



” Шамоня В., Сорока М. Цифрові сенсорні лабораторії як інструмент навчання фізичних основ IoT-систем. *Освіта. Інноватика. Практика*, 2026. Том 14, № 3. С. 138-143. <https://doi.org/10.31110/2616-650X-vol14i3-019>.

Shamonia V., Soroka M. Tsyfrovi sensorni laboratorii yak instrument navchannia fizychnykh osnov IoT-system [Digital sensor laboratories as a tool for teaching the physical foundations of IoT systems]. *Osvita. Innovatyka. Praktyka – Education. Innovation. Practice*, 2026. Vol. 14, No 3. S. 138-143. <https://doi.org/10.31110/2616-650X-vol14i3-019>.

УДК 004.7:681.586:37.091.3

DOI: 10.31110/2616-650X-vol14i3-019

Володимир ШАМОНЯ

Сумський державний педагогічний університет імені А.С.Макаренка, Україна

<https://orcid.org/0000-0002-3201-4090>

v.shamonya@fizmatsspu.sumy.ua

Максим СОРОКА

Сумський державний педагогічний університет імені А.С.Макаренка, Україна

<https://orcid.org/0009-0001-2353-692X>

ms.mikro.1@gmail.com

ЦИФРОВІ СЕНСОРНІ ЛАБОРАТОРІЇ ЯК ІНСТРУМЕНТ НАВЧАННЯ ФІЗИЧНИХ ОСНОВ ІОТ-СИСТЕМ

Анотація. Стаття розкриває можливості використання цифрових сенсорних лабораторій як технічних засобів навчання для формування розуміння фізичних основ IoT-систем. Фокус зроблено на двох найбільш доступних інструментальних конфігураціях: наборах мікроконтролерів (Arduino/ESP32 із сенсорними модулями) та смартфоні як сенсорній платформі (IMU/мікрофон/камера тощо). Огляд виконано у форматі концептуально орієнтованого scoping review, що дозволяє поєднати інженерні та педагогічні джерела з метрологічними й стандартами протоколів передавання даних. Основним результатом дослідження є матриця відповідності «фізична концепція - тип технічного засобу навчання - артефакт даних - IoT-інтерпретація», яка систематизує, як через згадані інструментальні конфігурації опрацьовуються сенсорний принцип, похибка й невизначеність, калібрування й дрейф, шум і фільтрація, дискретизація та квантування, динамічний діапазон, часові мітки й синхронізація, надійність каналу передавання і компроміси енергоспоживання. Наукова новизна дослідження полягає у поданні цих практик у вигляді матриці, придатної для проєктування занять з наперед заданою логікою переходу від фізики вимірювання до системних наслідків для IoT-даних (якість, стабільність, затримка, пропуски), без апеляції до емпіричної перевірки ефективності. Перспективи подальших розвідок пов'язані з емпіричною перевіркою того, як запропонована матриця працює в реальних освітніх умовах: доцільно оцінити, чи покращує вона якість пояснень здобувачів освіти та їхню здатність аргументувати висновки на основі даних, а не на рівні інтуїтивних суджень; варто провести аналіз того, як це впливає на формування критичного ставлення здобувачів освіти до якості даних (чи допомагають здобувачам освіти реальні вимірювання на смартфонах краще усвідомити роль умов середовища, а керованість вимірювань на мікроконтролерах – краще зрозуміти процедуру і межі точності).

Ключові слова: фізичні основи IoT-систем; технічні засоби навчання; цифрові лабораторії; набір мікроконтролерів; смартфон як сенсорна платформа; похибка і невизначеність вимірювання; підготовка в IT; фізична освіта; професійна освіта.

