

УДК 621.391.82:656.25

НОРМУВАННЯ І ВПЛИВ ЗАВАД ПОЇЗНОГО РАДІОЗВ'ЯЗКУ 2,13 І 2,15 МГц НА ПОРТИ ЖИВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ СЦБ РІВНІВ SIL 3/4

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

NORMALIZATION AND IMPACT OF INTERFERENCE OF 2.13 AND 2.15 MHz RAILWAY RADIO COMMUNICATIONS ON POWER SUPPLY PORTS OF ELECTRONIC DEVICES OF SIL 3/4 LEVELS

PhD (Tech). V. Kustov, Candidate of Techn. Sciences A. Yelizarenko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.216.2026.362481>



Анотація. У роботі розглянуто механізми проникнення завад поїзного радіозв'язку на частотах 2,13 і 2,15 МГц у порти живлення для систем сигналізації, централізації та блокування (СЦБ) рівнів SIL 3/4. Показано, що навіть за відносно помірної напруги радіосигналу у ВЛ або ДПП 14,2 В несиметричної завади (RMS) розподілена система загороджувачів ЗК-4, трансформаторів типу ОМ, сигнальних кабелів, рейкових кіл та опорних точок може формувати несиметричні завади понад нормоване значення 10 В, за ДСТУ EN 50121-4, і симетричні завади в діапазоні 2–20 В, які взагалі не нормовані цим стандартом. Показано, що в європейських країнах поїзний радіозв'язок на частотах 2,13 і 2,15 МГц не використовують, тому і норми на випробування на стійкість для таких частот не потрібні і не враховують у базових стандартах електромагнітної сумісності сигнальних систем і телекомунікацій. Рівень завад від частот поїзного радіозв'язку є унікальним в Україні і залежить від деградації ємності високочастотних загороджувачів, паразитних ємностей силових трансформаторів і конструкцій, хвильової невідповідності, а також стану заземлювачів і баласту. Виконані дослідження є основою для обґрунтування вузькосмугового національного додатка до ДСТУ EN 50121-4 у частині симетричних і несиметричних радіочастотних завад гектометрового діапазону.

Ключові слова: ДСТУ EN 50121-4, електромагнітна сумісність, електромагнітні завади, електронні пристрої СЦБ, загороджувачі ЗК-4 і СК-6, небезпечні відмови, несиметричні завади, поїзний радіозв'язок, радіочастотні завади, рівні SIL 3, SIL 4, симетричні завади, трансформатори ОМ і КТП, частоти 2,13 і 2,15 МГц.

Abstract. This paper examines the mechanisms by which interference from train radio communication at frequencies of 2.13 and 2.15 MHz penetrates the power supply ports of signalling, centralization, and blocking (SCB) systems with SIL 3/4 safety integrity levels. It is shown that even with a relatively moderate radio signal voltage of 14.2 V (RMS) of asymmetric interference in overhead lines or feeder lines, a distributed system consisting of ZK-4 blocking devices, OM-type transformers, signalling cables, track circuits, and reference points can generate asymmetric interference exceeding the standardized limit of 10 V according to DSTU EN 50121-4, as well as symmetric interference in the range of 2–20 V, which is not regulated by this standard at all.

It is demonstrated that in European countries, train radio communication at frequencies of 2.13 and 2.15 MHz is not used; therefore, immunity testing requirements for these frequencies are not

ISSN (p) 1994-7852

ISSN (online) 2413-3795

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

necessary and are not included in the basic electromagnetic compatibility standards for signalling and telecommunication systems. The interference levels at train radio communication frequencies are unique to Ukraine and depend on factors such as the degradation of the capacitance of high-frequency blocking devices, parasitic capacitances of power transformers and structures, wave impedance mismatch, as well as the condition of grounding systems and ballast.

The conducted research provides a basis for substantiating a narrowband national annex to DSTU EN 50121-4 concerning symmetric and asymmetric radio-frequency interference in the hectometer wave band.

Keywords: *DSTU EN 50121-4, electromagnetic compatibility, electromagnetic interference, SCB electronic devices, ZK-4 and SK-6 blocking devices, dangerous failures, asymmetric interference, train radio communication, radio-frequency interference, SIL 3 and SIL 4 levels, symmetric interference, OM and KTP transformers, frequencies 2.13 MHz and 2.15 MHz.*

Вступ. Нормування електромагнітної сумісності (ЕМС) електронних пристроїв і систем СЦБ є важливою проблемою, тому що на залізницях існує багато джерел завад, вплив яких може призвести до затримок поїздів і навіть аварій і катастроф. Відомо на увесь світ залізнична катастрофа в китайській провінції Венчжоу показала, що нормування стійкості мікропроцесорних систем керування рухом поїздів без урахування реально діючих завад, впровадження необґрунтованих норм ЕМС призвело до зіткнення двох високошвидкісних поїздів, загибелі багатьох людей і величезного матеріального збитку. Тому дослідження реальних параметрів електромагнітних завад і порівняння їх із нормативними значеннями є важливим науковим завданням. Особливо гострою стає ця проблема для обладнання, яке виконує функції безпеки з жорсткими вимогами рівней SIL 3 і SIL 4.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проведені дослідження електромагнітних завад у різних галузях промисловості призвели до появи базових вимог щодо стійкості електронного обладнання до електромагнітних завад, які встановлені в серіях стандартів Міжнародної електротехнічної комісії ІЕС 61000-4-х, стандартах CENELEC (Європейського комітету зі стандартизації в електротехніці) серії EN 61000-4-х. Основними в залізничній галузі для електронного та електричного обладнання є

стандарти серії ДСТУ EN 50121-х (електромагнітна сумісність залізничних застосувань) [1-5].

Вимоги щодо стійкості пристроїв СЦБ і телекомунікацій до різних видів завад в Україні регламентовано нормами національного стандарту ДСТУ EN 50121-4, повністю ідентичного європейському стандарту EN 50121-4, у тому числі і щодо кондуктивних завад радіочастотного діапазону 0,15 – 80 МГц. У них встановлена норма стійкості обладнання на рівні 10 В несиметричної завади [5], але обґрунтування її для специфічних умов роботи ПРЗ на залізничному транспорті відсутнє.

У стандартах щодо надійності пристроїв залізничної автоматики ДСТУ EN 50126, ДСТУ EN 50129 і галузевого нормативного документа «Методика доказу функціональної безпеки мікроелектронних комплексів систем керування та регулювання рухом поїздів» [6-8] є необхідність доведення функціональної безпечності в разі дії різних дестабілізівних чинників, але також немає обґрунтування рівней кондуктивних завад у гектометровому діапазоні ПРЗ для різних умов експлуатації.

У роботі [9] проаналізовано і класифіковано електромагнітні завади, що можуть негативно впливати на функціонування залізничної автоматики. Автори навіть пропонують підходи щодо зниження впливу таких завад. У статті [10] розглянуто питання забезпечення ЕМС від

електротягової мережі, гальванічно пов'язаної з високовольтною лінією ДПР і пристроями залізничної автоматики. Автори аналізують джерела електромагнітних завад і пропонують методи їх зниження, але також без урахування завад від ПРЗ. У роботі [11] ретельно досліджено вплив вологості на паразитні ємності різних елементів, зокрема трансформаторів, але немає дослідження впливу зміни від вологості паразитної ємності силових трансформаторів ОМ і КТП на проникнення завад від ПРЗ до портів живлення 230 В СЦБ.

У всіх публікаціях зазначено суттєвий вплив електромагнітних завад на готовність і безпечність функціонування систем залізничної автоматики, але не надано обґрунтування діапазону можливих рівней завад від ПРЗ і чинників, які на це впливають.

Мета та завдання дослідження. Усі ділянки залізниць мають бути обладнані засобами поїзного радіозв'язку, які працюють у гектометровому діапазоні радіохвиль. Освоєння мереж гектометрового діапазону почалося в середині минулого століття, що пояснює вибір діапазону, технологія радіозасобів якого була основною на той час. Зараз лінійні мережі ПРЗ залишаються основним видом диспетчерського радіозв'язку.

На українських залізницях експлуатують поїзний радіозв'язок (ПРЗ) гектометрового діапазону (2,13 і 2,15 МГц), радіосигнали якого інjektують безпосередньо у високовольтні лінії електроживлення пристроїв СЦБ (ВЛ 6/10 кВ або ДПР 27,5 кВ).

Для захисту від шунтування радіосигналів силовими трансформаторами ОМ і КТП безпосередньо на їхніх високовольтних вводах встановлюють відгалужувальні загороджувачі (типу ЗК-4 чи СК-6), які виконують роль фільтр-пробок для частот ПРЗ для кожного проводу первинного електроживлення пристроїв СЦБ. У випадку їх деградації в процесі експлуатації (зміни ємності чи обриву

конденсатора) і через відсутність якісної системи моніторингу та несвоєчасної заміни несправних елементів це може призвести до прямого потрапляння ВЧ-енергії з магістралі 6/10, 27,5 кВ у порти 220 В пристроїв СЦБ.

Особливістю завад від ПРЗ є:

- відносно невеликі рівні напруг у портах живлення (це одиниці і десятки вольт), які «не помічають» обмежувачі високовольтних імпульсних перенапруг (розрядники, варистори, супресори тощо), які встановлюють на ВЛ чи ДПР для захисту від грозових перенапружень і комутаційних перенапружень в електротяговій мережі;

- тривала дія високочастотних завад, яка через елементи детектування на електронних компонентах пристроїв СЦБ призводить до появи недопустимих для роботи СЦБ рівнів завад, безперервного негативного впливу енергії завад на електронні компоненти, елементи ізоляції чи завадозахисні пристрої.

Нормативні значення кондуктивних завад у діапазоні частот ПРЗ встановлено в європейському стандарті EN 50121-4 на рівні 10 В (0,15-80 МГц) для несиметричної (синфазної) завади. Рівні симетричних завад у цьому діапазоні взагалі не нормовані. Аналогічні норми стійкості з кондуктивних завад діапазону ПРЗ встановлено і в національному стандарті ДСТУ EN 50121-4 для пристроїв залізничної автоматики і телекомунікацій [5], який повністю є ідентичним європейському стандарту.

З урахуванням того, що у країнах Європейського Союзу відсутній такий тип ПРЗ і відповідно немає унікальних радіочастотних електромагнітних завад у вузькому діапазоні частот (2,13 і 2,15 МГц), актуальним є дослідження впливу завад від ПРЗ на пристрої залізничної автоматики, насамперед із відповідальними функціями на рівнях SIL3/4, які безпосередньо впливають на безпеку руху і пропускну спроможність поїздів.

Частоти 2,13 і 2,15 МГц поїзного радіозв'язку (ПРЗ) входять до цього

діапазону, але закладені в цих стандартах норми можуть не відповідати реальним умовам експлуатації українських залізниць із таких причин:

- у європейських країнах поїзний радіозв'язок із частотами 2,13/2,15 МГц не використовують і не планують до впровадження, тому рівень жорсткості до цих частот щодо стійкості може бути слабким;

- використання для передавання вузькосмугових радіосигналів частотою 2,13/2,15 МГц високовольтних ліній ВЛ 6/10 кВ і ДПР 27,5 кВ довжиною в десятки кілометрів, у які безпосередньо інжектують достатньо високі рівні напруги від стаціонарних радіостанцій, практично в порти первинного живлення електронних пристроїв СЦБ;

- обмежувачі перенапруги від грозових розрядів не можуть захистити пристрої СЦБ від завад ПРЗ унаслідок того, що їхні рівні не перевищують десятків вольт, а реальна деградація елементів височастотних загороджувачів у лініях ВЛ/ДПР не завжди має якісні фільтруючі властивості.

