

УДК 656.25:621.396.62:006.1

НАЦІОНАЛЬНІ ОСОБЛИВОСТІ РАДІОЧАСТОТНОГО ПОЛЯ ЗАЛІЗНИЦЬ УКРАЇНИ ТА ВИМОГИ ДО ПРОЄКТУВАННЯ ЕМС СИСТЕМ СЦБ

Кандидати техн. наук В. Ф. Кустов, А. О. Єлизаренко

NATIONAL FEATURES OF THE RADIO FREQUENCY FIELD OF UKRAINIAN RAILWAYS AND EMC REQUIREMENTS FOR THE DESIGN OF SIGNALLING AND INTERLOCKING SYSTEMS

PhD (Tech.) Viktor F. Kustov, PhD (Tech.), Andriy O. Yelizarenko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.217.2026.372983>



Анотація. Оцінено інженерну відповідність нормованих ДСТУ EN 50121-4 рівнів несприйнятливості апаратури СЦБ фактичному радіочастотному середовищу залізниць України. Розглянуто штатний і сторонній VHF-радіозв'язок у смузі 150–156 МГц і СВ-діапазон 27 МГц (Citizens Band, цивільний діапазон радіозв'язку). Показано, що документально підтверджені для України потужності VHF-передавачів можуть формувати розрахункові рівні поля, вищі за базовий випробувальний рівень 10 В/м. Для 27 МГц запропоновано аналізувати не лише зовнішнє поле, а і синфазні кондуктивні завади, індуковані на кабельних портах. Запропоновано трирівневий підхід: Національний додаток має конкретизувати характерні електромагнітні впливи; галузеві технологічні норми проєктування – правила ЕМС-зонування, рознесення, прокладання кабелів, екранування, заземлення, захисту портів і верифікації рішень з урахуванням функціональної безпечності; регламент експлуатації – обмеження для персональних радіозасобів і перевірку цілісності засобів екранування.

Ключові слова: електромагнітна сумісність, СЦБ, радіочастотне поле, EN 50121-4, технологічний радіозв'язок, СВ-діапазон, рівень несприйнятливості, ЕМС-проєктування, Національний додаток.

Abstract. An engineering assessment is conducted to evaluate the correspondence between the radio-frequency immunity levels specified by EN 50121-4 and the actual electromagnetic environment of Ukrainian railways. This assessment covers the railway VHF band at 150–156 MHz, including portable, mobile, and stationary transmitters, as well as the 27 MHz CB band (Citizens Band) as a scenario in which radiated electromagnetic fields can induce common-mode conducted disturbances on signalling and interlocking (SCI) cables and equipment ports. The analysis demonstrates that documentary-confirmed transmitter power levels currently authorized for use in Ukraine can generate calculated field strengths exceeding the basic immunity test level of 10 V/m at characteristic distances. For the 27 MHz band, the assessment emphasizes the analysis not only of radiated fields but also of common-mode conductive interference induced on cable ports through the mechanisms of antenna coupling and grounding path impedance. The frequency-dependent immunity levels established in EN 50121-4 are examined as methodological precedents for scenario-oriented national adaptation. A three-level approach is proposed: (1) a National Annex should identify characteristic electromagnetic influences and test scenarios specific to Ukrainian railway infrastructure; (2) sectoral EMC design rules should establish zoning principles, separation distances,

ISSN (p) 1994-7852

ISSN (online) 2413-3795

© Кустов В. Ф., Єлизаренко А. О., 2026.

cable routing, shielding, bonding, grounding, port protection and verification procedures with consideration of functional safety; and (3) operational regulations should impose restrictions on personal RF transmitters used in proximity to open apparatus and require periodic verification of passive shielding measures with regard to functional safety and signal integrity throughout the equipment lifecycle.

Keywords: *electromagnetic compatibility, railway signalling systems, radio-frequency field, EN 50121-4, VHF railway radio, CB band, immunity level, EMC design, National Annex.*

Вступ. Інтенсивне впровадження мікропроцесорних систем у пристроях залізничної автоматики (СЦБ) зумовлює підвищення вимог щодо їхньої електромагнітної сумісності та стійкості функціонування. Особливу небезпеку становить вплив сторонніх електромагнітних випромінювань від радіоелектронних засобів, що експлуатуються в безпосередній близькості від об'єктів залізничної автоматики. Підвищення рівня радіочастотного навантаження, зумовлене розвитком рухомого радіозв'язку, може призводити до виникнення електромагнітних завад, здатних порушувати нормальне функціонування мікропроцесорної апаратури. З огляду на відповідальність функцій, які виконують системи залізничної автоматики, навіть короткочасне порушення їхнього функціонування є критичним. У зв'язку з цим актуальним є визначення умов впливу сторонніх радіовипромінювань на мікропроцесорні пристрої залізничної автоматики, встановлення залежності рівня їхньої стійкості від параметрів електромагнітного поля та визначення допустимих рівнів зовнішнього електромагнітного впливу.

Оновлення технічного регулювання залізничного транспорту України з 3 травня 2026 р. [1–3] та ухвалення Закону України «Про безпеку та інтероперабельність на залізничному транспорті України» № 4904-IX від 09.06.2026 р. [4] актуалізують питання відповідності стандартизованих ЕМС-випробувань фактичному електромагнітному середовищу мережі. Базовий національний стандарт ДСТУ EN 50121-4:2019, ідентичний європейському EN 50121-

4:2016, встановлює рівні стійкості апаратури сигналізації, централізації та блокування (СЦБ) до радіочастотного електромагнітного поля [5].

Метою цієї статті є обґрунтування підходу щодо національної адаптації вимог ЕМС для електронних систем СЦБ на основі фактичного радіочастотного середовища залізниць України та формування практичних вимог щодо проектування. Дослідження охоплює штатний залізничний і сторонній VHF-радіозв'язок близько 150–156 МГц, а також СВ-діапазон 27 МГц, для якого випромінений вплив може переходити в синфазну кондуктивну заваду через кабельні кола.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання електромагнітної сумісності систем залізничної автоматики висвітлено в низці вітчизняних досліджень. У роботі [6] досліджено проникнення вузькосмугових завад поїзного радіозв'язку 2,13/2,15 МГц у порти живлення апаратури СЦБ SIL 3/4 – окремий, кондуктивний за природою механізм, що потребував самостійного дослідження; в цій статті натомість розглянуто випромінене радіочастотне поле в діапазонах 150–156 МГц і 27 МГц.

Показовим для смуги 150–156 МГц є досвід Польщі, де аналогова залізнична радіозв'язкова система PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. історично працює в тому самому діапазоні 150–156 МГц [7]. ЕМС таких радіотелефонів оцінюють за PN-EN 50121-4 без окремого польського числового рівня Вольт на метр саме для цієї смуги; специфіку експлуатації додатково регламентують відомчі технічні вимоги щодо радіообладнання. Водночас

європейська практика містить і приклад безпосереднього посилення інфраструктурних RF-вимог: настанова ProRail RLN00007 (Нідерланди) для визначених частот передавання у смузі 380–470 МГц установлює 20 В/м замість базових 10 В/м, прямо пов'язуючи посилення з впливом портативних засобів радіозв'язку [8]. Отже, застосовують щонайменше два підходи щодо локальної специфіки: додаткові вимоги щодо самого радіообладнання та підвищення несприйнятливості апаратури інфраструктури в характерній смузі.

Ширший методологічний контекст підтверджує міжнародне порівняння: базовий міжнародний документ IEC 62236-4 [9], від якого походить і європейський EN 50121-4, і гармонізовані з ним міждержавні стандарти на пострадянському просторі у всіх випадках встановлює єдиний рівень 10 В/м для широкої смуги (80–800/1000 МГц), що охоплює діапазон 150–156 МГц, без частотної диференціації всередині цієї смуги. Отже, відсутність спеціального нормування для штатного залізничного VHF-радіозв'язку є спільною методологічною рисою всієї родини стандартів, похідних від IEC 62236-4, а не окремим недоліком чинної редакції EN 50121-4, що додатково підкреслює системний характер прогалини, яку покликана заповнити пропозиція національного додатка, розглянута в цій статті.

Ширший міжнародний контекст підтверджують і галузеві дослідження поза межами національної адаптації стандартів. Огляд проблем електромагнітної сумісності Європейської системи управління рухом поїздів (ERTMS) показав, що радіочастотна складова цієї системи (GSM-R) відчутно зазнає впливу зовнішнього електромагнітного середовища залізниці [10]. Подальші експериментальні дослідження на діючих лініях підтвердили, що завади від сторонніх GSM/UMTS-сигналів і перехідних процесів статистично значуще погіршують якість зв'язку GSM-R, причому характер цих завад суттєво

відрізняється від тестових сигналів, передбачених чинними стандартами ЕМС [11]. Це підтверджує на прикладі іншого частотного діапазону загальну методологічну проблему цієї статті: розрив між генеричними випробувальними рівнями і сигналами стандартів і фактичним радіочастотним середовищем є системним питанням залізничної ЕМС, а не специфічною рисою лише VHF 150–156 МГц чи СВ 27 МГц. Базові вимоги щодо випробувань на несприйнятливість до випроміненого радіочастотного поля встановлює IEC 61000-4-3, на який посиляється ДСТУ EN 50121-4 [5]. Загальна методологічна проблема – розрив між генеричним рівнем базового стандарту і специфічним національним радіочастотним середовищем – потребує окремого розгляду; ця стаття деталізує саме інженерний, розрахунковий аспект проблеми для двох конкретних діапазонів.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є оцінювання характерних для України радіочастотних впливів на апаратуру СЦБ, включно зі сценаріями близького розташування персональних мобільних терміналів і портативних радіостанцій персоналу біля периферійних пристроїв і кабелів апаратури, і визначення того, які з цих впливів доцільно врахувати не лише в Національному додатку до ДСТУ EN 50121-4, а і галузевих технологічних нормах ЕМС-проектування систем різного рівня функціональної безпеки.

Завдання дослідження: систематизувати чинний радіочастотний ресурс, виділений для технологічного радіозв'язку залізниць України; виконати інженерний розрахунок напруженості поля для характерних потужностей передавачів і відстаней до апаратури СЦБ; оцінити сценарії близького розташування персональних мобільних терміналів і портативних радіостанцій персоналу біля периферійних пристроїв автоматизованого робочого місця та відкритої апаратури СЦБ

з точки зору функціональної безпечності; проаналізувати статус і потенційну потужність стороннього випромінювання в СВ-діапазоні 27 МГц; зіставити з міжнародною практикою формалізованого контролю такого середовища; сформулювати пропозиції з виокремлення цих діапазонів і сценаріїв у Національному додатку до ДСТУ EN 50121-4.