Volodymyr SHAMONIA

Sumy State Pedagogical University named after A.S. Makarenko, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0002-3201-4090>

v.shamonya@fizmatsspu.sumy.ua

Maksym SOROKA

Sumy State Pedagogical University named after A.S. Makarenko, Ukraine

<https://orcid.org/0009-0001-2353-692X>

ms.mikro.1@gmail.com

DIGITAL SENSOR LABORATORIES AS A TOOL FOR TEACHING THE PHYSICAL FOUNDATIONS OF IOT SYSTEMS

Abstract. The article explores the possibilities of using digital sensor laboratories as technical teaching aids for developing an understanding of the physical foundations of IoT systems. The focus is placed on two of the most accessible instrumental configurations: microcontroller kits (Arduino/ESP32 with sensor modules) and the smartphone as a sensor platform (IMU/microphone/camera, etc.). The review is conducted in the format of a conceptually oriented scoping review, which allows integrating engineering and pedagogical sources with meteorological standards and data transmission protocols. The main result of the study is a correspondence matrix “physical concept – type of teaching tool – data artifact – IoT interpretation,” which systematizes how, through the mentioned instrumental configurations, sensor principles, error and uncertainty, calibration and drift, noise and filtering, discretization and quantization, dynamic range, timestamps and synchronization channel reliability, and energy consumption trade-offs are addressed. The scientific novelty of the study lies in presenting these practices in a matrix suitable for designing lessons with a predetermined logic of transition from measurement physics to systemic consequences for IoT data (quality, stability, latency, and losses), without appealing to empirical verification of effectiveness. Future research should focus on empirically testing how the proposed matrix performs in real-world educational settings: it would be useful to assess whether it improves the quality of students’ explanations and their ability to justify conclusions based on data rather than on intuitive judgments; It is worth analyzing how this influences the development of students’ critical attitude toward data quality (whether real-world measurements on smartphones help students better appreciate the role of environmental conditions, and whether the controllability of measurements on microcontrollers helps them better understand the procedure and limits of accuracy).

Keywords: physical foundations of IoT systems; teaching aids; digital laboratories; microcontroller kits; smartphone as a sensor platform; measurement error and uncertainty; IT training; physics education; vocational education.

Вступ. Навчання фізичних основ IoT-систем має специфіку: здобувач освіти працює не лише з “сенсором” як пристроєм, а й з ланцюгом перетворення фізичної величини у дані, їхньою часовою структурою, якістю, стабільністю та придатністю для прийняття рішень. Тому “фізичні основи IoT” доцільно трактувати як сукупність вимірювальних і системних уявлень про принцип дії сенсорів, похибки і невизначеність, калібрування і дрейф, шум і фільтрацію, дискретизацію та квантування, динамічний діапазон і насичення, часові мітки й синхронізацію, надійність каналу передавання даних тощо, характеризують елементи системи (є дані валідними, відтворюваними та інтерпретованими). Цифрові сенсорні лабораторії як технічні засоби навчання створюють можливість зробити ці залежності “видимими”: здобувач освіти отримує не абстрактний опис, а дані та результати вимірювання, які можна аналізувати. Водночас в освітніх практиках часто виникає переки: або домінує інструмент (датчики як “набір”), або домінує програмування (збір даних як “код”), а фізичні підстави якості даних лишаються на рівні загальних тверджень. Мета статті – розробити матрицю параметрів «фізична концепція -технічний засіб навчання – результат для даних - IoT-інтерпретація» для двох цифрових сенсорних лабораторій (набір мікроконтролерів Arduino/ESP32 із сенсорними модулями та смартфон як сенсорна платформа з IMU, мікрофоном, камерою, датчики освітленості тощо), яка дасть можливість узгодити фізичні основи вимірювання з типами даних і системними наслідками для IoT.

Аналіз актуальних досліджень. У сучасній IoT-освіті сенсорні лабораторії дедалі частіше трактуються як середовище формування системного мислення: здобувач освіти має бачити не лише сенсор і код, а весь ланцюг “вимірювання - передавання - обробка - інтерпретація”. Це особливо помітно у дослідженнях, де описуються освітні платформи та курси, що поєднують сенсорні модулі, бездротові інтерфейси тощо [1; 4; 20]. У таких підходах навчальний ефект пов'язують із можливістю швидко переходити від фізичної величини до даних і далі до “системного результату” (наприклад, спостереження затримки, пропусків, стабільності потоку, впливу частоти опитування на енергоспоживання) [12].

