

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ЗАВАДИ ТА НАДІЙНІСТЬ ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ У НАВЧАЛЬНИХ ЕКСПЕРИМЕНТАХ ІЗ SDR

Володимир ШАМОНЯ ✉

Сумський державний педагогічний університет
імені А.С.Макаренка, Україна
v.shamonya@fizmatsspu.sumy.ua
<https://orcid.org/0000-0002-3201-4090>

Владислав БЕСПАЛИЙ

Сумський державний педагогічний університет
імені А.С.Макаренка, Україна
v.bespalyi@fizmatsspu.sumy.ua
<https://orcid.org/0009-0009-0630-5183>

ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE AND DATA TRANSMISSION RELIABILITY IN SDR-BASED EDUCATIONAL EXPERIMENTS

Volodymyr SHAMONIA

Sumy State Pedagogical University
named after A. S. Makarenko, Ukraine
v.shamonya@fizmatsspu.sumy.ua
<https://orcid.org/0000-0002-3201-4090>

Vladyslav BESPALYI

Sumy State Pedagogical University
named after A. S. Makarenko, Ukraine
v.bespalyi@fizmatsspu.sumy.ua
<https://orcid.org/0009-0009-0630-5183>

АНОТАЦІЯ

Формулювання проблеми. Стаття розкриває проблему поєднання і засвоєння уявлень про сигнал, завади та канал зв'язку з якістю передавання даних інформаційною системою (ІС) за допомогою технічних засобів навчання (SDR і простих радіомодулів). Метою статті є систематизація практик виявлення та опису електромагнітних завод (ЕМЗ) і оцінювання надійності передавання даних.

Матеріали і методи. Огляд виконано через інтегрування різномірних джерел: інженерні дослідження коекзистенції технологій у 2.4 GHz ISM-діапазоні, публікації про SDR-лабораторії та стандарти як орієнтир коректності вимірювань.

Результати. Основними результатами є: таксономія практик ЕМЗ-спостереження, таксономія метрик надійності та матриця відповідності «практика ЕМЗ - метрика надійності», доповнена рамкою впровадження лабораторних робіт. Визначено межі використання радіомодуля: пристрій розглянуто як навчальний засіб спостереження, а стандарти – як джерело вимог до валідності процедури, а не як вимога до сертифікаційних вимірювань. Наукова новизна дослідження полягає у концептуальній систематизації практик виявлення та опису ЕМЗ і практик оцінювання надійності передавання даних у такій формі, яка придатна для викладання фізичних основ ІС.

Висновки. Систематизація практик дозволяє проектувати лабораторні завдання з наперед визначеним причинним механізмом та прозорими вимогами до результату. Подальші розвідки можуть бути спрямовані на адаптацію матриці до змішаного і дистанційного форматів навчання; важливим є розширення предметного поля за межі одного діапазону та одного класу пристроїв: порівняння навчальних ефектів і типових помилок інтерпретації для різних технологій (наприклад, Wi-Fi, Bluetooth) і різних умов середовища дозволить уточнити універсальні та специфічні елементи запропонованої матриці й рамки.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: фізичні основи ІС; технічні засоби навчання; інформаційна система; електромагнітні завади; електромагнітна сумісність; SDR; відтворюваність лабораторних вимірювань, фізична освіта.

ДЛЯ ЦИТУВАННЯ: Шамо́ня В., Бєспа́лий В. Електромагнітні завади та надійність передавання даних у навчальних експериментах із SDR. *Фізико-математична освіта*, 2026. Том 41. № 2. С. 94-100. <https://doi.org/10.31110/fmo2026.v41i2-06>.

ABSTRACT

Formulation of the problem. This article explains how, within the course *Physical Foundations of Information Systems*, concepts of signal, interference, and communication channel can be connected to practical metrics of data transmission quality using instructional technical tools (software-defined radio, SDR, and simple radio modules). The aim is to systematize practices of (a) detecting and describing electromagnetic interference (EMI) and (b) assessing data transmission reliability, thereby providing a methodological bridge between physical manifestations in the radio environment and network-level outcomes (PER/PRR/throughput/latency/outages).

Materials and methods. The review is conducted as a scoping review, which enables integration of heterogeneous sources: engineering studies on technology coexistence in the 2.4 GHz ISM band, educational publications on SDR laboratories, and standards used as reference points for measurement rigor.

Results. The main results include: a taxonomy of EMI observation practices, a taxonomy of reliability metrics, and a correspondence matrix “EMI practice - reliability metric,” complemented by an implementation framework for laboratory work and a minimal package of reproducibility artifacts. The article delineates the limits of SDR use: the device is treated as an educational observation tool, while standards are used as a source of requirements for procedural validity rather than as a basis for certification measurements. Scientific novelty lies in a conceptual systematization of EMI detection/description practices and reliability assessment practices, in a form suitable for teaching the *Physical Foundations of Information Systems* course using instructional technical tools.

