubMed, IEEE Xplore, ScienceDirect, SpringerLink, Google Scholar), проведено структурування сенсорних технологій за принципом дії та типом отримуваних сигналів (інерційні вимірювальні одиниці, акселерометри, гіроскопи, магнітометри, гнучкі сенсори та відеоаналітичні системи) та проаналізовано особливості їхньої роботи за різних зовнішніх впливів. Отримані результати демонструють, що навіть незначні коливання температури або рівня вологості можуть спричиняти статистично значимий дрейф сигналів (signal drift), а електромагнітні поля та вібраційні впливи здатні викликати короточасні збої або деградацію стабільності калібрування або збільшення похибки вимірювання. Проведений аналіз дозволив виділитися сенсорні технології з найнижчою стійкістю до зовнішніх факторів, сформувавши критерії для їх тестування та визначити напрямки удосконалення протоколів валідації та метрологічного забезпечення. Практична значущість роботи полягає в тому, що результати можуть бути використані при розробленні нових стандартів оцінки якості реабілітаційних пристроїв, а також для оптимізації умов їхнього застосування в клінічних і домашніх сценаріях. Перспективи подальших досліджень пов'язані з розробкою адаптивних алгоритмів компенсації впливів середовища та створенням інтегрованих методик випробувань, здатних забезпечити високу відтворюваність і метрологічну узгодженість результатів у різних експлуатаційних умовах.

Ключові слова: біомедична інженерія, вплив довкілля, відстеження рухів, реабілітація, сенсори, комп'ютерна обробка сигналів.

I. ВСТУП

У сучасній реабілітаційній практиці системи відстеження рухів людини (motion tracking systems) відіграють ключову роль у кількісній оцінці моторних функцій і персоналізації програм відновлення. Забезпечення високої точності та стабільності вимірювань сенсорних модулів є критичною умовою достовірного моніторингу ефективності терапії. Водночас відсутність уніфікованих протоколів випробувань у реальних умовах експлуатації

та недостатнє врахування впливу зовнішніх чинників середовища — температури, вологості, вібрацій і електромагнітного фону — зумовлюють ризики спотворення результатів і зниження відтворюваності даних. Це визначає необхідність комплексного аналізу стійкості сенсорних технологій до середовищних впливів і розроблення інтегрованих критеріїв оцінювання їхньої надійності у біомедичних застосуваннях.

II. МЕТА РОБОТИ

Метою дослідження є визначення рівня чутливості різних типів сенсорів (інерціальних, оптичних, тензометричних, електроміографічних тощо) до зовнішніх впливів та запропонування способів підвищення точності їх роботи.

III. ПОШУКОВА СТРАТЕГІЯ, КІЛЬКІСНИЙ АНАЛІЗ ТА ВІЗУАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Для формування джерельної бази дослідження було розроблено пошукову стратегію, що передбачала визначення ключових слів та побудову запитів відповідно до тематики роботи. Пошук здійснювався у провідних міжнародних наукових базах даних: PubMed, IEEE Xplore, ScienceDirect, SpringerLink та Google Scholar [1–3].

Запити, за якими здійснювався пошук:

1. Environmental impact on wearable motion tracking devices
2. Effect of temperature and humidity on wearable motion sensor
3. Performance of biomedical devices for human motion monitoring in different environments
4. Reliability of motion tracking systems under varying environmental conditions
5. Environmental noise effects on biomechanical motion sensors
6. Biomedical motion tracking devices and external environmental factors
7. Sensor drift and signal quality in wearable biomedical systems
8. Assessment of wearable motion tracking technology in clinical and outdoor settings
9. Impact of environmental conditions on inertial measurement units (IMUs) in healthcare
10. Human activity recognition and environmental robustness of biomedical sensors.

Усього сформовано понад 50 комбінацій ключових слів, однак саме наведені запити виявилися найефективнішими для відбору релевантних публікацій.

Різна наукова спрямованість баз даних зумовила саме такий вибір пошукових платформ: PubMed зосереджений на біомедичних аспектах, IEEE Xplore — на інженерних та комп'ютерних науках, ScienceDirect і SpringerLink охоплюють міждисциплінарні дослідження, а Google Scholar дозволяє відслідковувати широкий спектр публікацій, включно з оглядовими роботами.

Сформовані запити дали великий обсяг результатів, однак кількість і релевантність публікацій суттєво відрізнялися залежно від бази даних (Табл. 1). Щоб забезпечити об'єктивність аналізу, попередньо визначили критерії відбору публікацій. До релевантних відносили наукові статті, які одночасно відповідали таким умовам:

- 1) період публікації — 2005–2024 рр., що охоплює актуальний етап розвитку сенсорних технологій і реабілітаційних систем;
- 2) тип матеріалів — рецензовані журнальні статті, конференційні тези або оглядові роботи, що містять експериментальні чи моделювальні результати;
- 3) наявність у назві, анотації або ключових словах згадок про вплив факторів середовища (температура, вологість, електромагнітне поле, механічні впливи, хімічні чинники) на точність або стабільність сенсорних систем;
- 4) доступність повного тексту для оцінки методології та перевірки наведених даних.