Окрема лінія досліджень фокусується на віддалених/гібридних IoT-лабораторіях як способі забезпечити масовість і повторюваність практик при обмежених ресурсах. Дослідження описують архітектури віддалених лабораторій, у яких здобувач освіти працює з реальним обладнанням через веб-інтерфейс, а навчальні завдання вибудовуються навколо конкретних елементів IoT-системи: вузол сенсора, протокол, брокер, панель візуалізації [10]. Для IoT-даних критичною є не лише наявність вимірювання, а й його якість: похибка, невизначеність, повторюваність, відтворюваність. У педагогічній площині це означає, що навчальна сенсорна лабораторія має формувати вимірювальну культуру, а не просто навички підключення модулів. Наразі з'являються публікації, які прямо підкреслюють потребу модернізації викладання науки про вимірювання: здобувач освіти має вміти аргументувати коректність результату, розуміти невизначеність і розрізнати джерела помилок (сенсор, процедура, обробка, середовище) [16].

Показовими є й роботи, де невизначеність вимірювань стає об'єктом спеціального організованого навчання через цифрові інструменти. Наприклад, у хімічній освіті запропоновано підхід, коли обчислення невизначеності та її інтерпретація підтримуються програмним засобом, що знижує поріг входу та дозволяє зосередитися на змісті моделей похибок і коректності висновків. Для IoT-освіти цей результат важливий як аргумент: цифрова сенсорна лабораторія дає найкращий ефект тоді, коли “дані” супроводжуються явним описом якості, а не лише графіком [8].

Сенсорні дані в IoT майже завжди існують як часові ряди. Тому фізичні основи IoT включають дискретизацію, квантування і фільтрацію як фактори, що визначають форму сигналу, структуру шуму, появу спотворень, а також стабільність оцінок у часі. У сучасних застосунках IMU та інші вбудовані сенсори використовуються як недорогі вимірювальні засоби в різних предметних галузях, тому дослідження останніх років детально аналізують практичні наслідки шуму, сенсорного злиття, стабільності орієнтації/ розміщення і впливу алгоритмів обробки на інтерпретацію руху [1].

Паралельно з'являються дослідження, які показують освітній потенціал смартфонів саме як лабораторного інструмента у фізиці [2; 3]. У дослідженні [9] підтверджено, що мобільні сенсори можуть бути не “доповненням”, а повноцінним технічним засобом навчання для тем, де важливі часові ряди, стабільність вимірювань і зв'язок моделі з даними.

Фізичні процеси в IoT не завершуються на сенсорі. Дані передаються, буферизуються, агрегуються, і саме тут виникають ефекти, що змінюють інтерпретацію: пропуски, дублікати, затримка, залежність якості від каналу та частоти. Сучасні публікації про віддалені IoT-лабораторії та навчальні платформи часто будують завдання навколо реального обміну повідомленнями (зокрема через MQTT) і підкреслюють, що навчання протоколів має включати розуміння системних метрик – латентності, пропускну здатності, стабільності доставки у мережі [11].

Отже, узагальнення наукових джерел виявляє дві засадничі тези. Перша: цифрові сенсорні лабораторії в IoT-освіті мають оцінюватися через те, які дані вони дають і які системні наслідки ці дані дозволяють пояснювати, а не через перелік доступних датчиків. Друга: для опанування фізичних основ

IoT потрібне поєднання вимірювальної культури (невизначеність, калібрування, шум, дискретизація) з системними властивостями потоку даних (час, канал, стабільність, енергетика). Саме ця логіка спонукає розробити матрицю проектування навчальних завдань з опанування IoT, що є метою цієї статті.

Матеріали і методи. Дослідження базується на концептуально орієнтованому огляді з різними базовими джерелами (метрологічні керівництва про невизначеність вимірювань і термінологію; стандарти й специфікації IoT-архітектур і протоколів; технічні матеріали про сенсорні інтерфейси; описи сенсорних лабораторій), оскільки важливо було виділити наявні підходи і запропонувати структуру їхнього узгодженого опису [6; 19].

Концептуальна рамка матриці спирається на метрологічну логіку: будь-яке сенсорне вимірювання має похибку й невизначеність, потребує калібрування, залежить від умов середовища та процедури збору даних. Це фіксується у GUM [14] і VIM [15], які задають термінологічний і методичний мінімум для коректного опису вимірювань [14; 15]. На рівні IoT-систем до цих характеристик додаються часові й мережеві ефекти: затримки, пропуски, дублікати, черги, що особливо помітні у сценаріях обміну повідомленнями (наприклад, MQTT) та у використанні референсної IoT-архітектури [13; 17].