Основна частина

1. Штатний залізничний УКХ-радіозв'язок у діапазоні 150–156 МГц

У службових приміщеннях залізничних станцій, може бути розміщено багато мікропроцесорних пристроїв залізничної автоматики, на які потенційно матиме вплив електромагнітне поле від радіозасобів технологічного радіозв'язку. Вони є критичними для безпеки руху і містять значну кількість електронних входів, виходів і кабельних з'єднань, через які може відбуватися вплив зовнішнього ВЧ-поля.

Одночасно на залізничних станціях зосереджена значна кількість стаціонарних радіозасобів станційного, поїзного і ремонтно-оперативного радіозв'язку, возимі радіостанції на рухомих об'єктах, носимі радіостанції різних абонентів. Радіозасоби технологічного радіозв'язку можуть встановлювати на локомотивах і в службових приміщеннях у безпосередній близькості від обладнання мікропроцесорних систем керування.

Важливим чинником є вплив радіочастотних випромінювань передавальних пристроїв. Від радіостанції, встановленої поблизу постів ЕЦ, вплив може відбуватися через випромінюване електромагнітне поле на корпус/кабелі/інтерфейси мікропроцесорної системи.

Згідно з Планом розподілу і користування радіочастотним спектром, в Україні для рухомого радіозв'язку виділено різні смуги частот у метровому, дециметровому та сантиметровому діапазонах радіохвиль [12].

У системах рухомого радіозв'язку на залізницях у наш час використовують канали і в гектометровому діапазоні з частотою 2,13 і 2,15 МГц із довжиною хвилі 140 м. Ці частоти використовують для організації лінійних мереж поїзного радіозв'язку. Ці мережі переважно працюють із використанням направляючих ліній різних типів [6].

Нормативними документами України для радіоелектронних засобів залізничного транспорту виділено смуги 151,725–154 МГц і 155–156 МГц [12]. Чинне регулювання радіочастотного спектра здійснює План, затверджений Постановою Кабінету Міністрів України № 1340, поточна редакція якого діє з 04.03.2026 р. [12]. Діапазон близько 156 МГц (УКХ) традиційно використовують для станційного, поїзного, та ремонтно-оперативного технологічного радіозв'язку на залізничному транспорті; довжина електромагнітної хвилі в цьому діапазоні становить приблизно 1,9 м, що зумовлює ефективне наведення завад на кабельні траси, вводи-виводи та конструктивні елементи шаф автоматики.

На сьогодні радіозасоби працюють із частотною модуляцією в симплексному режимі, і параметри регульовані ДСТУ 4384:2003. У цих же смугах частот можуть працювати радіозасоби цифрового конвенціонального стандарту DMR за вокодерними технологіями.

Спеціально для залізниць у Плані виділені смуги для організації стільникових мереж стандарту GSM-R (Global System for Mobile communications – Railway) зі смугами 875,400 – 880 МГц і 920– 925 МГц. На цей час системи стандарту GSM-R не працюють в Україні, але широко використовувані для організації радіоканалів керування рухом поїздів в Європі.

Для широкосмугових систем LTE виділені частоти в діапазонах 1800 МГц і 2600 МГц із шириною смуги до 20 МГц, що дає змогу передавати більші обсяги

інформації в системах керування рухом поїздів.

На сьогодні системи GSM-R не завжди відповідають вимогам сучасних комп'ютеризованих систем управління. Тому перспективним є впровадження широкосмугових систем LTE (Long Term Evolution) і FRMCS (Future Railway Mobile Communication System). Але ці системи поки знаходяться на етапі дослідної експлуатації.

Для залізничного транспорту з метою впровадження 5G FRMCS передбачено зайняти частину діапазону, яку зараз використовують для GSM-R (смуга 4 МГц у діапазоні 900 МГц) або діапазон 1900–1910 МГц, що необхідно враховувати для випробування перспективних систем МПЦ.

Діючі рівні стійкості до завад радіочастотного поля, згідно з ДСТУ EN 50121-4, становлять у діапазоні 80–800 МГц 10 В/м за 80-відсоткової амплітудної модуляції синусоїдою 1 кГц. Найпотужнішими джерелами радіочастотних завад у цьому діапазоні на залізниці є службові стаціонарні та возимі (мобільні) радіостанції: за типовими технічними характеристиками стаціонарних і возимих радіостанцій залізничного радіозв'язку, що застосовують в Україні, потужність несучої частоти передавачів становить до 10 Вт; точне значення для конкретного типу обладнання підлягає уточненню за відомчою технічною документацією.

Згідно з рішенням Національної комісії з електронних комунікацій, для аналогових і цифрових радіозасобів УКХ радіозв'язку встановлені максимальні потужності передавачів для стаціонарних, возимих і носимих радіостанцій відповідно 25, 10, 5 Вт.

Такі самі норми діють і для цифрових радіозасобів, і для передавачів цифрових радіозасобів, стандарту DMR, які дозволені в мережах залізничного радіозв'язку. На станціях одночасно можуть діяти декілька стаціонарних радіостанцій різних мереж (до 5-10 мереж). Їх розміщення відповідає

частотно-територіальному плану. Радіостанції возимих абонентів можуть довільно переміщуватися в межах всієї станції (до 10-15 локомотивів). Це може створювати значну напруженість випромінюваних полів. У деяких випадках можлива одночасна дія декількох передавачів, які діють поблизу поста ЕЦ. За одночасної дії декількох випромінювачів сумарну напруженість поля визначають як корінь квадратний із суми квадратів напруженостей окремих джерел. При цьому дія окремого джерела може не викликати збоїв у роботі апаратури, а за спільної дії може не бути забезпечена стійкість роботи автоматики.

Тривалість дії завади може бути незначною, але викликати порушення, наприклад, із ввімкненням на передавання радіостанції в разі проїзду поблизу обладнання. Тому необхідно оцінити напруженість поля, яка може бути утворена.

Для інженерного оцінювання порядку величин напруженості електричного поля E використовують спрощену класичну залежність для дальньої зони випромінювання неспрямованого джерела [13]:

$$E = \sqrt{(30 \cdot P \cdot G) / r}, \quad (1)$$

де P — вихідна потужність передавача, Вт;

G — коефіцієнт підсилення антени відносно ізотропного випромінювача в лінійних одиницях, 1 — для носимих (портативних), 2 — для возимих і стаціонарних радіозасобів;

r — відстань від антени до об'єкта, м.

За формулою, напруженість поля не залежить безпосередньо від частоти коливаль, але параметри використовуваних антен та умови поширення радіохвиль можуть залежати від частоти.

Потужність возимих радіостанцій технологічного радіозв'язку звичайно встановлена 10 Вт. Для мереж стільникового радіозв'язку загального користування максимальна потужність передавачів базових станцій зазвичай складає 20 Вт.

Наведену залежність використовують лише як спрощену інженерну оцінку порядку величини у випадках, де припущення дальньої зони є прийнятним. На відстанях порядку десятків сантиметрів, особливо поблизу металевих шаф, кабелів і реальної портативної антени, вона не має бути трактована як точний прогноз локального поля; такі сценарії потребують натурних вимірювань або спеціального випробування.

Тоді відповідно напруженість поля, наприклад на відстані 1 м із використанням неспрямованої антени, за потужності 10 Вт становитиме $E = 24,5$ В/м. За потужності 25 Вт значення напруженості поля складає $E = 38,7$ В/м. Зі збільшенням відстані напруженість поля буде відповідно меншою, наприклад на відстані 3 м для потужності 10 Вт складе $E = 8,16$ В/м.

Однак стаціонарну антену зазвичай розміщують на щоглі чи даху, тоді як портативну радіостанцію оперативний персонал може заносити безпосередньо до приміщення поста ЕЦ і використовувати біля відкритої шафи або пульта. Для потужності 4–5 Вт спрощена модель уже на відстані близько 1 м дає рівень понад 10 В/м, а з подальшим наближенням вказує на швидке зростання потенційної інтенсивності впливу. Числові значення для відстаней близько 0,3 м і менше для діапазону 150–156 МГц (довжина хвилі близько 1,9 м) у цій роботі не розглядають як валідовані значення поля і мають бути підтверджені вимірюваннями. Слід зазначити, що межа застосовності моделі дальньої зони залежить від довжини хвилі: для суттєво коротших хвиль мобільного та Wi-Fi діапазонів (п. 1.5) умовна межа дальньої зони настає на значно менших абсолютних відстанях, тому оцінка на відстані 0,3 м для цих діапазонів є методологічно іншим випадком і не суперечить цьому застереженню.

Але за сумарної дії двох джерел напруженість поля зростає. Наближено сумарний рівень поля визначають як корінь

квадратний із суми квадратів амплітуд напруженості, утворених окремими джерелами з випадковими фазами.

$$E_{\Sigma} = \sqrt{E_i^2}. \quad (2)$$

Отже, із впливом випромінювання двох локомотивних радіостанцій за потужності 10 Вт для визначених раніше значень напруженості поля завад досягає вже 34,6 В/м.

Аналіз цих показників свідчить про необхідність корекції нормативної бази та умов тестових випробувань засобів залізничної автоматики і підвищення нормативу несприйнятливості.

Частотне середовище 150–156 МГц не обмежено лише залізничним технологічним радіозв'язком. Чинний План розподілу і користування радіочастотним спектром України передбачає використання рухомою радіослужбою загальних користувачів смуги 150,05–168,5 МГц, водночас смуги 151,725–154 МГц і 155–156 МГц окремо призначені для радіообладнання АТ «Укрзалізниця» [12]. Це означає, що в безпосередній близькості від залізничних об'єктів потенційно можуть перебувати і радіозасоби інших користувачів суміжного УКХ-діапазону. Сам факт належності обладнання до дозволеного частотного діапазону не означає право стороннього користувача працювати на частотах, призначених для АТ «Укрзалізниця»; конкретні робочі частоти визначають умовами користування спектром.

На роботу пристроїв СЦБ можуть впливати і радіозасоби сторонніх користувачів, які можуть знаходитися в безпосередній близькості від них.

1.1. Розрахункові зони перевищення випробувального рівня 10 В/м для сторонніх УКХ-передавачів 150–156 МГц

Проект prEN 50121-4:2025 [14] зберігає призначення стандарту для апаратури залізничної сигналізації і телекомунікацій, зокрема обладнання постів централізації, колійних шаф, залізничних

переїздів та іншого обладнання, пов'язаного з безпекою руху, і передбачає оновлення вимог щодо несприйнятливості. Це підтверджує актуальність частотно- та сценарно-орієнтованого підходу, але не усуває необхідності врахування фактичного національного електромагнітного середовища.

