

КУСТОВ В. Ф., к.т.н., доцент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів (Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна)

Особливості електромагнітного середовища та каналів проникнення завад в електронні засоби залізничної автоматики України в умовах нових технічних регламентів безпеки

Анотація



Розглянуто особливості електромагнітного середовища і каналів проникнення електромагнітних завад в електронні засоби залізничної автоматики (ЕЗ ЗА) в умовах експлуатації на залізницях України.

Показано, що специфіка електромагнітного середовища залізниць України визначена не тільки параметрами джерел завад, але й особливостями інфраструктури, через яку зовнішній електромагнітний вплив може трансформуватися в кондуктивну, синфазну або диференціальну заваду безпосередньо на портах ЕЗ ЗА. До таких факторів віднесено протяжні лінії електроживлення 6 і 10 кВ, систему «два проводи — рейка» (ДПР) 27,5 кВ і її електричний зв'язок із тяговою мережею змінного струму, силові трансформатори ОМ (однофазні масляні), дросель-трансформатори (ДТ), рейкову мережу, системи заземлення, сезонну зміну параметрів баласту і ґрунту, грозові та комутаційні впливи.

Розглянуто можливість проникнення одного зовнішнього електромагнітного впливу одночасно через декілька портів, зокрема через трансформатор ОМ до порту живлення та через систему заземлення і середню точку дросель-трансформатора до сигнальних кіл. Показано, що розрахункова інтенсивність небезпечних функціональних відмов FFR резервованих структур залежить від коефіцієнта деградації елементної бази приблизно квадратично, тоді як дефіцит ізоляційної координації входить у бета-фактор спільних відмов лінійно, що здатне домінувати в підсумковому показнику для високонадійних компонентів.

Показано зв'язок таких впливів із функціональною безпечністю ЕЗ ЗА рівнів SIL 3 і SIL 4. Електромагнітний вплив може призводити не тільки до збою або переходу системи в захисний стан, але і формування небезпечного помилкового вихідного стану, відмов за спільною причиною та збільшення інтенсивності небезпечних відмов у процесі експлуатації.

Ключові слова: електромагнітна сумісність, залізнична автоматика, електронні засоби залізничної автоматики, функціональна безпечність, SIL 3, SIL 4, ДСТУ EN 50121-4, дросель-трансформатор, силовий трансформатор ОМ, галузеві норми ЕМС.

Постановка проблеми

Електронні засоби залізничної автоматики (ЕЗ ЗА) належать до найбільш відповідальних технічних засобів залізничної інфраструктури, оскільки результати їхнього функціонування безпосередньо використовують для контролю стану колійних ділянок, стрілок та інших об'єктів, формування команд керування і гарантування безпеки руху поїздів. До цієї категорії належать як окремі електронні пристрої — колійні приймачі, пристрої узгодження, контролери стрілок, модулі систем

підрахунку осей, джерела живлення, так і побудовані на їхній основі мікропроцесорні системи централізації, блокування та контролю.

Із 3 травня 2026 р. в Україні набрали чинності Технічний регламент безпеки інфраструктури залізничного транспорту [1] і Технічний регламент безпеки рухомого складу залізничного транспорту [2]. Разом із Законом України «Про безпеку та інтероперабельність на залізничному транспорті України» від 09.06.2026 р. № 4904-IX [3] вони посилюють ризик-орієнтований підхід щодо безпеки

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

залізничної системи. На відміну від національних стандартів (ДСТУ), застосування яких за загальним правилом є добровільним, вимоги технічних регламентів є обов'язковими. Це підвищує значення доказу безпечності для конкретних умов застосування і аналізу характерних національних електромагнітних впливів, якому присвячена ця стаття.

Базовим нормативним документом щодо EMC стаціонарної сигнальної та телекомунікаційної апаратури є ДСТУ EN 50121-4 [4], гармонізований із відповідним європейським стандартом.

У 2025 р. CENELEC підготовлено проєкт нової редакції prEN 50121-4:2025 [5], який має замінити EN 50121-4:2016 і A1:2019; у 2026 р. документ перейшов до стадії FprEN 50121-4:2026 [6]. Офіційна назва документа з переходом до фінальної стадії проєкту не змінилася. Проєкт уточнює сферу застосування, структуру вимог щодо емісії та несприйнятливості й охоплює сигнальну і телекомунікаційну апаратуру, включно з належними до неї системами живлення. Водночас збережено продуктивний, порт-орієнтований підхід, тому оновлення стандарту не усуває необхідності дослідження специфічних для залізниць України інфраструктурних каналів і фактичного електромагнітного середовища.

Перелічені стандарти установлюють відтворювані вимоги щодо емісії та несприйнятливості обладнання і використовують базові методи випробувань серії IEC 61000-4 [7]. Такий підхід є необхідною основою оцінювання відповідності електронного обладнання. Водночас стандартизована випробувальна матриця не може апіорі враховувати всі особливості електромагнітного середовища, топології електроживлення, заземлення, тягової та рейкової інфраструктури конкретної національної залізничної мережі.

Особливість залізниць України полягає не тільки в наявності певних специфічних джерел завад. Не менш важливими є канали, через які ці завади можуть проникати до портів ЕЗ ЗА. Протяжні високовольтні лінії електроживлення 6 і 10 кВ, система «два проводи — рейка» (ДПР) 27,5 кВ на ділянках електротяги змінного струму, контактна і рейкова мережі, силові трансформатори ОМ (однофазні масляні), дросель-трансформатори (ДТ), сигнальні кабелі та системи заземлення утворюють складну розподілену електричну структуру. Її високочастотні властивості істотно відрізняються від властивостей, які притаманні залізницям європейських країн, а також залежать від характеристик видів електротяги поїздів, електроживлення або рейкових кіл.

Викладені в статті результати обґрунтовують практичну потребу в додаткових галузевих

нормативних документах АТ «Укрзалізниця», що конкретизували б вимоги ДСТУ EN 50121-4 з урахуванням національних умов.

Детальне інженерне опрацювання окремих числових рівнів виходить за межі цієї публікації; основну увагу зосереджено на інфраструктурних каналах проникнення завад і їхньому зв'язку з функційною безпечністю.

Наслідки електромагнітного впливу на ЕЗ ЗА можуть бути принципово різними: короткочасний збій або зависання; перехід у передбачений захисний стан із затримкою руху; формування небезпечного помилкового стану; а також поступова деградація елементів із підвищенням інтенсивності небезпечних відмов.

Разом із тим електромагнітна завада може одночасно впливати на декілька портів або резервованих каналів: наприклад, одна зовнішня завада потенційно може проникати через ОМ до порту живлення і одночасно через систему заземлення, середню точку ДТ і сигнальні кола до інших портів тієї самої системи. У такому випадку припущення про незалежність каналів потребує окремого підтвердження, а електромагнітний фактор потрібно розглядати як потенційну причину відмови за спільною причиною (common cause failure, CCF).

У зв'язку з цим актуальним є розроблення додаткових галузевих нормативних документів до ДСТУ EN 50121-4, призначення яких полягає не в критиці чи механічному підвищенні базових європейських рівнів, а у встановленні процедури врахування характерних умов залізниць України: вибір передбачених міжнародними стандартами ступенів жорсткості; доповнення відсутніх експлуатаційних сценаріїв; верифікація інфраструктурних каналів проникнення; встановлення критеріїв безпечної реакції та зв'язку результатів EMC-випробувань із доказами функціональної безпечності SIL 3/SIL 4.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Перехід нормативної бази України до стандартів серії EN 50121 відбувся через ідентичне ухвалення європейських документів (чинний ДСТУ EN 50121-4:2019 — IDT до EN 50121-4:2016), тому спеціальні вимоги на основі особливостей електромагнітного середовища залізниць України окремо не встановлені.