У межах цієї статті розглядаються два типи цифрових сенсорних лабораторій. Перший – це набір мікроконтролерів, який забезпечує керування різними параметрами (частоту збору, фільтрацію, реалізацію калібрування, режими енергоспоживання, формати даних), на якому здобувач освіти може простежити, як саме фізичний сигнал переходить у цифрове представлення, і де виникають систематичні похибки через налаштування АЦП, масштабування, квантування, обмеження діапазону, часові зсуви. Ця конфігурація зручна для опрацювання “вимірювальної фізики” і інженерних компромісів. Другий – це смартфон як сенсорна платформа, який доповнює попередній набір частотою дискретизації, яка може бути несталою, часовими мітками, що залежать від ОС і застосунку, середовищем з шумом. Другий набір демонструє те, що якість IoT-даних залежить не лише від сенсора, а й від платформи, умов і процедури збору даних.

Результати. Матриця відповідності побудована так, що для кожної фізичної концепції, значущої для розуміння IoT-систем, окреслено типові дані, які можна отримати за допомогою двох найбільш доступних технічних засобів навчання – набору мікроконтролерів та смартфона як сенсорної платформи (табл.1). У клітинках таблиці зафіксовано три елементи, необхідні для навчального проектування: результат/ дані (що саме спостерігає здобувач освіти), операція/спостереження (що робиться з даними) та IoT-інтерпретація (який системний наслідок пояснюється через фізичний механізм). Такий формат дозволяє уникнути підміни фізичних процесів переліком датчиків і переводить фокус уваги на вимірювальну коректність, часові ряди, якість даних та обмеження платформи.

Таблиця 1

**“Фізична концепція - дані - інтерпретація”
для набору мікроконтролерів та смартфона як сенсорної платформи**

<i>Фізична концепція (C)</i>	<i>Набір мікроконтролерів</i>	<i>Смартфон як сенсорна платформа</i>
C1. Сенсорний принцип (transduction)	Дані: сирі покази + одиниці/коефіцієнти перетворення. Інтерпретація: що саме вимірюється, де межі чутливості, як це пов'язано з фізичною величиною.	Дані: покази вбудованих сенсорів + метадані застосунку. Інтерпретація: вибір сенсора під задачу, валідність вимірювання “побутовим” сенсором.
C2. Похибка, невизначеність, повторюваність	Дані: серії повторів; середнє/SD, вплив алгоритмічних перетворень у код. Інтерпретація: розрізнення похибок сенсора і похибок обробки/масштабування.	Дані: повтори в різних умовах; порівняння з умовним “еталоном”. Інтерпретація: межі точності BYOD, роль умов середовища.
C3. Калібрування і дрейф	Дані: калібрувальна крива, параметри offset/scale в прошивці. Інтерпретація: як калібрування змінює дані, чому потрібна перевірка на дрейф.	Дані: зміна показів у часі (напр., IMU), температурні ефекти. Інтерпретація: стабільність і дрейф як обмеження платформи.
C4. Шум і фільтрація (аналогова/цифрова)	Дані: фільтрація; реалізація MA/EMA/Kalman. Інтерпретація: SNR, компроміс “згладжування - спотворення сигналу”.	Дані: шум середовища (мікрофон/акселерометр), різні режими згладжування в застосунку. Інтерпретація: «відгук» середовища, вплив обробки на висновок.
C5. Дискретизація і квантування	Дані: частота дискретизації, розрядність АЦП (де застосовно), ефект aliasing. Інтерпретація: як Fs і квантування визначають “якість цифрового представлення” фізичного процесу.	Дані: фактична Fs сенсора ОС, пропуски/нерівномірність. Інтерпретація: обмеження мобільної платформи для точних часових рядів.
C6. Динамічний діапазон і насичення	Дані: насичення/обрізання, “плато” показів, перевищення діапазону сенсора.	Дані: кліпінг мікрофона/камери або межі IMU.