Джерела, що не відповідали цим вимогам (наприклад, загальні огляди без експериментальної частини, технічні повідомлення без рецензії або матеріали, де вплив середовищних факторів не розглядався безпосередньо), були виключені з вибірки. Цей підхід забезпечив уніфіковану оцінку результатів пошуку й унеможливив включення нереконструованих або неакадемічних матеріалів.

Таблиця 1 – Кількість знайдених і релевантних джерел у різних базах даних (відповідно до визначених критеріїв релевантності)

База даних	Діапазон знайдених публікацій	Частка релевантних	Особливості результатів
PubMed	0 – 55	~50–60 %	Невелика кількість, але висока наукова цінність окремих статей
IEEE Xplore	0 – 16	20–80 %	Висока залежність від формулювання запиту
ScienceDirect	300 – 16 000	50–60 %	Широкий спектр інженерних і прикладних досліджень
SpringerLink	126 – 4929	55–60 %	Дотичні теми у біоінженерії та сенсорних технологіях
Google Scholar	10 700 – 18 300	~0,01 %	Велика кількість нерелевантних результатів

У базі PubMed більшість запитів давали обмежену кількість результатів (0–55), однак понад половина з них відповідала зазначеним критеріям, що свідчить про високу наукову цінність вибірки. У Google Scholar кількість результатів коливалася від 10 700 до 18 300, але релевантними виявилися лише близько 0,01 % матеріалів, що підкреслює необхідність ретельної фільтрації результатів [4]. Найінформативнішими для заданої тематики виявилися бази ScienceDirect і SpringerLink, у яких частка релевантних джерел сягала 55–60 %, тоді як у IEEE Xplore цей показник змінювався в межах 20–80 % залежно від формулювання пошукових запитів [5].

На основі отриманих кількісних даних побудовано графічну візуалізацію (Рис. 1), яка дозволяє порівняти ефективність пошукових запитів і проаналізувати рівень інформаційного наповнення тематики. Цифрами (1–10) на діаграмі позначено пошукові запити, перелік яких подано вище, а відсоткові значення відображають частку знайдених публікацій у межах конкретної бази даних відносно її загального обсягу.

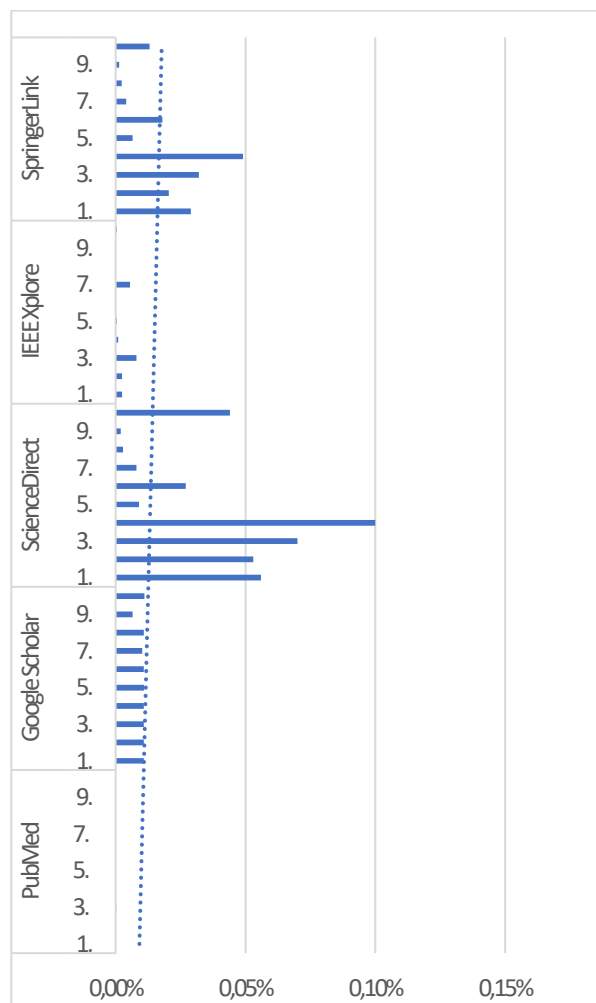


Рисунок 1 – Візуалізація результатів пошуку за тематичними запитами

Такий підхід дозволяє визначити, наскільки широко представлено кожна з тем у сучасній науковій літературі. Діаграма наочно демонструє актуальність окремих напрямів пошукових запитів. Вища частка релевантних джерел свідчить про більшу наукову зацікавленість проблемою впливу зовнішніх факторів на системи відстеження рухів.

Отримані результати підтверджують актуальність теми, однак вказують на недостатню вивченість впливу зовнішніх факторів саме у контексті реабілітаційних технологій. Виявлені прогалини у літературі зумовили необхідність подальшого аналізу, що стало основою наступного етапу дослідження — класифікації сенсорних технологій та оцінки їх стійкості до зовнішніх впливів [6, 7].

IV. КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ВІДСТЕЖЕННЯ РУХІВ

До основних технологій відстеження рухів належать інерціальні вимірювальні одиниці (IMU), оптичні системи, гнучкі сенсори та електромеханічні пристрої (Табл. 2).