У сучасних дослідженнях значну увагу приділено електромагнітній взаємодії тягового електропостачання, рухомого складу та систем залізничної автоматики. Для автоматичної локомотивної сигналізації досліджено вплив гармонік тягового струму на сигнальний канал [8]. Для

ІНФОРМАЦІЙНО–КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

рейкових кіл запропоновано автоматизований моніторинг спотворень і завад у сигналах [9], а також критерії вибору параметрів системи моніторингу ЕМІ тягової мережі відповідно до нормативних вимог [10]. Незалежні натурні дослідження рухомого складу підтверджують, що оцінювання його ЕМС із системами виявлення поїзда на основі рейкових кіл потребує вимірювань у реальних умовах, де одночасно діють додаткові джерела завад [11]. Сучасне моделювання електромагнітного зв'язку паралельних рейкових кіл також показує істотну залежність рівня завади від геометрії, довжини паралельного проходження, частоти і параметрів рейкової лінії [12]. В Україні цей напрям розвинуто до прикладного завдання підвищення завадостійкості рейкових кіл із застосуванням фільтрів з нанокристалічним осердям [13].

У попередніх роботах автора досліджено специфічний для залізниць України канал проникнення завад поїзного радіозв'язку 2,13 і 2,15 МГц через високовольтні лінії електроживлення та силові трансформатори ОМ до порту живлення ЕЗ ЗА [14], вплив вологості на параметри захисних елементів і каналів проникнення завад [15], а також питання зміни показників надійності в процесі експлуатації [16, 17].

Закордонні дослідження підтверджують окремі складові проблеми для інших мереж: дугові процеси в контакті пантографа є джерелом перехідних процесів, що впливають на GSM-R (Boschetti та ін. [18]); питомий опір мерзлого ґрунту експоненціально залежить від температури (Shan та ін. [19]); протяжна рейкова мережа чутлива до геомагнітно-індукованих струмів (Boteler [20]). Ці роботи не стосуються національної специфіки України, але підтверджують тезу статті: інфраструктурний канал проникнення завади є не менш важливим предметом дослідження, ніж сам факт існування джерела завади.

Результати розглянутих досліджень показують, що для засобів залізничної автоматики оцінювання ЕМС не може бути обмежено лише встановленням рівня зовнішньої завади або фактом збереження працездатності пристрою. Для систем, що виконують функції безпеки, необхідно також оцінювати можливий функціональний наслідок електромагнітного впливу відповідно до принципів функціональної безпечності залізничних систем, установлених ДСТУ EN 50129 [21]. Це визначає необхідність подальшого розгляду зв'язку між ЕМС, небезпечними відмовами та відмовами за спільною причиною.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми

Проведений аналіз показує, що сучасні дослідження сформували значний теоретичний та

експериментальний доробок щодо електромагнітної взаємодії тягового електропостачання, рухомого складу і рейкових кіл, моніторингу завад і засобів підвищення завадостійкості [8–13]. Водночас потрібні подальший розвиток і системний аналіз інших інфраструктурних каналів проникнення завад безпосередньо до електронних засобів залізничної автоматики — через кола електроживлення, силові трансформатори ОМ, рейково-заземлювальну мережу та дросель-трансформатори, включно з можливістю одночасного впливу однієї електромагнітної причини на декілька портів або резервованих каналів.

Мета і задача роботи

Метою дослідження є обґрунтування складу і структури додаткових галузевих вимог щодо ДСТУ EN 50121-4 на основі систематизації характерних для залізниць України джерел електромагнітних завад та інфраструктурних каналів їх проникнення до портів електронних засобів залізничної автоматики, а також встановлення зв'язку відповідних впливів із критеріями функціональної безпечності SIL 3/SIL 4.

Завдання дослідження: проаналізувати базові вимоги ДСТУ EN 50121-4 і попередній досвід національного нормування ЕМС залізничної автоматики; систематизувати особливості електромагнітного середовища та інфраструктури залізниць України — електроживлення 6/10 кВ, систему ДІР 27,5 кВ, контактну мережу, рейкову мережу, заземлення; дослідити силові трансформатори ОМ і дросель-трансформатори як інфраструктурні канали проникнення завад до портів ЕЗ ЗА; оцінити вплив сезонної зміни параметрів баласту і ґрунту на співвідношення паралельних шляхів поширення завад; сформулювати пропозиції щодо структури додаткових галузевих вимог щодо ДСТУ EN 50121-4 включно з процедурою зіставлення фактичного середовища з вимогами стандарту і визначити напрями подальших експериментальних досліджень.

Викладення основного матеріалу дослідження

5.1. Аналіз базових вимог ДСТУ EN 50121-4 і зв'язок ЕМС із функціональною безпечністю

Основою нормативного забезпечення ЕМС апаратури ЗА є ДСТУ EN 50121-4, гармонізований з EN 50121-4 і заснований на базових методах визначення ЕМС серії ІЕС 61000-4, що забезпечує відтворюваність випробування незалежно від виробника. Водночас продуктивний характер стандарту зумовлює необхідний ступінь узагальнення: він не може враховувати всі особливості національної інфраструктури, електроживлення, заземлення і кліматичних умов, тому необхідність додаткових галузевих вимог полягає не в «недосконалої» EN 50121-4, а репрезентативності його випробувального

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

сценарію для конкретного середовища залізниць України.

Аналіз змін prEN 50121-4:2025 [5] і його подальшої стадії FprEN 50121-4:2026 [6] показує, що розвиток європейської нормативної бази EMC СЦБ відбувається переважно через уточнення сфери застосування, актуалізації нормативних посилань, структури вимог і таблиць емісії та несприйнятливості зі збереженням продуктового, порт-орієнтованого принципу випробувань. Це створює сучаснішу методичну основу для оцінювання EMC апаратури, однак не усуває необхідності встановлення фактичних параметрів електромагнітного середовища конкретної залізничної мережі та інфраструктурних каналів формування завад на нормованих портах обладнання. Для залізниць України це стосується, зокрема, ВЛ СЦБ 6/10 кВ, системи ДПР 27,5 кВ, силових трансформаторів ОМ, дросель-трансформаторів, рейково-заземлювальної мережі та сезонної зміни параметрів відповідних каналів. Особливого значення набуває можливість одночасного проникнення однієї зовнішньої електромагнітної завади через декілька інфраструктурних трактів і портів резервованої системи. Отже, додаткові галузеві вимоги для залізниць України мають не замінювати або механічно посилювати EN 50121-4, а встановлювати репрезентативні умови застосування передбачених ним методів і ступенів жорсткості на основі характеристик національної інфраструктури. Оскільки питання безпеки не входять до сфери prEN/FprEN 50121-4 [5, 6], для ЕЗ ЗА, що реалізують функції SIL 3/SIL 4, результати EMC-випробувань мають бути додатково оцінені за можливими функціональними наслідками відповідно до принципів ДСТУ EN 50129 [21].

Показовим є попередній досвід нормування EMC в Україні: скасований нещодавно ДСТУ 4151:2003 для комплексів керування рухом поїздів, разом із традиційними випробуваннями, окремо враховував рівні жорсткості ЕЗ ЗА, динамічні зміни напруги живлення та вплив цифрових радіотелефонів залежно від умов експлуатації, а раніше чинний ДСТУ 4178:2003 встановлював вимоги щодо функціональної безпечності за дій електромагнітних завад. Це не привід повертати скасовані норми, а підстава перевірити, чи не були в процесі гармонізації з EN/IEC втрачені сценарії, фізично характерні для ЕЗ ЗА України.

Функціональний наслідок однакового рівня електромагнітного впливу може істотно відрізнятись для різних функцій. Короткочасне порушення роботи некритичного телекомунікаційного пристрою може бути допустимим, тоді як для колійного приймача, контролера стрілки або іншого засобу, що бере участь у формуванні безпечного стану, правдоподібний, але помилковий вихідний сигнал є принципово іншою,

небезпечною ситуацією. Тому для ЕЗ ЗА необхідно оцінювати не тільки збереження працездатності під час EMC-випробування, а і відсутність хибної команди, помилкового контрольного стану, прихованої втрати діагностики та одночасного порушення резервованих каналів.