Фізична концепція (C)	Набір мікроконтролерів	Смартфон як сенсорна платформа
	Інтерпретація: як переваженість руйнує валідність даних, як це виявляти.	Інтерпретація: чому "гарний графік" може означати насичення, а не стабільність.
C7. Час: мітки, синхронізація, затримка	Дані: мітка часу (RTC/NTP), затримка циклу збору, латентність обробки. Інтерпретація: точність часових рядів як фізична умова коректного аналізу.	Дані: часові мітки застосунку, дрейф/несинхронність сенсорів. Інтерпретація: складність синхронізації як типова проблема IoT-даних.
C8. Канал зв'язку і надійність передачі	Дані: логи BLE/Wi-Fi (де використовується), повтори/втрати, RSSI (за можливості). Інтерпретація: як канал змінює "видимі" сенсорні дані (пропуски, затримки, дублікати).	Дані: практичні тести BLE/Wi-Fi смартфона, порівняння сценаріїв зв'язку. Інтерпретація: вибір каналу як інженерне рішення, а не лише "налаштування".
C9. Енергоспоживання і частота вимірювань	Дані: оцінка струму/режимів сну/активності, робочий цикл. Інтерпретація: компроміс "частота вимірювань - батарея - якість даних".	Дані: вплив активних сенсорів на батарею смартфона. Інтерпретація: реалістичні обмеження мобільних вимірювань у польових умовах.

Набір мікроконтролерів забезпечує керованість параметрів вимірювання й прозорість перетворень (частота збору, фільтрація, калібрування, режими енергоспоживання), тому є придатним для опрацювання фізики вимірювань. Смартфон як сенсорна платформа підсилює розуміння обмежень IoT-даних: несталість частоти дискретизації, чутливість до умов середовища, дрейф і обмеження BYOD-вимірювань. Матриця охоплює дев'ять фізичних концепцій: сенсорний принцип; похибка і невизначеність; калібрування і дрейф; шум і фільтрація; дискретизація та квантування; динамічний діапазон і насичення; час і синхронізація; надійність каналу; енергоспоживання. Перші шість концепцій безпосередньо корелюють із метрологічною культурою опису вимірювань, яку задають GUM та VIM [14; 15], а також із практиками оцінювання невизначеності, поширеними у документах NIST [18]. Три останні концепції формують системний вимір IoT, де дані існують як потік, що передається і обробляється в архітектурі IoT, з типовими ризиками [13; 17]. Матриця дозволяє користуватися двома стратегіями проектування освітньої діяльності.

Основний висновок, який випливає з використання матриці, полягає у різній дидактичній силі навчальних IoT-систем – набору мікроконтролерів та смартфона як сенсорної платформи – щодо окремих фізичних концепцій. Перша завдяки керованості, найкраще підходить для формування інженерного бачення вимірювальної процедури як реалізація фільтра змінює шум і форму сигналу, як калібрування переносить дані у фізичні одиниці, як режими енергоспоживання визначають частоту вимірювань і, відповідно, якість часових рядів. Друга робить акцент на природних обмеженнях реального збору даних: сенсори працюють в умовах, де шум і впливи середовища є типовими, частота дискретизації не завжди стабільна, синхронізація різних сенсорів ускладнена. Тому смартфон як сенсорна платформа особливо корисний для формування критичного ставлення до валідності висновків на основі сенсорних даних.

Обмеження. Обмеження цієї роботи визначаються її оглядовим характером. По-перше, матриця є результатом концептуальної систематизації, а не доказом доведеною методикою чи освітнім підходом, тому вона потребує подальшої емпіричної перевірки в освітніх умовах, якщо така задача буде поставлена. По-друге, запропонована матриця є узагальненням і не враховує специфіку конкретних моделей датчиків і застосунків, що може впливати на частоту дискретизації, доступність метаданих і точність часових міток. По-третє, мережевий вимір IoT може бути реалізований у різних протоколах і сценаріях, а отже, рівень деталізації залежить від того, наскільки лабораторія включає реальний обмін повідомленнями (наприклад, MQTT) чи лише локальний запис [17].