Смугу 150–156 МГц доцільно розглядати як один із пріоритетних об'єктів національної адаптації вимог ЕМС. Її специфіка полягає не в тому, що європейські стандарти не охоплюють цю частоту: вона входить до широкої смуги випробувань RF-полем. Особливість полягає в поєднанні саме на залізницях України технологічного радіозв'язку УКХ-діапазону, портативних передавачів персоналу, можливості їх безпосереднього наближення до апаратури СЦБ і наявності інших дозволених УКХ-засобів у суміжному частотному просторі. Тому доцільно не підвищувати рівень несприйнятливості в усьому діапазоні 80–800 МГц, а перевірити натурними вимірюваннями необхідність спеціального випробувального сценарію саме для 150–156 МГц.

1.2. Національна специфіка смуги 150–156 МГц: контрольована RF-зона навколо апаратури СЦБ

Із позицій технологічних норм ЕМС-проектування доцільно вводити поняття контрольованої RF-зони навколо критичної апаратури СЦБ. Її межа не має механічно дорівнювати розрахунковим 1,7 або 2,5 м, а бути встановлена за результатами випробувань конкретного типу обладнання. Для SIL 3/SIL 4 така зона може бути використана для регламентації передавання з портативної УКХ-радіостанції під час відкриття шафи, діагностики та ремонтних робіт.

На відстанях близько десятків сантиметрів структура поля істотно залежить від конструкції антени, металевих поверхонь шафи, кабельних вводів і взаємного розташування обладнання. Тому

значення, отримані за формулою дальньої зони в цій області, потрібно розглядати лише як індикатор потенційно інтенсивного локального впливу. Для сценаріїв «радіостанція на шафі», «радіостанція біля пульта» і «електромеханік із передавачем біля відкритої електроніки» необхідні натурні вимірювання або спеціальні випробування з реальною антеною.

За формулою (1), розрахункова межа $E = 10$ В/м становить приблизно 1,55 м для 4 Вт, 1,73 м для 5 Вт, 2,45 м для 10 Вт і 3,87 м для 25 Вт. Ці відстані не є санітарними, безпечними або нормативними мінімальними відстанями. Вони визначають лише розрахункові області можливого перевищення базового випробувального рівня 10 В/м і можуть бути використані для вибору точок натурних вимірювань і формування ЕМС-зон об'єкта (рис. 1).

Для діапазону 150–156 МГц принципово важливо враховувати не лише штатні параметри передавача, а і реальні сценарії його просторового зближення з електронною апаратурою. Портативну радіостанцію потужністю 4–5 Вт може використовувати електромеханік під час пошуку несправності біля відкритої релейної або електронної шафи; вона може бути тимчасово розміщена на поверхні шафи; знаходитися біля клавіатури, миші, монітора або пульта ДСП; використана працівниками вагонного чи колійного господарства поблизу робочого місця (рис. 2).

На рис. 2 показано такі сценарії: розміщення радіостанції на шафі; біля АРМ ДСП; використання електромеханіком під час діагностики біля відкритої шафи. Рисунок задає сценарії для ЕМС-випробувань, а не фіксовані значення напруженості поля.

Такі ситуації не слід трактувати як гарантовані значення поля в конкретній точці, однак вони є обґрунтовано передбачуваними експлуатаційними сценаріями, які потрібно враховувати для ЕМС-проектування та випробувань.

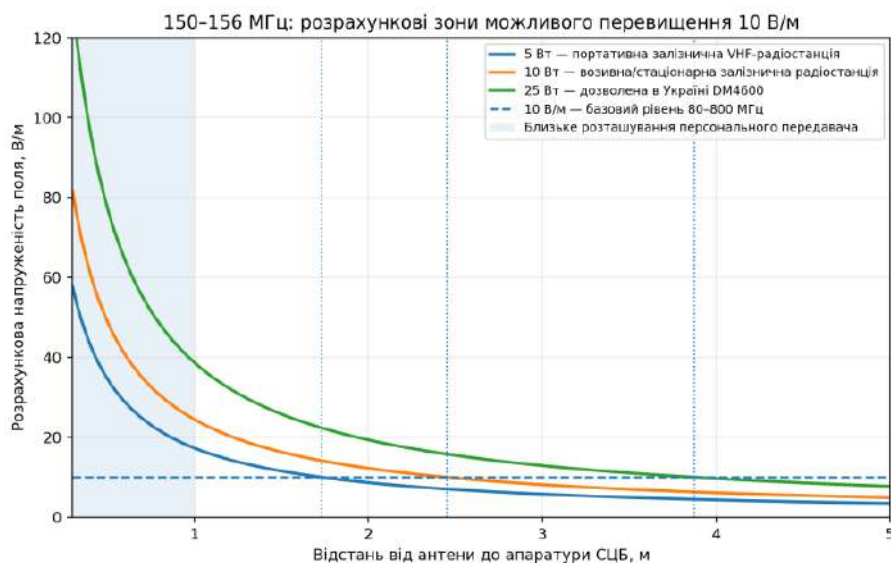


Рис. 1. Розрахункові зони можливого перевищення рівня 10 В/м для УКХ-передавачів 150–156 МГц



Сценарії є обґрунтовані передбачуваними умовами експлуатації; фактичні рівні мають підтверджуватися вимірюваннями або випробуваннями.

Рис. 2. Характерні експлуатаційні сценарії локального впливу портативної УКХ-радіостанції 150–156 МГц на апаратуру СЦБ

1.3. Частотно-диференційовані рівні несприйнятливості та сучасні мобільні джерела

Для проєктувальників і розробників важливо зіставляти локальні експлуатаційні RF-впливи не з одним універсальним числом, а з частотно-диференційованими

рівнями несприйнятливості. У EN 50121-4:2016 / IEC 62236-4:2018 для випроміненого RF-поля застосовують, зокрема, рівні 10 В/м у смузі 80–800 МГц, 20 В/м у 800–1000 МГц, 10 В/м у 1,4–2,0 ГГц, 5 В/м у 2,0–2,7 ГГц і 3 В/м у 5,1–6,0 ГГц. Випробування у верхніх смугах

призначені, зокрема, для імітації завад від цифрових засобів зв'язку. Проект prEN 50121-4:2025 оновлює вимоги щодо несприйнятливості для сучасної сигнальної і телекомунікаційної апаратури, але сам принцип залишається частотно- і сценарно-орієнтованим.

На окрему увагу потребує IEC 61000-4-39, який установлює відтворювані випробування несприйнятливості електричного та електронного обладнання до RF-передавачів, що використовувані в безпосередній близькості, у загальному діапазоні 9 кГц–6 ГГц [15]. Для сучасних мобільних терміналів цей стандарт дає методично коректну основу випробувань на близькій відстані і допомагає не екстраполювати залежність $1/r$ у сантиметрову область. Для VHF 150–156 МГц у цій роботі спеціальний випробувальний сценарій запропоновано визначати окремо за результатами натурного дослідження

реальної антени та конфігурації апаратури СЦБ.

Мобільні телефони, 4G/5G і Wi-Fi – це не національна особливість України, однак вони є корисним нормативним прецедентом: стандарт уже визнає, що характерні радіоджерела в різних частотних областях потребують різних випробувальних рівнів. Саме тому для української смуги 150–156 МГц доцільно поставити окреме питання про репрезентативність базових 10 В/м, оскільки тут існують штатні портативні і стаціонарні залізничні передавачі та можливі сторонні VHF-джерела, здатні працювати на дуже малих відстанях від апаратури СЦБ.

На рис. 3 наведені норми на стійкість до випроміненого RF-поля, за ДСТУ EN 50121-4 / IEC 62236-4. Смугу 150–156 МГц виділено як характерний для залізниць України УКХ-сценарій, який у чинному стандарті входить до широкого діапазону 80–800 МГц із рівнем 10 В/м.

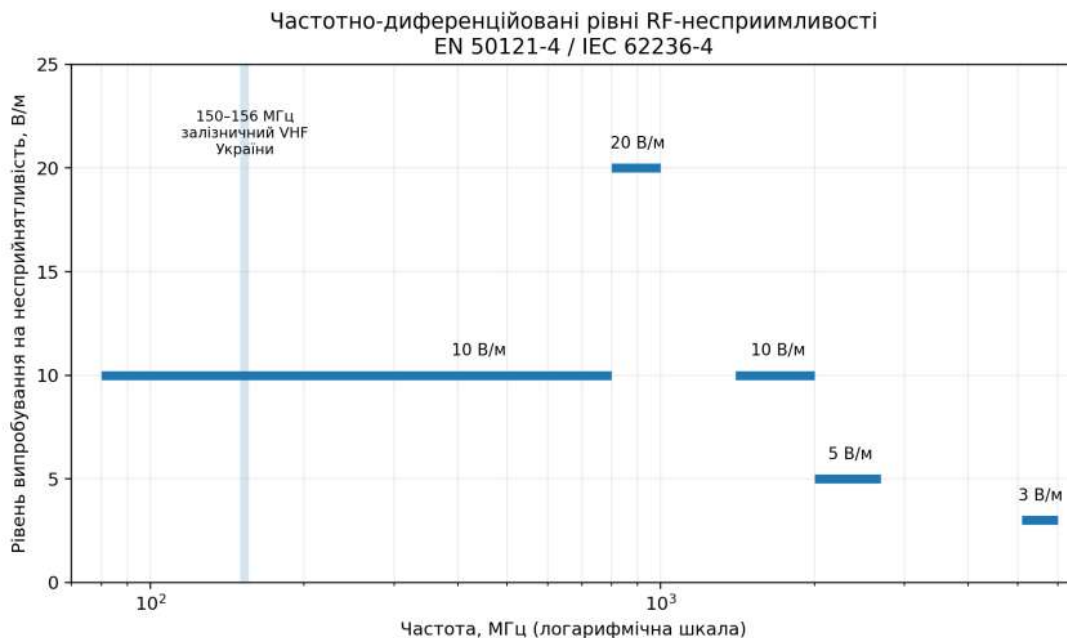


Рис. 3. Частотно-диференційовані рівні випробувань на несприйнятливість до випроміненого RF-поля, за ДСТУ EN 50121-4 / IEC 62236-4

На рис. 4 наведено порівняння базового рівня 10 В/м з розрахунковою напруженістю поля на відстані 1 м для УКХ-передавачів 150–156 МГц: 5 Вт – 17,3 В/м;

10 Вт — 24,5 В/м; 25 Вт — 38,7 В/м. Розрахунок використано як оцінювання порядку величини, а не як результат натурного вимірювання.