Вплив електромагнітного середовища на функціональну безпечність може бути реалізований щонайменше трьома механізмами. Перший – безпосередній функціональний вплив: електромагнітна завада може спричинити збій, зависання або перезапуск електронного пристрою, хибне спрацювання входу чи виходу; наслідком може бути перехід системи в передбачений захисний стан із затримкою руху поїздів або, за несприятливого розвитку, формування помилкового контрольного чи керуючого стану, здатного створити небезпечну ситуацію.

Другий механізм – відмова за спільною причиною (common cause failure, CCF): одна зовнішня електромагнітна подія може одночасно впливати на декілька каналів резервованої системи або проникати до одного комплексу різними інфраструктурними шляхами. Приклад такого багатопортового впливу через ОМ і середню точку дросель-трансформатора (СТ ДТ) як складної розподіленої електричної структури наведено у розділі 1. Для такого випадку припущення про незалежність резервованих каналів потребує окремого підтвердження.

Третій механізм – поступове погіршення надійності електронних засобів за дії експлуатаційних факторів: вологість, конденсат і повторювані електромагнітні впливи можуть змінювати параметри елементів захисту і каналів проникнення завад, збільшуючи фактичну інтенсивність відмов [15]. Для резервованих структур ЕЗ ЗА це впливає на інтенсивність небезпечних функційних відмов непропорційно сильно, що детально розглянуто кількісно в наступному підрозділі; питання зміни інтенсивності відмов у процесі експлуатації розглянуто в роботі [17].

Отже, принципівим є встановлення не лише адекватних параметрів електромагнітного впливу, але і критеріїв безпечної реакції ЕЗ ЗА: під час і після дії завади не мають виникати хибна команда керування, помилковий контрольний стан чи прихована втрата діагностики, а для резервованих систем окремо має бути оцінена можливість спільного впливу на декілька каналів.

5.2. Особливості електромагнітного середовища та інфраструктури залізниць України

Електромагнітне середовище ЕЗ ЗА визначено не тільки параметрами зовнішніх джерел завад, але і структурою тягового та нетягового

ІНФОРМАЦІЙНО–КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

електропостачання, рейкової мережі, протяжних повітряних і кабельних ліній і систем заземлення. Для залізниць України ця обставина має особливе значення через поєднання на діючій мережі різних систем тяги (25 кВ, 50 Гц і 3 кВ постійного струму) та успадкованих схем електропостачання пристроїв автоматики. На рис. 1 показані джерела та інфраструктурні канали формування електромагнітних завад у портах ЕЗ ЗА. Суцільними лініями позначено встановлені функціональні/електричні зв'язки, штриховими – потенційні високочастотні канали, що потребують експериментального підтвердження.

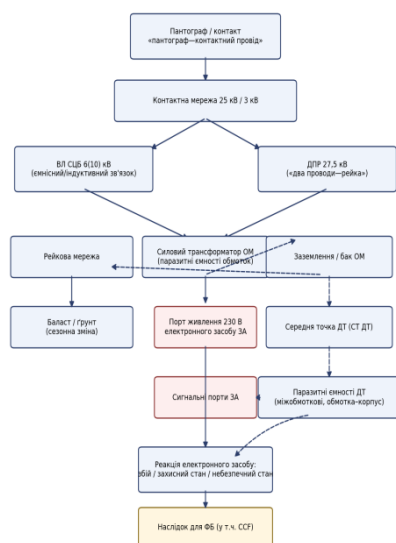


Рис. 1. Джерела та інфраструктурні канали формування електромагнітних завад на портах ЕЗ ЗА

На електрифікованих змінним струмом ділянках разом із контактною мережею застосовувана і система поздовжнього електропостачання ДПР 27,5 кВ («два проводи — рейка») на електрифікованих ділянках змінного струму, причому одним з елементів електричного кола є рейка [22]. Саме використання рейкової мережі як складової системи електропостачання принципово важливе з позиції ЕМС: на відміну від незалежної промислової розподільної мережі, система ДПР конструктивно поєднує кола електропостачання нетягових споживачів із рейковою мережею, яка одночасно бере участь у поверненні тягового струму та функціонуванні низки засобів залізничної автоматики.

Натурні вимірювання і статистичне оцінювання якості електроенергії у споживачів ДПР 27,5 кВ підтверджують практичну значущість цього питання для ЕМС [23]. Ще суттєвішим є електричний зв'язок системи ДПР із тяговою інфраструктурою: лінії ДПР, як і контактна мережа, отримують живлення від тієї самої розподільної установки, а рейка як третій

провідник створює гальванічний шлях впливу тягового струму, тому систему ДПР доцільно розглядати як інфраструктурний тракт, а не просто джерело електроенергії.

Іншою характерною особливістю успадкованої інфраструктури є застосування протяжних повітряних ліній електропостачання пристроїв автоматики напругою 6 і 10 кВ (ВЛ СЦБ). Електромагнітний вплив тягової мережі на такі лінії є фізично добре вивченим явищем силової електротехніки: ємнісний зв'язок із контактною мережею та індуктивний зв'язок через поздовжню ЕРС, наведену тяговим струмом, є двома класичними механізмами взаємного впливу паралельних високовольтних ліній, які традиційно враховують для проєктування захисту ліній автоматики, прокладених поблизу тягової мережі змінного струму 25 кВ. Отже, для ВЛ СЦБ можна виділити щонайменше два таких механізми взаємного впливу: ємнісний зв'язок контактної мережі з ВЛ СЦБ та індуктивний зв'язок тягового струму з ВЛ СЦБ; кількісне оцінювання обох ефектів для конкретної конфігурації лінії потребує розрахунку або натурного вимірювання. Це є важливим аргументом на користь додаткових галузевих вимог: завада на вході силового трансформатора живлення ЕЗ ЗА формується вже в інфраструктурі перед обладнанням, тоді як стандартне випробування порту електронного засобу починається фактично з уже заданого випробувального рівня.

Додатковим, добре відомим у галузі джерелом завад є процес струмознімання: дуга в контакті «пантограф — контактний провід» формує швидкі перехідні електромагнітні процеси, що впливають, зокрема, на GSM-R [18]. Це джерело спільне для різних залізниць; національно специфічною є саме інфраструктура, через яку цей широкосмуговий вплив поширений до ЕЗ ЗА — контактна мережа, ДПР чи ВЛ СЦБ, трансформатор ОМ і порт живлення, а також рейкова і заземлювальна інфраструктура як паралельні шляхи.

Особливого значення набуває рейкова мережа. У системі ДПР рейка безпосередньо входить до електричного кола; одночасно рейки беруть участь у поверненні тягового струму і є середовищем взаємодії з пристроями залізничної автоматики. Для низькочастотних задач модель рейки як провідника з малим активним опором у багатьох випадках є прийнятною. Сучасні дослідження підтверджують, що рівень завад у рейкових і сигнальних колах визначений спектральним складом тягового струму, параметрами рейкової лінії та умовами електромагнітного зв'язку [8–12]. Проте зі зростанням частоти повний імпеданс протяжної рейкової мережі визначають уже не лише активним опором: необхідно враховувати поздовжню індуктивність, розподілену ємність відносно землі, взаємний електромагнітний зв'язок і частотно-залежний розподіл струму в

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

перерізі провідника (скін-ефект). Тому низький опір рейки на постійному струмі або промисловій частоті не є достатнім доказом того, що цей самий тракт буде низькоімпедансним через відведення завади на частотах десятків і сотень мегагерц.

5.3. Силкові трансформатори ОМ як канал проникнення завад

Одним із характерних інфраструктурних каналів проникнення завад до ЕЗ ЗА є силкові трансформатори типу ОМ, через які здійснюється живлення апаратури від протяжних ВЛ або ДПР. Гальванічне розділення первинної та вторинної обмоток не усуває високочастотного зв'язку між ними, який визначений паразитними міжобмотковими та обмотка-корпус ємностями.

Практична значущість такого механізму для залізниць України показана в попередньому дослідженні автора з А. О. Єлізаренком для специфічних національних завад поїзного радіозв'язку 2,13 і 2,15 МГц [14]: сигнали цих частот безпосередньо впорскувані у високовольтні лінії електроживлення систем ЗА (ДПР 27,5 кВ, ВЛ СЦБ 6/10 кВ), а параметри ВЧ-загороджувачів, силових трансформаторів, паразитні ємності, заземлення і стан баласту визначають, наскільки ефективно ця завада передана далі на порти живлення ЕП ЗА. У цій роботі такі результати використано як підтвердження принципового положення: трансформатор ОМ може бути високочастотним каналом між протяжною високовольтною мережею та портом живлення 230 В ЕЗ ЗА.