Conclusions. The systematization of practices is presented as a correspondence matrix between types of EMI observations and reliability metrics, enabling the design of laboratory tasks with a predefined causal mechanism and transparent requirements for outcomes. Further research could focus on adapting the matrix for blended and distance-learning formats. It is important to expand the scope beyond a single range and a single class of devices: comparing learning outcomes and typical interpretation errors across different technologies (e.g., Wi-Fi, Bluetooth) and different environmental conditions will help refine the universal and specific elements of the proposed matrix and framework.

KEYWORDS: physical foundations of information systems; instructional technical tools; information systems; electromagnetic interference; electromagnetic compatibility; reproducibility of laboratory measurements; physics education.

FOR CITATION: Shamonia, V., & Bospalyi, V. (2026). Electromagnetic interference and data transmission reliability in SDR-based educational experiments. *Physical and Mathematical Education*, 41(2), 94-100. <https://doi.org/10.31110/fmo2026.v41i2-06>.

ВСТУП

Постановка проблеми. Курс «фізичні основи ІС» потребує такої дидактичної логіки, яка дозволяє здобувачу освіти перейти від фізичних явищ на рівні сигналу та середовища передавання даних до пояснення поведінки інформаційної системи через вимірювані показники її якості. У цій логіці електромагнітні завади не є абстрактним “шумом”, а постають як сукупність керованих проявів електромагнітного середовища, що відображаються на надійності передавання даних і стабільності зв’язку. Водночас у курсах, споріднених із мікроелектронікою та комп’ютерною архітектурою інформаційних систем, уже накопичено досвід, який показує: технічні засоби навчання працюють найкраще тоді, коли забезпечують не лише наочність, а й підкріплюють пояснення результату. У вітчизняних дослідженнях підкреслено продуктивність наочного моделювання цифрових компонентів для засвоєння складних тем мікроелектроніки й архітектури комп’ютера (Шамо́ня та ін., 2025a), а також показано потенціал віртуальних середовищ (зокрема, Proteus) для візуалізації процесів і формування інженерного бачення схем і систем (Шамо́ня та ін., 2025b). У роботах, присвячених STEM-інтеграції, обґрунтовано, що поєднання інженерних задач, цифрових інструментів і практикоорієнтованих підходів до навчання підсилює розуміння фізичних основ функціонування технічних систем та робить можливою перевірку навчальних результатів (Семеніхіна та ін., 2025). Важливими є й результати про використання відкритих освітніх платформ для формування інженерного мислення в курсах мікроелектроніки (Демент’єв & Юрченко, 2025): вони підкреслюють значення доступності інструментів і прозорості процедур, що напряду переноситься на лабораторії з радіомодулями, де налаштування та параметри спостереження визначають коректність висновків. Додатково міжнародний досвід застосування цифрових технологій у навчанні фізики показує, що цифрові інструменти найбільш ефективні тоді, коли не підмінюють зміст, а організовують експеримент, інтерпретацію даних і рефлексію щодо отриманого результату (Yurchenko et al., 2023). Ці підходи є релевантними й для вивчення електромагнітних завод, однак тут з’являється додатковий методичний виклик. Наочність спектрограм або графіків сама по собі не гарантує їх розуміння: здобувач освіти може відтворити “картинку” спектра, але не пояснити, чому саме за певної структури завод зменшується частка успішно прийнятих пакетів або зростає нерівномірність затримки передавання даних.

Метою статті є концептуальна систематизація практик визначення та опису електромагнітних завод у навчальних експериментах із використанням SDR і простих радіомодулів, а також практик оцінювання надійності передавання даних у присутності завод. Результатом огляду запропоновано: (1) таксономію практик “спостереження/виявлення завод”; (2) матрицю відповідності між типами практик і метриками надійності; (3) рамку впровадження таких практик у лабораторних заняттях, яка задає послідовність дій і мінімальний набір артефактів відтворюваності. Така постановка проблеми узгоджується з наявними педагогічними напрацюваннями у сфері мікроелектроніки й цифрового моделювання (Шамо́ня та ін., 2025a; Семеніхіна та ін., 2025), але переносить акцент на специфічний для ІС перехід від фізики електромагнітного середовища до системних показників надійності.

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Поняття електромагнітних завод (ЕМЗ) в цій роботі використано для опису фізичних впливів, що змінюють спостережувані параметри сигналу та, як наслідок, показники надійності передавання даних. Натомість електромагнітна сумісність (ЕМС) розглядається як категорія, що має стандартизовані процедури й вимоги до вимірювальної апаратури. У навчальному середовищі важливо не підмінювати одне іншим. SDR і недорогі радіомодулі доцільно трактувати як технічні засоби навчання, які дозволяють відтворити причинно-наслідкові зв’язки і сформулювати інтерпретацію, але не як засоби сертифікаційного вимірювання електромагнітних завод у нормативному сенсі. Тому в огляді акцент зроблено на методичній коректності спостереження: сталість параметрів вимірювання, контроль переважанення приймача, документування налаштувань, відокремлення фізичних ефектів від слідів використання інструмента.