Висновки. Матриця відповідності «фізична концепція - технічний засіб навчання - артефакт даних – IoT-інтерпретація» дає зручний інструмент для проектування занять із фізичних основ IoT-систем, який не прив'язує викладача до конкретного набору обладнання і водночас не зводить роботу до "підключення датчиків". Вона фіксує, які саме навчальні результати можна формувати через два доступні типи IoT-систем: мікроконтролерний набір і смартфон як сенсорну платформу. Завдяки цьому викладач може планувати заняття не від переліку пристроїв, а від змісту: які поняття про вимірювання та дані мають стати предметом осмислення, які об'єкти/моделі здобувач освіти має створити, і який висновок він може обґрунтувати на їхній основі. Матриця також підтримує прозоріший підхід до оцінювання, бо результат тут означає не тільки правильність чисел, а й здатність здобувача освіти пояснити, звідки береться похибка, чому змінюється форма сигналу після фільтрації, як дискретизація

впливає на інтерпретацію часових рядів, і чому в реальних умовах дані можуть бути неповними або нерівномірними.

Перспективи подальших розвідок пов'язані з емпіричною перевіркою того, як запропонована матриця працює в реальних освітніх умовах. Насамперед доцільно оцінити, чи покращує вона якість пояснень здобувачів освіти та їхню здатність аргументувати висновки на основі даних, а не на рівні інтуїтивних суджень. Перспективним також є аналіз того, як це впливає на формування критичного ставлення до якості даних: чи допомагають реальні вимірювання на смартфонах краще усвідомити роль умов середовища, а керованість вимірювань на мікроконтролерах – краще зрозуміти процедуру і межі точності.

Конфлікт інтересів. Автор заявляє про відсутність конфлікту інтересів.

Джерела фінансування. Дослідження не отримувало зовнішнього фінансування.

Доступність даних. Дані можуть бути надані за обґрунтованим запитом відповідному автору.

Використання засобів штучного інтелекту (ШІ). Під час підготовки цієї роботи автори використовували Grammarly для виявлення технічних помилок та якості англійської мови в анотації перекладу.

Список використаних джерел

1. Дементьев, Е., & Юрченко, А. (2025). Використання відкритих освітніх платформ для формування інженерного мислення у курсах мікроелектроніки. *Освіта. Інноватика. Практика*, 13(6), 98–103. <https://doi.org/10.31110/2616-650X-vol13i6-013>
2. Здешиц, В., Здешиц, А., & Пирховка, К. (2024). Вимірювання кута відриву тіл під час їх руху по сферичній поверхні. *Фізико-математична освіта*, 39(3), 53–60. <https://doi.org/10.31110/fmo2024.v39i3-07>
3. Федчишин, О., Мохун, С., & Чопик, П. (2023). Віртуальний фізичний експеримент як засіб удосконалення фахових компетентностей здобувачів освіти в умовах дистанційного навчання. *Фізико-математична освіта*, 38(2), 50–55. <https://doi.org/10.31110/2413-1571-2023-038-2-008>
4. Шамо́ня, В. Г., Момот, Р. А., & Семеніхіна, О. В. (2025). Візуальні методи навчання основ мікроелектроніки і архітектури комп'ютера: використання віртуального середовища Proteus. *Вісник Луганського національного університету імені Тараса Шевченка. Педагогічні науки*, (3), 90–96. <https://doi.org/10.12958/3083-6514-2025-3-90-96>