Додаткового дослідження потребує інший можливий шлях. За електричного зв'язку бака ОМ із рейковою та заземлювальною мережею через середню точку ДТ частина високочастотної завади потенційно може бути поширена за трактом ВЛ/ДПР → ОМ → бак/заземлення → СТ ДТ, тобто паралельно каналу

через порт живлення. Цей другий канал потребує експериментального підтвердження і розглянутий у наступному підрозділі.

5.4. Дросель-трансформатор як потенційний високочастотний канал проникнення завад

Середня точка ДТ є важливим вузлом рейкової та заземлювальної інфраструктури. Традиційне уявлення про відведення струму із СТ ДТ через рейкову мережу є достатнім для багатьох низькочастотних задач, але не може бути автоматично перенесено на швидкі імпульсні та радіочастотні процеси (рис. 2).

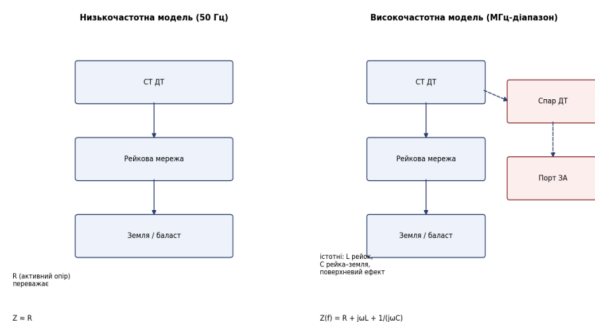


Рис. 2. Концептуальна відмінність низькочастотного та високочастотного подання рейково-заземлювальної інфраструктури ЕЗ ЗА

У МГц-діапазоні зростає роль паразитних міжобмоткових і обмотка-корпус ємностей ДТ, тоді як повний імпеданс рейок і протяжних заземлювальних провідників визначений не тільки їхнім активним опором. Тому низькоомне заземлення на промисловій частоті не є автоматично низькоімпедансним високочастотним заземленням.

Параметрична оцінка для $C_{\text{спар}} = 100\text{--}2000$ пФ показує швидке зменшення ємнісного опору зі зростанням частоти (рис. 3).

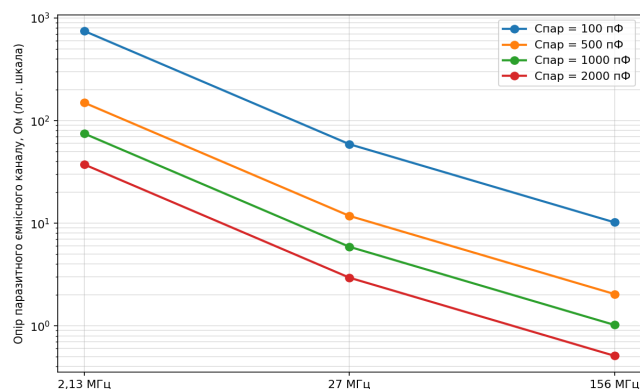


Рис. 3. Розрахункова частотна залежність опору паразитного ємнісного каналу ДТ

Особливо несприятливим може бути поєднання промерзання баласту і контуру заземлення з утворенням конденсату на корпусах ДТ і

трансформаторів ОМ. За таких умов одночасно змінюються імпеданси рейково-заземлювального

тракту і паразитні параметри високочастотних каналів проникнення завад.

Для оцінювання реального впливу різних типів ДТ доцільно передбачити експериментальне дослідження їхньої частотної передавальної характеристики для різних видів електротяги та схем заземлення.

5.5. Сезонна зміна параметрів каналів поширення завад

Електричні параметри тракту «рейка - баласт - ґрунт» залежать від температури та вологості. Промерзання не є самостійним джерелом завади, але може змінювати співвідношення комплексних імпедансів паралельних шляхів її поширення (експоненціальна залежність питомого опору мерзлого ґрунту від температури підтверджена багатьма дослідженнями, наприклад роботою [19]) і потребує врахування у МГц-діапазоні разом з індуктивністю і поверхневим ефектом рейкової мережі.

Протилежний за характером кліматичний сценарій пов'язаний із підвищеною вологістю і конденсатом. У попередньому дослідженні автора з А. А. Прилипком показано збільшення паразитної ємності між провідниками, між провідником і корпусом і в елементах гальванічної розв'язки за дії вологи, одночасно зі зменшенням опору ізоляції [15]. Отже, кліматичні фактори можуть змінювати не тільки надійність окремих елементів, але і передавальні властивості каналів проникнення електромагнітних завад, що обґрунтовує необхідність проведення частини вимірювань для характерних сезонних умов експлуатації.

Принципово важливо, що йдеться не про одноразовий вплив, а про повторюваний цикл: апаратура ЗА в колійному ящику чи релейній шафі, на відміну від приміщення з контрольованим кліматом, регулярно зазнає промерзання і відтавання взимку та конденсації і нагріву влітку — цей плавний сезонний фон накладається на короткочасні імпульсні впливи іншої природи (грозова перенапруга — від десятків мікросекунд до секунд; сеанс поїзного радіозв'язку 2,13/2,15 МГц чи іскріння пантографа - від секунд до кількох хвилин; розмова по мобільному телефону чи службовій радіостанції під час пошуку несправності електромеханіком СЦБ - до десятків хвилин). Кожна окрема подія рідко є причиною відмови, але кумулятивна дія сукупності таких плавних та імпульсних факторів формує додаткову складову інтенсивності відмов, яка зростає протягом терміну служби, а не є сталою величиною (рис. 4).

5.6. Кількісний вплив накопиченої деградації елементів за дії електромагнітних завад

на функційну безпечність електронних засобів залізничної автоматики

Електромагнітний вплив на електронні засоби залізничної автоматики (ЕЗ ЗА) не обмежений короткочасним збоєм або миттєвим фізичним пошкодженням. Повторювані кондуктивні, імпульсні та радіочастотні завади в поєднанні з температурою, вологістю, конденсатом та іншими експлуатаційними факторами можуть створювати тривалий електричний і тепловий стрес елементної бази. Окрема подія може не призводити одразу до відмови, однак сукупний вплив протягом терміну експлуатації здатний проявитися параметричним дрейфом характеристик напівпровідникових компонентів, елементів захисту, ізоляції та гальванічної розв'язки і, як наслідок, збільшенням фактичної інтенсивності небезпечних відмов як окремих каналів резервування, так і ЕЗ ЗА і цілому.

Для кількісного аналізу розглянемо дві базові резервовані структури ЕЗ ЗА: дубльовану структуру 2 з 2 за логікою «І» (2002) і мажоритарну структуру 2 з 3 (2003). Спочатку розглядають лише незалежні небезпечні відмови каналів. Відмови зі спільної причини (CCF) і β -фактор мають бути розглянуті окремо, оскільки вони порушують вихідне припущення про незалежність каналів.

Нормативною основою для структури 2002 є ДСТУ EN 50129 [21] (EN 50129:2018), додаток В, п. В.2.2 «Composition of two independent items». Для двох однакових незалежних каналів резервування стандарт наводить апроксимацію асимптотичної інтенсивності небезпечних функційних відмов:

$$FFR_{2002} = 2FR_0^2SDT, \quad (1)$$

де FFR_{2002} (Functional Failure Rate) — результуюча інтенсивність небезпечних відмов дубльованої структури 2002, FFR нормативний показник за стандартом;

FR_0 (Failure Rate) — початкова інтенсивність небезпечних відмов одного каналу;

SDT (Safe Down Time) — сумарний безпечний час від виникнення відмови до її виявлення (часу діагностики T_d) і нейтралізації (часу усунення T_u).