Таблиця 2 – Переваги та обмеження сенсорних технологій

Тип сенсорів	Переваги	Обмеження
Інерціальні (IMU)	Компактність, низька вартість	Дрейф сигналів, вплив температури
Оптичні	Висока точність, 3D аналіз	Залежність від освітлення, перешкод
Гнучкі	Зручність, інтеграція в одяг	Чутливість до вологості, деформацій
Електромеханічні	Висока точність	Громіздкість, низька портативність

Інерціальні вимірювальні одиниці (IMU), які об'єднують акселерометри, гіроскопи й магнітометри, вирізняються компактністю та невисокою вартістю, однак залишаються найбільш чутливими до температурних коливань і вібраційних впливів.

Зміни температури призводять до дрейфу нульового сигналу, тоді як вібрації спричиняють поступове накопичення похибок у гіроскопічних вимірюваннях [4].

Оптичні системи характеризуються високою просторовою точністю та можливістю тривимірного аналізу рухів, проте їхня ефективність значною мірою залежить від умов освітлення, наявності

тіней, відбиттів і сторонніх перешкод. Надлишкове електромагнітне або інфрачервоне фонове випромінювання знижує точність обробки відеосигналів та стабільність розпізнавання рухів [5].

Гнучкі сенсори, інтегровані в текстиль або еластичні матеріали, відзначаються високою ергономічністю, але їхня точність знижується під впливом вологості та підвищеної температури тіла, що змінюють електропровідність матеріалу. Тривале перебування в умовах вологості (>80 % RH) може зменшувати точність на 10–15 % [2].

Електромеханічні сенсорні системи, як правило, характеризуються високою точністю вимірювань і стабільністю, але вони вразливі до механічних ударів і хімічно активних середовищ, які прискорюють корозію контактів і знижують довговічність компонентів [7].

Для наочності узагальнений зв'язок між типами сенсорів і критичними зовнішніми факторами подано в таблиці 3.

Таблиця 3 – Взаємозв'язок між типами сенсорів і критичними факторами середовища

Тип сенсорів	Основні зовнішні фактори	Типова реакція / похибка	Джерело
Інерціальні (IMU: акселерометри, гіроскопи, магнітометри)	Температура, вібрації	Дрейф сигналу 0,2–0,5 %/°C; накопичення похибок у гіроскопах	[4]
Оптичні	Освітлення, ЕМ-випромінювання	Зниження точності реконструкції на 10–20 %; поява шумів	[5]
Гнучкі	Вологість, температура тіла	Підвищення опору, похибка до 15 %	[2]
Електромеханічні	Механічні удари, хімічні речовини	Корозія контактів, деградація полімерів, зниження точності	[7]

Для поглибленого аналізу впливу середовищних умов доцільно розглянути взаємозв'язок між конкретними типами сенсорів та характером дії основних факторів середовища. Матрицю взаємозалежностей наведено в таблиці 4.

Таблиця 4 – Взаємозв'язок між зовнішніми факторами та типами сенсорів

Фактор середовища	Найбільш чутливі типи сенсорів	Типові наслідки впливу
Температура	Інерціальні (IMU), гнучкі	Дрейф нульового сигналу, зміна опору матеріалів, похибка 0,2–0,5 %/°C
Вологість	Гнучкі, електромеханічні	Погіршення провідності, корозія контактів, зниження точності до 15 %
Електромагнітні поля	IMU, оптичні	Збої магнітометрів ($\pm 20^\circ$), спотворення оптичного трекінгу
Механічні/хімічні впливи	Електромеханічні, гнучкі	Деформації, корозія, деградація матеріалів, порушення калібрування

З таблиці видно, що інерціальні сенсори найбільш чутливі до температурних і вібраційних впливів, до вологості та механічних деформацій — гнучкі, а електромеханічні системи найбільш вразливі до хімічних середовищ. Оптичні сенсори переважно реагують на освітлення та електромагнітні флуктуації, що знижують точність зображення. Запропонована матрична структура дає змогу оцінювати сукупний ризик впливу зовнішніх факторів на комплексні сенсорні системи та обґрунтувати доцільність комбінованих підходів під час розроблення реабілітаційних пристроїв.

Отже, кожна сенсорна технологія характеризується власним профілем чутливості до зовнішніх чинників, що визначає вимоги до умов експлуатації та калібрування. Поєднання різних типів сенсорів (наприклад, IMU з оптичними або гнучкими) частково компенсує вплив окремих факторів і підвищує надійність реабілітаційних систем у змінних умовах середовища [8, 9].

Практичні наслідки цих ефектів виявляються у різних реабілітаційних сценаріях. Наприклад, у системах відновлення ходи пацієнтів після інсульту або травм нижніх кінцівок IMU-сенсори, розміщені на гомілках, можуть демонструвати температурний дрейф під час тривалих тренувань або при застосуванні теплової терапії. У тренуваннях верхніх кінцівок із використанням гнучких сенсорів, вбудованих у реабілітаційні рукавички, зростання вологості шкіри та температури тіла змінює електропровідність матеріалу, що спотворює амплітуду зареєстрованих рухів. У клінічних залах, насичених електромедичним обладнанням, можливі електромагнітні завади, які погіршують точність орієнтації магнітометрів у носимих системах. А під час домашньої реабілітації оптичні системи, які фіксують рухи у тривимірному просторі, можуть давати помилки через нестабільне освітлення або відблиски від поверхонь.