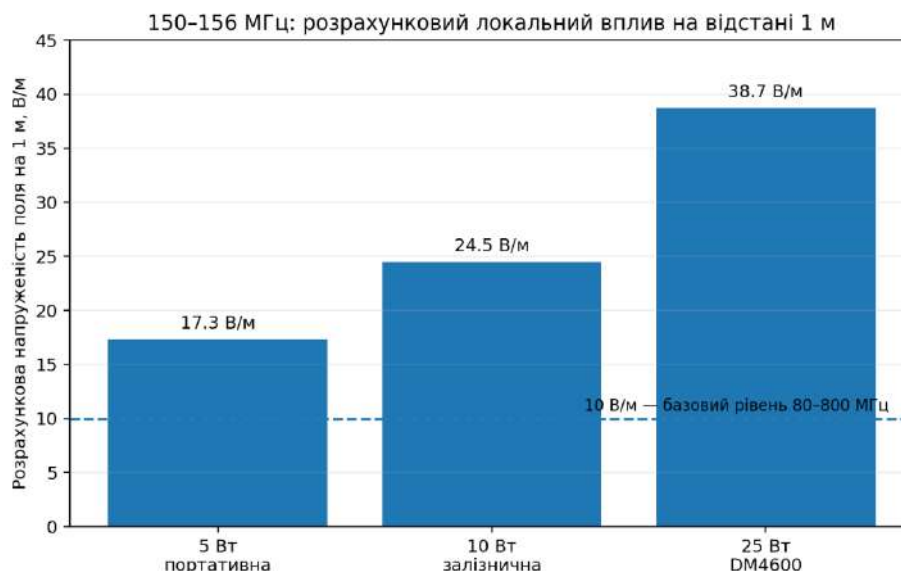


Рис. 4. Порівняння базового нормативного рівня 10 В/м із розрахунковою напруженістю поля на відстані 1 м для УКХ-передавачів 150–156 МГц

Для практичного проектування ці два рисунки потрібно розглядати спільно. Перший показує, які рівні стандарт вважає репрезентативними для різних частотних областей, а другий — в українському УКХ-сценарії навіть документально обґрунтовані потужності передавачів можуть давати на характерних відстанях розрахункові значення, вищі за 10 В/м. Це не є достатньою підставою для негайного встановлення нового нормативного рівня; воно є підставою для натурального RF-моніторингу на постах ЕЦ, переїздах, біля релейних та електронних шаф і подальшого встановлення спеціального національного випробувального сценарію, якщо вимірювання підтвердять систематичне перевищення.

1.4. Близько розташовані мобільні передавачі біля периферії АРМ та функціональна безпечність

Окремим експлуатаційним сценарієм є використання мобільного телефона або

службової портативної радіостанції безпосередньо біля периферійних пристроїв автоматизованого робочого місця ДСП. Телефон може лежати на столі на відстані 0,1–0,2 м від клавіатури, маніпулятора «миша», монітора, інтерфейсного кабелю, USB-порту або іншого елемента введення-виведення. Під час технічного обслуговування аналогічна ситуація можлива біля відкритої шафи, кабельних джгутів, роз'ємів і плат електронної апаратури.

Для систем СЦБ периферійний пристрій не потрібно розглядати лише як побутовий аксесуар. Якщо клавіатура, маніпулятор, сенсорний пристрій або їхній інтерфейс бере участь у формуванні чи підтвердженні команди керування, електромагнітне збурення такого каналу потенційно може впливати на виконання функції системи. Це не означає, що RF-вплив автоматично призводить до

небезпечної команди: причинний ланцюг має бути встановлений аналізом небезпек і випробуваннями. Однак для апаратури, що реалізує функції SIL 3/SIL 4, периферію, кабелі та реальну конфігурацію АРМ доцільно включати до меж об'єкта ЕМС-верифікації.

Оцінювання на рис. 5 виконано за формулою (1) для $G = 1$ (ізотропне наближення для антени терміналу) і максимальних потужностей передавача, типових для відповідного класу обладнання: 2 Вт для GSM900, 1 Вт для GSM1800, 0,25 Вт для UMTS2100, 0,2 Вт для LTE2600, 0,1 Вт для Wi-Fi 2,4/5 ГГц [16]. На відстані 0,3 м такі попередні інженерні оцінки для несприятливих умов радіозв'язку показали, що локальні рівні від мобільних терміналів можуть бути порівнянними з частотно-специфічними рівнями ДСТУ EN 50121-4 або перевищувати їх (рис. 5). Ці дані використані тут лише як загальноєвропейський нормативний прецедент частотно-залежного нормування і не є центральним результатом статті. Фактична потужність телефону залежить від

технології, алгоритму керування потужністю і умов мережі, тому характерні сценарії потрібно перевіряти вимірюванням. Аналогічний за фізичною природою, хоча інший за прикладною галуззю, ефект близького впливу портативних передавачів на чутливу електроніку добре задокументований емпірично для медичного обладнання: контрольоване дослідження на 61 одиниці критичного медичного обладнання зафіксувало 48 випадків електромагнітних завад від мобільних телефонів другого і третього покоління з медіанною відстанню виникнення завади близько кількох сантиметрів (діапазон від 0,1 до 300 см) [17]; систематичний огляд подібних досліджень підтверджує клінічну значущість цього ефекту [18]. Це підтверджує, що близький вплив портативного передавача на електронне обладнання є не гіпотетичним, а емпірично підтвердженим в іншій предметній галузі сценарієм, що виправдовує застосування методології випробувань на близькій відстані (ІЕС 61000-4-39) і для апаратури СЦБ.

Мобільні засоби зв'язку: оцінка на 0,3 м і частотно-специфічні пороги

Оцінка відповідає передачі на максимальній потужності передавача — реалістичний, а не консервативний сценарій за слабого сигналу базової станції (підвальні приміщення, екрановані апаратні, бункери постів ЕЦ)

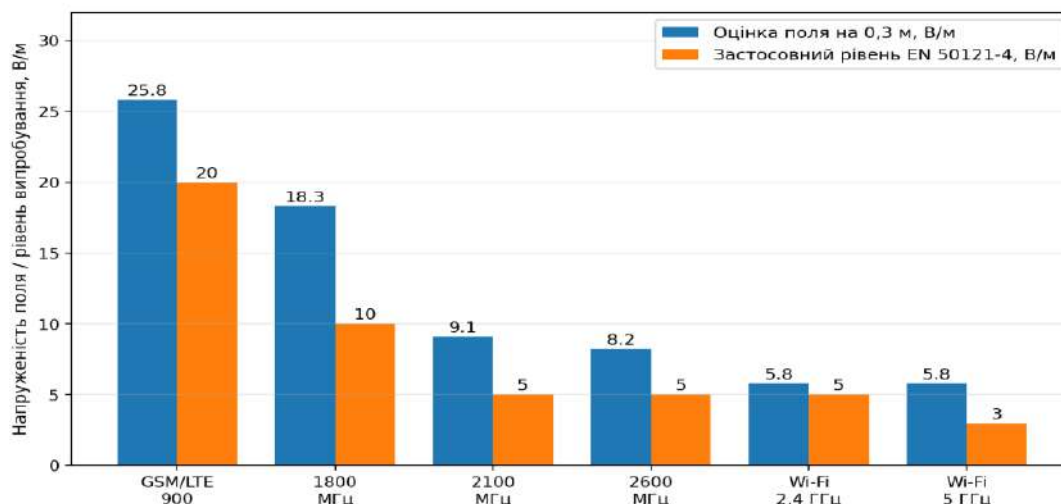


Рис. 5. Порівняння інженерної оцінки поля мобільних засобів зв'язку на відстані 0,3 м з частотно-специфічними рівнями ДСТУ EN 50121-4

На рис 5 сині стовпчики – оцінений рівень поля за максимальної потужності передавача; помаранчеві — відповідний нормативний рівень. Максимальна потужність відповідає реалістичному, а не консервативному сценарію слабого сигналу базової станції, типовому для підвальних приміщень, екранованих апаратних і бункерів постів ЕЦ. Графік ілюструє необхідність порівнювати кожну технологію з порогом саме її частотної смуги.

Для відстаней 0,1–0,2 м принципово важливо не продовжувати розрахунок за

законом 1/г. ІЕС 61000-4-39 спеціально призначений для оцінювання несприйнятливості електричного та електронного обладнання до RF-передавачів у безпосередній близькості; для частот понад 26 МГц під близькою відстанню зазвичай розуміють відстань не більше 200 мм. Тому сценарії «телефон біля миші/клавіатури», «радіостанція біля кабелю» і «передавач біля відкритої шафи» доцільно переводити з розрахункової постановки в постановку відтворюваного випробування на близькій відстані (рис. 6).

Механізм можливого впливу близького RF-передавача на периферію АРМ СЦБ

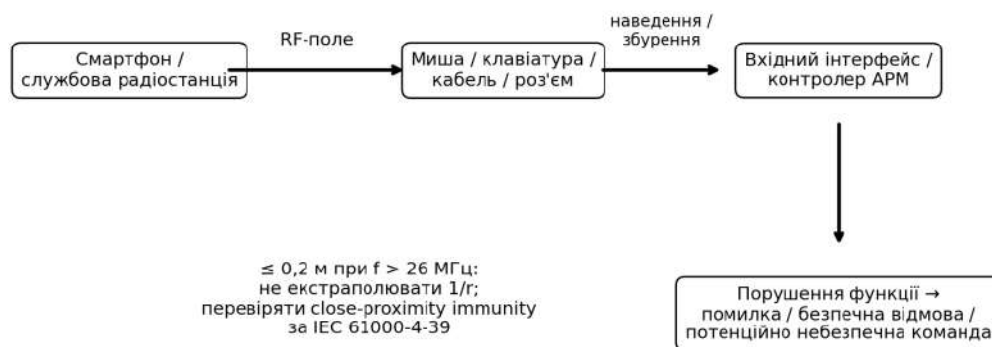


Рис. 6. Сценарій близького RF-впливу на АРМ СЦБ: мобільний телефон або портативна радіостанція → периферія (миша, клавіатура, кабель, роз'єм) → інтерфейс контролера → функція системи

Для відстаней до 0,2 м на частотах понад 26 МГц доцільно перевіряти за ІЕС 61000-4-39, а не екстраполяцією залежності 1/г.

Із позицій функціональної безпечності слід доводити не те, що мобільний телефон «створює небезпечну команду», а те, що передбачуваний RF-вплив не призводить до небезпечного порушення функції. Якщо клавіатура, маніпулятор, кабель або інший елемент периферії бере участь у формуванні чи підтвердженні команди, його доцільно

включати до ЕМС-конфігурації випробувань разом із центральною апаратурою.

Попередній національний нормативний досвід також є корисним прецедентом: ДСТУ 4178-2003 і ДСТУ 4151 передбачали окреме випробування заводою від цифрових радіотелефонів 900/1890 МГц із більш реальними параметрами заводів. Цю історичну вимогу не потрібно механічно відновлювати; її значення полягає в самому принципі окремого врахування характерного локального RF-джерела.