Формулу (1) застосовують за приблизним рівнянням, за умови $FR \cdot SDT < 0,1$ і можливості нехтування небезпечними CCF. Коефіцієнт 2 враховує найгірші, максимальні значення інтенсивностей небезпечних відмов каналів резервування наприкінці

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

інтервалу SDT . Для мажоритарної структури 2003 нормативну основу доповнює ІЕС 61508-6:2010, додаток В, п. В.3.3.2.5 «2003». Повна формула FFR для цієї архітектури містить коефіцієнт 6 при складовій, пов'язаній із комбінацією незалежних небезпечних відмов. У спрощеному поданні незалежної складової, прийнятому для порівняльного аналізу, інтенсивність небезпечних функційних відмов такої мажоритарної структури ЕЗ ЗА має вигляд

$$FFR_{2003} = 6FR_0^2 SDT. \quad (2)$$

Формулу (2) застосовують також за приблизним рівнянням, за умови $FR \cdot SDT < 0,1$ і можливості нехтування небезпечними ССФ. Аналогічні моделі (1) і (2) використовували в Україні і до ухвалення міжнародних і європейських стандартів для доказу функціональної безпечності ЕЗ ЗА (тільки з іншими позначеннями).

Формула (2) не є дослівним переписуванням повної формули ІЕС 61508-6; вона використовується тут як спрощене подання її незалежної складової для однакових каналів.

Отже, базові залежності для подальшого аналізу можна подати як

$$FFR_{2002} = 2FR_0^2 SDT; \\ FFR_{2003} = 6FR_0^2 SDT. \quad (3)$$

Для опису поступового погіршення стану елементної бази за дії повторюваних експлуатаційних стресів введемо безрозмірний коефіцієнт деградації κ . Він не є нормативним параметром EN 50129 або ІЕС 61508, а використовуваний як узагальнений параметр дослідження:

$$\kappa = FR\kappa / FR_0; FR\kappa = \kappa \cdot FR_0; \kappa \geq 1. \quad (4)$$

Значення $\kappa = 1$ відповідає вихідному розрахунковому стану каналу. Значення $\kappa > 1$ означає, що внаслідок накопиченої деградації

фактична інтенсивність небезпечних відмов каналу стала в κ разів більшою. При цьому конкретна залежність κ від напруженості поля, амплітуди кондуктивної завади, кількості імпульсів і часу експлуатації в цій роботі не постульована як нормативна: вона має бути визначена експериментально або за достовірною експлуатаційною статистикою.

На рис. 4. наведено вплив повторюваних завад і погіршення ізоляції між елементами структури ЕЗЗА на коефіцієнт деградації $\kappa(t)$. Графік не є експериментальною залежністю $\kappa = f(t)$, він показує механізм можливої його реальної зміни в процесі експлуатації.

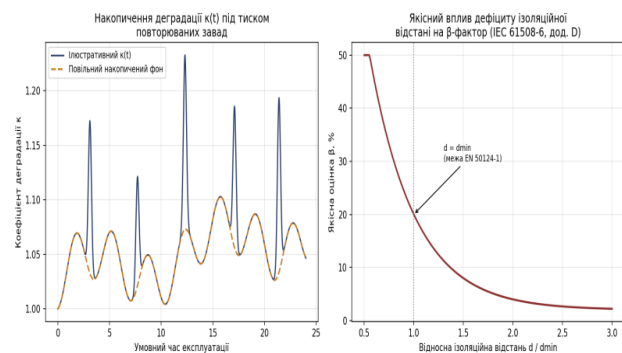


Рис. 4. Ілюстративне подання «тиску» повторюваних завад на коефіцієнт деградації $\kappa(t)$ (ліворуч) і якісний вплив дефіциту ізоляційної відстані на β -фактор за базовою методикою ІЕС 61508-6, додаток D (праворуч)

Підставляючи вираз (4) у базові залежності (3), отримуємо

$$FFR_{2002} = 2\kappa^2 FR_0^2 SDT; \quad (5)$$

$$FFR_{2003} = 6\kappa^2 FR_0^2 SDT \quad (6)$$

Звідси для кожної з розглянутих архітектур відносно збільшення незалежної складової інтенсивності небезпечних функційних відмов визначена однаково:

$$FFR(\kappa) / FFR(1) = \kappa^2. \quad (7)$$

Отже, лінійне збільшення інтенсивності небезпечних відмов окремого каналу в κ разів унаслідок накопиченої деградації спричиняє квадратичне у κ^2 разів збільшення незалежної складової інтенсивності небезпечних функційних відмов резервованої структури (рис. 5). На рисунку по осі ординат показано нормовану величину $FFR/(FR_0^2 \cdot SDT)$. Наприклад, $\kappa = 1,5$ відповідає збільшенню цієї складової у 2,25 раза, $\kappa = 2$ - у 4 рази, $\kappa = 3$ - у 9 разів. У разі більшого енергетичного впливу електромагнітних завад, наприклад унаслідок грозових перенапружень, які не спричинили миттєвих відмов елементів, ці коефіцієнти здатні змінити інтенсивність небезпечних відмов в сотні і навіть тисячі разів. При цьому сертифікаційні рівні функціональної безпеки SIL3 чи SIL4 і безпека руху поїздів будуть змінені до недопустимих значень.

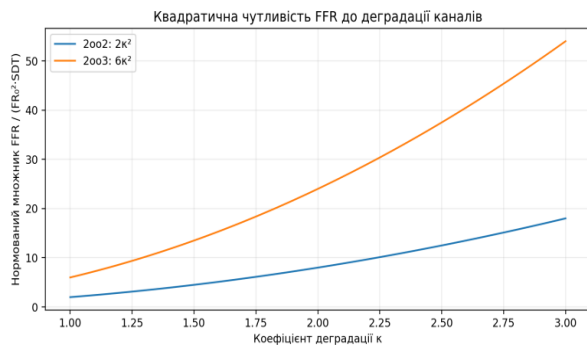


Рис. 5. Квадратична чутливість FFR до коефіцієнта деградації κ для базових структур ЕЗ ЗА 2oo2 і 2oo3

Рис. 5 показує однаковий квадратичний характер деградації для обох структур; більший коефіцієнт (6 проти 2) для 2oo3 відображає лише прийняту спрощену модель і не означає, що ця структура «втричі менш безпечна» — повна оцінка залежить ще і від діагностичного покриття, режиму відновлення та інших припущень.

Із позиції впливу електромагнітних завад отриманий результат має такий зміст: для погіршення функційної безпечності не обов'язково, щоб завада одразу призвела до фізичного руйнування елемента. Якщо повторювані впливи поступово збільшують FR каналу, резервована структура реагує на цю зміну нелінійно. Саме тому під час оцінювання EMC ЕЗ ЗА SIL 3/SIL 4 доцільно поряд із критерієм відсутності миттєвої небезпечної реакції досліджувати можливість накопиченої деградації елементної бази та підтверджувати збереження розрахункових показників FR протягом установленого терміну експлуатації.

Математичний ланцюг першого механізму впливу можна подати як

$$\begin{aligned} &\text{повторювані ЕМ – завади} \rightarrow \\ &\text{накопичена деградація} \rightarrow \kappa > 1 \rightarrow \\ &FR_{\kappa} = \kappa \cdot FR_0 \rightarrow FFR_{ind} \propto \kappa^2 \end{aligned} \quad (8)$$

Важливо, що цей висновок стосується саме незалежної складової відмов. Якщо одна й та сама електромагнітна причина здатна одночасно впливати на декілька каналів, припущення про їхню незалежність порушено. Такий механізм потрібно розглядати окремо як CCF із застосуванням β -фактора; він є предметом наступного підрозділу.

5.7. Вплив електромагнітних завад на відмови зі спільної причини (CCF) і β -фактор

Моделі попереднього підрозділу виходять із незалежності відмов каналів. Для ЕЗ ЗА це припущення потребує окремого підтвердження: одна зовнішня електромагнітна причина здатна одночасно впливати на декілька каналів або проникати до одного комплексу різними інфраструктурними шляхами (живлення, сигнальні кола, заземлення, ОМ, СТ ДТ). Такий механізм відповідає відмові за спільною причиною (CCF), яка підлягає розгляду за ДСТУ EN 50129.