Наведені приклади підкреслюють необхідність урахування середовищних факторів не лише під час лабораторних тестів, а й при практичному використанні пристроїв у клінічних і домашніх умовах.

V. ФАКТОРИ ЗОВНІШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ЯКІСТЬ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПРИСТРОЇВ

Ефективність роботи пристроїв для відстеження рухів людини істотно визначається умовами експлуатації — температурою, вологістю, рівнем електромагнітних полів, механічними навантаженнями та дією хімічно активних речовин. Літературні дані свідчать, що навіть незначні коливання зовнішніх параметрів

здатні спричиняти статистично значимі похибки у вимірюваннях.

Наприклад, інерціальні сенсори демонструють середній дрейф сигналу до 0,2–0,5 % на °C при зміні температури в діапазоні +10...+40 °C [4], а вологість понад 80 % RH може зменшувати точність гнучких сенсорів до 10–15 % через зростання електричного опору [2]. Для магнітометрів характерне відхилення орієнтації до 15–20° у зонах сильного електромагнітного поля [9]. У випробуваннях за стандартами ІЕС 60068-2-6 та ІЕС 60068-2-27 механічні навантаження амплітудою 1–5 g або ударів до 150 m/s² призводять до зміни калібрування сенсорів на 1–3 % [4]. Вплив хімічно активних агентів (аміак, озон, етанол у концентрації понад 5 %) знижує механічну стійкість матеріалів у середньому до 20 % [7].

Узагальнені орієнтовні діапазони зовнішніх впливів представлено в таблиці 5.

Таблиця 5 – Орієнтовні межі зовнішніх впливів на сенсорні системи

Фактор	Діапазон / Порогове значення	Типова зміна точності	Джерело
Температура	+10...+40 °C	0,2–0,5 % на °C (дрейф сигналу)	El-Sheimy et al., 2008
Вологість	> 80 % RH	зниження точності на 10–15 %	Review of Flexible Wearable Sensor Devices, 2022
ЕМ-випромінювання	до 3 V/m (ІЕС 60601-1-2)	відхилення орієнтації до 15–20°	Wu & Latash, 2014
Вібрації	1–5 g / 5–500 Hz	зміна калібрування на 1–3 %	ІЕС 60068-2-6
Хімічні агенти	аміак, озон, етанол > 5 % конц.	погіршення стійкості матеріалів на до 20 %	Gomes et al., 2015

Аналіз кількісних характеристик показує, що навіть у межах допустимих експлуатаційних параметрів зберігається суттєва варіабельність показників точності сенсорних систем. Це підкреслює потребу враховувати вплив середовищних чинників уже на етапі проєктування, калібрування пристроїв і розроблення протоколів випробувань та метрологічної валідації. Отримані результати можуть слугувати основою для розроблення стандартів оцінювання стабільності сенсорних модулів, що застосовуються в реабілітаційних технологіях.

VI. МЕТОДИ ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ ЗОВНІШНІХ ФАКТОРІВ

Тестування реабілітаційних пристроїв у умовах, що відтворюють реальні зовнішні фактори, є ключовим етапом забезпечення їхньої надійності та безпечності. Міжнародні стандарти формують комплексний підхід до оцінювання стійкості обладнання, який охоплює електромагнітні, кліматичні, механічні та хімічні впливи, а також вимоги до програмної надійності.

Одним із ключових нормативних документів є стандарт ІЕС 60601-1-2, що встановлює вимоги до електромагнітної сумісності медичних електронних систем. Він регламентує перевірку впливу електростатичних розрядів, радіочастотного випромінювання у діапазоні 80 МГц – 2,7 ГГц та імпульсних перенапруг. Пристрої мають демонструвати збереження функціональності під впливом типових для клінічного середовища завад, що виникають від мобільних телефонів, медичного обладнання чи промислових пристроїв [15].

Стійкість до температури та вологості перевіряється відповідно до стандартів ІЕС 60068-2-1, ІЕС 60068-2-2 та ІЕС 60068-2-78, що описують випробування низькими й високими температурами, а також дією вологого тепла. Такі методики дозволяють визначити діапазон стабільної роботи сенсорів під час експлуатації в умовах коливань температури та підвищеного потовиділення пацієнтів [16–18].

Механічна стійкість оцінюється за допомогою випробувань на вібрації та удари

згідно зі стандартами IEC 60068-2-6 та IEC 60068-2-27. Ці стандарти забезпечують перевірку стійкості корпусів і сенсорних модулів до навантажень, що виникають унаслідок падінь, активних рухів чи мікровібрацій під час реабілітаційного процесу. [19, 20].