1.5. Практичні наслідки трирівневого підходу для ЕМС-проектування та регламенту експлуатації

Для персональних передавачів просторове рознесення не може бути єдиним конструктивним захистом, оскільки працівник може піднести телефон або портативну радіостанцію до будь-якого елемента АРМ чи відкритої шафи незалежно від початкового компонування. Тому мінімальні відстані доцільно розглядати передусім як експлуатаційне обмеження, а технічну стійкість підтверджувати випробуванням реальної конфігурації обладнання, кабелів і периферії.

Конструктивні заходи (екранування, фідерні лінії, bonding, фільтрація) зберігають ефективність лише за умови їх справності протягом життєвого циклу. Тому запропонований підхід має три взаємопов'язані рівні: 1) Національний додаток визначає характерні RF-сценарії та процедуру встановлення випробувальних рівнів; 2) галузеві норми ЕМС-проектування задають конструктивні заходи; 3) регламент експлуатації встановлює обмеження для персональних передавачів і періодичну перевірку кабелів, екранів і з'єднувачів.

2. Сторонні УКХ-радіозасоби як складова зовнішнього електромагнітного середовища

Офіційним рішенням НКРЗІ від 10.01.2013 р. № 5 визначено можливим застосування в Україні, зокрема, возмостационарної радіостанції Motorola DM4600 типу МВА304N у смугах 150,05–156,7625; 156,8375–162,75 і 163,2–168,5 МГц із вихідною потужністю $P_v = 25$ Вт [19]. Перша з цих смуг охоплює досліджуваний у роботі інтервал 150–156 МГц і частотно суміжна з каналами технологічного залізничного радіозв'язку. Тому як обґрунтовано передбачуваний зовнішній сценарій доцільно розглядати знаходження автомобіля або стаціонарного об'єкта, обладнаного УКХ-радіостанцією цього класу, поблизу переїзду, поста ЕЦ чи іншої

апаратури СЦБ. За формулою (1), для $P = 25$ Вт і $G = 2$ розрахункова напруженість на відстані 1 м становить близько 38,7 В/м, тобто приблизно у 3,9 раза перевищує рівень 10 В/м. Розрахункове значення знижується до 10 В/м приблизно на відстані 3,9 м. Ці значення характеризують порядок величини за моделлю дальньої зони і не мають бути трактовані як точний опис ближнього поля. Значення 25 Вт у цій роботі використовують як документально підтверджений для України розрахунковий сценарій, а не як фізично максимально можливу потужність професійних УКХ-передавачів. Існують високопотужні виконання радіостанцій цього класу; за інших нормативно допустимих конфігурацій більша потужність означатиме збільшення розрахункової напруженості поля. Тому проєктний аналіз конкретного об'єкта має спиратися на фактично допустимі та обґрунтовано передбачувані джерела поблизу об'єкта.

Наведений сценарій не означає, що сторонній користувач має право передавати на частотах, призначених для залізничного радіозв'язку: за таке порушення законодавством України передбачена відповідальність [20]. Його значення для ЕМС полягає в іншому: потужний дозволений УКХ-передавач може фізично опинитися поблизу переїзду, поста ЕЦ, релейної шафи або кабельної траси. Тому для оцінювання фактичного електромагнітного середовища доцільно враховувати не лише штатні залізничні передавачі, а й обґрунтовано передбачувані зовнішні джерела та підтверджувати розрахункові оцінки натурними вимірюваннями.

Систематичне документування фактичного радіочастотного середовища є усталеною європейською практикою: зокрема, у Німеччині реєстрацію випромінювальних установок і моніторинг електромагнітного поля ведуть на постійній основі профільним регулятором [21]. Пріоритетними місцями натурального RF-

моніторингу для залізниць України доцільно вважати переїзди, горловини станцій, території біля постів ЕЦ і шафи СЦБ на перегонах поблизу автомобільних чи технологічних проїздів. Саме в цих локаціях можливе зближення стороннього транспортного радіозасобу з апаратурою, кабельними трасами або шафами СЦБ на відстані близько кількох метрів.

Фактична напруженість поля залежить від потужності передавача, параметрів та орієнтації антени, відстані до апаратури, взаємного розташування антени і кабельних трас, а також від відбиттів від металевих конструкцій рухомого складу та інфраструктури. Наведені розрахунки є оцінкою порядку величин за спрощеною моделлю дальньої зони і не враховують екранування корпусом апаратури чи будівлею поста, тому потребують верифікації натурними вимірюваннями на характерних об'єктах. Тим не менш, отримане перевищення нормованого рівня в кілька разів є достатньою підставою для того, щоб не розглядати діапазон 150–156 МГц як випадкове стороннє явище, а трактувати його як характерну, регулярно повторювану складову експлуатаційного середовища залізничної інфраструктури, що потребує окремого аналізу функціональної безпечності апаратури СЦБ як із позиції апаратного, так і програмного забезпечення, особливо в місцях близького розташування стаціонарних, локомотивних і носимих радіостанцій відносно апаратури, кабельних трас, шаф та інших елементів системи.

3. Відкритий СВ-діапазон (Citizens Band) 27 МГц: від випроміненого поля до синфазної кондуктивної завади на кабельних портах

Для 27 МГц характер ризику відрізняється від УКХ 150–156 МГц насамперед механізмом проникнення завади. На цій частоті довгі кабелі та джгути СЦБ можуть ефективно перетворювати зовнішнє RF-поле на наведений синфазний сигнал на портах. Тому основним об'єктом

оцінювання є не лише поле біля корпусу, а ланцюг «зовнішнє поле – кабельна структура – синфазна напруга – порт апаратури».

Окрему групу електромагнітних впливів становлять сторонні радіопередавальні засоби в СВ-діапазоні 27 МГц [22]. Для цієї частоти пряме перенесення критерію 10 В/м із випробування ДСТУ EN 50121-4 у смузі 80–800 МГц методологічно некоректне. Водночас 27 МГц входить до робочої смуги ІЕС 61000-4-6 (150 кГц–80 МГц), який оцінює несприйнятливість до кондуктивних завад, індукованих радіочастотними полями на кабелях живлення, сигналу та заземлення [23]. Тому для СЦБ доцільно розглядати ланцюг «зовнішнє поле – кабельна структура – синфазна наведена напруга – порт апаратури».

Для інженерного опису переходу від поля до наведеної завади може бути використана узагальнена залежність напруги кондуктивної завади (синфазної RF-напруги на порту) від напруженості поля, ефективної довжини кабелю (антени) і коефіцієнта зв'язку K_c , що враховує орієнтацію, екранування, прокладання кабелю, заземлення та навколишні провідні конструкції.

Стан ґрунту, баласту і заземлювальних кіл, у тому числі сезонне промерзання, доцільно розглядати як фактор зміни комплексного імпедансу зворотного/заземлювального шляху і, відповідно, коефіцієнта зв'язку K_c . Залежність питомого опору ґрунту від вологості та промерзання добре задокументована в літературі із заземлювальних пристроїв: лабораторні та польові дослідження фіксують багаторазове зростання питомого опору ґрунту з переходом від вологого до мерзлого стану [24, 25], а міжнародний стандарт ІЕС 61936-1 для проєктування електроустановок вище 1 кВ безпосередньо приписує використовувати масштабний коефіцієнт 5–6 для «зимового» опору ґрунту в холодних регіонах порівняно з «літнім»

[26]. Без натурних даних для конкретного об'єкта некоректно механічно переносити ці узагальнені коефіцієнти на розрахунок коефіцієнта зв'язку K_s для кабельних трас СЦБ; натомість для Національного додатка і технологічних норм доцільно передбачити перевірку найгірших сезонних станів об'єкта за аналогічною логікою.

Довжина електромагнітної хвилі на частоті 27 МГц становить приблизно 11,1 м, а чвертьхвильовий резонансний розмір – близько 2,8 м, півхвильовий – близько 5,6 м. Це означає, що ефективними приймальними «антенами» для завад цього діапазону є не апаратура як така, а кабелі й джгути сигнальних кіл, проводи електроживлення обладнання та інші протяжні провідні елементи шаф і постів СЦБ, довжина яких (від одиниць до кількох десятків метрів) відповідає резонансним розмірам або їхнім кратним у зазначеному діапазоні. На відміну від гігагерцових діапазонів, де резонансні розміри вимірювані сантиметрами, а ефективно наведення потребує спеціально узгоджених антенних структур, на 27 МГц звичайна нештатна кабельна проводка здатна діяти як паразитна антена без будь-якого спеціального узгодження, що суттєво підвищує практичну значущість цього діапазону для кондуктивного проникнення

завади в порти апаратури СЦБ через наведену на кабель ЕРС, а не лише через безпосередній випромінений вплив на корпус пристрою.

Нормативно допустима потужність СВ-обладнання (зазвичай одиниці ват) не має бути автоматично ототожнена з найгіршим передбачуваним впливом на конкретному об'єкті. На рис. 7, крім нормативного рівня 4 Вт, наведено ілюстративні сценарії 20, 30 і 100 Вт: вони не відповідають дозволений потужності стандартного СВ-обладнання, а відображають добре відому на практиці ситуацію використання нештатно форсованих (модифікованих) СВ-передавачів і підсилювачів, потужність яких може в декілька разів і на порядки перевищувати нормативну. Ці значення наведено виключно для ілюстрації чутливості розрахункової напруженості поля до потужності джерела ($E \sim \sqrt{P}$) і не є оцінкою типової чи очікуваної інтенсивності впливу. У цій роботі не встановлено довільний «максимальний» рівень випромінювання для нештатних конфігурацій; достатність випробувального сценарію для 27 МГц запропоновано визначати за натурними вимірюваннями та оцінюванням наведеної синфазної напруги.