Для кількісного оцінювання апаратних CCF застосовують методику β -фактора IEC 61508-6, додаток D. Незалежна і спільна складові інтенсивності небезпечних відмов виражені як

$$FR_{ind} = (1 - \beta)FR; FR_{ccf} = \beta FR.$$

Важливий інженерний наслідок: незалежна складова FFR пропорційна FR^2 (вирази (5), (6)), тоді як складова CCF — лише $\beta \cdot FR$, тобто величина першого порядку. Співвідношення цих доданків не є сталим: точка переходу $FR_{crit} \approx \beta / (2 \cdot SDT)$, після якої переважає квадратична складова, залежить від SDT на кілька порядків — за малого SDT (швидке гарантоване відновлення) навіть незначний β може домінувати вже для високонадійних каналів, тоді як за великого SDT переважає квадратична складова навіть за малих β . Крім того, оскільки CCF-складова зростає з деградацією лише лінійно ($\beta \cdot \kappa \cdot FR_0$), а незалежна складова — квадратично ($\kappa^2 \cdot FR_0^2 \cdot SDT$), для достатнього накопичення деградації (зростання κ)

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

квадратичний доданок рано чи пізно переважає незалежно від початкового співвідношення. Отже, жодне підвищення надійності елементної бази не компенсує недостатнього фізичного розділення каналів лише за умови малого SDT і обмеженої деградації; за значного SDT або суттєвої деградації визначальним стає саме квадратичний доданок.

На рис. 6 показано вплив β -фактора на FFR структур 2002 і 2003 для реального каналу ($FR = 10^{-7}$

год⁻¹, $SDT = 5$ років) у найгіршому за ІЕС 61508-6, додаток D, діапазоні β (1-10 %). Для $\beta = 0$ різниця між структурами точно відповідає співвідношенню коефіцієнтів (6 проти 2, тобто рівно втричі); зі зростанням β лінійний CCF-доданок, однаковий для обох структур, починає домінувати, і ця відмінність нівелюється.

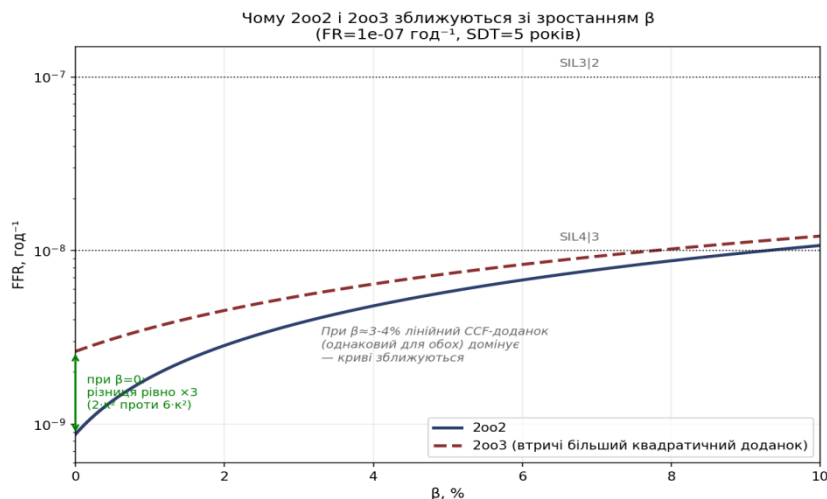


Рис. 6. Порівняння FFR структур 2002 і 2003 залежно від β : для $\beta = 0$ різниця точно втричі, зі зростанням β лінійний CCF-доданок домінує, і криві зближуються

($FR = 10^{-7}$ год⁻¹, $SDT = 5$ років)

Незначна відмінність між сумарними значеннями FFR структур 2002 і 2003 зі збільшенням β -фактора є закономірною. У прийнятій моделі архітектури відрізняються незалежною складовою небезпечних відмов, тоді як складова відмов за спільною причиною (CCF) є спільною для обох структур і зростає пропорційно β -фактору. Зі збільшенням β саме CCF-складова починає домінувати в сумарному FFR, тому відносний внесок відмінності між незалежними складовими 2002 і 2003 зменшується, а відповідні криві зближуються. Відмінність між структурами стає суттєвою за протилежних умов - коли незалежна складова стає співмірною з CCF-складовою або перевищує її. Цьому сприяють збільшення фактичного часу відновлення SDT , зростання інтенсивності небезпечних відмов окремого каналу FR і зменшення β -фактора. Саме тому за великого SDT , зокрема тривалого очікування планового усунення виявленої або прихованої відмови, різниця між структурами на рис. 6 стає значно виразнішою, тоді як за малого SDT і домінування CCF вона практично нівелюється. Фізично це означає, що за домінування CCF збільшення структурної надлишковості саме по собі не забезпечує пропорційного підвищення функціональної безпечності, оскільки одна спільна зовнішня причина, зокрема електромагнітний вплив,

потенційно може одночасно порушувати декілька резервованих каналів.

Із рис. 6 випливає і дзеркальний архітектурний висновок. Оскільки незалежний доданок 2002 утричі менший за 2003, для досягнення одного і того самого цільового FFR структура 2002 допускає канал із інтенсивністю відмов FR у $\sqrt{3} \approx 1,73$ раза вищою (тобто гіршою), ніж структура 2003. Іншими словами, «кращий» на перший погляд рівень функціональної безпеки структури 2002 частково може бути досягнутий не за рахунок надійніших компонентів, а за рахунок простішої — подвійної, а не потрійної — мажоритарної логіки; це потрібно враховувати, порівнюючи вартість елементної бази різних архітектур для однакового цільового SIL.

Практичний висновок: оскільки CCF, за визначенням, розглядає одну зовнішню причину, здатну одночасно вражати декілька каналів, електромагнітна завада є типовим кандидатом на роль такої причини, а отже, оцінювання EMC ЕЗ ЗА має включати не лише перевірку окремого порту, а й аналіз можливості одночасного впливу на декілька резервованих каналів через спільні інфраструктурні шляхи. Кількісне встановлення β для конкретних конфігурацій ЕЗ ЗА є завданням окремого

ІНФОРМАЦІЙНО–КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

дослідження; наведена вище залежність має виключно ілюстративний характер.

Тут слід зазначити про принципову асиметрію двох доданків формули (9). Квадратичний доданок $2 \cdot (1-\beta)^2 \cdot FR^2 \cdot SDT$ явно містить SDT, тому вплив накопиченої деградації можна компенсувати скороченням SDT — частішим гарантованим контролем і усуненням відмов. Натомість CCF-доданок $\beta \cdot FR$ від SDT не залежить узагалі: скільки б не скорочувати період контролю, це в жодному разі не зменшує внесок відмови за спільною причиною. Єдиний спосіб зменшити цей доданок — зменшити сам β , тобто підвищити фізичне розділення, різноманітність (різні виробники, технології, траси прокладання кабелів) і екранування резервованих каналів. Іншими словами, проти деградації ефективний швидкий контроль, а проти CCF — лише якісніше конструктивне розділення; підміна одного заходу іншим не працює.

Слід зазначити, що визначальні параметри цього співвідношення — SDT (з урахуванням часу гарантованого усунення, а не лише виявлення відмови) і коефіцієнт деградації k — на практиці не є нормативними: обидва потребують окремого обґрунтування для конкретної конфігурації апаратури, тому апіорне віднесення каналу до « β -домінантного» чи «деградаційно-домінантного» режиму є орієнтовним. Більш того, ці параметри взаємопов'язані: мале SDT досягне лише за умови автоматичної діагностики і усунення відмови, а засіб діагностики сам є електронною системою, що підлягає власній деградації за дії тих самих EMC-факторів — рекурсивний варіант проблеми «хто діагностує систему діагностики».