Хімічна стійкість і біобезпека визначаються стандартами ISO 10993-1 та ISO 2812-1, що передбачають оцінку взаємодії матеріалів із біологічними середовищами, вплив дезінфекційних засобів та агресивних рідин на функціональність сенсорів. Ці вимоги особливо актуальні для носимих пристроїв, що перебувають у тривалому контакті зі шкірою та регулярно піддаються дезінфекції. [14, 22].

Стандарт ISO/IEC 30122 визначає загальні технічні вимоги до ергономіки та надійності носимих систем, тоді як ISO 13485 регламентує процеси виробництва та контролю якості [23, 24]. Для програмних рішень застосовується стандарт ISO/TS 82304-2, що встановлює критерії надійності алгоритмів і стійкості програмних модулів до змінних умов середовища [25].

Поряд із стандартизованими процедурами широко застосовуються лабораторні та польові методи випробувань. Лабораторні випробування виконуються у контрольованих умовах із використанням кліматичних камер, вібраційних стендів і генераторів електромагнітних полів, що гарантує високу точність та відтворюваність результатів [26]. Водночас лабораторні дослідження не завжди відображають багатофакторний вплив середовища, тому важливим є доповнення їх польовими тестами. Польові випробування дають змогу оцінити стабільність роботи сенсорів у реальних умовах — під час фізичної активності пацієнтів, у клінічних або домашніх середовищах [27].

Невід'ємною складовою досліджень є статистичний аналіз даних. Для оцінки впливу середовищних факторів застосовують t-тести, дисперсійний аналіз (ANOVA), критерії Манна–Уїтні та Краскела–Уолліса, що дозволяє визначити

значущість виявлених відмінностей [28]. У випадках багатофакторного впливу застосовується багатовимірний дисперсійний аналіз (MANOVA), а для довготривалих спостережень — аналіз часових рядів, що виявляє тренди деградації сигналу або накопичення похибок [29]. Узагальнення стандартів, що регламентують методи оцінювання впливу зовнішніх факторів на пристрої для відстеження рухів, наведено у вигляді схеми (Рис. 2).

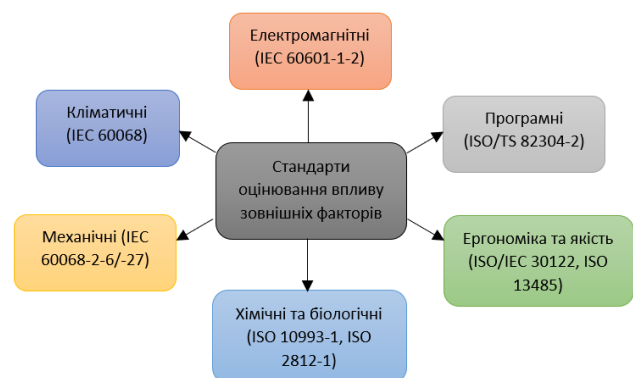


Рисунок 2 – Класифікація стандартів оцінювання впливу зовнішніх факторів на реабілітаційні пристрої для відстеження рухів

Отже, поєднання міжнародних стандартів, лабораторних і польових досліджень та сучасних статистичних методів формує комплексну основу для оцінювання впливу зовнішніх факторів на роботу реабілітаційних пристроїв, забезпечуючи об'єктивність та практичну значущість отриманих результатів [14–20, 22–29].

VII. ВИСНОВКИ

У роботі здійснено систематичний аналіз сучасних досліджень, що стосуються застосування сенсорних систем для відстеження рухів людини у реабілітації. Узагальнення наукових джерел показало, що основними зовнішніми чинниками, які найчастіше впливають на точність та стабільність вимірювань, є температура, вологість, електромагнітні поля, механічні навантаження та хімічно активні середовища. Ці висновки ґрунтуються на аналізі експериментальних результатів,

поданих у розглянутих дослідженнях, і мають аналітичний характер, що підкреслює необхідність подальшої експериментальної верифікації цих результатів у майбутніх дослідженнях.

Порівняно з попередніми роботами, ця стаття узагальнює методи оцінювання стійкості пристроїв і співвідносить їх із чинними міжнародними стандартами, що дозволяє сформулювати єдину систему критеріїв для перевірки надійності сенсорних технологій. Це дає можливість більш комплексно оцінювати ефективність пристроїв у різних середовищах та створює передумови для їх безпечного клінічного використання.

Запропонований підхід сприяє вдосконаленню методів тестування реабілітаційних пристроїв, адаптації сенсорних систем до реальних умов експлуатації та зменшення впливу середовищних факторів. Практична реалізація може ґрунтуватися на застосуванні комбінованих сенсорних модулів та розробці протоколів стандартизованих випробувань.

Практична цінність отриманих результатів полягає у можливості їх застосування під час розроблення національних методичних рекомендацій щодо випробувань реабілітаційних пристроїв. Доцільно частково адаптувати положення міжнародних стандартів ІЕС 60601-1-2 (електромагнітна сумісність), ІЕС 60068 (випробування на кліматичні та механічні впливи), ISO 10993-1 (біосумісність матеріалів) та ISO 13485 (системи управління якістю) до українських вимог метрологічного контролю та технічного регулювання.