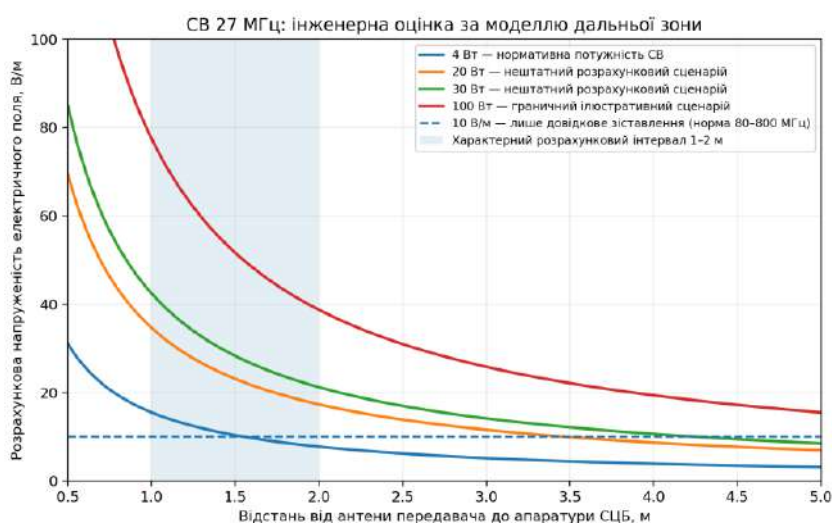


Рис. 7. Розрахункова напруженість електричного поля стороннього СВ-передавача 27 МГц для характерних потужностей

На рис. 7 і в таблиці значення 10 В/м наведено лише як довідкове зіставлення, оскільки цей рівень ДСТУ EN 50121-4 стосується випробування випроміненим полем у смузі 80–800 МГц. Частота 27 МГц

входить до сфери IEC 61000-4-6 (150 кГц–80 МГц), де нормовано кондуктивну заваду, індуковану RF-полями на кабелях на рівні 10 В [23].

Таблиця

Порогові рівні несприйнятливості, застосовні (безпосередньо чи за аналогією) для частоти 27 МГц, згідно з ДСТУ EN 50121-4 [5]

Тип впливу на порту апаратури СЦБ	Метод впливу	Нормований поріг	Формальна застосовність на 27 МГц
Випромінене поле (вільний простір)	Антенна в екранованій камері / ТЕМ-комірка	10 В/м	За аналогією (норма для 80–800 МГц)
Кондуктивна завада (наведена на провід)	Інжекція через струмовий затискач на кабель	10 В	Формально застосовний (норма для 0,15–80 МГц)

Для відповідальних систем СЦБ ця обставина має принципове значення. Нормативне обмеження потужності стороннього передавача не гарантує, що обладнання СЦБ протягом усього життєвого циклу не зазнає більш інтенсивного локального електромагнітного впливу. Тому для обґрунтування вимог щодо систем SIL 3/SIL 4 доцільно розрізняти нормативно допустиме радіочастотне середовище та обґрунтовано передбачувані зовнішні впливи, що можуть виникнути в реальних умовах експлуатації.

Мобільні телефони, 4G/5G і Wi-Fi доцільно згадувати як загальноєвропейський, а не унікальний для України клас локальних RF-джерел. Їхня роль у цій роботі полягає насамперед у підтвердженні загального принципу: реальний рівень впливу визначений не лише потужністю, а і частотою та відстанню до апаратури. Для українського Національного додатка більш специфічними залишаються вузькосмугові 2,13/2,15 МГц і УКХ 150–156 МГц; 27 МГц доцільно розглядати як окремий сценарій переходу випроміненого поля в кондуктивну синфазну заваду.

4. Європейський прецедент інфраструктурної адаптації RF-вимог: ProRail

Настанова ProRail RLN00007 (Нідерланди) є безпосереднім прикладом доповнення базових вимог EN 50121-4 з урахуванням реального залізничного радіочастотного середовища. Для радіочастотного поля, за IEC 61000-4-3, вона встановлює 20 В/м на визначених частотах передавання у смузі 380–470 МГц замість базових 10 В/м; обґрунтування безпосередньо пов'язане з впливом портативних засобів радіозв'язку (portofoon). Крім того, RLN00007 заповнює частотні проміжки 1,0–1,4 ГГц рівнем 10 В/м і 2,7–5,1 ГГц рівнем 3 В/м [8].

Цей приклад не означає, що рівень 20 В/м потрібно автоматично перенести на українську смугу 150–156 МГц. Його значення методологічне: інфраструктурний оператор може встановлювати додаткові частотно-специфічні RF-вимоги, коли базовий стандарт недостатньо репрезентує характерні локальні передавачі. Для України конкретний рівень має бути визначений натурним RF-моніторингом на типових об'єктах СЦБ.

5. Від Національного додатка до технологічних норм ЕМС-проектування

Національна специфіка полягає не в самій наявності потужних радіопередавачів – такі джерела існують і в Європі, а в конкретному поєднанні частотного плану, історично сформованого технологічного УКХ-зв'язку, сторонніх рухомих передавачів, геометрії їхнього можливого зближення з об'єктами СЦБ і сезонних умов заземлення. Для порівняння, у ЄС Railway Mobile Radio гармонізовано насамперед у смугах 874,4–880,0 МГц, 919,4–925,0 МГц і 1900–1910 МГц [27]. Тому національна адаптація має виходити з вимірюного українського електромагнітного середовища, а не з припущення про відсутність аналогічних джерел у Європі.

Національний додаток до ДСТУ EN 50121-4 доцільно використовувати для визначення характерних електромагнітних впливів і випробувальних сценаріїв. Однак забезпечення ЕМС конкретного поста ЕЦ, переїзду, шафи автоблокування або іншого об'єкта є також проектним завданням. Тому, крім Національного додатка, доцільно розробити галузеві технологічні норми ЕМС-проектування, які встановлюватимуть ЕМС-зонування об'єкта; мінімальні відстані до передавальних антен; правила трасування та рознесення силових, сигнальних і радіочастотно вразливих кіл; вимоги щодо екранів, зонування і заземлення; захист портів; урахування сезонних станів ґрунту/баласту; порядок натурних вимірювань і верифікації ухвалених рішень. Для проєктувальника до ЕМС-карти об'єкта доцільно включати також таблицю частотно-залежних нормативних рівнів несприйнятливості та перелік локальних передавачів персоналу, зокрема портативних УКХ-радіостанцій і мобільних засобів зв'язку, із зазначенням сценаріїв мінімального просторового рознесення та способу їх верифікації.

Для систем різного рівня функціональної безпечності недоцільно механічно встановлювати різні значення

Вольт на метр лише за номером SIL. Натомість зі зростанням критичності функції має зростати повнота доказу. Для SIL 3/SIL 4 доцільно документувати ланцюг «джерело завади – механізм зв'язку – порт – реакція обладнання – вплив на відповідальну функцію безпеки – захисний захід – верифікація» і включати результати до доказової бази Safety Case конкретного застосування.

Для практичного застосування запропонованого підходу проєктувальник має формувати для об'єкта ЕМС-карту: джерело і частота -> максимальна обґрунтовано передбачувана потужність -> геометрія/відстань -> механізм зв'язку -> порт обладнання -> функція безпеки -> захисний захід -> спосіб верифікації. Для УКХ 150–156 МГц основними заходами є ЕМС-зонування, просторове рознесення, екранування та перевірка сценаріїв використання портативних передавачів персоналом.

Результати та обговорення

Виконані інженерні розрахунки показують, що в діапазоні 150–156 МГц рівень 10 В/м може бути перевищений за реалістичних сценаріїв близького розташування штатних залізничних і дозволених в Україні сторонніх УКХ-передавачів. Для 27 МГц число 10 В/м використовують лише як довідкове зіставлення, оскільки норматив ДСТУ EN 50121-4 для випроміненого поля 10 В/м формально встановлений у смузі 80–800 МГц. Для 27 МГц застосовним є кондуктивний метод ІЕС 61000-4-6, тому пряме чисельне зіставлення Вольт на метр і Вольт не допускають. В усіх випадках розрахунки за формулою (1) є оцінюванням порядку величини та потребують підтвердження натурними вимірюваннями.

Отримані результати дають підставу для двох конкретних пропозицій. По-перше, для смуги 150–156 МГц доцільно відокремити спеціальний національний випробувальний сценарій, а його рівень установлювати за результатами натурних вимірювань на постах ЕЦ, переїздах і біля

шаф автоматики. Такий принцип має європейський інфраструктурний прецедент у ProRail RLN00007, де для характерної смуги портативного радіозв'язку застосовано 20 В/м замість базових 10 В/м [8]. По-друге, для 27 МГц доцільно нормувати не механічно перенесене значення Вольт на метр, а сценарій переходу зовнішнього поля в синфазну кондуктивну заваду на кабельних портах.

Обидва напрями узгоджені із загальним ризик-орієнтованим підходом щодо формування Національного додатка до ДСТУ EN 50121-4: не механічне підвищення рівня в усьому діапазоні, а формування процедури, яка встановлює, чи є базовий рівень репрезентативним для конкретного об'єкта і його інтерфейсів.

Практичний наслідок для проєктувальника полягає в тому, що ЕМС-аналіз має охоплювати не лише центральну апаратуру, а весь функціональний ланцюг введення-виведення, якщо його порушення може вплинути на функцію безпеки. Мобільні телефони та портативні радіостанції при цьому розглядають як передбачувані локальні джерела RF-впливу, а не як доведену причину відмови.

На окрему увагу в обговоренні заслуговує перспектива щодо мобільних телефонів і портативних радіостанцій персоналу. Навіть у разі ухвалення оновленого проєкту prEN 50121-4:2025 у Європі та гармонізованого з ним національного стандарту в Україні оновлені частотно-диференційовані рівні несприйнятливості, за наявної інформацією про проєкт, залишаються орієнтованими на типову відстань джерела завади (зазвичай від 1 м і більше, за методикою IEC 61000-4-3) і не покривають сценарії безпосереднього близького розташування персонального пристрою (одиниці — десятки сантиметрів) біля периферії АРМ ДСП чи відкритої апаратури СЦБ. Тому навіть за умови гармонізації продуктового стандарту проблема ЕМС і функціональної безпечності для сценаріїв

близького розташування мобільних телефонів і портативних радіостанцій персоналу біля апаратури СЦБ, найімовірніше, залишатиметься актуальною і потребуватиме розв'язання не на рівні продуктового стандарту, а додатково на рівні організаційного регламенту, що обмежує використання особистих засобів радіозв'язку в безпосередній близькості від відкритої апаратури та периферії АРМ; верифікаційного випробування реальної конфігурації периферії, кабелів і портів апаратури за методологією випробувань на близькій відстані (IEC 61000-4-39) для відстаней до 0,2 м; включення функціонального ланцюга «периферія — інтерфейс — команда керування» до меж об'єкта ЕМС-верифікації для систем SIL 3/SIL 4. Навіть якщо майбутня редакція EN 50121-4 чи гармонізованого з нею національного стандарту розширить частотно-диференційовані рівні до неперервного покриття у смузі до 6 ГГц, це закрийє прогалини між сусідніми смугами випробувань, але не вирішить сценарій безпосереднього близького розташування мобільного телефона чи портативної радіостанції біля апаратури СЦБ: будь-який продуктивний рівень несприйнятливості розраховують для типової відстані джерела, а не для контакту на рівні одиниць сантиметрів, тому організаційні та верифікаційні заходи, запропоновані вище, залишаються необхідними незалежно від подальшої еволюції продуктового стандарту.