Обговорення результатів

Проведений аналіз показує, що необхідність національного доповнення вимог EMC не потрібно зводити до механічного підвищення рівнів жорсткості ДСТУ EN 50121-4: міжнародна нормативна база вже містить потрібні методи випробувань, а основна проблема полягає у визначенні репрезентативного сценарію впливу, каналу його проникнення та допустимої реакції функції. Це узгоджено з раніше отриманими результатами щодо завад поїзного радіозв'язку 2,13 і 2,15 МГц, де фактичний вплив на порт живлення визначено не самим джерелом, а елементами інфраструктурного тракту [14]; у цій роботі такий принцип розповсюджено на більше коло впливів і портів.

Передавання RF-завади через ДТ до сигнальних кіл залишається фізично обґрунтованою гіпотезою, а не доведеним експериментально фактом: параметричне зменшення емнісного опору на частотах порядку 156 МГц показує доцільність дослідження, але потребує вимірювання повної

передавальної характеристики реальних ДТ. Так само низькоомне заземлення на промисловій частоті не є доказом низького високочастотного імпедансу, а сезонна зміна властивостей баласту і ґрунту (підтверджена експериментально [19]) здатна змінювати співвідношення паралельних шляхів струму.

Із позиції функціональної безпечності найбільш несприятливим залишається багатофакторний вплив однієї зовнішньої причини (CCF) через ОМ і ДТ, оскільки він впливає на саме припущення про незалежність резервованих каналів [14, 15, 21]. Основним узагальненим результатом є перехід від підходу «нормований вплив → порт» до постановки «джерело → інфраструктурний канал → вплив на порт → реакція засобу → наслідок для ФБ», який доцільно покласти в основу подальших галузевих нормативних документів.

Пропозиції щодо додаткових галузевих вимог до ДСТУ EN 50121-4

Результати проведеного аналізу не дають підстав для механічного підвищення всіх установлених ДСТУ EN 50121-4 рівнів жорсткості. Для частини впливів міжнародні стандарти вже передбачають декілька рівнів або спеціальні методи випробувань. Завдання додаткових галузевих вимог полягає у визначенні умов їх застосування до ЕЗ ЗА України. До їхнього складу доцільно включити такі основні положення.

По-перше, необхідно класифікувати умови застосування обладнання за типом електропостачання, видом тяги, місцем установлення, характером підключених протяжних кіл і доступністю обладнання для персоналу. Це дасть змогу уникнути однакових підвищення вимог для принципово різних умов експлуатації.

По-друге, для радіочастотних впливів необхідно враховувати не тільки частоту і напруженість поля, але і тип джерела, форму сигналу та відстань до обладнання. Для обґрунтованого можливого близького розташування портативних передавачів доцільно передбачити застосування ІЕС 61000-4-39 і включення до випробувальної конфігурації кабелів, джгутів і периферійних пристроїв; конкретні числові рівні для радіочастотного середовища 150–156 МГц і СВ 27 МГц визначають у суміжному дослідженні і планують опублікувати після його завершення.

По-третє, для обладнання, підключеного через характерні залізничні інфраструктурні тракти, доцільно передбачити перевірку частотно-залежної передавання завади до порту, насамперед для ОМ, ДТ, протяжних кабелів, рейкової та заземлювальної мережі. Питання електростатичних розрядів (ESD),

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

динамічних змін живлення та грозових перенапруг, вимоги до яких лише частково закладено для ЕЗ ЗА у базовому стандарті EMC, потребують окремого критичного аналізу і є предметом додаткових досліджень прикладного спрямування.

Нарешті, для засобів, що реалізують функції SIL 3/SIL 4, доцільно послідовно застосовувати єдиний критерій безпечної реакції, сформульований у підрозділі про зв'язок EMC із функціональною безпечністю, до кожного з перелічених вище видів впливу, включно з перевіркою можливості одночасного впливу на декілька резервованих каналів.

Оскільки частина виявлених каналів має розрахункове або гіпотетичне обґрунтування, встановленню нових числових вимог має передувати галузева програма експериментальних досліджень: вимірювання частотної передавальної характеристики реальних типів ОМ і ДТ, комплексного імпедансу тракту рейка-земля за різних сезонних умов, рівнів динамічних змін напруги живлення, ESD-потенціалу персоналу та параметрів близького RF-впливу. Результатом такої програми має бути матриця «умови застосування → характерна завада → метод випробування → рівень → критерій реакції» як технічна основа для подальших галузевих нормативних документів.

Висновки

1. Проведений аналіз показав, що специфіка електромагнітного середовища електронних засобів залізничної автоматики України визначена не тільки рівнями зовнішніх завад, але і конфігурацією тягового і нетягового електропостачання, рейкової мережі, систем заземлення та інших протяжних структур, які формують фактичні канали проникнення завад до електронних портів.

2. Попередні дослідження проникнення завад поїзного радіозв'язку 2,13 і 2,15 МГц підтвердили практичну значущість інфраструктурного каналу через силові трансформатори ОМ до портів живлення. У цій роботі обґрунтовано необхідність розширення такого підходу на інші джерела, частоти і порти без повторення раніше отриманих результатів.

3. Висунуто гіпотезу про можливість височастотного передавання завади від рейково-заземлювальної інфраструктури через СТ ДТ і паразитні параметри ДТ до сигнальних кіл. Параметричні оцінки підтверджують доцільність такого дослідження, однак для кількісного оцінювання необхідне експериментальне визначення частотної передавальної характеристики реальних типів ДТ.

4. Показано необхідність урахування сезонної зміни каналів поширення завад. Промерзання баласту

і ґрунту може змінювати співвідношення імпедансів паралельних шляхів струму, тоді як вологість і конденсат впливають на опір ізоляції, паразитні ємності та характеристики захисних елементів.

5. Для ЕЗ ЗА із високими рівнями безпеки SIL 3/SIL 4 критерієм EMC має бути не тільки збереження працездатності або відсутність фізичного пошкодження, але і відсутність хибної команди, помилкового контрольного стану, прихованої втрати діагностики та спільного впливу на резервовані канали. Одна зовнішня електромагнітна причина, що проникає через декілька портів, має бути врахована для аналізу CCF.

6. Обґрунтовано, що додаткові галузеві вимоги щодо ДСТУ EN 50121-4 доцільно формувати не як таблицю загальнопідвищених рівнів В/м, кВ або В, а як систему правил вибору випробувального сценарію, ступеня жорсткості, конфігурації випробування та критерію реакції, пов'язаного з безпекою, залежно від реального середовища застосування; числові значення цих вимог мають бути установлені за результатами галузевих натурних і лабораторних досліджень.

Список використаних джерел

1. Про затвердження Технічного регламенту безпеки інфраструктури залізничного транспорту : Постанова КМУ від 11.07.2013 р. № 494 (ред. від 03.05.2026 р.). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/494-2013-%D0%BF> (дата звернення: 26.08.2026)
2. Про затвердження Технічного регламенту безпеки рухомого складу : Постанова КМУ від 30.12.2015 р. № 1194 (ред. від 03.05.2026 р.). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1194-2015-%D0%BF> (дата звернення: 26.08.2026)
3. Про безпеку та інтероперабельність на залізничному транспорті України : Закон України від 09.06.2026 р. № 4904-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/4904-20> (дата звернення: 26.08.2026)
4. ДСТУ EN 50121-4:2019 (EN 50121-4:2016, IDT). Залізничний транспорт. Електромагнітна сумісність. Ч. 4. Випромінювання та несприйнятливість апаратури сигналізації та зв'язку. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019.
5. prEN 50121-4:2025. Railway applications — Electromagnetic compatibility — Part 4: Emission and immunity of the signalling and telecommunications apparatus. CENELEC, Project 79750, draft, August 2025. URL: <https://standardsdevelopment.bsigroup.com/projects/2025-02602> (дата звернення: 04.09.2026)
6. FprEN 50121-4:2026. Railway applications — Electromagnetic compatibility — Part 4: Emission and

