

УДК 656.2: 621.3: 614.8

DOI: 10.18664/ikszt.v30i2.336437

КУСТОВ В. Ф., доцент,

ПРИЛИПКО А. А., доцент

(Український державний університет залізничного транспорту)



Вплив вологості на деградацію елементів захисту і параметри каналів проникнення завад: загрози для електромагнітної сумісності і функціональної безпеки систем залізничної автоматики

Анотація. У статті досліджено вплив підвищеної вологості на деградацію елементів захисту від електромагнітних завад і зміну електричних параметрів каналів проникнення завад у системах залізничної автоматики. Встановлено, що за умов високої вологості змінюються електричні характеристики частотних фільтрів, часових селекторів, захисних конденсаторів, обмежувачів напруги та оптронів, що призводить до зниження ефективності захисту від імпульсних і високочастотних завад. Показано, що волога суттєво підвищує паразитну ємність елементів гальванічної розв'язки між провідниками, а також між провідниками та корпусом і водночас знижує електричний опір ізоляційних матеріалів. Ці зміни сприяють посиленню перенесення імпульсних і високочастотних завад у критичні електронні вузли. Встановлено, що навіть за наявності справних захисних елементів рівень проникнення завад може перевищувати допустимі межі через вплив навколишнього середовища. Це становить потенційну загрозу для електромагнітної сумісності (ЕМС) і функціональної безпеки (SIL) систем керування рухом поїздів, особливо у випадках одночасного впливу вологи на всі канали резервування, що може спричинити кратні небезпечні відмови та призвести до аварій або навіть катастроф на залізничному транспорті.

Запропоновано рекомендації щодо вдосконалення стандартів випробувань пристроїв залізничної автоматики з урахуванням кліматичних чинників і впливу міжпровідникових ємнісних каналів.

Результати дослідження можуть бути корисними для розробників, аудиторів і органів сертифікації електричних, електронних і програмованих електронних систем керування та контролю, що експлуатуються в умовах підвищених вимог до функціональної безпеки та електромагнітної сумісності.

Ключові слова: вологість, електричні/електронні/програмовані електронні системи керування, електромагнітна сумісність, електромагнітні завади, завадостійкість, небезпечні відмови, рівні SIL, системи залізничної автоматики, функційна безпека.

Вступ

Забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС) і функціональної безпеки (SIL) у системах залізничної автоматики потребує не лише якісних елементів захисту від завад, а і контролю над фізичними параметрами каналів проникнення завад. У той час як чинні випробування проводять за стандартними кліматичними умовами (температура 23 ± 2 °C, відносна вологість (RH) 45–55 %), реальні умови експлуатації – підвищена вологість, коливання температур, утворення конденсату – можуть значно впливати на ефективність як завадозахисту, так і всієї системи.

Елементи захисту від завад часто працюють у зоні підвищеної вологості, що властиво об'єктам залізничної інфраструктури, розташованим на

© КУСТОВ В. Ф., ПРИЛИПКО А. А., 2025

відкритому повітрі або в недостатньо вентильованих приміщеннях. У цих реальних умовах змінюються електричні параметри елементів захисту від завад (частотних і часових селекторів, феритових фільтрів, оптронів, імпульсних обмежувачів напруги), що призводить до суттєвого зменшення ефективності захисту від завад. Водночас змінюється структура проникнення завад: зростає паразитна ємність між електричними колами, між провідниками та заземленими частинами, елементами гальванічної розв'язки (входами-виходами оптронів, обмотками трансформаторів), знижується пробивна напруга ізоляції. Ігнорування цього чинника призводить до того, що сертифікована продукція за чинними стандартами може незадовільно і небезпечно функціонувати в реальних умовах експлуатації та спричиняти порушення безпеки руху і затримки поїздів.

У статті подано аналітичні моделі, теоретичне та практичне обґрунтування впливу вологості на пристрої і системи залізничної автоматики.

На жаль, чинні стандарти випробувань (ДСТУ EN 50121-х, EN 50121-х, IEC 61000-4-х) передбачають ЕМС-випробування в лабораторних умовах без урахування кліматичних чинників, у тому числі вологості. Це створює ризик, що деградація захисних елементів через дію вологи залишиться поза увагою інженерів і сертифікаційних органів. Мета цієї роботи – дослідити механізми деградації елементів завадозахисту в умовах підвищеної вологості та оцінити її наслідки для ЕМС і SIL залізничних систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Базові вимоги щодо стійкості електронного обладнання до електромагнітних завад надано в серіях стандартів Міжнародної електротехнічної комісії IEC 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) і ДСТУ EN 50155 (електронне обладнання на рухомому складі) [1-3]. Вимоги щодо функціональної безпеки наведено у стандартах CENELEC EN 50126, EN 50128, EN 50129. Практично всі ці стандарти гармонізовані і чинні в Україні. У чинному стандарті ДСТУ 4178 із функціональної безпеки і надійності та галузевому нормативному документі «Методика доказу функціональної безпеки мікроелектронних комплексів систем керування та регулювання рухом поїздів» [4] також надані вимоги щодо доведення функціональної безпеки в разі дії електромагнітних завад. Але у всіх цих нормативних документах не нормовані одночасні впливи електромагнітних завад і підвищеної (реальної) вологості на місцях експлуатації пристроїв і систем, хоча окремі однофакторні випробування обладнання на стійкість до зміни вологості є у всіх міжнародних і національних стандартах, що підкреслює реальний вплив цих чинників.

У роботі [5] проаналізовано та класифіковано електромагнітні завади, що можуть негативно впливати на функціонування залізничної автоматики. Автори пропонують підходи для зниження впливу таких завад. У статті [6] розглянуто питання забезпечення ЕМС між тяговим електропостачанням і пристроями залізничної автоматики. Автори аналізують джерела електромагнітних завад і пропонують методи їх зниження, але також без урахування чинників вологості. Робота [7] присвячена впливу завад від тягової мережі на рейкові кола. Хоча основну увагу приділено електромагнітним завадам, зазначено, що кліматичні чинники, такі як вологість,

можуть впливати на надійність вимірювань і функціонування систем. У всіх публікаціях надано інформацію про важливість урахування впливів електромагнітних завад на готовність і безпечність функціонування систем залізничної автоматики.

Мета та завдання дослідження

В умовах підвищеної вологості виконує свої функції велика кількість пристроїв залізничної автоматики (за винятком класів K1, K1.1, згідно з нормативним документом галузі [8]), при цьому всі канали резервування можуть зазнавати одночасного впливу завад і кратних небезпечних відмов, що звести нанівець може виграш від використання багатоканальних структур з основним типом резервування – навантажувальним резервуванням. Тому дослідження впливу вологості на параметри електромагнітної сумісності і функціональної безпеки є необхідним і важливим завданням.

Більшість сучасних стандартів ЕМС (наприклад IEC 61000-4-х, EN 50121-4) створені для уніфікованих тестів і розроблені як мінімальні вимоги щодо захисту від завад. Немає однозначної методики тестувань «завада + вологість», що усталена для сертифікації. Обладнання може пройти окремий тест на вологість, ЕМС-тест за стандартом за температури 25 °C, 45 % RH (вологості), але вийти з ладу в тунелі метрополітена чи залізниці за вологості 95 % RH під дією наносекундних або мікросекундних завад. Можливий наслідок: формальна відповідність — без убезпечення.

Стандарти не враховують багатофакторні впливи можливих змін температури та вологості на рівень стійкості до небезпечного впливу завад, вони обмежені лише тимчасовими окремими впливами, а не станом комплексної дії різних чинників і реальних змін від них елементів завадозахисних пристроїв і параметрів тракту проникнення завад до дуже чутливих мікроелектронних елементів. Важливою відмінністю мікроелектронних елементів від реле першого класу надійності є те, що від завад може бути спотворена будь-яка відповідальна інформація для систем керування рухом поїздів, а внаслідок теплового пробою через дію потужних імпульсних завад можуть виникати небезпечні відмови. Порушення функціональної безпеки внаслідок впливу завад є загрозою для життя людей, довкілля і великим матеріальним збитком.

З метою аналізу діапазону впливу цих чинників необхідно провести теоретичні і практичні дослідження основних елементів захисту від завад із позиції можливої зміни їхньої якості під дією вологості, а також змін чутливості до небезпечних завад і функційної безпечності пристроїв залізничної автоматики в разі комбінованого впливу

«завада+вологість» порівняно з чинними стандартами і нормами [1-4], у яких окремо враховано тільки параметри завад або вологості.

так і недопустимого випромінювання. Тому важливим є аналіз можливих змін основних параметрів способів захисту і завадозахисних елементів у процесі експлуатації під дією вологості.

Виклад основного матеріалу дослідження

1. Дослідження впливу вологості на деградацію елементів захисту і параметри каналів проникнення завад

Для захисту від зовнішніх і внутрішніх електромагнітних завад застосовують такі основні способи та елементи:

- просторове та гальванічне розділення чутливих кіл і компонентів від джерел завад (ліній живлення, силових комутаційних кіл тощо), що сприяє зменшенню електричного зв'язку і, зокрема, паразитної ємності між елементами;

- обмеження напруги, струму і потужності завад;
- екранування і заземлення;
- використання частотної і часової селекції робочих сигналів і завад;
- зменшення пульсацій вторинного живлення постійного струму.

Для цього використовують найчастіше такі елементи і можливості:

- зменшення паразитної ємності між електричними колами, якими розповсюджуються електромагнітні завади, і чутливими до завад колами і елементами, а також між корпусом (екраном) і проводами;

- трансформатори – для гальванічного розділення і збільшення опору для проникнення електромагнітних завад, особливо на високих частотах;

- індуктивні дроселі, феритові елементи (кільця, трубки/циліндри, кліпси, SMD-ферити) – для електричних фільтрів;

- конденсатори – для електричних фільтрів, часових селекторів, зменшення пульсацій вторинного живлення;

- оптрони – для гальванічного розділення і збільшення опору для завад, особливо на високих частотах;

- розрядники, варистори, TVS-діоди (супресори) – для обмеження рівней напруги від потужних імпульсних завад.

Одним із важливих чинників, які можуть впливати на функційну безпечність за одночасних впливів на всі канали резервування та виключити основну перевагу резервованих систем – незалежність відмов у них, є вплив вологості на якість завадозахисних елементів і опір тракту розповсюдження завад як у бік чутливих елементів,

1.1. Зміна паразитної ємності між колами, що є джерелами або шляхами поширення електромагнітних завад, і чутливими до завад колами й елементами системи

До основних чинників впливу зовнішніх завад належать паразитні ємності, якими електромагнітні завади проникають до дуже чутливих мікроелектронних елементів, енергія спрацьовування і теплового пробою яких внаслідок високої швидкодії в мільярди разів менша, ніж у традиційних базових елементів залізничної автоматики – електромагнітних реле першого класу надійності. Важливою відмінністю мікроелектронних елементів від цих реле є те, що від завад може бути спотворена будь-яка відповідальна інформація для систем керування рухом поїздів, а внаслідок дії потужних імпульсних завад і теплового пробою можуть виникати небезпечні відмови не тільки в окремих, а й одночасно в кількох каналах резервування (у слабких за чутливістю до завад ланках).

1.1.1. Паразитна ємність між проводами в джгутах і проводами і корпусом (екраном)

Паразитна ємність між проводами в джгутах утворюється через наявність електричного поля між ними. Вона визначена:

- відстанню між жилами;
- діелектричною сталою матеріалу між ними (ізоляція + повітря + можлива волога);
- геометрією жил та укладання джгута.

Паразитна ємність між проводами сильно залежить від температури, вологості та навіть щільності і структури самого джгута.

За рахунок підвищення температури:

- **знижується** діелектрична стала ізоляції (наприклад ПВХ), відповідно ємність **зменшується на 5–10 %**;

- в'язкість ізоляції зменшується, жили зсуваються ближче – ємність **може трохи зрости** з деформацією;

- опір ізоляції знижується – зростає **витік** струму, але не сама ємність.

За температури 60–90 °C паразитна ємність зазвичай змінюється до ± 10 % у стабільних умовах. Важливо, що механічна зміна форми джгута з нагріванням також може вплинути.

За рахунок підвищення вологості:

- поглинання води ізоляцією (ПВХ, гума) – збільшується ϵ (діелектрична стала);

- поява води між жилами (конденсат) – значне зростання ємності;

- опір ізоляції падає – зростає ризик пробую;

- відносна вологість > 90 %, особливо якщо є конденсація, – паразитна ємність може зрости суттєво.

Паразитна ємність між проводами і корпусом (екраном) зростає зі збільшенням вологості повітря. Це зумовлено такими фізичними чинниками:

1. Вода — це полярний діелектрик, і пара води в повітрі збільшує діелектричну проникність середовища між провідником і екраном:

- у сухому повітрі $\epsilon \approx 1.0006$;

- вологому ϵ може не сильно зростати до 1.01–1.03;

- через **конденсацію вологи** на ізоляції чи екрані ϵ може наближатися до 10–80 (як у воді), тобто збільшуватися в десятки разів.

2. За вологості більше 85 % і температурі, близької до точки роси, може відбутися конденсація на внутрішньому боці екрана або ізоляції. Це різко збільшує паразитну ємність і може викликати непередбачувані відмови або збої.

У стандартах EN 50155 та IEC 60068-2 рекомендовано комбіновані випробування з температурою та вологістю, але без комбінації з електромагнітними завадами.

Зміну паразитної ємності для стандартних проводів залізничної автоматики перерізом **0,75 мм²** (діаметр $\approx 0,98$ мм, ізоляція: 0,5 мм) від вологості наведено в табл. 1.

Зміна паразитної ємності стандартних проводів залізничної автоматики перерізом 0,75 мм²

Умова	Діелектрична проникність ϵ	Ємність між проводом і корпусом, пФ/м	Ємність між двома проводами у джгуті, пФ/м
Сухе повітря 20 °C	~ 1.0006	79	21
Повітря за температури 85 °C	~ 1.005	79,35	21,1
Вологе повітря (100 %)	~ 1.01	79,7	21,2
Вологий шар	~ 5	396	105
Сильний конденсат	~ 80	6328	1675

Отже, паразитна ємність між проводами і корпусом (екраном) пристроїв у реальних умовах може збільшитися у 5-80 разів (до 8000 %).

Залежить від температури і вологості через зміну діелектричних властивостей ізоляційного матеріалу.

1.1.2. Паразитна (міжпровідна або міжжилна) ємність кабелів

Зростання температури призводить до зменшення діелектричної сталої ϵ у більшості полімерних ізоляцій, наприклад полівінілхлориду (ПВХ), поліетилену (ПЕ), які часто використовують для кабелів СЦБ, зростання тангенса кута діелектричних втрат $\tan \delta$, що погіршує ЕМС,

збільшення витоків струму між жилами за високих температур.

Зростання вологості призводить до зростання діелектричної сталої ϵ в ізоляційних матеріалах (через поглинання води), внаслідок чого паразитна ємність зростає. Також підвищується ризик пробою ізоляції або зменшення опору між жилами. Особливо це критично:

- для ПВХ і гумових оболонок кабелю, які схильні до гігроскопії, і паперової ізоляції між жилами кабелю (кабелі з паперовою ізоляцією в нових проєктах не використовують, але є ще на застарілих ділянках або депо ($< 10\%$);
- екранованих і сигнальних кабелів, де ємність критична для передавання сигналу.

Типова паразитна ємність для сигнально-блокувальних кабелів становить 50–100 пФ/м. З підвищенням вологості до 90 % ємність може збільшитися більш ніж на 70 %. У табл. 2 оцінено збільшення паразитної ємності кабелів з підвищенням вологості до 90 %.

Оцінювання збільшення паразитної ємності кабелів СЦБ за вологості 90 %

Тип кабелю	Ємність у сухому стані	Ємність за вологості 90 %	Збільшення
МСЦБ-ПЕ (поліетилен)	~50 пФ/м	~55–60 пФ/м	~10–20 % (незначно, ПЕ мало вбирає воду)
СБПВ (ПВХ)	~70 пФ/м	~100–120 пФ/м	до 70 % зростання
МСЦБ-ППМ (папір)	~100 пФ/м	~180–250 пФ/м	в 1,8–2,5 раза більше
Пошкоджений кабель із конденсатом	-	до 500–1000 пФ/м локально	критичне зростання

Розуміння впливу температури та вологості на паразитну ємність є критично важливим для забезпечення надійної роботи систем залізничної автоматики. Урахування цих чинників для проєктування та експлуатації кабельних систем допоможе мінімізувати ризики та забезпечити стабільну роботу обладнання.

Збільшення паразитної ємності між жилами кабелю внаслідок води до 90 % може досягати до 70 % (паперових до 250 %), а у випадках пошкодження кабелю і конденсату – у 10 – 20 разів.

1.1.3. Паразитна ємність трансформаторів

Паразитна (міжобмоткова, обмотка-корпус, обмотка-магнітопровід тощо) ємність трансформатора має суттєвий вплив на електромагнітну сумісність (ЕМС) електронних систем, особливо в умовах імпульсних і височастотних режимів роботи. Вона створює шляхи для проходження завад між первинною та вторинною обмотками трансформатора, а також, у разі заземлення магнітопроводу, між портом заземлення і вторинною обмоткою, в обхід пристроїв захисту від завад. Це призводить:

- до передавання завад із мережі живлення в низьковольтну частину (наприклад до процесора, АЦП, елементів логіки і пам'яті);
- збільшення рівня радіочастотних завад у сигнальних лініях;
- порушення норм ЕМС, зокрема вимог із випромінювання і стійкості до завад.

Основні чинники, що впливають на паразитну ємність трансформатора:

- відстань між обмотками (менша відстань – більша ємність);
- площа перекриття обмоток (більша площа перекриття – більша ємність);
- тип ізоляції (товщина, матеріал) – тонша ізоляція або вища діелектрична проникність – більша ємність;
- намотування (шарове, секційне) – шарове намотування збільшує площу перекриття – збільшує ємність;
- наявність екранів між обмотками – може зменшити міжобмоткову ємність, але збільшує ємність до екрана;
- матеріал магнітопроводу – малий опір для височастотних завад дає змогу проходити заваді через паразитну ємність із первинної обмотки на магнітопровід і далі через паразитну ємність – на вторинну обмотку трансформатора. Деякі матеріали магнітопроводів трансформаторів чи дроселів мають

виражену залежність від частоти і зменшують суттєво загальний опір проходження завад через трансформатори. Так, повний опір марганцево-цинкового феритового магнітопроводу зі збільшенням частоти пропорційно зменшується, і навпаки, опір нікель-цинкового феритового магнітопроводу практично є незмінним [9]. Вплив температури та вологості на питомий опір MnZn феритів є суттєвим. У крайніх випадках опір може зменшитися в 1000–10 000 разів;

- старіння матеріалів призводить до зміни властивостей ізоляції та зміни ємності;
- температура – зміна діелектричної проникності діелектрика призводить до незначної зміни паразитної ємності ($\sim \pm 1 \dots 5$ % на 50 °C для органічних матеріалів).

Волога також суттєво впливає на характеристики трансформатора як елемента захисту від електромагнітних завад і гальванічного розділення електричних кіл – збільшує діелектричну проникність діелектриків, тому зростає паразитна ємність.

Шляхи проникнення вологи в трансформатор:

- через герметичні порушення або ущільнення;

Наслідки впливу вологості на ефективність трансформатора як елемента захисту від завад

Вплив	Наслідки
Збільшення паразитної ємності	Зменшення опору для проникнення завад, особливо на високих частотах. Виникнення небажаних витоків струму
Зменшення опору ізоляції	Виникнення витоків струму, пробойів, у тому числі від потужних імпульсних завад і розрядів статичної електрики
Зниження електричної міцності масла	Масло перестає ізолювати – міжвиткові пробойи
Випаровування вологи з навантаженням	Утворення газів, мікропухирців – дугові розряди
Корозія та окиснення металів	Прискорене старіння внутрішніх частин
Зменшення терміну служби	Вологість навіть 2 % у паперовій ізоляції скорочує ресурс у чотири-п'ять разів

Паразитні ємності в силових трансформаторах

Тип паразитної ємності	Що зв'язує	Типова величина
Між обмотками (первинна -вторинна)	Високовольтна – низьковольтна обмотка	50...1000 пФ
Обмотка – магнітопровід (земля)	Первинна або вторинна – корпус	500...5000 пФ
Між витками однієї обмотки	Сусідні витки одного шару	1...10 пФ/виток
Між шарами намотки	Обмотка в багатошаровій конфігурації	20...500 пФ

Т
а

Паразитна ємність трансформатора залежить від діелектричних властивостей середовища між провідниками, а ці властивості змінюються під впливом вологості, тобто паразитна ємність суттєво зростає разом із діелектричною проникненістю ϵ_r матеріалів трансформатора внаслідок підвищення вологості.

Типові значення діелектричної проникненості ϵ_r для умов залізниці наведено в табл. 5.

Значення діелектричної проникненості ϵ_r для умов залізниці

Матеріал або умова	ϵ_r
Сухе повітря	1.0
Волога ізоляція (карболіт, текстоліт)	4–8
Конденсат без забруднення	~20
Сильний конденсат (вода з домішками – електроліт)	40–80
Тонка волога плівка з графітовими частинками	60–150
Волога лакова ізоляція з тріщинами	30–50

Паразитні ємності силових трансформаторів збільшуються внаслідок вологості:

- 60–75 % на 10–30 %;
- 90–100 % (без конденсату) на 50–100 %;
- 90–100 % з конденсатом на 200–1000 % (2–10 разів), особливо у відкритих або недостатньо захищених конструкціях, типових для залізничної автоматики.

Зволоження пористої ізоляції дає тривке зростання ємності на 300–600 %. Ще більше впливає волога на паразитну ємність в умовах соляного туману, біля моря, депо з реагентами. Також суттєво впливає волога в поєднанні з сажею та гальмівним пилом (графітом), який утворюється в результаті зносу гальмівних колодок і контактних елементів (ковзунів, щіток) на залізничному транспорті та метрополітені.

Вологість 100 % із конденсатом на ізоляції трансформаторів — це не рідкість на залізницях (табл. 6).

Причини виникнення конденсату на ізоляції трансформаторів

Умова	Спосіб утворення
Атмосферна волога	Дощ, туман, Т сирий сніг → підвищення вологості до 100 % у шафах/ящиках
Перепади температури	Удень $+20^{\circ}\text{C}$, Уночі 0°C → конденсація в металевих шафах, ящиках, ЦСБ
Низька вентиляція	У закритих ящиках за слабкої циркуляції повітря
Протікання води	Через ущільнення, вводи, кабельні отвори — особливо на переїздах
Місця без підігріву	Узимку або восени у вологому повітрі → вода осідає на поверхні обмоток

У відповідальних системах залізничної автоматики для трансформаторів важливо вибрати **термічно стабільні, малогіроскопічні ізолятори**, особливо в середовищах з вологістю $>80\%$.

Ізоляційні матеріали трансформаторів (целюлоза, прескартон, масло) мають високу гіроскопічність. Навіть незначне зволоження суттєво знижує їхню електричну міцність. За даними IEEE Std C57.91 і CIGRÉ WG A2, збільшення вологості твердих ізоляцій з 0,5 до 3 % може знизити електричну міцність більш ніж удвічі. У середовищі трансформаторного масла це призводить до прискореного утворення часткових розрядів за напруги, нижчої за номінальну.

У трансформаторній діагностиці волога — одна з трьох головних причин відмов ізоляції (разом із перенапругами і старінням масла). Часткові розряди, спричинені зволоженням, — часта причина катастрофічних відмов у великих силових трансформаторах.

Отже, під впливом вологості паразитна ємність між елементами трансформатора (наприклад між обмотками та корпусом) може зростати у 2–10 разів у локальних зонах, особливо за наявності сильно зволоженої ізоляції. У типових умовах експлуатаційного зволоження характерне зростання становить 1.5–3 рази.

1.1.4. Паразитна ємність індуктивних дроселів завадозахисних фільтрів

Паразитна (міжвиткова Табо міжелементна) ємність індуктивних дроселів у завадозахисних

фільтрах (ЕМІ-фільтрах) залежить від кількох основних чинників:

- геометрія обмотки (кількість витків: чим більше витків – тим більша сумарна паразитна ємність; відстань між витками: менша відстань – більша ємність; тип намотування: шарова намотка має більшу ємність, ніж рознесена сегментована (із наявністю секцій у кожній обмотці)); двошарова чи багатошарова намотка підвищує ємність між шарами, наявності і форми секцій в обмотках та розташування їх шарів відносно поверхні магнітопроводу і входів-виходів обмоток дроселя;

- габарити і форма сердечника впливають на розміщення обмоток і електричне поле, компактні тороїдальні дроселі мають менші паразитні ємності, ніж інші типи з великою міжобмотковою площею;

- матеріал, проникність і опір сердечника: висока магнітна проникність дає змогу зменшити кількість витків і відповідно паразитну ємність, але безпосередньо на ємність не впливає; при цьому ферити з великим діелектричним проникненням можуть сприяти зростанню паразитної ємності; малий або частотнозалежний опір магнітопроводу суттєво зменшує опір для проходження завад;

- ізоляційні матеріали (матеріали з високою діелектричною проникністю між шарами або між витками збільшують паразитну ємність, покриття проводів (емаль, лак) мають свій внесок у діелектричну поведінку);

- зовнішні чинники: за підвищеної вологості ізоляційні властивості можуть змінюватися, що впливає на паразитну ємність; зміни температури впливають на геометричні розміри та діелектричні властивості матеріалів (наприклад розширення ізоляції – зміна відстані між витками);

- тип дроселя – симетричні (двообмоткові) дроселі мають більшу паразитну ємність між обмотками, які можуть створювати шлях для високочастотних завад; однообмоткові дроселі часто мають меншу паразитну ємність між обмотками.

Найбільше змінюється паразитна ємність дроселів в експлуатації від вологості і температури, особливо це стосується деяких частотно-залежних феритових магнітопроводів. Так, в індуктивних дроселів з магнітопроводами марки MnZn його питомий опір змінюється від вологості в сотні і тисячі разів, а разом навіть десятки тисяч разів [9]. Очевидно, таке зменшення опору може суттєво сприяти проходженню і впливу завад.

1.1.5. Вплив вологості на властивості оптронів як завадозахисних елементів

Одним із найбільш масових сучасних елементів захисту від завад є використання оптронів із малою паразитною ємністю і високою напругою ізоляції.

У вологому середовищі з RH = 100 % або за конденсації реальна витривалість оптронів на імпульсну напругу (1,2/50 μ s) може знизитися до 1000–2000 В, навіть якщо номінальна становить 6000–7000 В.

Паразитна ємність типових оптронів у сухій атмосфері - 25 °C і за вологості 40 % (RH) 0,4 - 1,0 пФ, вологій атмосфері (25–40 °C, 90–95 % RH) – 0,5 - 2,5 пФ. При цьому додається ємність друкованих провідників на платах. Для найпоширенішого матеріалу плат FR-4 вплив температури на його паразитну ємність до 15-20 %, вологості – до 5 %.

Із підвищенням вологості ізоляційний опір між входом і виходом оптрона може **змінюватися на декілька порядків, особливо в умовах наявності пилу, іонного забруднення або відкритого епоксидного корпусу.**

Напруга пробою між входом і виходом оптрона з підвищенням вологості може знижуватися на десятки відсотків, у крайніх випадках — у два-три рази, особливо:

- з конденсацією вологи всередині корпусу або на платі;
- за відсутності герметичного корпусу;
- наявності іонного забруднення (флюс, пил, сіль).

Отже, паразитна ємність оптрона внаслідок дії вологості може збільшуватися у 2-2,5 рази, а напруга пробою може зменшуватися на 25-40 %, за наявності конденсації вологи і забруднення – у два-п'ять разів.

1.1.6. Зміни ємності конденсаторів завадозахисних фільтрів від вологості в процесі експлуатації

Найбільш поширені елементи для захисту від зовнішніх і внутрішніх завад – конденсатори – можуть бути чутливими до вологості в місцях експлуатації пристроїв і систем залізничної автоматики. У табл. 7 надані зміни ємності конденсаторів від окремого чинника – вологості.

Зміна ємності конденсаторів від вологості

Тип конденсатора	Тип діелектрика	Максимальна зміна ємності від вологості (до 100 % RH)	Коментар
Керамічний (Class II/III)	BaTiO ₃ (X7R, Y5V тощо)	$\pm 10 \dots \pm 50$ %	Найчутливіші до вологи, особливо Y5V
Керамічний (Class I)	NP0 / C0G	$< \pm 1$ %	Дуже стабільні
Плівковий (поліестер)	PET	$\pm 2 \dots \pm 5$ %	Мала зміна, хороша стабільність
Плівковий (поліпропілен)	PP	$\pm 1 \dots \pm 2$ %	Один із найстабільніших
Електролітичний (алюмінієвий)	Волога + рідкий електроліт	$\pm 10 \dots \pm 20$ %	Волога впливає на герметичність і висихання
Танталовий (солід)	Танталоксид	$\pm 5 \dots \pm 10$ %	Краще за електролітичні, але чутливі до герметизації
Паперовий	Папір (гігроскопічний)	до ± 50 % і більше	Практично не використовувані через гігроскопічність
Слюдяний	Слюда	$< \pm 1$ %	Висока стабільність, використовують у НВЧ

Найчутливіші до вологи керамічні конденсатори класу II/III з діелектриком X7R, Y5V (особливо Y5V) і паперові. Електролітичні (алюмінієві) конденсатори також мають високу чутливість до вологості.

Найбільш стійкими до зміни ємності є керамічні конденсатори NP0/ C0G і слюдяні, які є дуже стабільними і майже не змінюються від вологості. Поліпропіленові конденсатори (PP) є достатньо стабільними за тривалої експлуатації.

Необхідно також урахувати і можливі зміни ємності конденсаторів від вологості разом зі зміною температури в процесі експлуатації. Так, за даними виробників, конденсатори зменшують свою ємність ще більше за рахунок вологості, температури і напруги:

- керамічні Y5V на 80-90 %;
- керамічні X7R на 60-70 %;
- алюмінієві електролітичні на 40–60 % (через 2000–5000 год експлуатації за рахунок підвищення температури, випаровування електроліту);
- танталові електролітичні на 20–30 % (є більш стабільними, але більш чутливими до перенапруги).

Аналіз цих даних показує, що ємність окремих типів конденсаторів може суттєво змінюватися від вологості в місцях розташування. У табл. 8 і 9 наведено швидкості зміни і відновлення ємності за впливів вологості.

Таблиця 8

Швидкість зміни ємності найпоширеніших типів конденсаторів після початку впливу вологості

Тип конденсатора	Зниження ємності після 12 год	Після 24 год	Коментар
Керамічний X7R (клас 2)	$\approx 30\text{--}35$ %	до 45–50 %	Швидка деградація
Керамічний Y5V (клас 3)	$\approx 40\text{--}50$ %	до 65–70 %	Найгірша стабільність
Керамічний NP0/C0G (клас I)	≈ 0 %	≈ 0 %	Майже не реагує на вологість
Плівковий (PET/PP)	≈ 2 %	$\approx 4\text{--}5$ %	Стабільний
Алюмінієвий електроліт	$\approx 7\text{--}10$ %	$\approx 13\text{--}15$ %	ESR може різко зрости
Танталовий	$\approx 6\text{--}8$ %	$\approx 9\text{--}10$ %	Середня стабільність

Таблиця 9

Швидкість відновлення ємності найпоширеніших типів конденсаторів після впливу вологості

Тип конденсатора	Початкові втрати	Відновлення	Коментар
------------------	------------------	-------------	----------

Керамічний X7R (клас 2)	до -50 %	дві-п'ять діб	Вразливий, потрібне сушіння
Керамічний Y5V (клас 3)	до -70 %	>5 діб, часткове	Найгірша стабільність
Керамічний NP0/C0G (клас I)	≈0 %	миттєве	Ідеальна стабільність
Плівковий (PET, PP)	≈-5 %	дві-три доби	Надійний для вологи
Алюмінієвий електроліт	≈-15 %	часткове	Ризик деградації, еквівалентний серійний опір (ESR) збільшується ↑
Танталовий	≈-10 %	одна-дві доби	Середня стійкість

Аналіз табл. 9 показує, що відновлення ємності відбувається поступово, тобто це дає змогу проводити випробування на ЕМС одразу після моделювання впливу вологості, що спрощує проведення комбінаційного випробування.

Необхідно враховувати і зміну ємності протягом експлуатації за рахунок старіння і зносу від комплексних факторів (табл. 10).

Оцінювання зміни ємності типових конденсаторів під час експлуатації

Тип конденсатора	Основний діелектрик	Типові зміни ємності за 5–10 років	Причини деградації	Стабільність
NP0/C0G (кераміка)	кераміка класу I	±1 %	Практично незмінна	● Висока
X7R, Y5V (кераміка)	кераміка класу II/III	-15 -70 %	Волога, температура, постійна напруга	● Низька
Плівкові (МКС, МБГ)	поліестер, поліпропілен	±2–5 %	Термічне старіння, волога	● Висока
Електролітичні (Al)	оксид алюмінію	-20–50 %	Висихання електроліту, температура	● Середня
Танталові	оксид танталу	-10–30 %	Напруга, старіння, діелектрика	● Середня
Суперконденсатори (від 1 Ф до >5000 Ф)	вуглецева структура	-10–50 %	Цикли заряджання-розряджання, деградація	● Низька
Паперові (старі типи)	просочений папір	-20–70 %	Гідроліз, волога, пробій	● Дуже низька

2. Теоретичний аналіз впливу зміни ємності заводозахисних елементів і каналів проникнення завод у чутливі електронні вузли

Аналіз роботи елементів заводозахисних елементів показує, що ємність під впливом вологості може змінитися дуже суттєво порівняно з даними виробника і призвести до відмови: короткого замикання, втрати контакту (обривання електричного кола), зменшення ємності, збільшення ємності (особливо в електролітичних і деяких керамічних типах), пробою, збільшення внутрішнього опору, вибуху/роздування.

Проаналізуємо теоретичні можливі зміни різних ємностей на електромагнітну стійкість, функційну та електромагнітну безпечність, а також випромінювання завод.

2.1. Вплив зміни ємності конденсатора в джерелах живлення з позиції впливу на електромагнітну сумісність

Конденсатори відіграють головну роль у джерелах живлення, забезпечуючи фільтрацію пульсацій і завод, стабілізацію напруги та накопичення енергії [10, 11]. Зміна ємності конденсатора (наприклад через вплив зовнішніх і внутрішніх чинників, старіння, дефекти чи відхилення від номінального значення) може суттєво вплинути на вихідні характеристики джерела живлення, зокрема сигнали постійного (DC) і змінного (AC) струму [10–13].

У цій статті також розглянемо, як зміна ємності впливає на роботу джерела живлення, проаналізуємо зміни сигналів на виході та підкріпимо аналіз математичними виразами, включаючи ряди Фур'є [14, 15].

2.2. Вплив ємності на імпеданс конденсатора

Імпеданс конденсатора Z_C для змінного струму залежить від частоти (f) і ємності (C) [10]. Зменшення ємності призводить до зростання імпедансу, що погіршує здатність конденсатора пропускати змінний струм (AC) і посилює пульсації [12].

Збільшення ємності призводить до зменшення імпедансу, що покращує фільтрацію низькочастотних пульсацій, але може викликати перехідні процеси чи резонансні явища [13].

2.3. Вплив на сигнал постійного струму (DC)

У джерелі живлення постійного струму конденсатор зазвичай з'єднаний паралельно навантаженню після випрямляча, щоб згладжувати пульсації [10]. Розглянемо типовий мостовий випрямляч із конденсатором фільтра.

2.3.1. Пульсації вихідної напруги

Вихідна напруга після випрямляча має пульсації, які залежать від ємності C , частоти мережі f , наприклад 50 Гц, струму навантаження I_L та періоду пульсацій $T = 1/f$.

Амплітуду пульсацій ΔV наближено визначають за відомим рівнянням [13]

$$\Delta U \approx \frac{I_L T}{C} = \frac{I_L}{fC} \quad (1)$$

Якщо зменшується ємність (наприклад через старіння), то пульсації зростають, що призводить до погіршення якості вихідної напруги [12]. У разі збільшення ємності стабільність напруги покращується [11].

2.3.2. Подання пульсацій рядом Фур'є

Пульсації напруги після випрямляча можна апроксимувати періодичною функцією (наприклад пилоподібною хвилею для однопівперіодного випрямляча). Для пилоподібного сигналу з періодом T та амплітудою ΔV ряд Фур'є має вигляд [15]

$$v(t) = \frac{\Delta V}{2} - \frac{\Delta V}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2\pi n f t)}{n} \quad (2)$$

де $f = 1/T$ – частота пульсацій (наприклад 100 Гц для мостового випрямляча за умови 50 Гц мережі).

Конденсатор діє як низькочастотний фільтр, послаблюючи високочастотні гармоніки. Послаблення гармонік залежить від імпедансу конденсатора для кожної гармоніки [14]:

$$|Z_c(n)| = \frac{1}{2\pi n f C} \quad (3)$$

Зменшення ємності: зростання $|Z_C(n)|$ послаблює фільтрацію, що призводить до збільшення амплітуд вищих гармонік у спектрі пульсацій [15].

Збільшення ємності: зменшення $|Z_C(n)|$ покращує фільтрацію, знижуючи амплітуди гармонік [14].

2.3.3. Вплив на спектр сигналу

Зміна ємності впливає на гармонійний склад вхідного струму. Без належної ємності вхідний струм стає більш нелінійним, що збільшує гармонійні спотворення [14]. Спектр струму можна подати як ряд Фур'є [15]:

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(2\pi n f t + \varphi_n) \quad (4)$$

Зі зменшенням ємності амплітуди вищих гармонік I_n зростають через погіршення фільтрації [14].

Зі збільшенням ємності низькочастотні гармоніки можуть бути надмірно послаблені, але виникає ризик резонансу на певних частотах, якщо ємність утворює LC-контур із індуктивністю трансформатора [16].

Частота резонансу LC-контур

$$f_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (5)$$

де L — індуктивність обмотки трансформатора.

Зміна ємності зсуває частоту резонансу $f_{\text{рез}}$, що може викликати небажані коливання [16].

Амплітуда n -ї гармоніки пульсацій після фільтрації конденсатором пропорційна [15]:

$$U_n \propto \frac{\Delta V}{n} \cdot \frac{1}{1+(2\pi n f R_L C)^2} \quad (6)$$

Зі зменшенням ємності значення $2\pi n/R_L C$ зменшується, що збільшує внесок вищих гармонік, погіршуючи якість сигналу [14].

2.3.4. Вплив пульсацій на функційну безпечність.

У стандартах IEC 61508, EN 50126/50129 є вимоги щодо перевірки впливу завад, у тому числі за пульсацій у мережах живлення. Але немає вимог щодо контролю в процесі експлуатації. Тому треба дослідити, наскільки впливають на рівні пульсацій різні чинники, у тому числі ті, які одночасно впливають на формування залежних (кратних) небезпечних відмов у каналах резервування відповідальних систем керування рухом поїздів.

Збільшення пульсацій у мережі живлення постійного струму може призвести до небезпечної роботи пристроїв сполучення мікропроцесорних засобів із виконавчими пристроями, наприклад контролерів виведення дискретних сигналів із реле першого класу надійності, які виконують функції безпеки на залізничному транспорті. Унаслідок пульсацій у таких схемах, побудованих за динамічними принципами, можуть вмикатися несанкціоновано двигуни стрілок, автошлабаумів, дозволяючи сигнали на світлофорах тощо.

Класичним елементом, широко застосовуваним у залізничній автоматичній, є перетворювач полярності, який забезпечує захисний стан за всіх одиничних і кратних відмов і з точки зору функційної безпеки є надійним. Проте з появою пульсацій на вході або порушенням фільтрації такий пристрій може переходити в небезпечний стан, що не контролюється стандартними методами діагностики.

Практичний приклад. Під час випробувань перших дослідних зразків електронної системи підрахунку осей рухомого складу на металургійному комбінаті «Запоріжсталь» було використано перетворювач полярності з живленням постійним струмом ± 24 В. У процесі експерименту зменшення ємності конденсатора, що забезпечував згладжування пульсацій, призвело до ситуації, коли колійне реле рейкового кола хибно сприйняло імпульсну напругу як номінальний сигнал для спрацювання. Унаслідок цього система передчасно сформувала сигнал вільності колійної дільниці за фактичної наявності на ній рухомого складу. У разі позитивного завершення сертифікаційних випробувань і допуску такої системи до експлуатації подібна відмова могла б спричинити небезпечну помилку функціонування, що прямо суперечить вимогам до SIL4 відповідно до EN 50129, і в екстремальному випадку стати причиною залізничної аварії або катастрофи.

Отже, підвищення рівня пульсацій напруги живлення може призвести до появи високочастотних електромагнітних завад, які впливають на навантаження шляхом утворення кондуктивних

(провідникових) завад. Такі завади здатні спричинити некоректну роботу або відмови мікроелектронних пристроїв, особливо в системах із високим ступенем інтеграції. Подібне зниження електромагнітної стійкості призводить до суттєвого зменшення рівня функційної безпеки (SIL) за реальної експлуатації. Особливу небезпеку становлять ситуації, коли пульсації з'являються одночасно в кількох каналах резервування, спричиняючи однаковий вплив на ідентичні елементи всіх каналів. Це створює умови для кратних (множинних) відмов, тобто відмов, які перетинають бар'єри резервування і виходять за межі передбачених сценаріїв безпечної деградації. Такі збої та відмови прямо суперечать принципам незалежності резервних каналів згідно з EN 50129 та IEC 61508.

2.3.5. Вплив пульсацій на допустиме випромінювання та електромагнітну безпечність

Пульсації вихідної напруги постійного струму безпосередньо впливають і на рівень випромінювання електромагнітних завад.

Реальна вихідна напруга блока живлення завжди має пульсації – залишкові хвилі, спричинені перетворенням енергії (наприклад після випрямляча або в імпульсному перетворювачі). Пульсації – це високочастотні електромагнітні завади, які можуть бути випромінені у простір через провідники, корпус або кабелі.

Допускаючи в експлуатацію системи, проводять відповідні випробування на допустиме випромінювання (емісію), у тому числі й сертифікаційні на виконання допустимих вимог стандартів, наприклад ДСТУ EN 50121-4 для залізничної автоматики, EN/IEC 61000-6-4 для промислового середовища, EN 55011/EN 55032 (CISPR), у яких чітко обмежені рівні випромінювання, включаючи ті, що можуть бути спричинені пульсаціями. Але в процесі експлуатації ці пульсації можуть бути збільшені за рахунок зменшення ємності конденсаторів у джерелах живлення, а також збільшення загальної паразитної ємності внаслідок впливу вологості та негативно впливати на довкілля та електромагнітну безпечність оперативного навченого персоналу.

3. Загрози для ЕМС і функційної безпеки

1. Значна частина пристроїв залізничної автоматики функціонують в умовах підвищеної вологості протягом тривалого часу, тому одночасний вплив завад і вологості – це звичайне явище, яке може призводити до недопустимих змін деградації завадозахисних елементів і більш легкого проникнення завад до чутливих електронних елементів.

2. Проведені дослідження показали, що вплив вологості є суттєвим чинником для зменшення стійкості до небезпечних впливів імпульсних завад і радіочастотного електромагнітного поля, що може призвести до небезпечних відмов і погіршення функційної безпечності. Волога на платах або роз'ємах створює додаткові струмопровідні шляхи для завад. Вологе середовище змінює електричні характеристики друкованих плат, кабелів, трансформаторів. Реальна вологість може в кілька разів змінити завдостійкість пристроїв і систем.

3. Одночасний вплив внутрішніх завад і вологості також може призвести до збільшення електромагнітного випромінювання від електронних пристроїв і систем, який також може впливати на довкілля, електромагнітну безпеку оперативного навченого персоналу, негативно впливати на інші пристрої автоматики і зв'язку.

4. Волога змінює паразитну ємність і провідність ізоляцій, знижує ефективність ЕМС-фільтрів, може створити струмопровідні шляхи, яких нема в сухому середовищі. Без комбінованих тестів (ЕМС+вологість) можна не виявити приховані відмови, що виникають лише за грозових або комутаційних імпульсних перенапружень і конденсату одночасно.

5. Вплив вологості на конденсатори фільтрів може принципово змінити рівень стійкості пристроїв залізничної автоматики до небезпечного впливу завад. Це не частковий вплив цього чинника – це можуть бути сотні відсотків похибки результатів випробувань на ЕМС-тест для підтвердження функційної безпечності. Так, зменшення ємності на 50 % може зменшити загасання фільтрів у два-п'ять разів, а зміна на 90 % призводить до втрати загасання на цільовій частоті майже повністю. Зменшення ємності на 50 % зменшує ефективність часової селекції сигналів і завад в 1,8 - 2 рази, зміна на 90 % – 5-10 разів. Найпростіший RC-фільтр при цьому втрачає до 90 % ефективності часової селекції.

6. Сертифікуючи продукцію, для відповідальних пристроїв і систем, що безпосередньо впливають на безпеку руху поїздів, потрібно пройти всі необхідні стандартизовані тести на функційну безпечність, але реальні умови експлуатації можуть критично знизити рівень стійкості до електромагнітних завад в умовах реальної вологості і призводити до небезпечних станів.

7. Проведення комбінованих тестів (ЕМС+вологість) ускладнює випробування і сертифікацію, хоча в деяких випадках відновлення електричних параметрів елементів після впливу вологи відбувається повільно, що дає можливість проводити стандартні тести одразу після проведення

кліматичних випробувань (температура, вологість) без додаткових ускладнень.

8. Прорахунки функційної безпечності, особливо їхні наслідки, у разі ігнорування комплексної дії завад у реальних умовах експлуатації можуть бути фатальними.

Висновки за результатами дослідження

1. З урахуванням загроз для ЕМС і функційної безпеки необхідно враховувати можливі наслідки впливу вологості на параметри завадозахисних пристроїв і каналів проникнення завад.

2. Для відповідальних систем із високим рівнем SIL потрібно ретельно вибирати елементи і пристрої захисту від завад із мінімальними змінами в умовах вологості та температури.

3. Фахівцям із сертифікації і аудиторам надавати окремий звіт щодо врахування чинника вологості для постійної експлуатації і мінімізації деградації елементів захисту від вологості.

4. Пропоновано з випробуваннями на ЕМС і функційну безпеку моделювати прогнозовані зміни каналів паразитного зв'язку в умовах підвищеної вологості, у тому числі за портами живлення, введення і виведення інформації.

5. Формальним показником якості ЕМС систем може бути значення паразитної ємності між внутрішньою структурою системи з усіма зовнішніми портами проникнення завад, у тому числі в режимах моделювання на стендах реальної вологості (за допомогою спеціальних вимірювачів ємності).

6. Для систем із високими вимогами щодо функційної безпеки (рівней SIL) необхідно проводити випробування на стійкість до завад разом зі зміною вологості та ємності конденсаторів фільтрів, тому що вологість змінює ємність конденсаторів достатньо швидко.

7. Впроваджувати моніторинг деградації конденсаторів, оптронів, розрядників, варисторів та інших відповідальних елементів захисту від завад (вимірювання ємності, напруги пробую, імпульсної ізоляції) за необхідності резервування і автоматичного підключення резервних пристроїв захисту.

8. З метою виключення одночасного впливу імпульсів завад на апаратні та програмні елементи системи в різних каналах резервування більш жорсткими мають бути вимоги щодо його використання, потрібно використовувати різне апаратне та програмне забезпечення з незалежними пристроями захисту від завад в окремих каналах резервування.

9. Міжнародні, європейські і національні стандарти потребують перевірки на стійкість пристроїв і систем залізничної автоматики до зміни

температури і вологості, підкреслюють важливість цих факторів для забезпечення надійності і функційної безпечності, але в разі нормування електромагнітної сумісності та функційної безпечності не регламентують вимоги до багатофакторних випробувань на функційну безпечність, зокрема на одночасний вплив дуже важливих чинників «завада+вологість». Тому потрібно розробити зміни щодо впровадження в цих стандартах і галузевих методиках комбінованих випробувань на ЕМС і функціональну безпеку.

10. Підтвердженням необхідності врахування вологості в поєднанні з електромагнітними завадами деякою мірою дають у світі тільки стандарти MIL-STD-461G, MIL-STD-810H (військова ЕМС і середовище) – метод 507.6 (вологість), у поєднанні з методом 510 (ЕМІ). Але ці вимоги не є обов'язковими, вони мають бути виконані тільки за потребою замовника. Частково врахована комбінація «вологість +ЕМС» у стандарті ISO 16750-4:2023 на електронне обладнання автомобілів (випробування на ЕМС проводять після витримання обладнання в умовах підвищеної вологості). Досвід використання цих стандартів пропонувано врахувати для корегування відповідних нормативних документів з ЕМС і функційної безпеки.

11. В умовах вологості імпульсні перенапруги, наприклад швидкі перехідні процеси (EFT), мікросекундні всплески (Surge), розряди статичної електрики (ESD), викликають більш часті, глибокі та небезпечні порушення функціонування систем.

Список використаних джерел

1. ДСТУ EN 50121-4: 2019. Залізничний транспорт. Електромагнітна сумісність. Ч. 4. Емісія завад і несприйнятливість сигнальної та телекомунікаційної апаратури (EN 50121-4:2016, IDT).
2. ДСТУ EN 50121-3-2:2019. Залізничний транспорт. Електромагнітна сумісність. Ч. 3-2. Рухомий склад. Апаратура (EN 50121-3-2:2016, IDT).
3. ДСТУ EN 50121-5:2019. Залізничний транспорт. Електромагнітна сумісність. Ч. 5. Емісія завад і несприйнятливість стаціонарних установок електроживлення та апаратури (EN 50121-5:2017, IDT).
4. Методика доказу функціональної безпеки мікроелектронних комплексів систем керування та регулювання рухом поїздів: затв. та введ. в дію наказом «Укрзалізниця» № 452-Ц від 17.08.2001 р. Київ: Вид. ПП «Алькор», 2002. 106 с.
5. Єрмоленко Л. П. Електромагнітні завади на залізничному транспорті: теоретичні засади та класифікація. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2019. № 3. С. 31-36.
6. Гаврилюк В. І. Модель впливу тягового струму на тональні рейкові кола. *Електромагнітна сумісність на залізничному транспорті*. 2011. С. 6-10. URL: crust.ust.edu.ua.
7. Гаврилюк В. І., Завгородній О. В. Електромагнітний вплив тягової мережі на рейкові кола. Моделювання тягового струму в рейковій лінії. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2007. № 4. С. 53-57.
8. СОУ45.020-00034045-002:2006. Вироби залізничної автоматики, телемеханіки та зв'язку. Загальні технічні умови. Київ: Укрзалізниця, 2006. 80 с.
9. Kustov V. F. & Neychev O. V. (1993). Chokes for interference-suppressing filters. *Telecommunications & Radio Engineering*. 48(10). 132–135.
10. Сивухін Д. В. Загальний курс фізики: підруч. для студ. фіз. спец. ВНЗ. Т. 3. Електрика: пер. з рос. Київ : Либідь, 2009. 512 с.
11. Хоровиц П., Хилл У. Мистецтво схемотехніки : підруч. для студ. техн. ВНЗ: пер. з англ. Вид. 5-те. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2018. 960 с.
12. Бессонов Л. А. Теоретичні основи електротехніки : підруч. для студ. електротех. спец. ВНЗ: пер. з рос. Київ : Вища школа, 2005. 688 с.
13. Касаткін А. С., Немцов М. В. Електротехніка : підруч. для студ. техн. ВНЗ / за ред. А. С. Касаткіна. Вид. 4-те, перероб. і доп. Київ : Академія, 2020. 512 с.
14. Опадчий Ф. Ф., Попов В. А. Аналіз сигналів і систем : навч. посіб. для студ. ВНЗ. Київ : Вища школа, 2012. 320 с.
15. Брейсуелл Р. Н. Перетворення Фур'є та його застосування : монографія: пер. з англ. Київ : Наукова думка, 2003. 400 с.
16. Атабеков Г. І., Сидоров В. П. Тиристорні перетворювачі частоти : монографія: пер. з рос. Київ : Техніка, 2016. 280 с.
17. Ogunsola A., Mariscotti A. (2013). Signalling and Communication Systems. In: *Electromagnetic Compatibility in Railways. Lecture Notes in Electrical Engineering*. Vol. 168. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-30281-7_3.
18. Chauhan R. S. (2020). Variation in Capacitance of Ceramic Capacitors Due to Humidity. *Journal of Advanced Research in Power Electronics and Power Systems*. 7(3). 27–29. docs.nrel.gov+12.

19. Bilgic M., Tekin I. Parasitic Capacitance Impact on Cable EMC Performance under Moist Conditions. *IEEE EMC Symposium*. 2022.

20. Grebenyuk S., Sokolov V. Analysis of Degradation of EMI Protection Devices in Railway Systems. *JIKS*. 2022.

21. RSRail 2022 Proceedings Combined EMC and environmental stress testing of safety-critical railway electronics.

22. IEEE EMC+SIPI Demos 2024. Practical studies on environment-driven EMC degradation. emc2024.org.

The influence of humidity on the degradation of protection elements and parameters of interference penetration

Abstract. *The article investigates the impact of increased humidity on the degradation of electromagnetic interference (EMI) protection components and on changes in the electrical parameters of interference propagation channels in railway automation systems. It has been established that under high humidity conditions, the electrical characteristics of frequency filters, time selectors, protective capacitors, voltage limiters, and optocouplers undergo significant changes, resulting in reduced effectiveness of protection against impulse and high-frequency disturbances. The study shows that moisture substantially increases the parasitic capacitance of galvanic isolation elements — both between conductors and between conductors and the chassis — while also reducing the electrical resistance of insulation materials.*

These effects contribute to enhanced transmission of impulse and high-frequency disturbances into critical electronic circuits. It was found that even with fully functional protective elements, the level of interference penetration may exceed permissible limits due to environmental influences. This poses serious risks to electromagnetic compatibility (EMC) and functional safety (SIL) of train control systems, particularly due to the simultaneous impact of humidity on all redundancy channels, potentially leading to multiple dangerous failures and increasing the risk of accidents or catastrophes in railway transport.

The article proposes recommendations for updating the testing standards of railway automation devices to account for climatic factors and inter-conductor capacitive coupling channels. The results of the study may be valuable for developers, auditors, and certification bodies involved with electrical, electronic, and programmable electronic control and monitoring systems operating under stringent functional safety and EMC requirements.

Keywords: *humidity, electrical/electronic/programmable electronic control systems, electromagnetic compatibility, electromagnetic*

interference, immunity, dangerous failures, SIL levels, railway automation systems, functional safety.

Кустов Віктор Федорович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-9773-5470. Тел.: +38(057) 730-10-32. E-mail: kustov.vf@kart.edu.ua.

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

Прилипко Андрій Андрійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-6126-1085. Тел.: +38(057) 730-10-32. E-mail: prilipkoaa@kart.edu.ua.

Prylypko Andrii, PhD (Tech). Associate professor, department of automation and computer telecontrol of trains, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-6126-1085. Tel.: +38(057) 730-10-32. E-mail: prilipkoaa@kart.edu.ua.