В українських умовах доцільно розробити спрощені протоколи випробувань для дослідних зразків носимих реабілітаційних пристроїв, з акцентом на стабільність показників у межах побутових і клінічних сценаріїв. Також рекомендовано впроваджувати обов'язкове тестування на вплив температури (10–40 °C), вологості (до 80 %), електромагнітних полів та механічних навантажень у складі технічних умов (ТУ)

під час подання приладів на державну реєстрацію.

Розробникам слід орієнтуватися на принципи модульного тестування сенсорних компонентів, роздільного аналізу апаратної та програмної частини системи, а також на застосування єдиних методик метрологічного калібрування, узгоджених із ISO/IEC 30122 (носимі пристрої — терміни та загальні вимоги). Це дозволить підвищити рівень довіри до результатів вимірювань і забезпечити сумісність українських пристроїв із міжнародними системами сертифікації.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення алгоритмів інтелектуальної компенсації похибок сенсорних систем на основі методів фільтрації Калмана, нейронних мереж та адаптивної нормалізації сигналів у режимі реального часу.

Передбачено створення інтегрованої системи оцінювання точності, що поєднуватиме математичне моделювання впливу температури, вологості та електромагнітних завад із програмними модулями автоматичної калібрування сенсорів.

У роботі визначено відмінності у рівнях чутливості між інерціальними, оптичними, гнучкими та електромеханічними сенсорами щодо температури, вологості, електромагнітних полів, механічних та хімічних впливів.

Реалізація запропонованих підходів підвищить стабільність вимірювань і забезпечить надійну роботу реабілітаційних пристроїв у змінних середовищних умовах.

Фінансування. Дане дослідження не отримувало зовнішнього фінансування.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Згода на публікацію. Усі пацієнти, що мають відношення до рукопису дали згоду на публікацію даної роботи.

ORCID ID та внесок авторів.

0009-0009-4937-5325 (A,B,D,C) Nina Stepanenko

0000-0001-6070-3945 (E,F) Andrii Dubko

А- Концепція роботи та дизайн, В- Аналіз даних, С- Відповідальність за статистичний аналіз, D- Написання статті, Е- Критичний огляд, F- Остаточне схвалення статті.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. García-de-Villa S., Casillas-Pérez D., Jiménez-Martín A., García-Domínguez J. J. Inertial Sensors for Human Motion Analysis: A Comprehensive Review. — arXiv preprint arXiv:2401.12919, 2024. — Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/2401.12919> — Назва з екрана.
2. Review of Flexible Wearable Sensor Devices for Biomedical Applications. — Режим доступу: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9505309/> — Назва з екрана.
3. Wearable Movement Sensors for Rehabilitation: A Focused Review of Technological and Clinical Advances. — Режим доступу: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6700726/> — Назва з екрана.
4. El-Sheimy N., Hou H., Niu X. Analysis and modeling of inertial sensors using Allan variance // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. — 2008. — 57, № 1. — С. 140–149. — DOI: 10.1109/TIM.2007.912917.
5. Bonato P. Advances in wearable technology and applications in physical medicine and rehabilitation // Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation. — 2005. — 2, № 2. — DOI: 10.1186/1743-0003-2-2.
6. Palensky P., Dietrich D. Demand Side Management: Demand Response, Intelligent Energy Systems, and Smart Loads // IEEE Transactions on Industrial Informatics. — 2011. — 7, № 3. — С. 381–388. — DOI: 10.1109/TII.2011.2158841.
7. Gomes J., Mendes A., Madureira J., Neves P., Silva S. Chemical exposure in cleaning services: an overlooked issue // International Journal of Environmental Research and Public Health. — 2015. — 12, № 2. — С. 1992–2009. — DOI: 10.3390/ijerph120201992.
8. Winter D. A., Patla A. E. Biomechanics and Motor Control of Human Movement. — Hoboken : John Wiley & Sons, 2001. — 616 с.