5. Andersson, R., Bermejo-García, J., Agujetas, R., Cronhjort, M., & Chilo, J. (2024). Smartphone IMU sensors for human identification through hip joint angle analysis. *Sensors*, 24(15), 4769. <https://doi.org/10.3390/s24154769>
6. Arksey, H., & O'Malley, L. (2005). Scoping studies: Towards a methodological framework. *International Journal of Social Research Methodology*, 8(1), 19–32. <https://doi.org/10.1080/1364557032000119616>
7. Bakare, M. S., & Abubaker, K. (2026). IoT-based indoor environmental monitoring system using multi-parameter sensing and ESP32-WROOM integration. *Discover Electronics*, 3, Article 6. <https://doi.org/10.1007/s44291-026-00157-3>
8. Cerrato-Alvarez, M., Frutos-Puerto, S., & Pinilla-Gil, E. (2023). Use of uncertainty calculation software as a didactic tool to improve the knowledge of chemistry students in analytical method validation. *Journal of Chemical Education*, 101(1), 104–112. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.3c00102>
9. Christonasi, P., & Kotsis, K. T. (2026). Smartphone-based experimentation for teaching linear motion in primary education. *EIKI Journal of Effective Teaching Methods*, 4(1). <https://doi.org/10.59652/v2df0630>
10. Czekalski, P., Tokarz, K., Kuaban, G. S., Sell, R., Nikitenko, A., Berkolds, K., & Lipka, Ł. (2025). Design and implementation of a next-generation remote lab for IoT and Industry 4.0. *Procedia Computer Science*, 270, 387–396. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.09.157>
11. Garefalakis, M., Kamarianakis, Z., & Panagiotakis, S. (2024). Remote laboratory for developing an IoT system. In *Proceedings of the 28th Pan-Hellenic Conference on Progress in Informatics and Computing (PCI '24)*. Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3716554.3716602>
12. Hercog, D., Lerher, T., Truntič, M., & Težak, O. (2023). Design and implementation of ESP32-based IoT devices. *Sensors*, 23(15), 6739. <https://doi.org/10.3390/s23156739>
13. International Organization for Standardization & International Electrotechnical Commission. (2018). *ISO/IEC 30141:2018 — Internet of Things (IoT) — Reference architecture*. ISO.
14. Joint Committee for Guides in Metrology. (2008). *Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement (JCGM 100:2008)*. BIPM.
15. Joint Committee for Guides in Metrology. (2012). *International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM) (JCGM 200:2012)*. BIPM.
16. Morawski, R. Z. (2025). Teaching measurement science and technology in the times of pervasive AI. *Measurement: Sensors*, 38(Suppl.), 101315. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2024.101315>
17. OASIS. (2019). *MQTT Version 5.0 (OASIS Standard)*. OASIS Open.
18. Taylor, B. N., & Kuyatt, C. E. (1994). *Guidelines for evaluating and expressing the uncertainty of NIST measurement results (NIST Technical Note 1297)*. National Institute of Standards and Technology.
19. Tricco, A. C., Lillie, E., Zarin, W., O'Brien, K. K., Colquhoun, H., Levac, D., Moher, D., Peters, M. D. J., Horsley, T., Weeks, L., Hempel, S., Akl, E. A., Chang, C., McGowan, J., Stewart, L., Hartling, L., Aldcroft, A., Wilson, M. G., Garritty, C., ... Straus, S.E. (2018). PRISMA Extension for Scoping Reviews (PRISMA-ScR): Checklist and explanation. *Annals of Internal Medicine*, 169(7), 467–473. <https://doi.org/10.7326/M18-0850>