SDR у навчальній лабораторії виконує роль “спостерігача” спектра та часової структури активності в діапазоні. Це відкриває шлях до важливих з методичної точки зору запитань: що саме означає “зайнятий канал”; чому короткі імпульсні події можуть погіршувати надійність сильніше, ніж стабільний фон; як просторові чинники (відстань, орієнтація антен, екранування) впливають на ймовірність приймання пакетів даних. Однак зміна ширини смуги приймання, параметрів FFT, вікна усереднення, порогів визначення, а також неконтрольоване переважанення вхідного тракту здатні породити висновки, які виглядають переконливо, але не відтворюються. Тому здобувач освіти має навчитися не лише “бачити спектр”, а й аргументувати, чому вимірювання є достатньо надійним, щоб робити висновки про поведінку інформаційної системи.

Саме тому доцільно описати практики фіксації та інтерпретації завод (спектральних, часових, просторових і процедурних) та практики оцінювання надійності передавання даних. Їх поєднання у матриці відповідності дозволить проєктувати лабораторні завдання так, щоб технічні засоби навчання працювали на пояснення причин того, які параметри електромагнітного середовища спричиняють зміну надійності і які кроки потрібно виконати, щоб такий висновок зробити.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Дослідження проведено у форматі огляду: якісно аналізувалися інженерні дослідження, методичні описи лабораторій із SDR, а також нормативні документи, що задають вимоги до вимірювань і термінології. Такий тип огляду доцільний, коли потрібно не оцінити ефект, а описати обсяг і структуру наявних підходів, виділити повторювані практики та запропонувати їх систематизацію. Методологічно огляд спирається на рамку Arksey & O’Malley (2005) і подальші уточнення щодо етапів і якості звітності; звітування структурується з урахуванням PRISMA-ScR (Tricco et al., 2018).

Пошук здійснювався за чотирма кластерами запитів. Перший кластер охоплював роботи про інтерференцію та коекзистенцію технологій у неліцензованих діапазонах (насамперед 2.4 GHz ISM) з кількісними метриками надійності (BER/PER/PRR/throughput/latency). Другий кластер охоплював джерела, у яких описано практики спектрального спостереження та оцінювання активності в каналі (PSD, спектрограма, зайнятість каналу, енергетичне детектування) і їхні

обмеження. Третій кластер охоплював освітні публікації, що розглядають SDR як технічний засіб навчання для лабораторій з теорії зв'язку, обробки сигналів та мережевих вимірювань. Четвертий кластер включав стандарти і регуляторні документи як рамкові орієнтири того, як у фаховій практиці описують співіснування в ISM-діапазоні та вимоги до вимірювальної апаратури/процедур (Shin et al., 2007b).

Критеріями включення були: (1) наявність явного зв'язку між характеристиками інтерференції або умовами спектрального середовища та метриками надійності передавання даних; (2) достатній опис методики вимірювання або моделювання (щоб її можна було перетворити на навчальну практику); (3) релевантність до лабораторних робіт із доступними технічними засобами навчання (SDR, прості радіомодулі, програмні інструменти на кшталт GNU Radio). Виключалися популярні матеріали без методики та джерела, де спектральні спостереження не пов'язані з індикаторами надійності. Дані з джерел “картувалися” у двовимірну структуру: (а) практика визначення/опису завод (спектральна, часова, просторова, процедурна), (б) метрика надійності (BER/PER, PRR, throughput/goodput, latency/jitter, outages). Результатом картування стала матриця відповідності (Arksey & O'Malley, 2005).

Запропонована рамка впровадження орієнтована на методичне завдання: перетворити роботу з SDR і радіомодулями з демонстрації обладнання на формування здатності здобувачів освіти пояснювати поведінку інформаційної системи через її фізичні передумови. Здобувач освіти має не лише отримати спектрограму, а й пов'язати характеристики електромагнітного середовища з конкретними метриками надійності передавання даних. Як технічні засоби навчання використовуються: (а) SDR як інструмент спостереження спектра й активності в діапазоні; (б) прості радіомодулі або вузли мережі (IEEE 802.15.4, інші навчальні модулі) як джерело пакетних логів; (в) програмні інструменти для збору й аналізу даних (GNU Radio або еквівалент, скрипти аналізу). Освітня доцільність SDR у цьому форматі обґрунтовується працями, де SDR розглядаються як платформа для навчальних сценаріїв із акцентом на практичний вимір теорії зв'язку (Ramos et al., 2024).

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Поняття завод набуває змісту тоді, коли здобувач освіти бачить, що “завада” — це не абстрактний шум, а конкретний стан електромагнітного середовища, який можна описати вимірюваними ознаками і пов'язати з поведінкою каналу зв'язку. Технічні засоби навчання на кшталт SDR є зручними саме тому, що дають оперативне спостереження за спектром та активністю діапазону, а отже, дозволяють будувати причинні пояснення на межі “сигнал–канал–дані”. SDR-лабораторії підтримують перехід від теорії до експерименту, але вимагають чітко заданої методики, інакше спостереження перетворюється на “картинку” без інженерного висновку. (Ramos et al., 2024).