Висновки

Виконано інженерну оцінку відповідності нормованих ДСТУ EN 50121-4 рівнів несприйнятливості апаратури СЦБ фактичному радіочастотному середовищу залізниць України. Розглянуто штатний і сторонній УКХ-радіозв'язок у смузі 150–156 МГц і відкритий СВ-діапазон 27 МГц. Показано, що документально підтверджені для України потужності УКХ-передавачів можуть формувати розрахункові рівні поля, вищі за базовий випробувальний рівень

10 В/м. Для частот 27 МГц запропоновано аналізувати не лише зовнішнє поле, а й синфазні кондуктивні завади, індуковані на кабельних портах. Запропоновано трирівневий підхід: Національний додаток має конкретизувати характерні електромагнітні впливи; галузеві технологічні норми проєктування – правила ЕМС-зонування, рознесення, прокладання кабелів, екранування, заземлення, захисту портів і верифікації рішень з урахуванням функціональної безпечності; регламент експлуатації – обмеження для персональних радіозасобів і перевірку цілісності засобів екранування.

Показано, що для технологічного радіозв'язку 150–156 МГц типові потужності стаціонарних і возимих радіостанцій на характерних відстанях можуть створювати розрахункові рівні, вищі за 10 В/м. Додатково встановлено, що в Україні офіційно допущена для застосування возимо-стаціонарна Motorola DM4600 типу МВА304N потужністю 25 Вт у смузі 150,05–156,7625 МГц [19]. За прийнятою моделлю на відстані 1 м це відповідає приблизно 38,7 В/м. Для 27 МГц розраховані значення напруженості поля не потрібно безпосередньо трактувати як перевищення нормативу 10 В/м, оскільки цей норматив випроміненого поля стосується 80–800 МГц; результати для 27 МГц характеризують потенційну інтенсивність зовнішнього впливу та необхідність окремого випробувального сценарію.

Усі наведені результати є оцінками порядку величини за спрощеною інженерною моделлю і потребують підтвердження натурними вимірюваннями на характерних об'єктах залізничної інфраструктури – станціях, переїздах, постах ЕЦ і шафах автоматики. Особливо це стосується відстаней близько десятків сантиметрів, де структура поля визначається випромінюванням реальною антеною, металевими корпусами, кабелями та взаємним розташуванням.

Обґрунтовано трирівневу модель національної адаптації ЕМС, що доповнює початкову дворівневу структуру експлуатаційним рівнем (розділ 1.5). На першому рівні Національний додаток до ДСТУ EN 50121-4 має визначати характерні для залізниць України частотні смуги, сценарії впливу та процедуру встановлення випробувальних рівнів за результатами натурних вимірювань. На другому рівні галузеві технологічні норми ЕМС-проєктування мають визначати практичні правила розміщення обладнання, рознесення та прокладання кабелів, екранування, заземлення, захисту портів і верифікації рішень з урахуванням функціональної безпечності. На третьому рівні регламент експлуатації і технічного обслуговування має визначати організаційні обмеження для персональних радіозасобів поблизу відкритої апаратури та періодичність перевірки цілісності пасивних засобів захисту (кабелів, екранів, з'єднувачів фідерних ліній), оскільки конструктивний захист втрачає ефективність у разі пошкодження екранування. Для 27 МГц доцільно поєднувати оцінювання зовнішнього поля з аналізом синфазної кондуктивної завади на кабельних портах; можливість установа окремого польового випробувального рівня для 27 МГц має бути предметом натурних досліджень, а не механічного перенесення 10 В/м із діапазону 80–800 МГц.

Порівняльний аналіз показує, що європейська практика не обмежена єдиним способом адаптації EN 50121-4. У Польщі специфіку УКХ 150–156 МГц переважно враховують через відомчі вимоги щодо радіобладнання, тоді як ProRail у Нідерландах застосовує додатковий інфраструктурний рівень 20 В/м на визначених частотах 380–470 МГц замість базових 10 В/м [8]. Це підтверджує принципову допустимість частотно-специфічного посилення вимог, але конкретний український рівень для 150–156 МГц має

бути встановлений лише після натурного RF-моніторингу.

Окремим висновком є те, що проблема близького розташування мобільних телефонів і портативних радіостанцій персоналу біля апаратури СЦБ (розділи 1.4–1.5) не буде автоматично усунена ухваленням оновленого європейського проєкту стандарту prEN 50121-4:2025 чи гармонізованого з ним національного документа: оновлені частотно-диференційовані рівні несприйнятливості, за задумом, орієнтовані на типові відстані джерела завади, а не на сценарії безпосереднього близького розташування персонального пристрою біля периферії

АРМ чи відкритої апаратури. Тому для систем безпеки рівнів SIL 3/SIL 4 продуктивний стандарт доцільно доповнювати організаційним обмеженням використання особистих засобів радіозв'язку поблизу відкритої апаратури; верифікаційним випробуванням периферії, кабелів і портів за методологією IEC 61000-4-39 для відстаней до 0,2 м; включенням функціонального ланцюга «периферія – інтерфейс – команда керування» до меж об'єкта ЕМС-верифікації. Це узгоджено із запропонованою трирівневою моделлю і залишається чинним незалежно від того, коли і в якому вигляді буде ухвалено prEN 50121-4:2025.

Список використаних джерел

1. Кабінет Міністрів України. (2013). Про затвердження Технічного регламенту безпеки інфраструктури залізничного транспорту (Постанова № 494 від 11.07.2013, ред. від 03.05.2026). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/494-2013-%D0%BF>
2. Кабінет Міністрів України. (2015). Про затвердження Технічного регламенту безпеки рухомого складу залізничного транспорту (Постанова № 1194 від 30.12.2015, ред. від 03.05.2026). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1194-2015-%D0%BF>
3. Кабінет Міністрів України. (2022). Про внесення змін до Технічного регламенту безпеки інфраструктури залізничного транспорту і Технічного регламенту безпеки рухомого складу залізничного транспорту (Постанова № 53 від 26.01.2022). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/53-2022-%D0%BF>
4. Верховна Рада України. (2026). Про безпеку та інтероперабельність на залізничному транспорті України (Закон України № 4904-IX від 09.06.2026). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/4904-20>
5. ДСТУ EN 50121-4:2019 (EN 50121-4:2016, IDT). (2019). Залізничний транспорт. Електромагнітна сумісність. Частина 4. Емісія завад і несприйнятливість сигнальної та телекомунікаційної апаратури. Київ: ДП «УкрНДНЦ».
6. Кустов, В. Ф., & Єлізаренко, А. О. (2026). Нормування і вплив завад поїзного радіозв'язку 2,13 і 2,15 МГц на порти живлення електронних пристроїв СЦБ рівнів SIL 3/4. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, 216, 289–314. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.216.2026.362481>
7. Sumiła, M. (2016). Dopuszczenie do użytkowania w radiołączności kolejowej w Polsce nowych radiotelefonów VHF. *Prace Instytutu Kolejnictwa*, 149, 33–39.
8. ProRail. (2020). RLN00007. EMC-eisen aan apparatuur nabij alle geëlektrificeerde en niet-geëlektrificeerde baanvakken in beheer bij ProRail (Richtlijn ProRail, versie 007). URL: <https://www.tenderned.nl/papi/tenderned-rs-tns/v2/publicaties/407577/documenten/13539830/content>
9. IEC 62236-4:2018. (2018). Railway applications – Electromagnetic compatibility – Part 4: Emission and immunity of the signalling and telecommunications apparatus. Geneva: IEC.

10. Midya, S., & Thottappillil, R. (2008). An overview of electromagnetic compatibility challenges in European Rail Traffic Management System. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 16(5), 515–534. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2007.11.001>
11. Dudoyer, S., Deniau, V., Adriano, R., Ben Slimen, N., Rioult, J., Meyniel, B., & Berbineau, M. (2012). Study of the susceptibility of the GSM-R communications face to the electromagnetic interferences of the rail environment. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 54(3), 667–676. DOI: <https://doi.org/10.1109/TEMPC.2011.2169677>
12. Кабінет Міністрів України. (2023). Про затвердження плану розподілу і користування радіочастотним спектром в Україні (Постанова № 1340 від 19.12.2023). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1340-2023-%D0%BF>
13. Balanis, C. A. (2016). *Antenna theory: Analysis and design* (4th ed.). John Wiley & Sons.
14. prEN 50121-4:2025. (2025). *Railway applications – Electromagnetic compatibility – Part 4: Emission and immunity of the signalling and telecommunications apparatus*. Brussels: CENELEC.
15. IEC 61000-4-39:2017. (2017). *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-39: Testing and measurement techniques – Radiated fields in close proximity – Immunity test*. Geneva: IEC.
16. 3GPP; IEEE 802.11. (6. д.). TS 38.101-1; TS 36.101. User Equipment (UE) radio transmission and reception — maximum output power classes for GSM, UMTS, LTE and Wi-Fi terminal equipment.
17. Van Lieshout, E. J., van der Veer, S. N., Hensbroek, R., Korevaar, J. C., Vroom, M. B., & Schultz, M. J. (2007). Interference by new-generation mobile phones on critical care medical equipment. *Critical Care*, 11(5), R98. DOI: <https://doi.org/10.1186/cc6115>
18. Lawrentschuk, N., & Bolton, D. M. (2004). Mobile phone interference with medical equipment and its clinical relevance: A systematic review. *The Medical Journal of Australia*, 181(3), 145–149. DOI: <https://doi.org/10.5694/j.1326-5377.2004.tb06205.x>
19. Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сфері зв'язку та інформатизації. (2013). Про визначення можливим застосування радіоелектронних засобів та випромінювальних пристроїв на території України (Рішення № 5 від 10.01.2013, додаток, поз. 3). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/vr005864-13>
20. Верховна Рада України. (2024). Про внесення змін до деяких законів України щодо імплементації норм законодавства Європейського Союзу з питань роумінгу (Закон України № 3727-IX від 22.05.2024). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3727-20>; Кодекс України про адміністративні правопорушення, ст. 146. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/80731-10>
21. Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen. (6. д.). EMF-Monitoring: Anzeigen nach BEMFV. URL: <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/Telekommunikation/Technik/EMF/start.html>
22. Безліцензійний радіозв'язок: довідковий матеріал щодо смуг радіочастот CB, LPD, PMR в Україні. (6. д.). URL: https://shop.micro-gis.com/radio-without-licenses_ua
23. IEC 61000-4-6:2023. (2023). *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-6: Testing and measurement techniques – Immunity to conducted disturbances, induced by radio-frequency fields*. Geneva: IEC.
24. Coelho, V. L., Piantini, A., Almaguer, H. A. D., Coelho, R. A., Boaventura, W. D. C., & Paulino, J. O. S. (2015). The influence of seasonal soil moisture on the behavior of soil resistivity and power distribution grounding systems. *Electric Power Systems Research*, 118, 76–82. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2014.07.027>
25. Reffin, M. S., Abdul Ali, A. W., Mohamad Nor, N., Ahmad, N. N., Syed Abdullah, S. A., Mahmud, A., & Hanaffi, F. (2019). Seasonal influences on the impulse characteristics of grounding systems for tropical countries. *Energies*, 12(7), 1334. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12071334>

26. IEC 61936-1:2021. (2021). Power installations exceeding 1 kV AC and 1,5 kV DC – Part 1: AC. Geneva: IEC.

27. European Commission. (2021). Commission Implementing Decision (EU) 2021/1730 of 28 September 2021 on the harmonised use of the paired frequency bands 874,4–880,0 MHz and 919,4–925,0 MHz and of the unpaired frequency band 1900–1910 MHz for Railway Mobile Radio (as amended by Implementing Decision (EU) 2026/291). URL: https://eur-lex.europa.eu/eli/dec_impl/2021/1730/oj/eng

References

1. Kabinet Ministriv Ukrainy. (2013). Pro zatverdzhennia Tekhnichnoho rehlamentu bezpeky infrastruktury zaliznychnoho transportu [On approval of the Technical Regulation on the safety of railway transport infrastructure] (Resolution No. 494 of 11.07.2013, as amended on 03.05.2026). Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/go/494-2013-%D0%BF> [in Ukrainian].