Отже, на залізницях України паралельно коліям діє розгалужена мережа джерел завад від ПРЗ, яка діє на десятках і сотнях кілометрів, і може не тільки призводити до деградації елементів ізоляції і захисту від завад, але і захисних і небезпечних станів пристроїв СЦБ (відповідно до затримок поїздів і порушення безпеки руху поїздів). Тому актуальним є дослідження впливу завад від ПРЗ на електронні пристрої і системи СЦБ, особливо тих, які виконують функції

безпеки на рівнях SIL3/4, а також оцінювання норм зі стійкості до кондуктивних завад у діапазоні 0,15 - 80 МГц.

Виклад основного матеріалу дослідження

1. Розрахункова модель

Для організації каналу поїзного радіозв'язку застосовують індуктивний спосіб передавання, за якого височастотна енергія від стаціонарних радіостанцій підведена до напрямних проводів, що йдуть уздовж полотна залізниці. Електромагнітне поле, концентруючись уздовж напрямних проводів, поширюється з меншими втратами [12].

Як напрямні для сигналів поїзного радіозв'язку використовують лінії, поздовжнього електропостачання ДПР, високовольтні лінії електроживлення пристроїв СЦБ ВЛ-6/10 кВ. Використання ВЛ або ДПР для передавання височастотної енергії вигідно тим, що немає необхідності в підвісці спеціального хвилеводного проводу, оскільки траса високовольтних ліній збігається з напрямком передавання енергії високої частоти.

Для підвищення ефективності використання проводів ДПР і ВЛ як напрямні лінії ПРЗ застосовують протифазне збудження двох високовольтних проводів і височастотну обробку всіх відгалужень до силового обладнання. При цьому формується міжпроводна хвиля, яка має менше згасання та забезпечує більшу дальність радіозв'язку.

Двопроводна схема індуктивного збудження високовольтної напрямної лінії наведена на рис. 1.

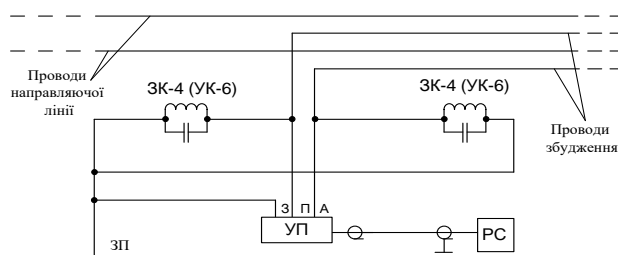


Рис. 1. Двопроводна схема індуктивного збудження

Вхідний опір проводів збудження узгоджений із хвильовим опором коаксіального кабелю, що йде від радіостанції РС, за допомогою антенно-узгоджувальних пристроїв УП. Збуджуючий провід мінімальною довжиною чверть хвилі підвішений уздовж прямої лінії на відстані 0,6 - 1,0 м, що виключає гальванічний зв'язок із високовольтними проводами.

Для забезпечення електробезпеки кожний із проводів збудження має бути з'єднаний із заземлюючим пристроєм через запіральний контур ЗК-4 або УК-6, який розраховано на більший струм.

Питання заземлення розглядають відповідно до конкретних умов організації радіомереж. Заземлення можна виконувати в окремих випадках до середньої точки дросель-трансформатора або на рейкове коле через запіральний контур і включений діодний або тиристорний заземлювач [13].

В усіх схемах для передавання сигналів урахують згасання з підключенням схеми збудження прямої лінії $a_{зб}$. У випадку схеми збудження для ВЛ $a_{зб} = 2$ дБ.

З урахуванням згасання узгоджувального пристрою та фідера можна визначити сумарне згасання станційних пристроїв:

$$\sum a_{ст} = \alpha_{\phi} I_{\phi} + a_{уп} + a_{зб} = 1,5 + 1,5 + 2 = 5 \text{ дБ.}$$

Рівень вихідного сигналу передавача радіостанції $U_{прд}$, дБ, для передавача з потужністю 10 Вт становить $U_{прд} = 148$ дБ відносно 1 мкВ.

Тоді напруга радіосигналу в проводах прямої лінії в зоні збудження складе, дБ,

$$P_u = U_{прд} - \sum a_{ст} = 148 - 5 = 143 \text{ дБмкВ.},$$

або близько 14,2 В.

Узагалі, відповідно до ДСТУ 4184:2003, можливе використання локомотивних радіостанцій із потужностями передавачів

до 25 Вт, а стаціонарних до 60 Вт, що може призвести до збільшення напруги високочастотних завад [14].

До високовольтних ліній підключено силові обладнання, що призводить до збільшення згасання в тракці передавання радіосигналів. Тому для зниження шунтуючої дії відгалужень застосовують високочастотну обробку силового обладнання.

Наявність у високовольтних лініях підключених трансформаторів ускладнює завдання передавання високочастотної енергії. Високовольтне обладнання збільшує згасання та порушує однорідність лінії для струмів високої частоти. Неоднорідності в каналі призводять до появи відбитих хвиль і виникнення інтерференції.

Загороджувач за електричною схемою є паралельним коливальним контуром, який налаштований на частоту каналу ПРЗ (2,13 МГц). Контур має великий опір (до 25 кОм) для струмів резонансної частоти і незначний (до 0,025 Ом) для струмів промислової частоти, що не позначається на умовах електроживлення пристроїв автоматики [12].

На рис. 2, а наведена схема підключення до проводів ДПР із радіосигналами однофазних (КТПО) і трифазних (КТПТ) трансформаторів, а на рис. 2, б – схема для підключення до проводів ВЛ трифазного КТПТ та однофазного трансформатора ОМ.

Згасання, яке внесене силовими трансформаторами з високочастотною обробкою, залежить від довжини відпаю і з увімкненням безпосередньо в напрямку лінію складає 0,1 дБ і може суттєво зростати до 4 дБ залежно від довжини та схеми відпаю [12]. Заземлення силових пристроїв, які живляться за системою ДПР, виконують для середніх виводів дросель-трансформаторів або тягових ниток [13]. У випадку, якщо заземлення на рейку ускладнено, дозволено заземлювати проводи контактної мережі і ДПР на трос

групового заземлення, безпосередньо на металеву опору або видимий заземлюючий спуск залізобетонної (дерев'яної) опори після візуальної перевірки їх приєднання до рейки або дросель-трансформатора і шунтування іскрового проміжку (діодного

заземлювача) перемичкою площею перерізу не менше 50 мм².

Експлуатація напрямних ліній ПРЗ покладена на працівників дистанцій сигналізації та зв'язку і енергопостачання.

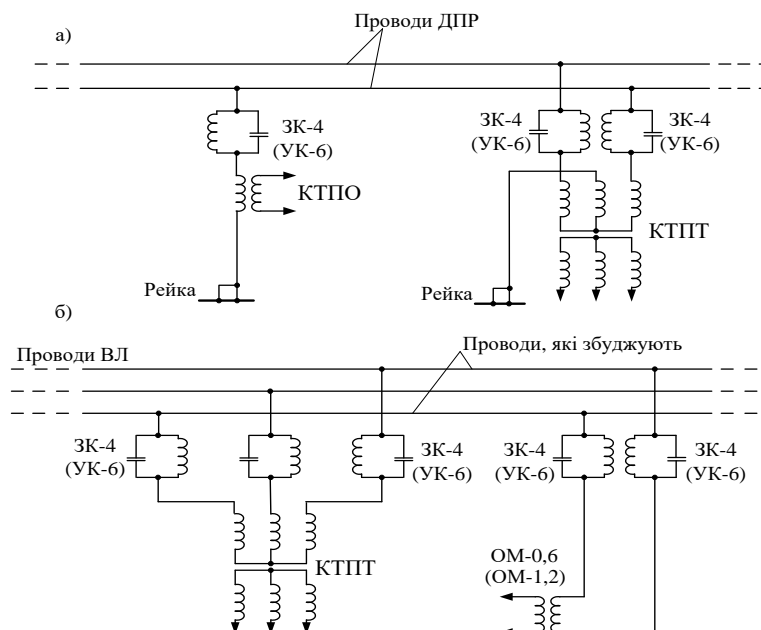


Рис. 2. Схеми підключення силового обладнання

Розглянуті особливості організації каналів ПРЗ гектометрового діапазону з використанням напрямних ліній дають змогу розробити аргументовану модель аналізу процесів впливу дестабілізуючих чинників на якість роботи каналів ПРЗ і стійкість роботи обладнання СЦБ.

У роботі детально розглянуто чинники, які погіршують загороджувальні якості пристроїв ЗК і УК, що може призвести до зростання згасання в тракці передавання високочастотної енергії ПРЗ і можливого пошкодження пристроїв автоматики зі збільшенням високочастотної напруги завод. Ці явища виникають унаслідок погіршення амплітудно-частотних характеристик вибіркової загороджувачів і зниження добротності контурів.

У моделі прийнято, що напруга радіосигналу у ВЛ 6/10 кВ або ДПР 27,5 кВ за потужності стаціонарної радіостанції 10 Вт становить 14,2 В несиметричної (синфазної завади RMS). Для 20 і 40 Вт вона масштабована як корінь квадратний із потужності 20,1 і 28,4 В відповідно. Тому в разі суттєвого зменшення повного опору ВЧ-загороджувача значна частина енергії ПРЗ буде передана в порти первинного живлення СЦБ. У разі однакової деградації ЗК по всіх входах силових трансформаторів буде проникати тільки несиметрична відмова по обох проводах ВЛ/ДПР, а в разі асиметрії імпедансів у цих колах буде ще формуватися симетрична завада, яка в багатьох випадках може ще сильніше впливати на заводостійкість мікроелектронних пристроїв СЦБ. З урахуванням повної відсутності норм щодо

стійкості до такого виду завад це може призвести до збоїв і відмов систем керування рухом поїздів і навіть катастрофічних наслідків.

Довжина хвилі поїзного радіозв'язку (ПРЗ) на частоті 2,13 МГц у лінії становить 140,8 м. Із деградацією ЗК-4 виникає неузгодженість імпедансів ($\Gamma = 0,8$). Якщо трансформатори ОМ підключені на відстані 35 м (чверть хвилі) від анкерної опори або ізолятора, напруга ПРЗ майже подвоюється (25,4 В).

Оскільки крок встановлення трансформаторів ОМ на перегонах (1,5–2,5 км) значно перевищує довжину хвилі, уздовж секції виникає до 20 точок потенційного виникнення пучності напруги ПРЗ.

Трансформатор ОМ із паперово-масляною ізоляцією у зволоженому стані має сумарну паразитну ємність 1500–2500 пФ. На частоті 2,13 МГц реактивний опір ізоляції $X_c = 37$ Ом, що у 20 разів менше за хвильовий опір лінії (700 Ом). Трансформатор стає низькоомним «містком» для завади. Конденсат на трансформаторі створює ще більший вплив на зростання паразитної ємності [11] і проникнення завад у порти живлення пристроїв СЦБ.

Наявність реактивних елементів у високочастотному тракті ВЛ/ДПР – загороджувач – паразитні ємності силових трансформаторів ОМ/КТП – індуктивність троса заземлення створює послідовний резонанс у колі проходження кондуктивних завад. Індуктивність ЗК-4 (до 100 мкГн) і троса заземлення бака трансформаторів ОМ (до 15 мкГн і 200 Ом на частоті 2,13 МГц) разом із паразитною ємністю ОМ

утворюють контур із добротністю $Q = 2,5$. Це піднімає пропорційно ще більше рівень завади в порту 220 В. У разі промерзання ґрунту опір заземлювача бака трансформатора ОМ досягає 500 Ом і разом з імпедансом троса заземлення може досягати 700 Ом, що є повним узгодженням довгої лінії з таким самим хвильовим опором і передаванням максимальної напруги завад у порти СЦБ, які є в реальних умовах АТ «Укрзалізниця» набагато більшими, ніж у нормах стійкості прийнятих європейських і національних стандартів ЕМС [2-5].

Отже, ЗК є важливим елементом і практично останнім кордоном захисту портів пристроїв СЦБ від завад ПРЗ з ВЛ чи ДПР. Тому необхідно дослідити характеристики ЗК і їхніх компонентів, насамперед за можливою зміною їхнього повного опору на частоті 2,13 МГц.

2. Загороджувачі на базі паралельних LC-контурів

Особливістю LC-загороджувачів, наприклад типу ЗК-4 і СК-6, є наявність невеликої індуктивності (відповідно 15,0 і 7,5 мкГн, високої добротності Q (120 і 100), високого опору на частоті 2,13 МГц 24 і 10 кОм [12]. За рахунок високої добротності зміна ємності суттєво впливає на резонансні характеристики контуру і зменшення повного опору для проникнення завад від ПРЗ на входи силових трансформаторів живлення пристроїв СЦБ. Зміни імпедансу від відхилення ємності від номіналу для загороджувачів ЗК-4 і СК-6 на частоті 2,13 МГц наведено на рис. 3, 4.

Розрахунок виконано для паралельних резонансних контурів із параметрами:

- ЗК-4: ($L = 15$ мкГн, $Q = 120$, $C_{ном} = 372$ пФ, $|Z|_{max} = 24,1$ кОм);
- СК-6: ($L = 7,5$ мкГн, $Q = 100$, $C_{ном} = 744$ пФ, $|Z|_{max} = 10,0$ кОм).

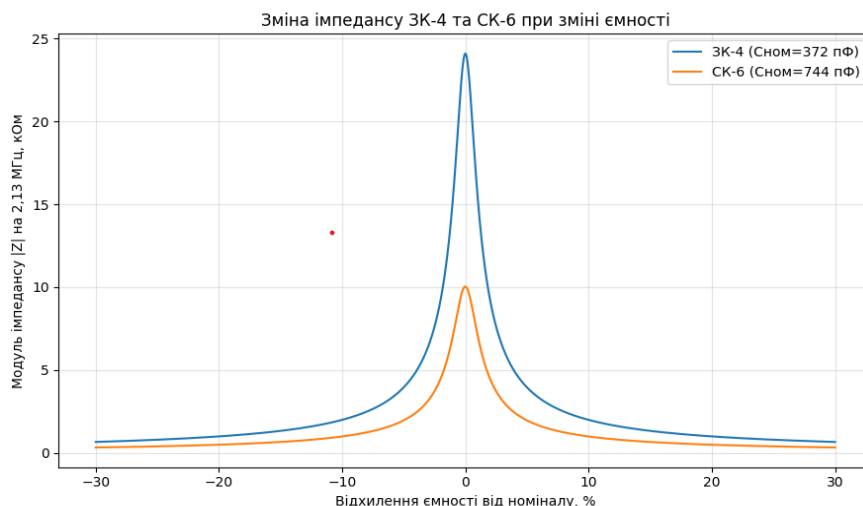


Рис. 3. Графіки зміни імпедансу від процентного відхилення ємності від номінального (ідеального) значення для загороджувачів ЗК-4 і СК-6 на частоті 2,13 МГц

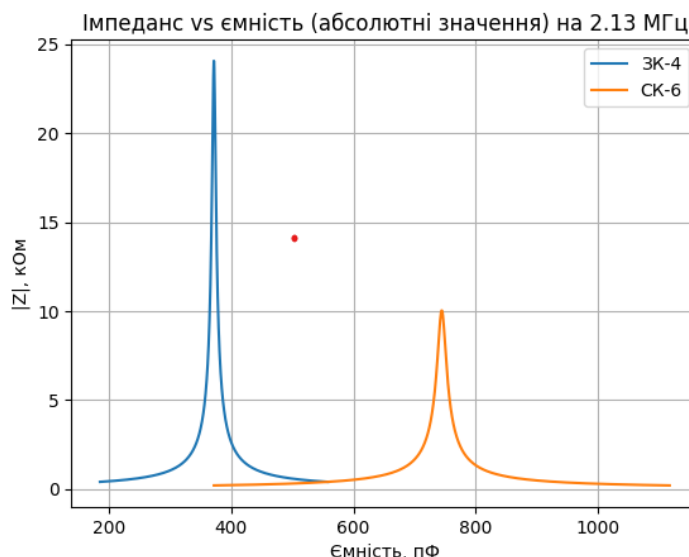


Рис. 4. Графіки зміни імпедансу від відхилення абсолютного значення ємності від номіналу для загороджувачів ЗК-4 і СК-6 на частоті 2,13 МГц

Аналіз цих графіків показує, що максимуму імпедансу досягають за номінальної ємності. Через високу добротність навіть невелике відхилення ємності $S_{ном}$ різко зменшує імпеданс. Загороджувач ЗК-4 більш чутливий до розстроювання, бо має вищий пік імпедансу. Для добротності $Q \approx 100 \dots 120$ загороджувач працює тільки в дуже вузькому діапазоні

ємності ЗК, і будь-яка додаткова ємність (навіть десятки пікофарад) вже критична. Ці паразитні ємності додані за рахунок кабелів (50–150 пФ/м), конструкційних елементів трансформаторів ОМ і КТП (100–1000 пФ); ємностей корпус – земля, рейки – земля, волога/лід. Мерзлота ґрунту ще погіршує ситуацію, за рахунок неї змінюється не тільки опір заземлення, але і діелектрична

проникність, розподіл поля; більше струму йде через ємності, ефективна паразитна ємність ЗК зростає.

На рис. 5 показано графіки зміни імпедансу від додаткового значення ємності для LC-загороджувачів ЗК-4 на частоті 2,13 МГц.

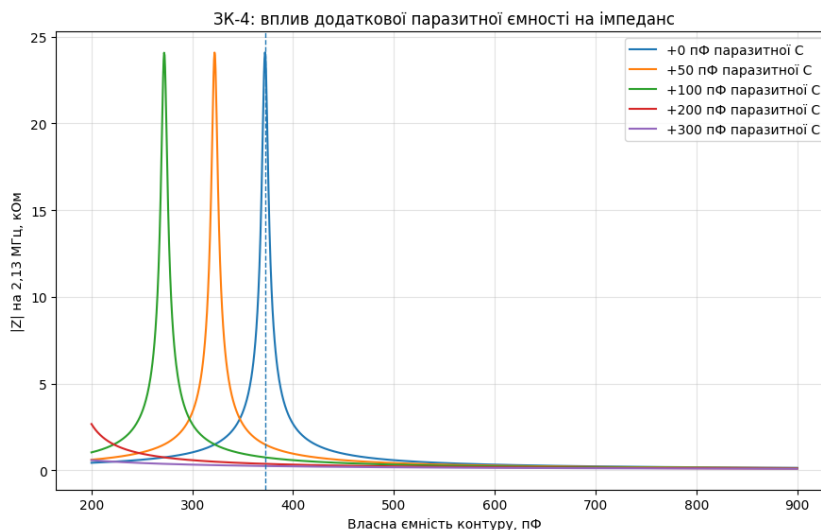


Рис. 5. Графіки зміни імпедансу від додаткового значення ємності для LC-загороджувачів ЗК-4 на частоті 2,13 МГц

Аналіз графіка на рис. 5 показує, що без паразитної ємності пік імпедансу настає за 372 пФ, а його значення дорівнює 24,1 кОм, що є дуже якісним загородженням для частоти ПРЗ. Додаткові +50 / +100 / +200 / +300 пФ зсувають резонанс вліво і відповідно різко зменшують імпеданс до 1,49; 0,75; 0,37; 0,25 кОм. Зміна +300 пФ і більше призводить до практично повного пропускання завади через ЗК. Тобто якщо власний конденсатор не переналаштовувати, опір за 2,13 МГц падає дуже різко. Навіть +50 пФ погіршує загородження з ~24 кОм майже до 1,5 кОм.

На рис. 6 показано графіки зміни імпедансу від додаткового значення ємності для LC-загороджувачів СК-6 на частоті 2,13 МГц.

Для незмінного номіналу 744,4 пФ додаткові ємності +50 / +100 / +200 / +300 пФ також зсувають резонанс вліво і різко зменшують імпеданс відповідно до 1,48; 0,74; 0,37; 0,25 кОм. Тобто для СК-6 ефект такий самий за суттю: резонанс різко

зсувається; опір на 2,13 МГц обвалюється; загороджувач майже перестає фільтрувати завади від ПРЗ.

Слід зазначити, що для ЗК-4 і СК-6 падіння імпедансу за доданої паразитної ємності дуже близьке, бо вирішальним є саме розстроювання від резонансу, а не лише абсолютні значення контуру L і C. На рис. 7 надано порівняльні графіки зміни імпедансу від додаткового значення ємності для LC-загороджувачів типу ЗК-4 і СК-6 на частоті 2,13 МГц.

Із наведених графіків видно, що LC-загороджувач ЗК-4 має вищий номінальний пік, але обидва загороджувачі дуже чутливі до зміни ємності, яка не просто трохи погіршує загородження, а фактично розстроює контур, тому на частоті ПРЗ його опір падає в рази або на порядок.

Додавання паразитної ємності викликає для обох типів додаткове зміщення резонансу в область менших частот, різке зниження імпедансу на частоті 2,13 МГц більш ніж у 10–60 разів.

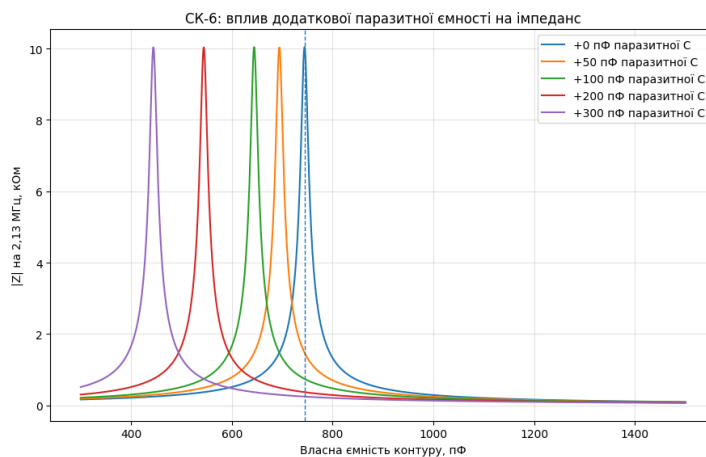


Рис. 6. Графіки зміни імпедансу від додаткового значення ємності для LC-загороджувачів СК-6 на частоті 2,13 МГц

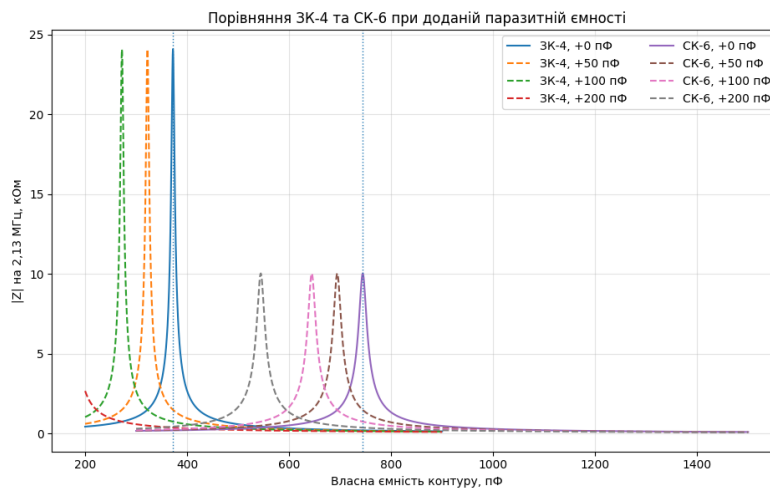


Рис. 7. Порівняльні графіки зміни імпедансу від додаткового значення ємності для LC-загороджувачів типу ЗК-4 і СК-6 на частоті 2,13 МГц

3. Загороджувачі з демпфуючими резисторами

Аналіз більшості ЗК, побудованих на базі паралельного резонансу LC-контур, показує, що за рахунок високої добротності його імпеданс і властивості фільтр-пробки на частоті ПРЗ різко зменшуються за навіть невеликої зміни сумарної ємності $S_{зк}$ і Спар. Для зменшення залежності від зміни параметрів контуру використовують загороджувачі типу ЗК-4 із додатковими демпфуючими резисторами у вигляді паралельного резонансного RLC-контур,

наприклад із параметрами $L = 85$ мкГн, $S_{ном} = 68$ пФ, $R = 510$ Ом, які також вмикають послідовно на всіх відгалуженнях від високовольтних магістралей живлення ВЛ 6/10 кВ чи ДПР 27,5 кВ до всіх входів силових трансформаторів ОМ або КТП.

Для порівняння LC-загороджувачів ЗК-4, СК-6 RLC-загороджувачів ЗК-4 із демпфуючим резистором проведені дослідження їхніх резонансних і фільтруючих властивостей із позиції впливу ПРЗ на порти живлення змінного струму 230 В пристроїв СЦБ.

На рис. 8 і в табл. 1 наведено зміну імпедансу ЗК від значень додаткової ємності, обумовленої зміною внутрішньої

ємності конденсатора загороджувача або зовнішніми чинниками.

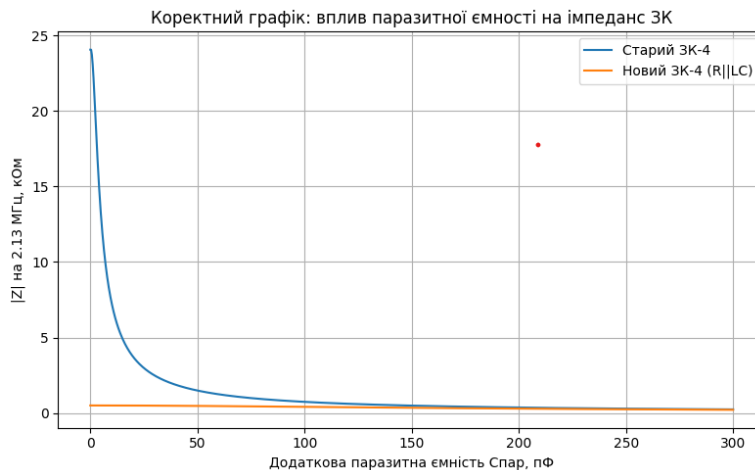


Рис. 8. Графіки зміни імпедансу від додаткового значення ємності для RLC-загороджувачів ЗК-4 на частоті 2,13 МГц

Таблиця 1

Повний опір різних типів ЗК залежно від зміни додаткової ємності до номінального значення ємності контуру

Додаткова ємність до контуру, пФ	Повний опір LC-загороджувачів ЗК-4, кОм	Повний опір RLC-загороджувачів ЗК-4, кОм
0	24,1	0,51
50	1,49	0,50
100	0,75	0,50
200	0,37	0,49
300	0,25	0,48

Аналіз рис. 6 і табл. 1 показує, що LC-загороджувач типу ЗК-4 із номінальною ємністю має високий опір 24 кОм, але вже за дуже малої зміни ємності на 50 пФ він різко зменшується до значення 1,49 кОм. Повний опір RLC-загороджувача ЗК-4 із демпфером на частоті резонансу 2,13 МГц є набагато нижчим і дорівнює 0,51 кОм, зате практично не змінюється, що дуже важливо для стабілізації несиметричних заводів і зменшення симетричних заводів на входах трансформатора Ом для асиметрії

деградації різних ЗК. За доданої ємності більше +200...300 пФ LC-загороджувач ЗК-4 має гірші фільтруючі властивості як для несиметричних, так і симетричних заводів.

На рис. 9 показані графіки зміни імпедансу від відхилення абсолютного значення ємності від номіналу для LC-загороджувачів ЗК-4, СК-6 (умовно старих ЗК) і RLC-загороджувача ЗК-4 (новий демпфований варіант) на частоті 2,13 МГц.

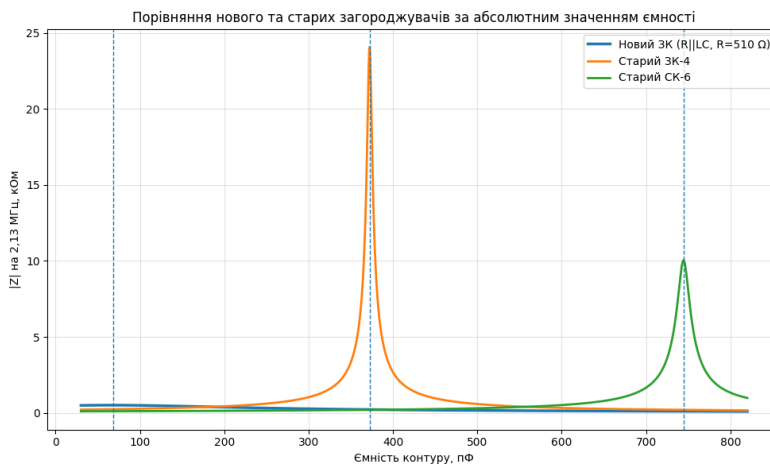


Рис. 9. Графіки зміни імпедансу від відхилення абсолютного значення ємності від номіналу для LC-загороджувачів ЗК-4, СК-6 і RLC-загороджувача ЗК-4 (новий демпфований варіант) на частоті 2,13 МГц

Отже, старий високодобротний ЗК має дуже великий опір лише в зоні точного резонансу, але різко втрачає ефективність навіть за невеликого приросту паразитної ємності; новий демпфований RLC-загороджувач ЗК-4 має менший початковий опір, проте значно вищу і практично незмінну стабільність характеристик.

Перевага демпфованого загороджувача полягає не у збільшенні максимального опору на робочій частоті, а зниженні чутливості цього опору до змін паразитної ємності. За значних відхилень сумарної ємності абсолютні значення імпедансу старих і нових конструкцій стають близькими, однак демпфований варіант забезпечує менший розкид характеристик у змінних умовах експлуатації.

Приблизно після +100...200 пФ перевага LC-загороджувача ЗК-4 практично зникає. Саме це і є причиною, чому в експлуатації новий варіант RLC-загороджувача ЗК-4 часто виявляється надійнішим.

Застосування демпфованих загороджувачів не забезпечує мінімального рівня завод, проте допомагає обмежити їх до стабільного та прогнозованого рівня, що є критично важливим для забезпечення надійної роботи ПРЗ і пристроїв СЦБ.

За рівнем наведеної напруги на вході трансформатора ОМ і портах 230 В апаратури СЦБ найкращі результати забезпечує високодобротний загороджувач за умови точного резонансного налаштування. Однак у разі зміни паразитних параметрів його опір різко зменшується, що призводить до суттєвого зростання напруги кондуктивних завод у портах живлення СЦБ.

Демпфований загороджувач має нижчий, але стабільний опір, тому формує прогнозований, хоча і вищий, рівень наведеної напруги. Такий ЗК-4 навіть краще називати з цієї причини демпфованим селективним елементом, ніж резонансним контуром.

Паралельне з'єднання лише індуктивності та демпфуючого резистора ЗК-4 не забезпечує частотної вибіркової на частоті 2,13 МГц, тому наявність конденсатора є необхідною умовою формування частотної селективності загороджувача, тоді як резистор виконує функцію демпфування та обмежує його добротність і стабілізує характеристики. Використання лише індуктивно-резистивного елемента не дає змогу сформуванню необхідної вибіркової у діапазоні частоти ПРЗ.

4. Залежність імпедансу від зміни ємності

Результати моделювання показують принципово різну поведінку загороджувачів різних типів. На рис. 10 видно, що найбільшу залежність імпедансу від процентної зміни ємності мають ЗК із

більшою добротністю (LC-загороджувачі), а найменшу – RLC-загороджувачі з демпфуючими резисторами.

У табл. 2 наведено кількісні значення імпедансу різних типів ЗК залежно від процентного відхилення ємності від номінального значення.

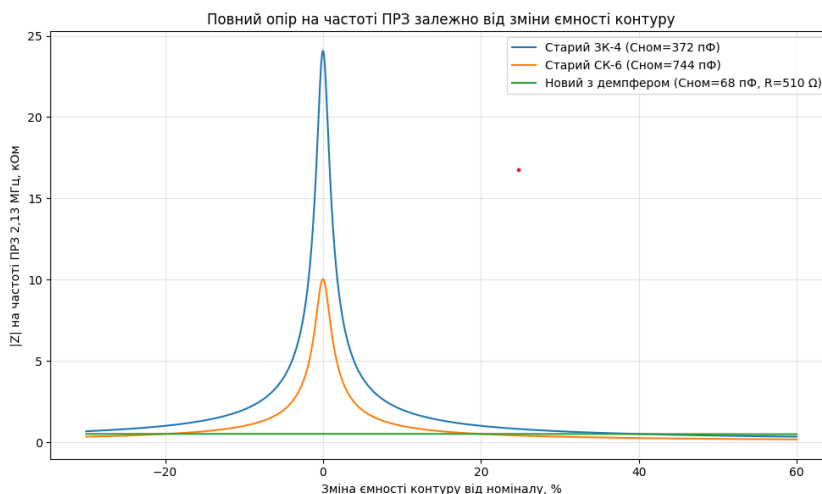


Рис. 10. Графіки зміни імпедансу від процентного відхилення ємності від номінального значення для LC-загороджувачів ЗК-4, СК-6 і RLC-загороджувача ЗК-4 (демпфований варіант) на частоті 2,13 МГц

Таблиця 2

Повний опір ЗК залежно від зміни додаткової ємності до номінального значення ємності контуру

Процентне відхилення ємності від номінального значення	Повний опір LC-загороджувачів, кОм		Повний опір RLC-загороджувачів ЗК-4, кОм
	ЗК-4	СК-6	
0	24,1	10,04	0,510
10	1,999	0,998	0,509
20	1,003	0,501	0,507
40	0,502	0,251	0,500
100	0,201	0,100	0,460

Порівняння залежностей повного опору від відносного відхилення ємності показує, що високодобротні LC-загороджувачі старих типів мають істотну перевагу лише в зоні точного резонансу. Зі збільшенням ємності на 20–40 % їхній опір різко зменшується і наближається до рівня демпфованого загороджувача, а за

подальшого зростання ємності стає суттєво меншим. Найбільше зменшення повного опору виникає для LC-загороджувача типу СК-6.

Особливий інтерес становить область, у якій високодобротні загороджувачі втрачають перевагу за повним опором на частоті ПРЗ (рис. 11).

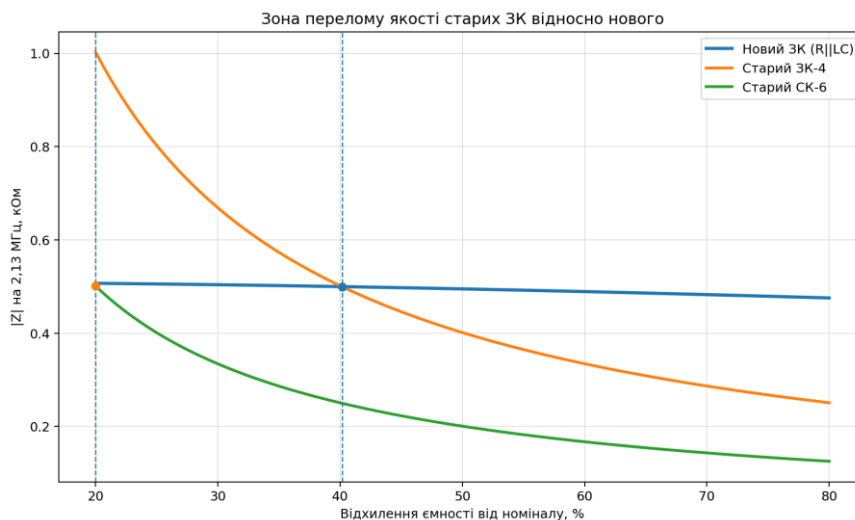


Рис. 11. Зона перелому характеристик загороджувачів зі зміною ємності

Аналіз рис. 11 показує, що для LC-загороджувача типу ЗК-4 точка перелому відносно RLC-загороджувача ЗК-4 приблизно 40,2 % зміни ємності, при цьому $|Z| \approx 0,500$ кОм; для LC-загороджувача типу СК-6 перелом настає раніше – приблизно 20,0 % зміни ємності, який визначає практично однаковий опір $|Z| \approx 0,501$ кОм.

Це свідчить про значно вищу чутливість високодобротних LC-загороджувачів до відхилення ємності від номінального значення, особливо СК-6.

У діапазоні додаткової паразитної ємності приблизно 100–260 пФ високодобротний LC-загороджувач ЗК-4 (умовно старий) ще забезпечує більший повний опір, ніж демпфований загороджувач нового типу. Однак зі збільшенням Спар перевага старого загороджувача поступово зменшується, і в області близько 300 пФ відбувається зрівнювання характеристик. Це свідчить про те, що LC-загороджувач (старий ЗК) є кращим за величиною імпедансу лише в обмеженому діапазоні паразитної ємності, тоді як RLC-загороджувач (умовно новий ЗК) має більш стабільні характеристики.

Незважаючи на більший повний опір високодобротних загороджувачів, їхній резонансний характер призводить до

підвищення високочастотної напруги у вузлі підключення. Це збільшує струми витоку через паразитні ємності і може сприяти зростанню несиметричних (синфазних) завад. Демпфовані загороджувачі, маючи менший опір, не створюють резонансного підсилення напруги, що забезпечує більш стабільний і, в ряді випадків, менший рівень таких завад.

Якщо оцінювати характеристики загороджувачів у відносних координатах, тобто за процентною зміною ємності відносно номінального значення, демпфований загороджувач нового типу виявляє значно меншу чутливість до розладу, ніж високодобротні загороджувачі старих типів. Це свідчить про вищу стабільність його параметрів у разі зміни сумарної ємності контуру.

Високодобротні LC-загороджувачі (ЗК-4, СК-6) забезпечують максимальний опір і найкраще загородження лише за умов точного налаштування та малої паразитної ємності. Демпфовані RLC-загороджувачі (R||LC) мають менший опір, але значно вищу стабільність, меншу чутливість до змін ємності, кращу поведінку відносно несиметричних (синфазних) завад.

Демпфовані загороджувачі нового типу, хоча й мають менший повний опір

порівняно з високодобротними LC-загороджувачами, але забезпечують вищу стабільність параметрів і кращу симетричність імпедансів у фазах. Це зменшує перетворення симетричних завад у несиметричні, які можуть бути більш критичними для портів СЦБ. Отже, перевага

нових RLC-загороджувачів полягає не в максимальному значенні опору, а забезпеченні стабільного та передбачуваного рівня завад у реальних умовах експлуатації.

Порівняння характеристик LC і RLC-загороджувачів наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Порівняння характеристик LC і RLC-загороджувачів

Критерій оцінювання	LC-загороджувачі (старі ЗК-4, СК-6)	RLC-загороджувач (новий ЗК-4, R LC)	Який із них кращий
Максимальний опір (резонанс)	Дуже високий (до десятків кілоомів)	Обмежений (~0.5 кОм)	LC
Загородження ПРЗ (ідеальні умови)	Високе	Середнє	LC
Чутливість до ΔC/Cном	Дуже висока	Низька	RLC
Стабільність зі зміною Cпар	Низька	Висока	RLC
Поведінка за +20...40 % ємності	Різкий спад опору	Плавна зміна	RLC
Робочий діапазон (реальні умови)	Нестабільний	Стабільний	RLC
Синфазні завади	Можливе підсилення	Демпфування	RLC
Передбачуваність	Низька	Висока	RLC
Чутливість до погоди/вологи	Висока	Низька	RLC
Ефективність «у точці»	Максимальна	Обмежена	LC
Ефективність «в експлуатації»	Нестійка	Стабільна	RLC

Висновок

Паразитна ємність призводить до зміщення резонансної частоти за законом, обернено пропорційним кореню квадратному від сумарної ємності, що за високої добротності контуру ($Q \approx 100-120$) викликає багаторазове зниження імпедансу на робочій частоті ПРЗ 2,13 МГц. Тому навіть додаткові десятки пікофарад є критичними для ефективності роботи високодобротних загороджувачів.

Для оцінювання можливих діапазонів ємностей ЗК, які є основними чинниками

погіршення фільтруючих властивостей ЗК і, як наслідок, проникнення завад від ПРЗ безпосередньо в порти живлення пристроїв СЦБ, проаналізуємо чинники, які впливають на їх зміну в процесі експлуатації.

5. Чинники зміни параметрів ВЧ-загороджувачів на частоті поїзного радіозв'язку

Ефективність роботи загороджувальних контурів визначають найчастіше параметрами вбудованих у них

конденсаторів Сзк і паразитною ємністю Спар ВЛ/ДПР і прилеглих конструкцій.

5.1. Аналіз елементної бази вбудованих конденсаторів загороджувальних контурів

Найбільш важливим для працездатності високочастотних загороджувальних контурів будь-якого типу (далі ЗК) є деградація і зміна параметрів їхніх конденсаторів (ємності Сзк і тангенса кута втрат $\text{tg } \delta$).

На українських залізницях використовують такі основні типи конденсаторів у складі ЗК:

- **К15У-1/К15У-2 (високовольтна кераміка)** ~75-80 %. Найбільш поширений тип конденсаторів (вважають «королем» загороджувачів). Має високу реактивну потужність, але через відкритий монтаж і деградацію захисної глазурі з часом демонструє поверхневу гіроскопічність;

- **литі блоки** на базі сучасних поліпропіленових/керамічних компонентів ~10-20 %: нове покоління пристроїв, що забезпечує повну незалежність параметрів від навколишнього середовища. Литі блоки — це «майбутнє», яке на залізниці приживається дуже повільно;

- **КПУ-5** (полістирольні ущільнені) — ~5-8 %: морально застарілі компоненти 1980-х років випуску. Через пористість корпусу і термічну нестабільність полістиролу мають найвищий показник деградації та відмов. У технічних завданнях на нове будівництво або капітальний ремонт залізничних енергооб'єктів КПУ не закладають взагалі. Їх суттєво витіснили К15У і литі блоки. На магістралях із будь-яким ремонтом КПУ міняють на більш стабільні конденсатори К15У;

- **інші типи конденсаторів**. У старих версіях ЗК або із заміною дефіцитних К15У-1/2 використовують більш дешеві керамічні конденсатори класів 2, 3 із великим температурним коефіцієнтом ємності (ТКЄ). На відміну від кераміки типу *NP0/COG* (клас 1), ці конденсатори зі зміною температури від +20 до -30 °С змінюють

свою ємність на 15–30 %, а вплив вологості та конденсату на деградацію ще більший. На жаль, такі неоптимальні рішення в останні роки використовують на залізницях України для відновлення радіоканалу, коли потрібно хоча б на деякий час відновити ПРЗ із машиністом згідно з ПТЕ і гарантувати безпеку руху поїздів.

5.2. Чинники, які впливають на зміну параметрів вбудованих конденсаторів загороджувальних контурів

5.2.1. Кліматичні чинники

Одним з основних чинників впливу на надійність конденсаторів, які використовують у ЗК, є вплив кліматичних чинників в умовах українських залізниць, особливо вологість і конденсат. У роботі [11] ретельно досліджено вплив вологості як на шляхи проникнення завад у порти СЦБ, так і елементи фільтрації і захисту, зокрема на зміну ємності в умовах вологості і конденсату. Наведено найбільш стійкі типи конденсаторів відносно кліматичних чинників і деградації їхніх параметрів. За рахунок того, що конденсатори не є герметичними, навіть у найкращих конденсаторах К15У-1/К15У-2 старіння глазурі призводить до утворення мікротріщин. В умовах високої вологості (осінь/весна) танення і замерзання конденсату всередині кераміки призводить до падіння добротності (Q) у два-чотири рази. Резонансна крива «розмивається», і коефіцієнт загородження падає з нормативних 20–26 дБ до критичних 6–10 дБ.

Унаслідок впливу зовнішніх чинників параметри конденсаторів стають нестабільними з певних причин.

Поверхнева адсорбція (ефект «водяної плівки»). Кераміка цих конденсаторів зазвичай покрита емаллю або глазур'ю. Проте з роками на ній з'являються мікротріщини, унаслідок чого за вологості >90 % на поверхні керамічного диска утворюється мономолекулярний шар води. Оскільки діелектрична проникненість води $\epsilon \approx 80$, а ϵ кераміки К15У (залежно від групи ТКЄ) — від декількох десятків до сотень, ця

плівка створює підвищення в туман або дощ загальної ємності вузла на 3–7 %. Цього достатньо, щоб «гострий» резонанс ПРЗ (2,13 МГц) змістився на 50–100 кГц вниз.

Падіння добротності (Q). Найбільша проблема К15У у вологому середовищі (головний удар) – це не стільки збільшення ємності, скільки різке зростання тангенса кута втрат $\text{tg } \delta$ за рахунок того, що волога і бруд на широких фланцях К15У створюють активні витоки. Добротність контуру падає зі 100–150 до 10–20, резонансна крива «розмивається», опір загородження Z_f падає з 24 кОм до 3–5 кОм. Це суттєво піднімає напругу завад від ПРЗ із мінімальних значень у порті живлення 220 В (навіть і за відсутності інших чинників).

Гігроскопічність деградованої глазури. Якщо конденсатор працює на ВЛ 10 кВ понад 15 років, тоді під дією ультрафіолету

та озону глазура стає пористою. Волога починає проникати глибше в приелектродні зони. Це викликає незворотний дрейф ємності. Такий конденсатор навіть у суху погоду вже не тримає резонансну частоту 2,13 МГц.

Ємність К15У-1 та К15У-2 за вологості та конденсаті зростає на 5–15 %, якщо RH 90–98 %, на 10–25 %, якщо конденсат, і 20–40 % із забрудненням.

Тангенс кута втрат $\text{tg } \delta$ зростає сильніше: у два рази, якщо RH 80 %; у чотири-п'ять разів, якщо RH 98 %, у 10–20 разів, якщо конденсат; більше 1,0 із брудом – тоді контур руйнується.

Фільтр-пробка LC-загороджувачів із К15У-1/2 втрачає резонанс, якщо $\Delta C > 10\%$, втрачає добротність, якщо $\text{tg } \delta > 0,1$, а із забрудненням + конденсатом повністю виходить із ладу.

Таблиця 4

Порівняльна характеристика впливу типів конденсаторів за їх деградації на рівень завад (базовий рівень напруги радіосигналу у ВЛ – 14,2 В без пучностей, резонансних явищ і промерзання ґрунту заземлювачів)

Параметр деградації	КПУ-5 (полістирол)	К15У-1/2 (кераміка)	Литий блок (поліпропілен)
Зміна ємності $C_{зк}$ за вологості 100 %	+25...40 %	+5...12 %	< 0,5 %
Падіння добротності (Q)	Повне зникнення резонансу	Критичне (у п'ять-вісім разів)	Відсутнє
Проникнення завади в порт живлення 230 В	13,5–14,1 В	9,5–11,5 В	< 0,5 В

5.2.2. Особливості розміщення конденсаторів для ВЧ-загороджувачів і їхній вплив на рівні завад електронних пристроїв СЦБ

Для захисту від зовнішніх чинників розміщують конденсатори КПУ-5 або К15У у захисних пластикових або азбестоцементних трубах із гумовими ущільнювачами («сальниками») — це класичне конструктивне рішення для переважно старих серій ВЧ-загороджувачів для ПРЗ.

Щодо гарантування функційної безпечності СЦБ і сучасних норм ЕМС, то така «герметичність» є ілюзорною внаслідок таких чинників:

- *проблема «точки роси» (внутрішній конденсат).* Труба не є вакуумованою. Повітря всередині містить вологу, тому з різким похолоданням уночі стінки труби остигають швидше за повітря всередині. Волога конденсується прямо на поверхні конденсаторів. Навіть якщо труба

ідеально закрити, усередині виникає «ефект бані». Конденсат на виводах, особливо для КПУ-5, викликає дрейф ємності на 10–15 %, що призводить до розстроювання резонансу 2,13 МГц;

- *деградація гумових ущільнювачів.* Гума («сальники») за дії ультрафіолету і перепадів температур на ВЛ 10 кВ розсихається за три-п'ять років, і через тріщини в ущільнювачах усередину труби починає засмоктуватися дощова вода (ефект «дихання» труби зі зміною тиску/температури). За статистикою, у 70 % випадків із розкриттям таких труб через 10 років експлуатації всередині виявляють воду або сліди сильної корозії.

Розподіл типів корпусів у реальній експлуатації:

- у трубах із сальниками (~30–40 % парку). Це здебільшого саморобні або дрібносерійні конструкції («тубуси»), які виготовляли дистанції електропостачання (ЕЧ) або заводи СЦБ. У них усередині стоять пакети конденсаторів КПУ-5 або К15У, з'єднані паралельно. Гумові сальники з часом тріскаються, і труба починає працювати як «насос», затягуючи вологу під час перепадів температур;

- відкрите встановлення на ізоляторах (~40–50 % парку). Найпростіший і найстаріший варіант. Конденсатори К15У-1 (великі «шайби») кріпляться безпосередньо до рами дроселя або на окремих опорних ізоляторах поруч. Захист відсутній або лише легкий козирок від дощу. Цей тип має найгірші показники ЕМС за дощу, оскільки поверхня кераміки миттєво покривається водяною плівкою, розстроюючи резонанс 2,13 МГц;

- металеві або склопластикові коробки (~10 %). Більш «цивілізований» варіант 1990-х років. Конденсатори захищені в коробку, закріплену на траверсі. У таких коробках часто немає дренажу, і вони поступово заповнюються конденсатом, що призводить до повного виходу конденсаторів із ладу;

- монолітні литі блоки (~10–15 % — сучасний стандарт). Це пристрої нового покоління (наприклад БЗВч). Конденсатори та котушка повністю залиті компаундом (епоксидною смолою). Ніяких труб, сальників чи повітря всередині. Це єдиний варіант, коли вологість взагалі не впливає на ємність.

Розташування у трубах із сальниками не є гарантією герметичності. Навпаки, це створює помилкове відчуття захищеності, хоча всередині відбуваються незворотні процеси деградації діелектрика (особливо для КПУ-5).

Для забезпечення рівня SIL 3/4 потрібно відмовлятися від «трубних» і «сальникових» конструкцій на користь монолітної вакуумної заливки. «Трубне» виконання ускладнює візуальну діагностику — зовні фільтр здається справним, а всередині конденсатори вже давно «попливли» за ємністю. Включення конденсатора в трубу додає паразитну ємність «конденсатор–труба».

Якщо труба металева, вона сама стає обкладкою. Якщо пластикова — накопичує статику. Це робить налаштування фільтра на частоту 2,13 МГц нестабільним ще на етапі монтажу.

Керамічні конденсатори К15У-1 і К15У-2 вважають набагато стійкішими за полістирольні (КПУ-5), але у складі відкритих фільтрів-пробок вони мають свою специфічну залежність від вологості, яка змінює резонанс 2,13 МГц. Керамічні конденсатори К15У-1 і К15У-2 мають значно більші габарити, ніж КПУ-5 (особливо К15У-1 у формі великих дисків — «шайб»), тому їх розміщення в трубах має свої особливості, наприклад на ВЛ 10 кВ через великий діаметр (до 10–15 см) К15У-1 важко вставити у стандартну трубу. Для них частіше використовують прямокутні склопластикові коробки (кожухи) або залишають їх відкритими, захищаючи лише зверху невеликим дашком. Відкриті К15У-1 найбільш вразливі до «водяної плівки». Навіть якщо вони в кожусі, відсутність

повної герметизації (залівки) призводить до накопичення вологи на широкій поверхні диска, що моментально розстроює резонанс.

Конденсатори К15У-2 мають витягнуту циліндричну форму. Вони ідеальні для монтажу всередині полімерних або азбестоцементних труб. Їх збирають у «гірлянди» (послідовно-паралельно) і розміщують у трубі-тубусі з гумовими заглушками. Оскільки К15У-2, працюючи на високій частоті (2,13 МГц), можуть відчутно нагріватися, обмежений простір труби створює «термос». Це прискорює старіння кераміки та деградацію гумових ущільнювачів.

Використання труб для конденсаторів К15У — це лише механічний захист. Повітряний прошарок у трубі не рятує від конденсату, за нічних перепадів температур («точка роси») поверхня К15У стає вологою. Це викликає дрейф ємності на 5–8 %, що практично змінює смугу пропускання ПРЗ і нівелює ефект загасання завад ЗК. Труба приховує корозію виводів, візуально фільтр справний, але електрично він уже не виконує функцію загородження, пропускаючи напругу завад набагато більше нормативних допусків стандарту [4] у порт 230 В, навіть у разі відсутності впливу додаткових чинників для прориву завад від ПРЗ та інших джерел кондуктивних завад.

Конструктивне виконання вузлів налаштування на базі К15У-1/2 у захисних трубах не гарантує необхідний рівень стабільності загороджувального опору. На відміну від монолітних литих блоків, трубне виконання зберігає ризик внутрішньої конденсації, що робить параметри ЕМС метеозалежними. Для гарантування вимог SIL необхідно переходити від «захисних оболонок» (труб) до суцільної герметизації компаундом. «Трубне» виконання бажано вважати застарілим, оскільки гумові сальники (ущільнювачі) мають термін служби п'ять-сім років, що набагато менше за термін служби самого трансформатора ОМ.

Отже, хоча кераміка К15У має кращу власну стабільність, ніж полістирольні аналоги, відкрита конструкція монтажу на ВЛ 10 кВ нівелює ці переваги. Поверхнева вогкість і забруднення керамічного корпусу призводять до зниження загасання фільтра на 15–20 дБ, що робить дотримання норм ДСТУ EN 50121-4 неможливим без повної герметизації вузла.

5.2.3. Вплив грозових перенапружень

У високовольтних лініях електроживлення ВЛ 6/10 кВ чи ДПР 27,5 кВ, які мають велику довжину, виникають суттєві рівні грозових перенапружень, які впливають на надійність ЗК. Деякі версії ЗК мають вбудований захист на розрядниках чи варисторах, але й він не завжди захищає від потужної енергії блискавки, а відсутність постійного контролю за працездатністю пристроїв захисту підвищує імовірність повної деградації високовольтних конденсаторів. Кожен удар блискавки поблизу лінії створює перенапруження, яке частково призводить до деградації властивостей конденсаторів ЗК (за рахунок мікропробойів срібла). Це може і не спалювати конденсатор миттєво, але зменшує його робочу ємність крок за кроком.

5.2.4. Вплив контролю за станом ЗК

Ситуація з конденсаторами К15У-1/К15У-2 у ЗК на частоті 2,13 МГц (основна частота ПРЗ на «Укрзалізниці») є також критичною саме через відсутність реального регламентного інструментального контролю, що пов'язано зі складністю робіт на високовольтних лініях електроживлення СЦБ 6, 10, 27,5 кВ і необхідності долучення до роботи фахівців різних служб. Перевіряють частіше за все в теплий період, коли негативний вплив деградації елементів тракту ПРЗ мінімальний, і метою є тільки покращення радіозв'язку. На напругу 2,13 МГц у портах СЦБ ніхто не звертає увагу, хоча більш надійним і найпростішим методом діагностики деградації ЗК є контроль рівня несиметричних і симетричних завад у низьковольтній частині живлення СЦБ (230 В), який

відносно легко реалізувати, у тому числі впровадити дистанційний контроль і своєчасний прогноз старіння і зносу ЗК та інших елементів тракту ПРЗ.

5.2.5. Висновок із реального стану ЗК

Навіть надійні, найбільш поширені конденсатори К15У-1/К15У-2, відпрацювавши 20–30 років без контролю, із великою ймовірністю мають деградацію 15–40 % за ємністю. Це зміщує резонанс фільтрів ПРЗ 2,13 МГц на 10–25 % і значно знижує ефективність загороджування завод ПРЗ у порти СЦБ 230 В. У реальних умовах АТ «Укрзалізниця» (вологість, морози, грози, промислові заводи, сильні електромагнітні поля), особливо у разі використання конденсаторів із незадовільними характеристиками та за відсутності реального обслуговування, ЗК перестають працювати як резонансні фільтри-пробки, радіозв'язок погіршується, у портах живлення 230 В апаратури СЦБ виникають суттєві несиметричні і симетричні завади від ПРЗ. Навіть зміна ємності конденсатора 5 % відчутно

погіршує якість каналу ПРЗ, а 20–30 % — робить фільтр фактично неробочим, а обладнання СЦБ – небезпечним для поїздів. На частоті 2,13 МГц такі ЗК фактично «виходять» із резонансу. Замість вузькосмугового фільтра з високим опором загородження система перетворюється на напівпрозору ланку для проникнення завод у порти відповідальних пристроїв СЦБ.

Висновок: для частоти ПРЗ 2,13 МГц за 20-30 років без надійного контролю ймовірність того, що ЗК виконує свої функції згідно з технічними умовами, становить менше 30 %. Це створює постійний «шумовий фон» у каналі, який критично знижує дальність зв'язку та надійність роботи сучасних мікроелектронних пристроїв СЦБ, що працюють «поверх» аналогових завод радіочастотного діапазону.

Ємність Сзк визначена конструкцією конденсатора і змінюється під впливом температури, старіння діелектрика, прикладеної напруги, вологості, технологічних допусків (табл. 5).

Таблиця 5

Вплив різних чинників на ємність Сзк (вбудованого в ЗК конденсатора типу К15У-1/К15У-2)

Чинник	Механізм впливу	Типова зміна	Коментар
Температура	Зміна діелектричної проникності	±1...5 % (до 10 %)	Залежить від типу діелектрика
Старіння	Деградація матеріалу	+1...3 %	Повільний процес (роки)
Напруга	Нелінійність діелектрика	1...5 %	Важливо для кераміки
Вологість	Поглинання вологи	2...10 %	За негерметичності
Технологічний допуск	Виробничий розкид	±5...10 %	Початковий розкид

Відхилення ємності власного конденсатора загороджувача має суттєвий вплив у старих його конструкціях або з використанням нестабільних конденсаторів,

залежних насамперед від вологості і конденсату, наприклад у конденсаторах з керамікою класів 2, 3 [11].

Для сучасних загороджувачів таке відхилення ємності $C_{зк}$ має обмежений характер і не перевищує зазвичай 10–15 % (має до 20 %), тоді як паразитні ємності $C_{пар}$ можуть змінюватися на сотні пікофарад під впливом експлуатаційних і метеорологічних чинників, що часто визначає основний механізм розладу високодобротних контурів.

5.3. Формування паразитної ємності Спар, яка підвищує загальну ємність LC-контур

Паразитна ємність $C_{пар}$ формується сукупністю електромагнітних зв'язків у системі: провід ВЛ/ДПР – земля; ізолятори та металокопії; трансформатор ОМ (ємності високої напруги ВН – ємності низької напруги НН; ВН-бак, НН-бак); ємності кабелю 230 В; поверхневі провідні шари (волога, забруднення) (табл. 6).

Паразитні ємності в точці встановлення загороджувача на проводах ВЛ/ДПР підключені безпосередньо паралельно до ємності резонансного контуру, оскільки всі вони утворюють ємнісні зв'язки між провідником і землею.

Це призводить до збільшення сумарної ємності та зміщення резонансної частоти загороджувача. Паразитні ємності в місцях підключення загороджувачів на ВЛ/ДПР мають значення того самого порядку, що і номінальна ємність контуру (десятки і сотні пікофарадів), і тому визначають його ефективну ємність і резонансні характеристики.

Налаштування загороджувача в лабораторних умовах не гарантує збереження резонансу в експлуатації, оскільки в реальних умовах до ємності контуру додані паразитні складові, що мають змінний характер і призводять до зміщення резонансної частоти.

Суттєвий вплив на рівень завод у портах 230 В СЦБ після трансформатора ОМ виникає тоді, коли повний опір загороджувача на частоті 2,13 МГц зменшується до рівня одиниць кілоома або нижче. За таких значень він стає порівняним із ємнісними шляхами проникнення через паразитні ємності трансформатора і вторинних кіл, унаслідок чого загороджувальна дія різко послаблена.

Таблиця 6

Чинники, що впливають на зміну паразитної ємності ЗК у процесі експлуатації

Джерело	Механізм	Типове значення	Зміна
Провід–земля (локально)	Геометрія поля	10–50 пФ	Слабка
Ізолятори, арматура	Поверхнева провідність	10–30 пФ (сухо)	До 150 пФ (волога)
Трансформатор ОМ (ВН–бак)	Міжобмоткова ємність	50–200 пФ	Стабільна
Трансформатор ОМ (ВН–НН)	Ємнісний зв'язок	20–100 пФ	Стабільна
Кабелі 230 В	Ємність до землі	50–200 пФ	Залежить від довжини
Вода/забруднення	Плівка з високим ϵ	+50...200 пФ	Різка зміна
Конденсат/лід	Перерозподіл поля	+20...100 пФ	Нестабільно

Вплив паразитних ємностей трансформаторів ОМ на резонанс ЗК найбільший, якщо трансформатор ОМ стоїть близько до точки встановлення ЗК, з'єднання коротке, бак добре заземлений, сама ємність ВН/бак або НН/бак велика, частота висока – 2,13 МГц.

Навіть відносно невелике збільшення ємності контуру (близько 10 %) призводить до зміщення резонансної частоти приблизно на 5 %, що за високої добротності ($Q \approx 100-120$) викликає зниження повного опору LC-загороджувача на робочій частоті більш ніж у 10 разів.

Типовий діапазон змін $S_{par} \approx 50-300$ пФ (до 500 пФ) – це швидка, велика і нестабільна зміна. Паразитна ємність призводить до зміщення резонансної частоти за законом, обернено пропорційним кореню квадратному від сумарної ємності, що за високої добротності контуру викликає багаторазове зниження імпедансу на робочій частоті. При цьому навіть невелика абсолютна зміна ємності (сотні і навіть десятки пікофарадів) викликає значний відносний ефект через високу добротність контуру. На відміну від $S_{зк}$, ця складова змінюється швидше, залежить від середовища, погодних умов і має значний вплив на параметри контуру і резонансні властивості LC-загороджувачів. Це обумовлює високу чутливість високочастотних загороджувачів до умов експлуатації та пояснює доцільність застосування демпфованих конструкцій із зниженою добротністю.

5.4. Зрив резонансу загороджувачів і наслідки для появи симетричних завод у порту 230 В

Унаслідок зміни параметрів ЗК на частоті 2,13 МГц, у тому числі і за рахунок незадовільної діагностики і відсутності безперервного контролю, вони перетворюються на непередбачувані елементи. Оскільки в різних дрютах конденсатори деградують неоднаково, виникає дисбаланс (асиметрія ліній). Несиметрична (синфазна завада) на входах

силових трансформаторів перетворюється на симетричну (диференційну), яку неможливо відфільтрувати стандартними засобами ПРЗ. Цього часто не помічають – енергетики не бачать проблеми, бо ЗК не впливає на передавання потужності 50 Гц. Зв'язківці бачать погіршення зв'язку, але списують це на «погане проходження сигналу» або старіння самих локомотивних радіостанцій. На багатьох ділянках УЗ реальний резонанс ЗК змістився в зону 1,9–2,0 МГц або 2,3–2,4 МГц.

Перетворення несиметричних завод у симетричні є особливо небезпечними для систем залізничної автоматики з рівнями безпеки SIL 3/4 через асиметрію сигнальних кіл, різні паразитні ємності, несиметричне підключення броні кабелю, різні шляхи повернення та неспівпадіння плечей сигнальних обмоток. На рис. 12 наведено графік залежності напруги симетричної завади від коефіцієнта асиметрії за різних значень напруги несиметричної завади в портах 230 В пристроїв СЦБ.

Аналіз рис. 12 показує, що з напругою несиметричної завади $U_{нс} = 15-20$ В і коефіцієнтом асиметрії 0,5 диференціальна складова сягає 7,5-10 В. За жорстких режимів ($U_n \approx 30$ В) і коефіцієнті асиметрії 0,6 симетрична завада може становити до 20 В. З урахуванням того, що такий вид завод взагалі не нормований для проведення випробувань на стійкість до електромагнітних завод, це може негативно впливати на роботу електронних пристроїв СЦБ.

Висновки за результатами дослідження

1. Проведений аналіз показує, що частоти ПРЗ можуть бути причиною виникнення несиметричних і симетричних завод, напруга яких може перевищувати в декілька разів порівняно з прийнятими в стандарті ДСТУ EN 50121-4 норми стійкості до кондуктивних завод (10 В). По суті фахівці служб СЦБ і зв'язку за рахунок використання напрямних ліній у каналах ПРЗ створюють дуже небезпечне джерело завод для засобів залізничної автоматики.

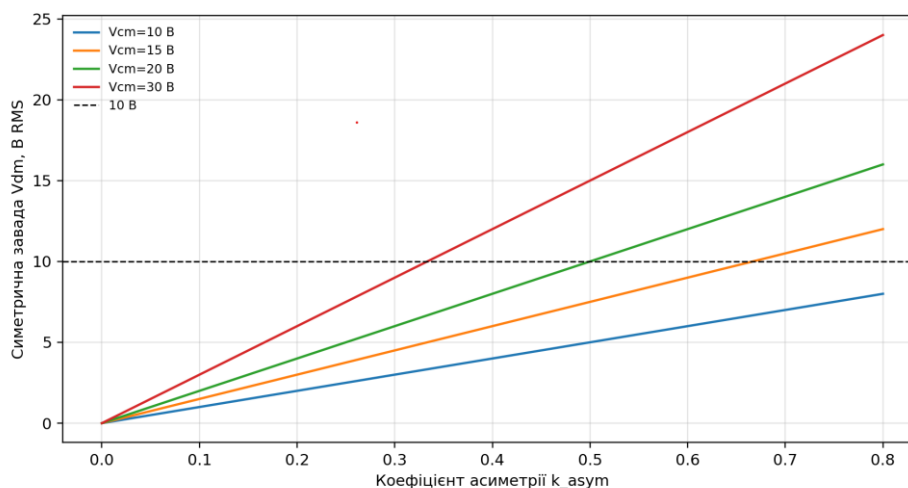


Рис. 12. Графік залежності напруги симетричної завади від коефіцієнта асиметрії

2. Завади від ПРЗ можуть легко проходити в порти живлення пристроїв СЦБ, особливо мікропроцесорних пристроїв, і призводити до захисних і небезпечних станів систем керування рухом поїздів, а також деградації елементів ізоляції і завадозахисних пристроїв.

3. Проведені дослідження показують, що необхідно розробити національний додаток до чинного стандарту ДСТУ EN 50121-4:2018 щодо кондуктивних завад радіочастотного діапазону на частотах ПРЗ для випробувань на стійкість як несиметричних завад (суттєво більше норми 10 В), так і симетричних завад (які взагалі не нормовані).

4. Для встановлення обґрунтованих норм бажаним є проведення експериментальних досліджень із вимірювання максимально можливих завад від ПРЗ у різних портах проникнення завад у пристрої СЦБ з урахуванням:

- потужностей стаціонарних радіостанцій;
- способу введення високочастотних коливань у напрямні проводи;
- реальних діапазонів змін паразитних ємностей силових трансформаторів;
- стану заземлювачів та опору різних ґрунтів (сухий, скальний, мерзлий);
- промерзання баласту рейкових кіл;

- коливання параметрів тракту проникнення завад від ПРЗ до сигнальних портів введення-виведення інформації, портів живлення та заземлення пристроїв СЦБ.

5. Потрібно встановлювати норми не тільки для стійкості пристроїв СЦБ до кондуктивних завад, але і рівнів появи недопустимих завад від ПРЗ у портах живлення 230 В змінного струму.

6. Необхідно розробити галузеві рекомендації зі зменшення рівнів завад від ПРЗ, оновленого регламенту перевірок з урахуванням сезонності, промерзання ґрунту і баласту рейкових кіл, автоматичної діагностики поступової зміни та появи небезпечних рівней напруги завад.

7. Отримані результати підтверджують доцільність подальших цільових досліджень у галузі нормування електромагнітної стійкості електронних засобів СЦБ з урахуванням особливостей експлуатації українських залізниць і розробленням національного додатка до стандарту ДСТУ EN 50121-4:2018 і за іншими видами електромагнітних завад. За результатами таких досліджень будуть обґрунтовані і сформовані вимоги щодо стійкості пристроїв і систем залізничної автоматики, які можуть бути покладені в основу оновлення або розширення чинних нормативних документів і введення в дію у вигляді галузевих нормативних документів.

Список використаних джерел

1. ДСТУ EN 50121-1:2010. *Залізничний транспорт. Електромагнітна сумісність. Ч. 1. Загальні положення* (EN 50121-1:2006, IDT (з першого до восьмого пункту)).
2. ДСТУ EN 50121-3-1:2019. *Залізничний транспорт. Електромагнітна сумісність. Ч. 3-1. Рухомий склад. Тяга цільна та з причепом* (EN 50121-3-1:2017, IDT).
3. ДСТУ EN 50121-3-2:2019. *Залізничний транспорт. Електромагнітна сумісність. Ч. 3-2. Рухомий склад. Апаратура* (EN 50121-3-2:2016, IDT).
4. ДСТУ EN 50121-5:2019. *Залізничний транспорт. Електромагнітна сумісність. Ч. 5. Емісія завод і несприйнятливості стаціонарних установок електроживлення та апаратури* (EN 50121-5:2017, IDT).
5. ДСТУ EN 50121-4:2018 (EN 50121-4:2016, IDT). *Залізничний транспорт. Електромагнітна сумісність. Ч. 4. Емісія та несприйнятливості сигнальної та телекомунікаційної апаратури*.
6. ДСТУ EN 50126-1:2019. *Залізничний транспорт. Специфікація та демонстрація надійності, доступності, безпеки і ремонтпридатності (РАМН). Ч. 1. Основні вимоги та загальний процес*. (EN 50126-1:2017, IDT). Чинний від 2020-01-01.
7. ДСТУ EN 50129:2019. *Залізничний транспорт. Системи зв'язку сигналізації та оброблення даних. Електронні сигналізаційні системи безпеки* (EN 50129:2018, IDT). Чинний від 2020-01-01.
8. *Методика доказу функціональної безпеки мікроелектронних комплексів систем керування та регулювання рухом поїздів*: затв. Наказом «Укрзалізниця» № 452-Ц від 17.08.2001 р. (2002). Київ: Вид. ПП «Алькор», 106 с.
9. Єрмоленко, Л. П. (2019). Електромагнітні завади на залізничному транспорті: теоретичні засади та класифікація. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. № 3. С. 31-36.
10. Гаврилюк, В. І., Завгородній, О. В. (2007). Електромагнітний вплив тягової мережі на рейкові кола. Моделювання тягового струму в рейковій лінії. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. № 4. С. 53-57.
11. Кустов, В. Ф., Прилипко, А. А. (2025). Вплив вологості на деградацію елементів захисту і параметри каналів проникнення завод: загрози для електромагнітної сумісності і функціональної безпеки систем залізничної автоматики. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. № 2. С. 144-158. <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/29380>
12. *Правила організації та розрахунку мереж поїзного радіозв'язку ЦШ-0058*. (2009). Державна адміністрація залізничного транспорту України Укрзалізниця. Київ, 123 с.
13. *Інструкція по заземленню пристроїв електропостачання на електрифікованих залізницях. ЦУ-0029*. (2009). Державна адміністрація залізничного транспорту України Укрзалізниця. Київ, 61 с.
14. ДСТУ 4184:2003. *Радіостанції з кутовою модуляцією суходільної рухомої служби. Класифікація. Загальні технічні вимоги. Методи вимірювання*. Київ, 2003.50 с.

References

1. DSTU EN 50121-1:2010. *Zaliznychnyy transport. Elektromahnitna sumisnist'. CH. 1. Zahal'ni polozhennya* (EN 50121-1:2006, IDT (z pershoho do vos'moho punktu)). [DSTU EN 50121-1:2010. *Railway transport. Electromagnetic compatibility. Part 1. General provisions* (EN 50121-1:2006, IDT (from the first to the eighth point))].

2. DSTU EN 50121-3-1:2019. *Zaliznychnyy transport. Elektromahnitna sumisnist'. CH. 3-1. Rukhomyy sklad. Tyaha tsil'na ta z prychemom* (EN 50121-3-1:2017, IDT). [DSTU EN 50121-3-1:2019. *Railway transport. Electromagnetic compatibility. Part 3-1. Rolling stock. Single and trailer traction* (EN 50121-3-1:2017, IDT)].
3. DSTU EN 50121-3-2:2019. *Zaliznychnyy transport. Elektromahnitna sumisnist'. CH. 3-2. Rukhomyy sklad. Aparatura* (EN 50121-3-2:2016, IDT). [DSTU EN 50121-3-2:2019. *Railway transport. Electromagnetic compatibility. Part 3-2. Rolling stock. Equipment* (EN 50121-3-2:2016, IDT)].
4. DSTU EN 50121-5:2019. *Zaliznychnyy transport. Elektromahnitna sumisnist'. CH. 5. Emisiya zavad i nespriynyatlyvist' statsionarnykh ustanovok elektrozhyvlennya ta aparatury* (EN 50121-5:2017, IDT). [DSTU EN 50121-5:2019. *Railway transport. Electromagnetic compatibility. Part 5. Emission and immunity of fixed power supply installations and equipment* (EN 50121-5:2017, IDT)].
5. DSTU EN 50121-4:2018 (EN 50121-4:2016, IDT). *Zaliznychnyy transport. Elektromahnitna sumisnist'. CH. 4. Emisiya ta nespriynyatlyvist' syhnal'noyi ta telekomunikatsiynoyi aparatury*. [DSTU EN 50121-4:2018 (EN 50121-4:2016, IDT). *Railway transport. Electromagnetic compatibility. Part 4. Emission and immunity of signaling and telecommunications equipment*].
6. DSTU EN 50126-1:2019. *Zaliznychnyy transport. Spetsyfikatsiya ta demonstratsiya nadiynosti, dostupnosti, bezpeky i remontoprydatnosti (RAMN). CH. 1. Osnovni vymohy ta zahal'nyy protses*. (EN 50126-1:2017, IDT). Chynnyy vid 2020-01-01. [DSTU EN 50126-1:2019. *Railway transport. Specification and demonstration of reliability, availability, safety and maintainability (RAMN). Part 1. Basic requirements and general process*. (EN 50126-1:2017, IDT). Effective from 2020-01-01].
7. DSTU EN 50129:2019. *Zaliznychnyy transport. Systemy zv'yazku syhnalizatsiyi ta obroblyennya danykh. Elektronni syhnalizatsiyni systemy bezpeky* (EN 50129:2018, IDT). Chynnyy vid 2020-01-01. [DSTU EN 50129:2019. *Railway transport. Signalling communication and data processing systems. Electronic safety signalling systems* (EN 50129:2018, IDT). Valid from 2020-01-01].
8. *Metodyka dokazu funktsional'noyi bezpeky mikroelektronnykh kompleksiv system keruvannya ta rehulyuvannya rukhom poyizdiv [Methodology for proving the functional safety of microelectronic complexes of train control and regulation systems]*: approved by Order of Ukrzaliznytsia No. 452-C dated August 17, 2001 (2002). Kyiv: Publishing House "Alkor", 106 p.
9. Yermolenko, L. P. (2019). *Elektromahnitni zavady na zaliznychnomu transporti: teoretychni zasady ta klasyfikatsiya [Electromagnetic interference in railway transport: theoretical principles and classification]*. *Information and control systems in railway transport*. No. 3. P. 31-36.
10. Gavrilyuk, V. I., Zavgorodniy, O. V. (2007). *Elektromahnitnyy vlyv tyahovoyi merezhi na reykovi kola. Modelyuvannya tyahovoho strumu v reykoviy liniyi [Electromagnetic influence of the traction network on the rail circuits. Modeling of traction current in the rail line]*. *Information and control systems in railway transport*. No. 4. P. 53-57.
11. Kustov, V. F., Prylipko, A. A. (2025). *Vplyv volohosti na dehradatsiyu elementiv zakhystu i parametry kanaliv pronyknennya zavad: zahrozy dlya elektromahnitnoyi sumisnosti i funktsional'noyi bezpeky system zaliznychnoyi avtomatyky. [The influence of humidity on the degradation of protection elements and the parameters of interference penetration channels: threats to electromagnetic compatibility and functional safety of railway automation systems]*. *Information and control systems in railway transport*. No. 2. Pp. 144-158. <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/29380>

12. *Pravyla orhanizatsiyi ta rozrakhunku merezh poyiznoho radiozv'yazku TSSH-0058* [Rules for the organization and calculation of train radio communication networks TSh-0058]. (2009). State Administration of Railway Transport of Ukraine Ukrzaliznytsia. Kyiv, 123 p.

13. *Instruktsiya po zazemlennyu prystroyiv elektropostachannya na elektryfikovanykh zaliznytsyakh*. [Instructions for grounding power supply devices on electrified railways]. ЦУ-0029. (2009). State Administration of Railway Transport of Ukraine Ukrzaliznytsia. Kyiv, 61 p.

14. DSTU 4184:2003. *Radiostantsiyi z kutovoyu modulyatsiyeyu sukhodil'noyi rukhomoyi sluzhby. Klasyfikatsiya. Zahal'ni tekhnichni vymohy. Metody vymiryuvannya*. [DSTU 4184:2003. Radio stations with angular modulation of the land mobile service. Classification. General technical requirements. Measurement methods]. Kyiv, 2003. 50 p.

Кустов Віктор Федорович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту, 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, Харків, Україна. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8567-7576>. E-mail: elizarenko1@ukr.net.

Kustov Viktor, PhD (Tech), Associate professor, department of automation and computer telecontrol of trains, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-9773-5470>. Tel.: +38(057) 730-10-32. E-mail: kustov.vf@kart.edu.ua.

Yelizarenko Andriy, Associate Professor of «Transport connection» department, Candidate of Techn. Sciences, PhD, 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 18.03.2026 р.

Дата прийняття статті до друку 18.05.2026 р.

Дата публікації (оприлюднення) статті 29.05.2026 р.

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