Перший клас практик — спектральний опис. Він включає: оцінювання спектральної щільності потужності (PSD), побудову спектрограм (час–частота), спостереження домінантних джерел у смузі каналу, фіксацію перекриття каналів і появу широкопasmових або вузькопasmових компонентів. Для навчання важливий не сам спектр, а те, що через нього здобувач освіти починає розрізняти: (а) “фон” (підвищення шумового фону), (б) “домінантне джерело” (пік/смуга, що перебиває канал), (в) “перемикання” активності між каналами. Окрему дидактичну цінність мають завдання, де здобувач освіти змінює частоту/канал передавання даних і бачить, як це змінює спектральну ситуацію, а далі — метрики надійності. Така логіка добре узгоджується з ідеєю регуляторного “спільного використання спектра” для обладнання 2.4 GHz ISM, відображеною в ETSI EN 300 328 (вимоги доступу до спектра/співіснування) (European Telecommunications Standards Institute, 2019).

Другий клас — зайнятість каналу (channel occupancy) та пов'язані з нею методи енергетичного детектування (визначення). З педагогічного погляду це місток між фізикою і протоколами доступу до середовища. Здобувач освіти бачить, що навіть без “високого шуму” канал може бути “поганим” через домінування чужих передавань у часі. Тут доцільно вводити поняття порога та часових вікон усереднення: різні параметри детектування дають різні оцінки усереднення, а отже, потребують фіксації процедури. Практика усереднення особливо корисна у сценаріях коекзистенції Wi-Fi та IEEE 802.15.4, де деградація якості часто пояснюється не лише енергетикою перешкоди, а й тим, що “ефір зайнятий” і пристрої відступають у backoff/повтори (Shin et al., 2007a).

Третій клас — часова структура завод. У реальному ISM-середовищі домінують переривчасті джерела: “пакетні” спалахи Wi-Fi, hopping-поведінка Bluetooth, короткі, але інтенсивні впливи від локальних джерел. Для здобувачів освіти методично важливо показати різницю між стабільним підвищенням фону і короткими сплесками. Переривчасті завади дозволяють пояснити, чому середні спектральні показники не завжди корелюють із відчутними провалами надійності. Тут доречно згадати, що процедура і характеристики апаратури впливають на те, що саме ми “бачимо” (International Electrotechnical Commission, 2019).

Четвертий клас — просторові практики. Вони найбільш інтуїтивні для аудиторних лабораторій: зміна відстані, поворот антен, введення екранування, розміщення джерела завод поруч із приймачем або передавачем. У межах курсу це природний спосіб показати, що надійність передавання даних є функцією геометрії, багатопроменевості та співрозташування пристроїв, а не лише налаштувань протоколу. У літературі про взаємні завади IEEE 802.15.4 і IEEE 802.11b підкреслюється, що просторовий чинник є системотвірним (Shin et al., 2007a).

П'ятий клас — процедурні практики, які доречно подати як основу “вимірювальної добросовісності”. Йдеться про фіксацію параметрів SDR (центральна частота, смуга, частота дискретизації, FFT-параметри, пороги), контроль перевантаження вхідного тракту, узгодження антени, стабільність умов і документування. Цей клас практик і формує відмінність між “демонстрацією SDR” і лабораторією з вимірюваними висновками. Тут корисно спиратися на CISPR 16-1-1 як на базовий EMC-стандарт, що визначає характеристики апаратури вимірювання радіозавод: навіть якщо навчальна лабораторія не відтворює стандартні процедури, вона повинна наслідувати їхню логіку — контроль похибок, сталість параметрів, відтворюваність результатів (International Electrotechnical Commission, 2019).

Надалі перейдемо до опису таксономії практик оцінювання надійності передавання даних за наявності завад через метрики помилок/втрат і метрики сервісу (пропускна здатність, час, стабільність).

BER (bit error rate) — базова метрика фізичного рівня, а PER (packet error rate) – її “прикладне” відображення для передачі кадрів/пакетів. У навчанні відображення PER часто дидактично продуктивніші, бо прямо відповідають на випадок “пакет не дійшов”. Важливо показати, що PER може бути отриманий із BER лише за певних припущень (довжина пакета, незалежність помилок, кодування), і саме тут фізичні основи IC виходять на рівень моделей. Класичні роботи з аналізу PER IEEE 802.15.4 підтверджують ланцюг: інтерференція → SINR → BER → PER плюс часові колізії (Shin et al., 2007b).