20. Yurchenko, A., Proshkin, V., Naboka, O., Shamonina, V., & Semenikhina, O. (2023). The use of digital technologies in education: The case of physics learning. *International Journal of Research in E-learning*, 9(2), 1–25. <https://doi.org/10.31261/IJREL.2023.9.2.02>

References

1. Diemientiev, Ye., & Yurchenko, A. (2025). Vykorystannia vidkrytykh osvitykh platform dlia formuvannia inzhenernoho myslennia u kursakh mikroelektroniky [Using open educational platforms to develop engineering thinking in microelectronics courses]. *Osvita. Innovatyka. Praktyka – Education. Innovation. Practice*, 13(6), 98–103. <https://doi.org/10.31110/2616-650X-vol13i6-013> (in Ukrainian)
2. Zdeschchys, V., Zdeschchys, A., & Pyrhovka, K. (2024). Vymyriuvannia kuta vidryvu til pid chas yikh rukhu po sferychnii poverkhni [Measurement of the angle of departure of bodies during their motion on a spherical surface]. *Fizyko-matematychna osvita – Physical and Mathematical Education*, 39(3), 53–60. <https://doi.org/10.31110/fmo2024.v39i3-07> (in Ukrainian)
3. Fedchyshyn, O., Mokhun, S., & Chopyk, P. (2023). Virtualnyi fizychnyi eksperyment yak zasib udoskonalennia fakhovykh kompetentnosti zdobuvachiv osvity v umovakh dystantsiinoho navchannia [A virtual physics experiment as a means of improving the professional competencies of students in the conditions of distance education]. *Fizyko-matematychna osvita – Physical and Mathematical Education*, 38(2), 50–55. <https://doi.org/10.31110/2413-1571-2023-038-2-008> (in Ukrainian)
4. Shamonina, V., Momot, R., & Semenikhina, O. (2025). Visual methods for teaching the fundamentals of microelectronics and computer architecture: using the virtual environment Proteus. *Bulletin of Luhansk Taras Shevchenko National University. Pedagogical Sciences*, (3), 90–96. <https://doi.org/10.12958/3083-6514-2025-3-90-96> (in Ukrainian)
5. Andersson, R., Bermejo-García, J., Agujetas, R., Cronhjort, M., & Chilo, J. (2024). Smartphone IMU sensors for human identification through hip joint angle analysis. *Sensors*, 24(15), 4769. <https://doi.org/10.3390/s24154769>
6. Arksey, H., & O'Malley, L. (2005). Scoping studies: Towards a methodological framework. *International Journal of Social Research Methodology*, 8(1), 19–32. <https://doi.org/10.1080/1364557032000119616>
7. Bakare, M. S., & Abubaker, K. (2026). IoT-based indoor environmental monitoring system using multi-parameter sensing and ESP32-WROOM integration. *Discover Electronics*, 3, Article 6. <https://doi.org/10.1007/s44291-026-00157-3>
8. Cerrato-Alvarez, M., Frutos-Puerto, S., & Pinilla-Gil, E. (2023). Use of uncertainty calculation software as a didactic tool to improve the knowledge of chemistry students in analytical method validation. *Journal of Chemical Education*, 101(1), 104–112. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.3c00102>
9. Christonasi, P., & Kotsis, K. T. (2026). Smartphone-based experimentation for teaching linear motion in primary education. *EIKI Journal of Effective Teaching Methods*, 4(1). <https://doi.org/10.59652/v2df0630>
10. Czekalski, P., Tokarz, K., Kuaban, G. S., Sell, R., Nikitenko, A., Berkolds, K., & Lipka, Ł. (2025). Design and implementation of a next-generation remote lab for IoT and Industry 4.0. *Procedia Computer Science*, 270, 387–396. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.09.157>
11. Garefalakis, M., Kamarianakis, Z., & Panagiotakis, S. (2024). Remote laboratory for developing an IoT system. In *Proceedings of the 28th Pan-Hellenic Conference on Progress in Informatics and Computing (PCI '24)*. Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3716554.3716602>
12. Hercog, D., Lerher, T., Truntič, M., & Težak, O. (2023). Design and implementation of ESP32-based IoT devices. *Sensors*, 23(15), 6739. <https://doi.org/10.3390/s23156739>
13. International Organization for Standardization & International Electrotechnical Commission. (2018). *ISO/IEC 30141:2018 — Internet of Things (IoT) — Reference architecture*. ISO.
14. Joint Committee for Guides in Metrology. (2008). *Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement (JCGM 100:2008)*. BIPM.
15. Joint Committee for Guides in Metrology. (2012). *International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM) (JCGM 200:2012)*. BIPM.
16. Morawski, R. Z. (2025). Teaching measurement science and technology in the times of pervasive AI. *Measurement: Sensors*, 38(Suppl.), 101315. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2024.101315>
17. OASIS. (2019). *MQTT Version 5.0 (OASIS Standard)*. OASIS Open.
18. Taylor, B. N., & Kuyatt, C. E. (1994). *Guidelines for evaluating and expressing the uncertainty of NIST measurement results (NIST Technical Note 1297)*. National Institute of Standards and Technology.
19. Tricco, A. C., Lillie, E., Zarin, W., O'Brien, K. K., Colquhoun, H., Levac, D., Moher, D., Peters, M. D. J., Horsley, T., Weeks, L., Hempel, S., Akl, E. A., Chang, C., McGowan, J., Stewart, L., Hartling, L., Aldcroft, A., Wilson, M. G., Garrity, C., ... Straus, S.E. (2018). PRISMA Extension for Scoping Reviews (PRISMA-ScR): Checklist and explanation. *Annals of Internal Medicine*, 169(7), 467–473. <https://doi.org/10.7326/M18-0850>
20. Yurchenko, A., Proshkin, V., Naboka, O., Shamonina, V., & Semenikhina, O. (2023). The use of digital technologies in education: The case of physics learning. *International Journal of Research in E-learning*, 9(2), 1–25. <https://doi.org/10.31261/IJREL.2023.9.2.02>

| Матеріал надійшов до редакції: 25.12.2025 р. | Прийнято до друку: 11.02.2026 р. | Опубліковано: 31.03.2026 р. |



This work is licensed under a Creative Commons License Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).