9. Wu W., Latash M. L. Magnetic disturbance rejection for wearable magnetometer-based orientation sensors // Sensors. — 2014. — 14, № 7. — С. 12098–12117. — DOI: 10.3390/s140712098.
10. Wearable sensors for activity monitoring and motion control: A review. — Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667379723000037> — Назва з екрана.
11. Using Inertial Sensors to Determine Head Motion – A Review // Sensors (MDPI). — Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2313-433X/7/12/265> — Назва з екрана.
12. Yang C.-C., Hsu Y.-L. A review of accelerometry-based wearable motion detectors for physical activity monitoring // Sensors. — 2010. — 10, № 8. — С. 7772–7788. — DOI: 10.3390/s100807772.
13. Sabatini A. M., Martelloni C., Scapellato S., Cavallo F. Assessment of walking features from foot inertial sensing // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. — 2005. — 52, № 3. — С. 486–494. — DOI: 10.1109/TBME.2004.844065.
14. ISO 10993-1:2018 Biological evaluation of medical devices – Part 1: Evaluation and testing within a risk management process. — Geneva : International Organization for Standardization, 2018. — 40 с.
15. IEC 60601-1-2:2014 Medical electrical equipment – Part 1-2: General requirements for basic safety and essential performance – Collateral standard: Electromagnetic disturbances – Requirements and tests. — Geneva : International Electrotechnical Commission, 2014. — 90 с.
16. IEC 60068-2-1:2007 Environmental testing – Part 2-1: Tests – Test A: Cold. — Geneva : International Electrotechnical Commission, 2007. — 48 с.
17. IEC 60068-2-2:2007 Environmental testing – Part 2-2: Tests – Test B: Dry heat. — Geneva : International Electrotechnical Commission, 2007. — 52 с.
18. IEC 60068-2-78:2012 Environmental testing – Part 2-78: Tests – Test Cab: Damp heat, steady state. — Geneva : International Electrotechnical Commission, 2012. — 60 с.
19. IEC 60068-2-6:2007 Environmental testing – Part 2-6: Tests – Test Fc: Vibration (sinusoidal). — Geneva : International Electrotechnical Commission, 2007. — 56 с.
20. IEC 60068-2-27:2008 Environmental testing – Part 2-27: Tests – Test Ea and guidance: Shock. — Geneva : International Electrotechnical Commission, 2008. — 64 с.
21. ISO 10993-1:2018 Biological evaluation of medical devices – Part 1: Evaluation and testing within a risk management process. — Geneva : International Organization for Standardization, 2018. — 40 с.
22. ISO 2812-1:2017 Paints and varnishes – Determination of resistance to liquids – Part 1: Immersion in liquids other than water. — Geneva : International Organization for Standardization, 2017. — 28 с.
23. ISO/IEC 30122:2021 Information technology – Wearables – Vocabulary and general requirements. — Geneva : International Organization for Standardization / International Electrotechnical Commission, 2021. — 34 с.
24. ISO 13485:2016 Medical devices – Quality management systems – Requirements for regulatory purposes. — Geneva : International Organization for Standardization, 2016. — 52 с.
25. ISO/TS 82304-2:2021 Health software – Part 2: Health and wellness apps – Quality and reliability. — Geneva : International Organization for Standardization, 2021. — 36 с.
26. Buxi D., Redmond S. J., Lovell N. H. Experimental evaluation of signal processing methods for physical activity classification with wearable accelerometer sensors // Medical & Biological Engineering & Computing. — 2012. — 50, № 4. — С. 395–405. — DOI: 10.1007/s11517-012-0873-6.
27. Godfrey A., Hetherington V., Shum H., Bonato P., Lovell N. H., Stuart S. From A to Z: Wearable technology explained // Maturitas. — 2020. — 138. — С. 55–62. — DOI: 10.1016/j.maturitas.2020.05.017.
28. Altman D. G. Practical Statistics for Medical Research. — London : Chapman and Hall/CRC, 1991. — 611 с.
29. Chen K. Y., Bassett D. R. The technology of accelerometry-based activity monitors: current and future // Medicine and Science in Sports and Exercise. — 2005. — 37, № 11 Suppl. — С. S490–S500. — DOI: 10.1249/01.mss.0000185571.49104.82.