PRR (packet reception ratio) зручна в лабораторіях із простими радіомодулями й сенсорними вузлами: її легко обчислювати, легко порівнювати між умовами, і вона прямо показує “скільки прийнято” даних. Педагогічно корисно поєднувати PRR з оцінкою зайнятості каналу: здобувач освіти бачить, що близькість каналів у частоті та високий фон активності знижують PRR навіть тоді, коли спектральна картина не виглядає катастрофічною. Дослідження взаємних завад IEEE 802.15.4 і IEEE 802.11b показують деградацію продуктивності при колокації; це узгоджується з тим, що PRR реагує не лише на силу завади, а й на механізми доступу до ефіру й часову структуру інтерференції (Shin et al., 2007a).

Пропускна здатність (throughput) описує загальну інтенсивність передавання, а goodput – корисно доставлені дані без службових накладних і повторів. Ці метрики потрібні, щоб пояснити парадокс: інколи PER/PRR змінюються помірно, але goodput падає суттєво через повторні передавання, backoff і конкуренцію за середовище. Це природно пов’язується з вимогами співіснування у спільному спектрі, які фіксуються в ETSI EN 300 328: на практиці інформаційні системи мають не лише “передавати”, а й “ділити” спектр (European Telecommunications Standards Institute, 2019).

У багатьох застосуваннях важливим стає не середній рівень втрат, а затримка (latency) та її варіативність (jitter або нерівномірність затримки передавання даних). Здобувач освіти бачить, що інтерференція впливає не тільки на “успішну/неуспішну” доставку, а й на час доставки через повтори, адаптивні механізми, очікування ефіру. Особливо демонстративними є сценарії завад, де варіативність зростає через поодинокі сплески, які спричиняють “хвости” розподілу часу доставки.

Outages (розриви/провали зв’язку) — метрика, яка дозволяє відрізнити “погану середню якість” від “нестабільності”, коли система то працює, то раптово перестає працювати. У літературі підкреслюється роль зайнятості каналу та відтворюваності протоколів тестування, щоб визначити пороги зайнятості (LaSorte et al., 2012).

Таксономія практик EM3 і таксономія метрик надійності поєднані нами у матриці відповідності (Табл. 1), яка задає правила проектування лабораторних робіт.

Таблиця 1. Відповідність практик визначення/опису електромагнітних завад і метрик надійності передавання даних (SDR і прості радіомодулі)*

Метрика надійності \ Практика EMI	A	B	C	D	E
1) BER/ PER	Зіставити енергію в смузі каналу з ростом PER при перекритті каналів/ потужності інтерферера. Дає прямий місток “фізика сигналу - пакетні втрати”.	Показати зростання PER у вікнах високої зайнятості навіть без різкої зміни середнього спектра.	PER чутливий до коротких сильних сплесків більше, ніж до стабільного фону; демонструє роль “рідкісних подій”.	Невеликі зміни відстані/ орієнтації антен змінюють PER; видно роль багато-променевості та колокації пристроїв.	PER легко спотворюється переважанням SDR або різними порогами/FFT; потрібна фіксація налаштувань і контроль насиченості (логіка вимог до вимірювань як орієнтир).
2) PRR	PRR корелює з інтегральною енергією в смузі приймача (SDR як “спостерігач”); зручно для сенсорних модулів.	Визначити пороги зайнятості, за яких PRR переходить у нестабільний режим, підводить до ідеї співіснування	“Зубці” PRR у часі пояснюють burst-джерела (Wi-Fi-спалахи, стрибки тощо).	PRR різко реагує на колокацію, екранування, «тінь». Показує, що фізичний рівень може домінувати над протоколом.	Порівняння PRR коректне лише за єдиного протоколу логування (пакети/ інтервали/ режими повторів).
3) Throughput/ Goodput	Зі зростанням спектральної інтенсивності пропускна здатність падає нелінійно через повтори та відступи	Висока зайнятість знижує корисний трафік навіть при помірному PER (очікування доступу до ефіру), що збігається з логікою співіснування в ISM.	Спалахові завади породжують короткі провали пропускної здатності і лавинні повтори, що знижують корисний трафік.	Просторове рознесення/ орієнтація іноді піднімає корисний трафік без зміни протоколу, демонструючи “фізичний ресурс” для оптимізації IC.	Потрібні однакові інтервали вимірювання і синхронізація часу; SDR-спостереження має бути прив’язане до пакетних логів.
4) Latency/ Jitter	Інтерференція збільшує затримки через повтори/ адаптації; зручно формулюється як ланцюг “фізика → протокол → час”.	Навіть без росту PER, зайнятість збільшує латентність через очікування доступу до каналу.	Спалахи різко збільшують варіативність (викиди), що важливо для розуміння нестабільності сервісу.	Варіативність може різко змінюватися від розташування через RSSI/ багато-променевість	Часові мітки та стабільність вимірювань; без артефактів відтворюваності висновки про варіативність ненадійні.