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

- immunity of the signalling and telecommunications apparatus. CENELEC, Project 79750, Final Draft, 2026. URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/clc/c928dca3-cc46-46d2-ba7f-27c534b624fd/fpren-50121-4-2026> (дата звернення: 04.09.2026)
7. IEC 61000-4 (series). Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 4: Testing and measurement techniques. Geneva : IEC.
8. Havryliuk, V. Investigation of the Influence of Traction Current Harmonics on Automatic Locomotive Signaling. *2025 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2025 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*. 2025. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/EEEIC/ICPSEurope64998.2025.11169221>
9. Havryliuk, V., Radzikhovskiy, K., Voznyak, O. Monitoring of distortions and interferences in ASK-modulated currents of railway signaling systems. *MATEC Web of Conferences*. 2024. Vol. 390. Art. 02004. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/202439002004>
10. Havryliuk, V., Nibaruta, R. Choice of the Parameters of an EMI Monitoring System for an AC Traction Network. *2023 IEEE 7th Global Electromagnetic Compatibility Conference (GEMCCON)*. IEEE, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1109/GEMCCON57842.2023.10078179>
11. Garczarek, A., Stachowiak, D. Measurements and Analysis of Electromagnetic Compatibility of Railway Rolling Stock with Train Detection Systems Using Track Circuits. *Energies*. 2025. Vol. 18, No. 11. Art. 2705. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18112705>
12. Fu, Z., Tan, C., Gong, J. Electromagnetic coupling interference modeling of high-speed railway track circuits: implications for wireless sensor networks in industry 4.0 IoT. *Discover Applied Sciences*. 2026. Vol. 8. Art. 72. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-025-08082-y>
13. Серченко, М. С. Підвищення завадостійкості рейкових кіл залізничної автоматики шляхом впровадження фільтрів з нанокристалічним осердям : дис. ... д-ра філософії : 273 Залізничний транспорт / Український державний університет науки і технологій. Дніпро, 2026. Державний реєстраційний номер 0826U002607. URL: <https://ust.edu.ua/nauka/specjalizovani-vcheni-rady/razovi-specjalizovani-vcheni-rady-phd/273-zaliznychnyj-transport/>
14. Кустов, В. Ф., Єлізаренко, А. О. Нормування і вплив завад поїзного радіозв'язку 2,13 і 2,15 МГц на порти живлення електронних пристроїв СЦБ рівнів SIL ¾. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* 2026. Вип. 216. DOI: 10.18664/1994-7852.216.2026.362481
15. Кустов, В. Ф., Прилипко, А. А. Вплив вологості на деградацію елементів захисту і параметри каналів проникнення завад: загрози для електромагнітної сумісності і функціональної безпеки систем залізничної автоматики. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2025. Т. 30, № 2. С. 144–158. DOI: 10.18664/ikszt.v30i2.336437
16. Кустов, В. Ф. Основи теорії надійності та функціональної безпечності систем залізничної автоматики : навч. посіб. Харків : УкрДАЗТ, 2008. 218 с.
17. Кустов, В. Ф. Фундаментальні недоліки базових моделей небезпечних відмов для розрахунку функціональної безпеки систем керування рухом поїздів. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* 2025. Вип. 212. С. 301–314. DOI: 10.18664/1994-7852.212.2025.336537
18. Boschetti, G., Mariscotti, A., Deniau, V. Assessment of the GSM-R susceptibility to repetitive transient disturbance. *Measurement*. 2012. Vol. 45, No. 9. P. 2226–2236. DOI: 10.1016/j.measurement.2012.04.004
19. Shan, W., Liu, Y., Hu, Z., Xiao, J. A Model for the Electrical Resistivity of Frozen Soils and an Experimental Verification of the Model. *Cold Regions Science and Technology*. 2015. Vol. 119. P. 75–83. DOI: 10.1016/j.coldregions.2015.07.010
20. Boteler, D. H. Modeling Geomagnetic Interference on Railway Signaling Track Circuits. *Space Weather*. 2021. Vol. 19, No. 1. e2020SW002609. DOI: 10.1029/2020SW002609
21. EN 50129:2018. Railway applications — Communication, signalling and processing systems — Safety related electronic systems for signalling. Brussels : CENELEC, 2018.
22. Про затвердження Правил безпечної експлуатації контактної мережі та пристроїв електропостачання автоблокування залізниць : Наказ МНС України від 13.01.2012 р. № 19 ; зареєстр. в Мін'юсті України 03.02.2012 р. за № з0175-12.
23. Земський, Д. Р. Експериментальне дослідження якості електроенергії у споживачів, що живляться від лінії ДІП 27,5 кВ залізниць змінного струму. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2018. № 1 (136). С. 66–71.
24. Panchenko, S., Bojnik, A., Kustov, V., Sotnyk, V. Ensuring Railroad's Digital Automation Systems Resistance to Dangerous States. *ICTE in Transportation and Logistics 2019. Lecture Notes in Intelligent*

Transportation and Infrastructure. Springer, Cham, 2020. P. 112–120. DOI: 10.1007/978-3-030-39688-6_17

25. EN 50124-1:2017. Railway applications — Insulation coordination — Part 1: Basic requirements — Clearances and creepage distances for all electrical and electronic equipment. Brussels : CENELEC, 2017.

26. IEC 61000-4-39:2017. Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 4-39: Testing and measurement techniques — Radiated fields in close proximity — Immunity test. Geneva : IEC, 2017.

27. IEC 61508-6:2010. Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems — Part 6: Guidelines on the application of IEC 61508-2 and IEC 61508-3. Geneva : IEC, 2010.

Features of the electromagnetic environment and disturbance penetration channels into electronic railway signalling equipment of Ukraine under new technical safety regulations

Viktor F. Kustov, PhD (Tech.), Associate Professor, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine.

Methodology. The study applies a channel-based approach: for each disturbance source, the physical infrastructure channel of its penetration to a specific equipment port is identified separately from the source, and the functional consequence is assessed against a unified safety-related reaction criterion. Established facts are explicitly distinguished from physically justified hypotheses requiring dedicated measurement, and an immunity-margin coefficient comparing measured disturbance levels with EN 50121-4 test levels is introduced as a decision tool.

Results. The OM-transformer channel of RF penetration to the power port, previously confirmed for 2.13/2.15 MHz train radio interference, is generalised to 6/10 kV power lines, the 27.5 kV booster system, and the rail-ground path with its seasonal variation. A physically justified hypothesis of high-frequency signal penetration through the impedance-bond midpoint to signalling circuits is formulated as a common-cause failure concern. It is shown that the hazardous functional failure rate (FFR) of redundant architectures depends approximately on the square of the component degradation factor, and that insulation-coordination deficits contribute to the beta-factor linearly rather than quadratically, which can dominate the resulting hazardous-failure rate for high-reliability components. A structured comparison procedure based on a quantified immunity-margin coefficient is proposed as the technical basis for further normative work.

Scientific novelty. For the first time, a unified infrastructural-channel taxonomy is proposed for the national electromagnetic environment of Ukrainian railway automation, linking disturbance sources to penetration paths and functional-safety consequences. The immunity-margin coefficient formalises a measurement-based alternative to the a priori increase of EN 50121-4 severity levels, and the quadratic versus linear sensitivity of the hazardous functional failure rate to component degradation and to insulation-coordination deficits, respectively, is established for the first time in this national context.

Practical significance. The proposed channel-based structure and comparison procedure can be used by designers, certification bodies and standardisation working groups when preparing additional normative requirements for DSTU EN 50121-4, providing a prioritised programme of field and laboratory measurements instead of an arbitrary increase of test levels. The results apply both to new SIL 3/SIL 4 signalling equipment and to EMC audits of equipment already in operation.

Keywords: electromagnetic compatibility, railway signaling, functional safety, SIL 3, SIL 4, EN 50121-4, impedance bond, OM power transformer, immunity margin, industry standards.

Кустов Віктор Федорович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна.

E-mail: kustov.vf@kart.edu.ua.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-9773-5470>.

Viktor Kustov, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Automation and Computer-Aided Train Traffic Control, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine.

E-mail: kustov.vf@kart.edu.ua.

ORCID iD: <http://orcid.org/0000-0002-9773-5470>.

Стаття надійшла 01.09.26

Стаття прийнята до друку після рецензування 26.09.26

Стаття опублікована (оприлюднена) 06.10.26

Стаття поширюється на умовах ліцензії

Creative Commons Attribution License International CC-BY.