REFERENCES

1. S. García-de-Villa, D. Casillas-Pérez, A. Jiménez-Martín, and J. J. García-Domínguez, “Inertial Sensors for Human Motion Analysis: A Comprehensive Review,” *arXiv preprint arXiv:2401.12919*, 2024. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2401.12919>
2. “Review of Flexible Wearable Sensor Devices for Biomedical Applications.” [Online]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9505309/>
3. “Wearable Movement Sensors for Rehabilitation: A Focused Review of Technological and Clinical Advances.” [Online]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6700726/>

4. N. El-Sheimy, H. Hou, and X. Niu, "Analysis and modeling of inertial sensors using Allan variance," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 57, no. 1, pp. 140–149, 2008, doi: 10.1109/TIM.2007.912917.
5. P. Bonato, "Advances in wearable technology and applications in physical medicine and rehabilitation," *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, vol. 2, no. 2, 2005, doi: 10.1186/1743-0003-2-2.
6. P. Palensky and D. Dietrich, "Demand Side Management: Demand Response, Intelligent Energy Systems, and Smart Loads," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 7, no. 3, pp. 381–388, 2011, doi: 10.1109/TII.2011.2158841.
7. J. Gomes, A. Mendes, J. Madureira, P. Neves, and S. Silva, "Chemical exposure in cleaning services: an overlooked issue," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 12, no. 2, pp. 1992–2009, 2015, doi: 10.3390/ijerph120201992.
8. D. A. Winter and A. E. Patla, *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2001.
9. W. Wu and M. L. Latash, "Magnetic disturbance rejection for wearable magnetometer-based orientation sensors," *Sensors*, vol. 14, no. 7, pp. 12098–12117, 2014, doi: 10.3390/s140712098.
10. "Wearable sensors for activity monitoring and motion control: A review." [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667379723000037>
11. "Using Inertial Sensors to Determine Head Motion – A Review," *Sensors (MDPI)*. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2313-433X/7/12/265>
12. C.-C. Yang and Y.-L. Hsu, "A review of accelerometry-based wearable motion detectors for physical activity monitoring," *Sensors*, vol. 10, no. 8, pp. 7772–7788, 2010, doi: 10.3390/s100807772.
13. A. M. Sabatini, C. Martelloni, S. Scapellato, and F. Cavallo, "Assessment of walking features from foot inertial sensing," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 52, no. 3, pp. 486–494, 2005, doi: 10.1109/TBME.2004.844065.
14. ISO 10993-1:2018, *Biological evaluation of medical devices – Part 1: Evaluation and testing within a risk management process*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2018.
15. IEC 60601-1-2:2014, *Medical electrical equipment – Part 1-2: General requirements for basic safety and essential performance – Collateral standard: Electromagnetic disturbances – Requirements and tests*. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2014.
16. IEC 60068-2-1:2007, *Environmental testing – Part 2-1: Tests – Test A: Cold*. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2007.
17. IEC 60068-2-2:2007, *Environmental testing – Part 2-2: Tests – Test B: Dry heat*. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2007.
18. IEC 60068-2-78:2012, *Environmental testing – Part 2-78: Tests – Test Cab: Damp heat, steady state*. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2012.
19. IEC 60068-2-6:2007, *Environmental testing – Part 2-6: Tests – Test Fc: Vibration (sinusoidal)*. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2007.
20. IEC 60068-2-27:2008, *Environmental testing – Part 2-27: Tests – Test Ea and guidance: Shock*. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2008.
21. ISO 10993-1:2018, *Biological evaluation of medical devices – Part 1: Evaluation and testing within a risk management process*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2018.
22. ISO 2812-1:2017, *Paints and varnishes – Determination of resistance to liquids – Part 1: Immersion in liquids other than water*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2017.
23. ISO/IEC 30122:2021, *Information technology – Wearables – Vocabulary and general requirements*. Geneva, Switzerland: ISO/IEC, 2021.
24. ISO 13485:2016, *Medical devices – Quality management systems – Requirements for regulatory purposes*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2016.
25. ISO/TS 82304-2:2021, *Health software – Part 2: Health and wellness apps – Quality and reliability*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2021.
26. D. Buxi, S. J. Redmond, and N. H. Lovell, "Experimental evaluation of signal processing methods for physical activity classification with wearable accelerometer sensors," *Medical & Biological Engineering & Computing*, vol. 50, no. 4, pp. 395–405, 2012, doi: 10.1007/s11517-012-0873-6.
27. A. Godfrey, V. Hetherington, H. Shum, P. Bonato, N. H. Lovell, and S. Stuart, "From A to Z: Wearable technology explained," *Maturitas*, vol. 138, pp. 55–62, 2020, doi: 10.1016/j.maturitas.2020.05.017.
28. D. G. Altman, *Practical Statistics for Medical Research*. London, UK: Chapman and Hall/CRC, 1991.
29. K. Y. Chen and D. R. Bassett, "The technology of accelerometry-based activity monitors: current and future," *Medicine and Science in Sports and Exercise*, vol. 37, no. 11 Suppl., pp. S490–S500, 2005, doi: 10.1249/01.mss.0000185571.49104.82.

UDC 615.825:616-7:681.5

EVALUATION OF SENSOR TECHNOLOGIES SENSITIVITY TO EXTERNAL INFLUENCES IN PATIENT MOTION MONITORING SYSTEMS

Nina Stepanenko

stepanenko.nina@lil.kpi.ua

Andrii Dubko

National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
Kyiv, Ukraine

Abstract – Human motion tracking systems occupy an important place in modern rehabilitation programs; however, their effectiveness largely depends on the stability of sensor module performance under real operating and clinical conditions. This study aimed to analyse how environmental factors — temperature, humidity, electromagnetic radiation, mechanical and vibrational impacts, as well as exposure to chemically aggressive media — affect the accuracy and reliability of measurements performed by biomedical devices for motion monitoring. A separate focus is placed on evaluating the sensitivity levels of different types of sensors to external influences. A comprehensive approach was employed, including a systematic review and selection of scientific sources from leading databases (PubMed, IEEE Xplore, ScienceDirect, SpringerLink, and Google Scholar), classification of sensor technologies according to their operating principles and types of acquired signals (inertial measurement units, accelerometers, gyroscopes, magnetometers, flexible sensors, and video-analytic systems), and analysis of their performance under various environmental influences. The results show that even minor fluctuations in temperature or humidity may cause statistically significant signal drift, while electromagnetic fields and vibration can lead to short-term malfunctions, degradation of calibration stability, or increased measurement errors. The analysis identified sensor technologies with the lowest resistance to external factors, established testing criteria, and outlined directions for improving validation protocols and metrological support. The practical significance of this work lies in the potential use of its results for developing new standards for assessing the quality of rehabilitation devices and optimising their use in both clinical and home environments. Future research will focus on developing adaptive algorithms for environmental influence compensation and creating integrated testing methodologies capable of ensuring high reproducibility and metrological consistency of results under diverse operating conditions.

Keywords – biomedical engineering, environmental exposure, motion tracking, rehabilitation, sensors, signal processing, computer-assisted.