Метрика надійності \ Практика ЕМІ	А	В	С	Д	Е
5) Часова стабільність (outages)	Перебої в роботі часто видно як періоди домінування сильного джерела в спектрограмі.	Зайнятість працює як простий предиктор: за яких значень зайнятості виникають розриви.	Найтиповіша причина перебоїв – короткі, але дуже сильні події.	Близькість до інтерферера або екранування породжує повторювані провали; це легко відтворюється в аудиторії технічними засобами навчання.	Важливо відокремлювати реальні перебої від артефактів (перевантаження, пороги детекції, несталі налаштування).

*Пояснення до стовпців (практики ЕМЗ): А – спектральна інтенсивність (PSD/ спектрограма); В – зайнятість каналу (channel occupancy); С – імпульсність/переривчастість (bursty); D – просторові чинники (відстань/орієнтація/екранування); Е – процедурні чинники вимірювання (параметри FFT, пороги, перевантаження приймача, фіксація налаштувань; межі SDR як навчального інструмента). SDR розглядається як навчальний засіб спостереження, а не сертифікаційний вимірювальний приймач; вимоги стандартів використано як орієнтир валідності процедури.

Джерело: авторська розробка (структура і звітність організовані за Arksey & O'Malley (2005) і PRISMA-ScR (Tricco et al., 2018)).

Наведена матриця відповідності вводиться як інструмент проектування лабораторної роботи, у якій технічні засоби навчання (SDR і прості радіомодулі) допомагають перейти від опису електромагнітного середовища до пояснення поведінки інформаційної системи. Одна й та сама спектральна картина може призводити до різних наслідків для PER, PRR, пропускної здатності або затримки залежно від часової структури інтерференції, доступу до ефіру та розташування пристроїв. Матриця задає “мову узгодження”: (а) який саме прояв завад ми фіксуємо (спектр, зайнятість, спалах-події, простір, процедура), (б) яку метрику надійності обираємо як навчальну ціль, (в) який причинний механізм очікуємо і як його перевіряємо.

Педагогічна цінність матриці полягає в тому, що: здобувач освіти отримує спектрограму, але висновок формулює не на рівні загальних фраз (“завади погіршують зв’язок”), матриця примушує конкретизувати: “який тип завад”, “яка метрика”, “яка процедура вимірювання”, “який зв’язок між ними”. Рамка впровадження задає єдиний сценарій, у якому технічні засоби навчання не “ілюструють” тему, а підтримують формування пояснення у ланцюжку: електромагнітні завади – параметри сигналу/доступу до ефіру – метрики надійності.

ОБГОВОРЕННЯ

Запропонована матриця відповідності та рамка впровадження закривають наявний методичний розрив: у навчальній практиці спостерігається тенденція зводити роботу з SDR до демонстрації спектра, тоді як для інформаційних систем принциповим є інше: як зміни в електромагнітному середовищі породжують зміну метрик надійності передавання даних, що описують сервіс уже на рівні системи. Матриця пропонує формалізований “місток” між цими рівнями. Вона дозволяє проектувати лабораторну роботу так, щоб спостереження ЕМЗ було пов’язане з конкретною метрикою надійності (PER/PRR/throughput/latency/outages) і мало передбачуваний механізм, а не інтуїтивний коментар.

Запропонована структура змінює статус технічних засобів навчання. SDR, радіомодулі та програмні інструменти (GNU Radio або аналоги) перестають бути “ілюстраторами” явищ. Вони стають засобами організації доказів: здобувач освіти спостерігає спектральну картину, описує зайнятість каналу та часову структуру інтерференції, а потім зіставляє це з логами пакетів і отриманими метриками. Таке поєднання підтримує інженерний тип мислення, що добре узгоджується з підходом “зайнятість - пропускна здатність/затримка” у навчанні (European Telecommunications Standards Institute, 2019). Окрему методичну роль відіграє процедурний вимір вимірювань, який узгоджується з логікою базових EMC-стандартів, де характеристики апаратури й вимірювальна процедура визначають валідність тверджень про радіозавади (International Electrotechnical Commission, 2019).

ОБМЕЖЕННЯ

Обмеження цієї роботи впливають насамперед із її типу та з природи обраних технічних засобів навчання. По-перше, огляд має формат scoring review і не передбачає метааналізу або кількісного узагальнення ефектів, тому запропонована матриця та рамка не є “доведено ефективною методикою” в статистичному сенсі. Вони є концептуальною систематизацією практик, описаних у літературі, та пропозицією їхнього педагогічного упорядкування відповідно до методології scoring review (Arksey, & O'Malley, 2005).

По-друге, у статті SDR навмисно трактується як засіб навчального спостереження, а не як стандартизований вимірювальний приймач для оцінювання електромагнітних завад. Це означає, що результати лабораторних спостережень не можуть інтерпретуватися як відповідність/невідповідність виробів EMC-нормам і не мають переноситися на задачі сертифікаційного контролю. Водночас використання CISPR 16-1-1 як орієнтир вимірювальної культури здобувачів освіти не усуває обмежень, пов’язаних із калібруванням, динамічним діапазоном, антенною системою та ризиком перевантаження приймача, які в навчальних умовах інколи важко контролювати повністю (International Electrotechnical Commission, 2019).

По-третє, сфокусованість на 2.4 GHz ISM-діапазоні має двоїстий характер. З одного боку, це найтиповіший простір для освітніх лабораторій і тому педагогічно виправданий. З іншого боку, не всі висновки щодо механізмів зайнятості каналу, доступу до ефіру та типових джерел інтерференції можуть бути однаково перенесені на інші діапазони або на спеціалізовані промислові радіосистеми. Нормативні вимоги ETSI EN 300 328 відображають саме клас широкосмугових

систем у 2.4 GHz і не повинні механічно екстраполюватися на інші регуляторні режими (European Telecommunications Standards Institute, 2019).

По-четверте, запропонована рамка задає мінімальний пакет результатів відтворюваності, проте не гарантує однакової якості реалізації у різних навчальних середовищах. На практиці на результати впливають фонові джерела випромінювання, просторові особливості аудиторій, різний рівень підготовленості здобувачів освіти та відмінності у програмних реалізаціях збору логів. Це обмеження слід враховувати під час перенесення рамки між закладами освіти і під час інтерпретації навчальних результатів, навіть якщо процедура може бути формально відтворена.

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

Центральним результатом дослідження стала матриця відповідності «практика ЕМЗ – метрика надійності», яка задає рамку проектування лабораторних робіт і зменшує ризик підміни інженерного висновку демонстрацією спектрограм. Запропонована рамка впровадження визначає послідовність дій і мінімальний пакет артефактів відтворюваності (конфігурації SDR, опис середовища, сирі логи, спосіб обчислення метрик і короткий журнал рішень), що робить результат навчання таким, що можна перевірити. Перспективи подальших досліджень у навчальних експериментах із SDR пов'язані насамперед з емпіричною валідацією запропонованої матриці відповідності та рамки впровадження. Доцільно перевірити, чи підвищує така структуризація здатність здобувачів освіти будувати причинні пояснення “характеристика завод – зміна метрики надійності”, а також чи зменшує частку декларативних висновків у звітах здобувачів за результатом виконання робіт. Подальші розвідки можуть бути спрямовані на адаптацію матриці до змішаного і дистанційного форматів навчання; важливим є розширення предметного поля за межі одного діапазону та одного класу пристроїв: порівняння навчальних ефектів і типових помилок інтерпретації для різних технологій (наприклад, Wi-Fi, Bluetooth) і різних умов середовища дозволить уточнити універсальні та специфічні елементи запропонованої матриці й рамки.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори підтверджують відсутність фінансових, особистих чи інших інтересів, що можуть розглядатися як потенційний конфлікт інтересів щодо публікації цієї статті.

ДЖЕРЕЛА ФІНАНСУВАННЯ

Робота виконана за відсутності фінансової підтримки з боку будь-яких організацій.

ДОСТУПНІСТЬ ДАНИХ

Це теоретичне дослідження не передбачає використання додаткових наборів даних.

ВИКОРИСТАННЯ ЗАСОБІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Інструменти штучного інтелекту використовувалися при пошуку наукових джерел (Perplexity), перекладі анотацій (ChatGPT) та граматичній корекції тексту роботи (Grammarly). Усі результати критично переглянуті, перевірені та відредаговані авторами. Автори несуть повну відповідальність за зміст публікації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 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>
2. European Telecommunications Standards Institute. (2019). *ETSI EN 300 328 V2.2.2 (2019-07): Wideband transmission systems; Data transmission equipment operating in the 2.4 GHz band; Harmonised Standard for access to radio spectrum*. ETSI. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300300_300399/300328/02.02.02_60/en_300328v020202p.pdf
3. International Electrotechnical Commission. (2019). *CISPR 16-1-1:2019: Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 1-1: Radio disturbance and immunity measuring apparatus – Measuring apparatus*. IEC. URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/60774>
4. LaSorte, N. J., Rajab, S. A., & Refai, H. H. (2012). Experimental assessment of wireless coexistence for 802.15.4 in the presence of 802.11g/n. *2012 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 473–479. <https://doi.org/10.1109/ISEMC.2012.6351685>
5. Ramos, M. A., Camacho, R., Buitrago, P. A., Urda, R. D., & Restrepo, J. P. (2024). Software Defined Radio, a perspective from education. *Frontiers in Education*, 8, Article 1228610. <https://doi.org/10.3389/educ.2023.1228610>
6. Shin, S. Y., Park, H. S., & Kwon, W.-H. (2007a). Mutual interference analysis of IEEE 802.15.4 and IEEE 802.11b. *Computer Networks*, 51(12), 3338–3353. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2007.01.034>
7. Shin, S. Y., Park, H. S., & Kwon, W.-H. (2007b). Packet error rate analysis of IEEE 802.15.4 under saturated IEEE 802.11b network interference. *IEICE Transactions on Communications*, E90-B(10), 2961–2963. <https://doi.org/10.1093/ietcom/e90-b.10.2961>
8. 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>
9. 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>
10. Дементьев, Е.,А., & Юрченко, А.О. (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>
11. Семеніхіна, О.В., Шамо́ня, В.Г., & Сорока, М.П. (2025). Інтеграція STEM-підходу в навчання мікроелектроніки майбутніх учителів інформатики. *Наука і техніка сьогодні*, 8(49), 948–959. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-8\(49\)-948-959](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-8(49)-948-959)

12. Шамо́ня, В.Г., Де́мєнтьєв, Є.,А., & Семеніхі́на, О.В. (2025а). Наочне моделювання цифрових компонентів комп'ютерної архітектури при вивченні мікроелектроніки. *Вісник науки та освіти*, 7(37), 1869–1878. [https://doi.org/10.52058/2786-6165-2025-7\(37\)-1869-1878](https://doi.org/10.52058/2786-6165-2025-7(37)-1869-1878)
13. Шамо́ня, В.Г., Момот, Р.А., & Семеніхі́на, О.В. (2025b). 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>

REFERENCES (TRANSLATED AND TRANSLITERATED)

1. 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>
2. European Telecommunications Standards Institute. (2019). *ETSI EN 300 328 V2.2.2 (2019-07): Wideband transmission systems; Data transmission equipment operating in the 2.4 GHz band; Harmonised Standard for access to radio spectrum*. ETSI. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300300/300399/300328/02_02_02_60/en_300328v020202p.pdf
3. International Electrotechnical Commission. (2019). *CISPR 16-1-1:2019: Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 1-1: Radio disturbance and immunity measuring apparatus – Measuring apparatus*. IEC. URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/60774>
4. LaSorte, N. J., Rajab, S. A., & Refai, H. H. (2012). Experimental assessment of wireless coexistence for 802.15.4 in the presence of 802.11g/n. *2012 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 473–479. <https://doi.org/10.1109/ISEMC.2012.6351685>
5. Ramos, M. A., Camacho, R., Buitrago, P. A., Urda, R. D., & Restrepo, J. P. (2024). Software Defined Radio, a perspective from education. *Frontiers in Education*, 8, Article 1228610. <https://doi.org/10.3389/feduc.2023.1228610>
6. Shin, S. Y., Park, H. S., & Kwon, W.-H. (2007a). Mutual interference analysis of IEEE 802.15.4 and IEEE 802.11b. *Computer Networks*, 51(12), 3338–3353. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2007.01.034>
7. Shin, S. Y., Park, H. S., & Kwon, W.-H. (2007b). Packet error rate analysis of IEEE 802.15.4 under saturated IEEE 802.11b network interference. *IEICE Transactions on Communications*, E90-B(10), 2961–2963. <https://doi.org/10.1093/ietcom/e90-b.10.2961>
8. 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>
9. 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>
10. Diemientiev, Ye., & Yurchenko, A. (2025). Vykorystannia vidkrytykh osvitnikh 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).
11. Semenikhina, O.V., Shamonina, V.H., & Soroka, M.P. (2025). Intehratsiia STEM-pidkholu v navchannia mikroelektroniky maibutnykh uchyteliv informatyky [Integration of the STEM approach into microelectronics education for future computer science teachers]. *Nauka i tekhnika siodni – Science and technology today*, 8(49), 948–959. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-8\(49\)-948-959](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-8(49)-948-959) (in Ukrainian).
12. Shamonina, V.H., Diemientiev, Ye.,A., & Semenikhina, O.V. (2025a). Naочне моделювання tsyfrovyykh komponentiv komp'yuternoї arkhitektury pry vyvchenni mikroelektroniky [Visual modelling of digital components of computer architecture in the study of microelectronics]. *Visnyk nauky ta osvity – Bulletin of Science and Education*, 7(37), 1869–1878. [https://doi.org/10.52058/2786-6165-2025-7\(37\)-1869-1878](https://doi.org/10.52058/2786-6165-2025-7(37)-1869-1878) (in Ukrainian).
13. Shamonina, V.H., Momot, R.A., & Semenikhina, O.V. (2025b). Vizualni metody navchannia osnov mikroelektroniky i arkhitektury komp'yutera: vykorystannia virtualnoho seredovyscha Proteus [Visual methods for teaching the fundamentals of microelectronics and computer architecture: using the virtual environment proteus]. *Visnyk Luhanskoho natsionalnoho universytetu imeni Tarasa Shevchenka. Pedagogichni nauky – Bulletin of the Taras Shevchenko National University of Luhansk. Pedagogical Sciences*, (3), 90–96. <https://doi.org/10.12958/3083-6514-2025-3-90-96> (in Ukrainian).

| Матеріал надійшов до редакції: 15.01.2026 р. | Прийнято до друку: 22.02.2026 р. | Опубліковано: 30.04.2026 р. |



This work is licensed under Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License.