2. Kabinet Ministriv Ukrainy. (2015). Pro zatverdzhennia Tekhnichnoho rehlamentu bezpeky rukhomoho skladu zaliznychnoho transportu [On approval of the Technical Regulation on the safety of railway rolling stock] (Resolution No. 1194 of 30.12.2015, as amended on 03.05.2026). Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1194-2015-%D0%BF> [in Ukrainian].

3. Kabinet Ministriv Ukrainy. (2022). Pro vnesennia zmin do Tekhnichnoho rehlamentu bezpeky infrastruktury zaliznychnoho transportu i Tekhnichnoho rehlamentu bezpeky rukhomoho skladu zaliznychnoho transportu [On amendments to the Technical Regulation on the safety of railway transport infrastructure and the Technical Regulation on the safety of railway rolling stock] (Resolution No. 53 of 26.01.2022). Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/go/53-2022-%D0%BF> [in Ukrainian].

4. Verkhovna Rada Ukrainy. (2026). Pro bezpeku ta interoperabelnist na zaliznychnomu transporti Ukrainy [On safety and interoperability in railway transport of Ukraine] (Law of Ukraine No. 4904-IX of 09.06.2026). Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/go/4904-20> [in Ukrainian].

5. DSTU EN 50121-4:2019 (EN 50121-4:2016, IDT). (2019). Zaliznychnyi transport. Elektromahnitna sumisnist. Chastyna 4. Emisiia zavod i nespryiniatlyvist syhnalnoi ta telekomunikatsiinoi aparatury [Railway applications. Electromagnetic compatibility. Part 4. Emission and immunity of the signalling and telecommunications apparatus]. Kyiv: DP «UkrNDNTs» [in Ukrainian].

6. Kustov, V. F., & Yelizarenko, A. O. (2026). Normuvannia i vplyv zavod poiznoho radiozviazku 2,13 i 2,15 MHz na porty zhyvlennia elektronnykh prystroiv STsB rivniv SIL 3/4 [Standardization and influence of train radio interference at 2.13 and 2.15 MHz on power ports of SIL 3/4 signalling electronic devices]. *Collection of Scientific Works of the Ukrainian State University of Railway Transport*, 216, 289–314. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.216.2026.362481> [in Ukrainian].

7. Sumiła, M. (2016). Dopuszczenie do użytkowania w radiołączności kolejowej w Polsce nowych radiotelefonów VHF [Approval of new VHF radiotelephones for use in railway radio communication in Poland]. *Prace Instytutu Kolejnictwa*, 149, 33–39 [in Polish].

8. ProRail. (2020). RLN00007. EMC-eisen aan apparatuur nabij alle geëlektrificeerde en niet-geëlektrificeerde baanvakken in beheer bij ProRail [EMC requirements for equipment near all electrified and non-electrified track sections managed by ProRail] (ProRail Guideline, version 007). Retrieved from: <https://www.tenderned.nl/papi/tenderned-rs-tns/v2/publicaties/407577/documenten/13539830/content> [in Dutch].

9. IEC 62236-4:2018. (2018). Railway applications – Electromagnetic compatibility – Part 4: Emission and immunity of the signalling and telecommunications apparatus. Geneva: IEC [in English].
10. Midya, S., & Thottappillil, R. (2008). An overview of electromagnetic compatibility challenges in European Rail Traffic Management System. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 16(5), 515–534. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2007.11.001> [in English].
11. Dudoyer, S., Deniau, V., Adriano, R., Ben Slimen, N., Rioult, J., Meyniel, B., & Berbineau, M. (2012). Study of the susceptibility of the GSM-R communications face to the electromagnetic interferences of the rail environment. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 54(3), 667–676. DOI: <https://doi.org/10.1109/TEM.2011.2169677> [in English].
12. Kabinet Ministriv Ukrainy. (2023). Pro zatverdzhennia planu rozpodilu i korystuvannia radiochastotnym spektrom v Ukraini [On approval of the plan for the allocation and use of the radio frequency spectrum in Ukraine] (Resolution No. 1340 of 19.12.2023). Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1340-2023-%D0%BF> [in Ukrainian].
13. Balanis, C. A. (2016). Antenna theory: Analysis and design (4th ed.). John Wiley & Sons [in English].
14. prEN 50121-4:2025. (2025). Railway applications – Electromagnetic compatibility – Part 4: Emission and immunity of the signalling and telecommunications apparatus. Brussels: CENELEC [in English].
15. IEC 61000-4-39:2017. (2017). Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-39: Testing and measurement techniques – Radiated fields in close proximity – Immunity test. Geneva: IEC [in English].
16. 3GPP; IEEE 802.11. (n.d.). TS 38.101-1; TS 36.101. User Equipment (UE) radio transmission and reception — maximum output power classes for GSM, UMTS, LTE and Wi-Fi terminal equipment [in English].
17. Van Lieshout, E. J., van der Veer, S. N., Hensbroek, R., Korevaar, J. C., Vroom, M. B., & Schultz, M. J. (2007). Interference by new-generation mobile phones on critical care medical equipment. *Critical Care*, 11(5), R98. DOI: <https://doi.org/10.1186/cc6115> [in English].
18. Lawrentschuk, N., & Bolton, D. M. (2004). Mobile phone interference with medical equipment and its clinical relevance: A systematic review. *The Medical Journal of Australia*, 181(3), 145–149. DOI: <https://doi.org/10.5694/j.1326-5377.2004.tb06205.x> [in English].
19. Natsionalna komisiia, shcho zdiisniue derzhavne rehuliuвання u sferi zviazku ta informatyzatsii. (2013). Pro vyznachennia mozhlyvym zastosuvannia radioelektronnykh zasobiv ta vyprominiuvalnykh prystroiv na terytorii Ukrainy [On determining the possibility of using radio electronic means and radiating devices on the territory of Ukraine] (Decision No. 5 of 10.01.2013, annex, item 3). Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/vr005864-13> [in Ukrainian].
20. Verkhovna Rada Ukrainy. (2024). Pro vnesennia zmin do deiakykh zakoniv Ukrainy shchodo implementatsii norm zakonodavstva Yevropeiskoho Soiuzu z pytan rouminhu [On amendments to certain laws of Ukraine regarding the implementation of European Union legislation on roaming] (Law of Ukraine No. 3727-IX of 22.05.2024). Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3727-20>; Kodeks Ukrainy pro administratyvni pravoporushennia [Code of Ukraine on Administrative Offenses], art. 146. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/80731-10> [in Ukrainian].
21. Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen. (n.d.). EMF-Monitoring: Anzeigen nach BEMFV [EMF monitoring: Notifications under BEMFV]. Retrieved from: <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/Telekommunikation/Technik/EMF/start.html> [in German].

22. Bezlitsenziinyi radiozviazok: dovidkovyi material shchodo smuh radiochastot CB, LPD, PMR v Ukraini [License-free radio communication: Reference material on CB, LPD and PMR radio frequency bands in Ukraine]. (n.d.). Retrieved from: https://shop.micro-gis.com/radio-without-licenses_ua [in Ukrainian].
 23. IEC 61000-4-6:2023. (2023). Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-6: Testing and measurement techniques – Immunity to conducted disturbances, induced by radio-frequency fields. Geneva: IEC [in English].
 24. Coelho, V. L., Piantini, A., Almaguer, H. A. D., Coelho, R. A., Boaventura, W. D. C., & Paulino, J. O. S. (2015). The influence of seasonal soil moisture on the behavior of soil resistivity and power distribution grounding systems. *Electric Power Systems Research*, 118, 76–82. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2014.07.027> [in English].
 25. Reffin, M. S., Abdul Ali, A. W., Mohamad Nor, N., Ahmad, N. N., Syed Abdullah, S. A., Mahmud, A., & Hanaffi, F. (2019). Seasonal influences on the impulse characteristics of grounding systems for tropical countries. *Energies*, 12(7), 1334. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12071334> [in English].
 26. IEC 61936-1:2021. (2021). Power installations exceeding 1 kV AC and 1,5 kV DC – Part 1: AC. Geneva: IEC [in English].
 27. European Commission. (2021). Commission Implementing Decision (EU) 2021/1730 of 28 September 2021 on the harmonised use of the paired frequency bands 874,4–880,0 MHz and 919,4–925,0 MHz and of the unpaired frequency band 1900–1910 MHz for Railway Mobile Radio (as amended by Implementing Decision (EU) 2026/291). Retrieved from: https://eur-lex.europa.eu/eli/dec_impl/2021/1730/oj/eng [in English].
-

Кустов Віктор Федорович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-9773-5470>. Тел.: +38(057) 730-10-32. E-mail: kustov.vf@kart.edu.ua.
Слізаренко Андрій Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортного зв'язку, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8567-7576>. E-mail: elizarenko1@ukr.net.

Viktor F. Kustov, PhD (Tech.), Associate Professor, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-9773-5470>. Тел.: +38(057) 730-10-32. E-mail: kustov.vf@kart.edu.ua.

Andriy O. Yelizarenko, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Transport Communication, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8567-7576>. E-mail: elizarenko1@ukr.net.

Дата надходження статті: 31.08.2026 р.

Дата прийняття статті до друку: 23.09.2026 р.

Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.10.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY