

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ПОЛТАВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА ІМЕНІ ЮРІЯ КОНДРАТЮКА»
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА
РОБОТОТЕХНІКИ
КАФЕДРА АВТОМАТИКИ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

Пояснювальна записка

до дипломної роботи бакалавра

на тему: **РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ВИМІРЮВАННЯ РІВНІВ РАДІОЗАВАД**

Виконала:
студентка групи,
спеціальності 172 «Телекомунікації та
радіотехніка»



Анастасія
ЧЕРВОНЕНКО

Керівник:
професор, доктор. техн. наук
Володимир



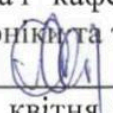
ЛИСЕЧКО

Рецензент

Полтава – 2025

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
Інститут Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та
робототехніки
Кафедра Автоматики, електроніки та телекомунікацій
Ступінь вищої освіти Бакалавр
Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ


Завідувач кафедри автоматки,
електроніки та телекомунікацій
 О.В. Шефер
«01» квітня 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА СТУДЕНТУ Червоненко Анастасії Сергіївни

1. Тема проекту (роботи) «Розробка методики вимірювання рівнів радіозавад»
керівник проекту (роботи) Лисечко Володимир Петрович, д.т.н., професор
затверджена наказом вищого навчального закладу від 03. 03. 2025 року
№ 306/1– ф.
2. Строк подання студентом проекту (роботи) 12.06.2025 р.
3. Вихідні дані до проекту (роботи) Вихідними даними є матеріали зібрані під час проходження практики.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Порівняльний аналіз різновидів радіозавад, у тому числі, на залізничному транспорті; оцінка видів похибок вимірювань та їхнього впливу; розробка методики вимірювань рівнів радіозавад в УКХ діапазон; результати моделювання; розрахунок техніко-економічної ефективності запропонованої методики; додаток А.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових плакатів): Актуальність і мета роботи, задачі що необхідно вирішити. Алгоритм визначення заважаючих впливів, який лежить в основі вимірювання рівнів радіозавад в УКХ діапазоні. Просторове прив'язування результатів вимірювань за допомогою навігаційного приймача GPS. Результати досліджень похибок вимірювань, з метою забезпечення метрологічної оцінки вимірювань. Алгоритм роботи методики. Натурний експеримент на базі кафедри «Транспортний зв'язок». Залежність загасання сигналу від відстані.
6. Дата видачі завдання 01.04.2025 р.

Пор. №	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Термін виконання етапів роботи			Примітка (плакати)
		Дата	Категорія	Відсоток	
1	Виявлення предмета та об'єкта дослідження, а також необхідних для їх вирішення задач.	22.04.25	I	20%	Пл. 1
2	Підготовка матеріалів до оглядово-аналітичної частини дипломного проекту.	08.05.25		40%	Пл. 2,3
3	Розроблення розділів спеціальної частини дипломного проекту (роботи) з елементами проектування(дослідження)	22.05.25	II	60%	Пл. 4
4	Підготовка графічного матеріалу, доповіді.	30.05.25		80 %	Пл. 5
5	Робота над висновками та оформлення кваліфікаційної роботи. Подання роботи на рецензію та затвердження.	10.06.25	III	100%	Пл. 6-8

Студент



(підпис)

Червоненко А. С..

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи



(підпис)

Лисечко В. П.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Дипломна робота на тему «Розробка методики вимірювань рівнів радіозавад»

Актуальність теми. Забезпечення надійного радіозв'язку на залізничному транспорті потребує точного контролю рівнів радіозавад, особливо в умовах інтенсивного використання УКХ-діапазону. Існуючі засоби контролю часто не відповідають сучасним вимогам, тому розробка ефективної методики вимірювання рівнів радіозавад є актуальним завданням для підвищення заводозахищеності систем зв'язку.

Метою роботи є розробка методу вимірювання рівнів радіозавад в ультракороткохвильовому (УКХ) діапазоні з урахуванням електромагнітного середовища та потреб технічного обслуговування систем радіозв'язку.

Об'єкт дослідження – це процеси електромагнітних завад, які виникають в середовищі залізничного транспорту.

Предмет дослідження – методика і алгоритми визначення рівнів радіозавад в УКХ-діапазоні з урахуванням впливу техногенних джерел випромінювання.

У роботі проведено порівняльний аналіз електромагнітних завад на залізничному транспорті. Розглянуто теоретичні основи похибок вимірювань, розроблено вимоги до методики вимірювань та побудовано алгоритм її реалізації. Проведено моделювання та експериментальну перевірку працездатності методики. Обґрунтовано, що запропонована методика забезпечує більш достовірну оцінку рівня радіозавад в УКХ-діапазоні та дозволяє сформулювати рекомендації щодо підвищення заводозахищеності радіозасобів.

Дипломна робота складається зі 67 аркушів ПЗ, 9 рисунків, 14 таблиць, 33 найменування в списку використаних джерел.

Ключові слова: радіозавади, УКХ-діапазон, метод вимірювань, заводостійкість, моделювання, алгоритм, залізничний транспорт.

REVIEW

Diploma thesis on the topic “Development of a methodology for measuring radio interference levels”

Relevance of the topic. Ensuring reliable radio communication in railway transport requires accurate control of radio interference levels, especially in conditions of intensive use of the VHF band. Existing monitoring tools often do not meet modern requirements, so the development of an effective method for measuring radio interference levels is an urgent task to improve the noise immunity of communication systems.

The aim of the work is to develop a method for measuring radio interference levels in the ultra-short-wave (UHF) range, taking into account the electromagnetic environment and the needs of radio communication systems maintenance.

The object of research is the processes of electromagnetic interference that occur in the environment of railway transport.

The subject of the study is the methodology and algorithms for determining the levels of radio interference in the VHF range, taking into account the influence of man-made radiation sources.

A comparative analysis of electromagnetic interference in railway transport is carried out. The theoretical foundations of measurement errors are considered, requirements for the measurement methodology are developed, and an algorithm for its implementation is constructed. The modeling and experimental verification of the methodology's performance are carried out. It is substantiated that the proposed methodology provides a more reliable assessment of the level of radio interference in the VHF band and allows to formulate recommendations for improving the interference immunity of radio equipment.

The thesis consists of 67 pages of software, 9 figures, 14 tables, 33 references.

Keywords: radio interference, VHF band, measurement method, interference immunity, modeling, algorithm, railway transport.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП	9
1 АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЗАВАД ТА ЇХ ВПЛИВ НА РАДІОСИСТЕМИ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ	11
1.1 Класифікація та характеристика джерел радіозавад	11
1.2 Вплив небажаних випромінювань передавачів на ефективність радіозв'язку	18
1.3 Аналіз впливу індустриальних радіозавад	23
2 АНАЛІЗ ПРИЧИН І ТИПІВ ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ	33
2.1 Класифікація похибок вимірювання	33
2.2 Похибки вимірювання, що виникають через джерела впливу	36
2.3 Аналіз впливу похибок вимірювань за закономірністю їх змінювання	39
2.4 Кількісні характеристики похибок вимірювань: способи вираження та порівняння	43
3 РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ВИМІРЮВАНЬ РАДІОЗАВАД В УКХ ДІАПАЗОНІ	49
3.1 Створення вимог до методики вимірювання рівнів радіозавад в УКХ діапазоні в умовах залізничного транспорту	49
3.2 Основні положення методики вимірювання рівнів радіозавад	51
3.3 Алгоритмічне забезпечення методики визначення рівнів радіозавад в УКХ діапазоні	54
4 РЕЗУЛЬТАТИ ПРОВЕДЕНОГО ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ	65
ВИСНОВКИ	78
ДОДАТКИ	80
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	88

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АВК	автоматизований вимірювальний комплекс
БКП	блок керування постійним струмом
ВЧ	високі частоти
ГЛОНАСС	глобальна навігаційна супутникова система
ГІС	геоінформаційна система
ДСПМ	маневровий диспетчер
ДСПІ	чергові по парках прийому
ДСПС	станційний диспетчер
ДСПЧ	черговий по станції
ЕМП	електромагнітне поле
ЗВТ	засоби вимірювальної техніки
ЄДЦК	єдиний дорожній диспетчерський центр керування
ЛЕП	лінії електропередач
МО	математичне очікування
МПС	мікропроцесорна система
НАК	навігаційна апаратура користувачів
НЧ	низькі частоти
ПРЗ	поїзний радіозв'язок
ПТДП-М	дуплексний телефонний підсилювач
ПТО	пункт технічного обслуговування вагонів
РВ	рухомий вагон (радіостанція рухомого вагона)
РПУ	радіопередавальний пристрій
РЕЗ	радіоелектронні засоби
СКО	середньоквадратичне відхилення
УКХ	ультракороткі хвилі
GPS	Global Positioning System (глобальна система позиціонування)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers

ВСТУП

Залізничний транспорт є критично важливою складовою транспортної інфраструктури, де надійний і високоякісний зв'язок є невід'ємною частиною системи управління перевезеннями. Безперебійний радіозв'язок забезпечує ефективну координацію між рухомими одиницями, технічними системами та диспетчерським управлінням, що, в свою чергу, впливає на безпеку, оперативність і ефективність перевізного процесу. Надійність і стабільність каналів зв'язку є ключовими умовами для забезпечення безпеки на залізниці, оскільки навіть найменше порушення їхньої роботи може призвести до серйозних інцидентів, які безпосередньо впливають на безпеку руху і збереження вантажів. Це підкреслює важливість належної організації та постійного моніторингу радіозв'язку на залізничному транспорті, включаючи оцінку рівнів радіозавад, що можуть негативно впливати на якість зв'язку.

Актуальність даного дослідження обумовлена необхідністю удосконалення існуючих методів вимірювання рівнів радіозавад у системах безпроводового доступу, що активно використовуються на залізничному транспорті. У зв'язку з розвитком новітніх технологій зв'язку та збільшенням завадових впливів, точність оцінки рівнів завад стає критично важливою для забезпечення стабільної роботи радіосистем. Зокрема, зростає потреба в удосконаленні методики вимірювань у діапазонах ультракоротких хвиль, особливо вище 1 ГГц, де системи зв'язку піддаються значним завадовим впливам, що ускладнює їх ефективну експлуатацію.

Для контролю за системами радіозв'язку, що експлуатуються на залізничному транспорті, активно використовуються вагони-лабораторії. Вони дозволяють проводити вимірювання та контроль параметрів радіозв'язку безпосередньо в умовах реальної експлуатації. У минулому були зроблені спроби розробити й застосовувати окремі сервісні пристрої, такі як девіометр або вимірювач рівня сигналу на основі приймача радіостанції 42РТМ-А2-4М, а також цілі вимірювальні комплекси для вагонів-лабораторій радіозв'язку.

Однак одним з основних недоліків цих розробок є відсутність належного метрологічного забезпечення, що значно знижує точність і достовірність результатів вимірювань.

Виходячи з зростаючої актуальності проблематики, **метою дослідження** є розробка нової методики вимірювання рівнів радіозавад, яка дозволить точно оцінювати завадову обстановку в заданому частотному діапазоні. Це забезпечить підвищення якості зв'язку та стабільність роботи безпроводових систем на залізничному транспорті, що має критичне значення для безпеки, ефективності перевезень та стабільної роботи систем управління на залізниці.

Об'єктом дослідження є радіозв'язкові системи, що використовуються на залізничному транспорті, зокрема безпроводові системи, що працюють у різних частотних діапазонах.

Предметом дослідження є методи вимірювання рівнів радіозавад у системах радіозв'язку залізничного транспорту, зокрема у діапазонах ультракоротких хвиль і вище 1 ГГц, а також розробка підходів до оцінки завадової обстановки та впливу радіозавад на якість і стабільність роботи цих систем.

Таким чином, дослідження зосереджене на розробці методики вимірювань, яка дозволить забезпечити точну оцінку рівнів радіозавад, що підвищить ефективність роботи радіосистем залізничного транспорту в умовах мінливих завадових впливів, гарантуючи безпеку і стабільність роботи в різних умовах експлуатації.

1 АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЗАВАД ТА ЇХ ВПЛИВ НА РАДІОСИСТЕМИ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

1.1 Класифікація та характеристика джерел радіозавад

Електромагнітні радіозавади є одним із основних чинників, що обмежують ефективність роботи радіотехнічних засобів. Вони виникають у вигляді непотрібних електромагнітних коливань, які впливають на радіоприймальні пристрої, спотворюючи передану по радіоканалу корисну інформацію. Такі завади можуть значно знижувати дальність дії радіосистем і погіршувати якість зв'язку [27, 30, 32]. Оскільки радіозавади можуть виникати в різних середовищах та від різноманітних джерел, їх класифікація є важливою для розуміння природи їхнього впливу і способів боротьби з ними [21, 25, 27].

Джерела електромагнітних радіозавад за походженням можна умовно поділити на дві основні категорії: природні та штучні [27, 32].

1. Природні джерела радіозавад включають різноманітні природні явища, які викликають електромагнітні коливання в навколишньому середовищі. До таких джерел відносяться.

1.1 Земні джерела: це природні явища, що виникають в атмосфері та на Землі, зокрема електричні розряди під час гроз, полярні сьйва, накопичення статичних розрядів, а також неоднорідності середовища поширення радіохвиль.

1.2 Позаземні джерела: це електромагнітне випромінювання, яке йде від сонця, планет, зірок, а також магнітні бурі, що можуть суттєво впливати на радіосигнали, що проходять через іоносферу.

1.3 Власні шуми пристроїв: кожен радіоприймальний пристрій має певний рівень власних шумів, які можуть спричиняти додаткові перешкоди в роботі радіосистем.

2. Штучні джерела радіозавад включають технічні пристрої та обладнання, що є результатом людської діяльності. Вони можуть виникати у багатьох сферах, і основними джерелами є наступні.

2.1 Радіоелектронні пристрої: до цієї групи належать радіомовні станції, засоби радіозв'язку, навігаційні системи, радіолокаційні станції, апаратура супутникового зв'язку та інші пристрої, що працюють на основі випромінювання електромагнітної енергії.

2.2 Пристрої електроживлення: це включає струмознімачі, генератори електроенергії, перетворювачі енергії, лінії електропередачі, розподільчі пристрої, а також засоби автоматизації, які можуть створювати високочастотні завади.

2.3 Електрообладнання: промислові верстати, інструменти, засоби оргтехніки, а також обладнання для контролю й вимірювання, що може виступати як джерело електромагнітних завад.

2.4 Системи запалювання: джерелами завад можуть бути двигуни внутрішнього згоряння, електротранспорт, освітлювальні прилади та побутові пристрої.

2.5 Промислова апаратура: включає зварювальні апарати, ультразвукові пристрої, медичне обладнання та інші промислові пристрої, які є джерелами високочастотних завад.

Індустріальні радіозавади, які є результатом діяльності промислових об'єктів, мають різний спектральний склад і інтенсивність. Такі радіозавади можуть впливати на радіоприймачі навіть на значних відстанях, досягаючи кількох кілометрів від джерела. Це особливо актуально для зон з високою концентрацією промислових підприємств або інфраструктур, що використовують різноманітні електронні системи. Вплив таких завад може бути значним на частотах в кілька сотень мегагерц, що вимагає особливих методів вимірювання та оцінки рівнів радіозавад [27, 30, 32].

Рівень радіозавад можна вимірювати різними одиницями, в залежності від мети вимірювання та характеру завад [13, 15, 18, 26, 29, 33]:

1. Одиниці напруженості поля — для вимірювання радіозавад, що поширюються у вигляді електромагнітних хвиль, використовують такі одиниці, як вольт на метр (В/м), мікровольт на метр (мкВ/м) або децибели

відносно 1 мкВ на метр (дБмкВ/м). Це дозволяє виміряти рівень напруженості поля, створеного джерелом радіозавади, що особливо важливо для визначення впливу таких завад на радіоприймачі.

2. Одиниці щільності потужності — для оцінки впливу завад на радіосистеми на більш технічному рівні використовують одиниці щільності потужності, як то ват на квадратний метр ($\text{Вт}/\text{м}^2$) або децибели відносно потужності в ватах на квадратний метр ($\text{дБВт}/\text{м}^2$). Це дозволяє визначити, скільки енергії передається через одиницю площі на певній частоті, що допомагає в оцінці завадового впливу на різні частотні канали.

3. Розподіл рівня радіозавади по частоті — для характеристики завантаження спектра частот радіозавадою вимірювання проводять також у одиницях, що показують, як рівень радіозавади змінюється залежно від частоти, наприклад, в децибелах міліват на квадратний метр на кілогерц ($\text{дБМВт}/\text{м}^2 \text{кГц}$). Це дозволяє більш точно оцінити спектральний вплив завад і визначити, на яких частотах радіосистема найбільше піддається завадовому впливу [29, 31, 33].

Ця класифікація враховує зв'язок між типами радіозавад і їх джерелами, а також їх вплив на спектр і часову характеристику радіосистем [20, 27, 30, 32].

Різні типи радіозавад можна класифікувати за їх спектральними та тимчасовими характеристиками. Згідно з цими критеріями, розрізняють три основні види радіозавад (табл. 1.1) [27, 30, 32].

Таблиця 1.1 – Типи радіозавад та їх характеристика

Тип радіозавади	Характеристика	Приклад
Зосереджені за спектром (вузькосмугові)	Коливання, що повільно змінюються з часом, зазвичай мають вузький спектр частот.	Радіозв'язок
Імпульсні	Широкосмугові, мають короткочасні, високочастотні піки потужності.	Грозові розряди

Флюктуаційні	Випадкові коливання, що мають невизначену частоту і амплітуду.	Космічні шуми, власні шуми пристроїв
--------------	--	--------------------------------------

Радіозавади впливають на різноманітні системи та пристрої, які об'єднуються під поняттям рецептори електромагнітних радіозавад. Як і джерела завад, рецептори можна поділити на природні і штучні. Штучні рецептори, у свою чергу, діляться на дві групи [20, 27, 30, 32].

1. Рецептори, що працюють на принципах добування інформації з навколишнього електромагнітного поля. До цієї групи належать радіоприймальні пристрої. Одними з основних характеристик радіоприймачів є:

- смуга пропускання – це частотний діапазон, у якому пристрій може приймати сигнал;

- чутливість – це здатність приймача приймати корисний сигнал на певних рівнях потужності;

- сприйнятливність по небажаних каналах прийому – це чутливість до рівнів радіозавад, частоти яких не потрапляють у смугу частот, зайняту корисним сигналом. Цей параметр вимірюється в дБ по відношенню чутливості приймача до корисного сигналу.

2. Рецептори, які за принципом своєї роботи не повинні реагувати на зовнішні електромагнітні поля. До цієї групи відносяться:

- радіоелектронні пристрої (наприклад, підсилювачі низької частоти (ПЧ), відеочастоти, засоби зв'язку, телефони та ін.);

- апаратура промислового та широкого застосування (пристрої для контролю, управління, автоматизації, засоби відображення та інші).

Такий поділ дозволяє більш точно визначити, як різні пристрої реагують на завади, та розробити методи захисту для кожного типу рецептора в залежності від їхніх характеристик і принципів роботи.

Для ефективного вирішення проблеми радіозавад необхідно пройти кілька етапів, кожен з яких фокусується на різних аспектах боротьби з цим явищем.

Етап I. Передбачає глибоке вивчення та аналіз електромагнітної обстановки на об'єкті [26, 31]. Це включає як вимірювання рівнів радіозавад, так і створення моделей, що описують взаємодію різних джерел завад із радіоелектронними засобами. Завдяки таким аналізам можна визначити, які пристрої і системи є найбільш вразливими до радіозавад, а також оцінити шляхи їх проникнення в апаратуру. Важливим етапом на цьому етапі є також накопичення статистичних даних, що дозволяє створити прогностичні моделі для подальших розрахунків та оптимізації.

Етап II. Спрямований на реалізацію заходів для підвищення радіо завадозахищеності радіоелектронних засобів (РЕЗ) [16, 22, 30]. Цей етап включає комплекс технічних та організаційних заходів, спрямованих на мінімізацію впливу завад. Технічні заходи охоплюють поліпшення характеристик РЕЗ: це можуть бути нові фільтраційні рішення, екранування, спеціальні схеми захисту або підвищення динамічного діапазону. Всі ці заходи допомагають знизити чутливість пристроїв до завад, що дозволяє забезпечити стабільну і безперебійну роботу радіосистем.

Організаційні заходи на цьому етапі орієнтовані на оптимізацію роботи сукупності РЕЗ в рамках широкої радіосистеми. Це включає створення стратегії ефективного використання частотного спектру, управління тимчасовими режимами роботи, а також визначення оптимальних умов для розміщення та координації радіоелектронних засобів. Всі ці заходи сприяють не тільки зниженню впливу радіозавад, але й забезпеченню високої якості і надійності роботи системи в умовах реальної експлуатації [19, 21, 22].

Для врахування ефектів взаємодії заважаючих сигналів на нелінійних приймачах, необхідно оцінити вплив одночасного випромінювання від кількох джерел. Для спрощення обчислень в модель включають тільки ті джерела, які можуть суттєво впливати на нормальну роботу РЕЗ, виключаючи ті, що не становлять загрози. Вибір таких джерел здійснюється на основі попередньо встановленого порогу, що дозволяє фокусуватися лише на найбільш небезпечних випромінюваннях. Алгоритм аналізу електромагнітного впливу

між парами приймач-передавач представлений на рис. 1.1. Як видно з рисунку, на Етапі 1 проводиться енергетичний відбір, який ґрунтується на амплітудних показниках сигналів. Етап II включає частотний відбір, що враховує селективні характеристики приймача. Етап III передбачає застосування додаткових оцінок, що дозволяють враховувати інші параметри впливу.

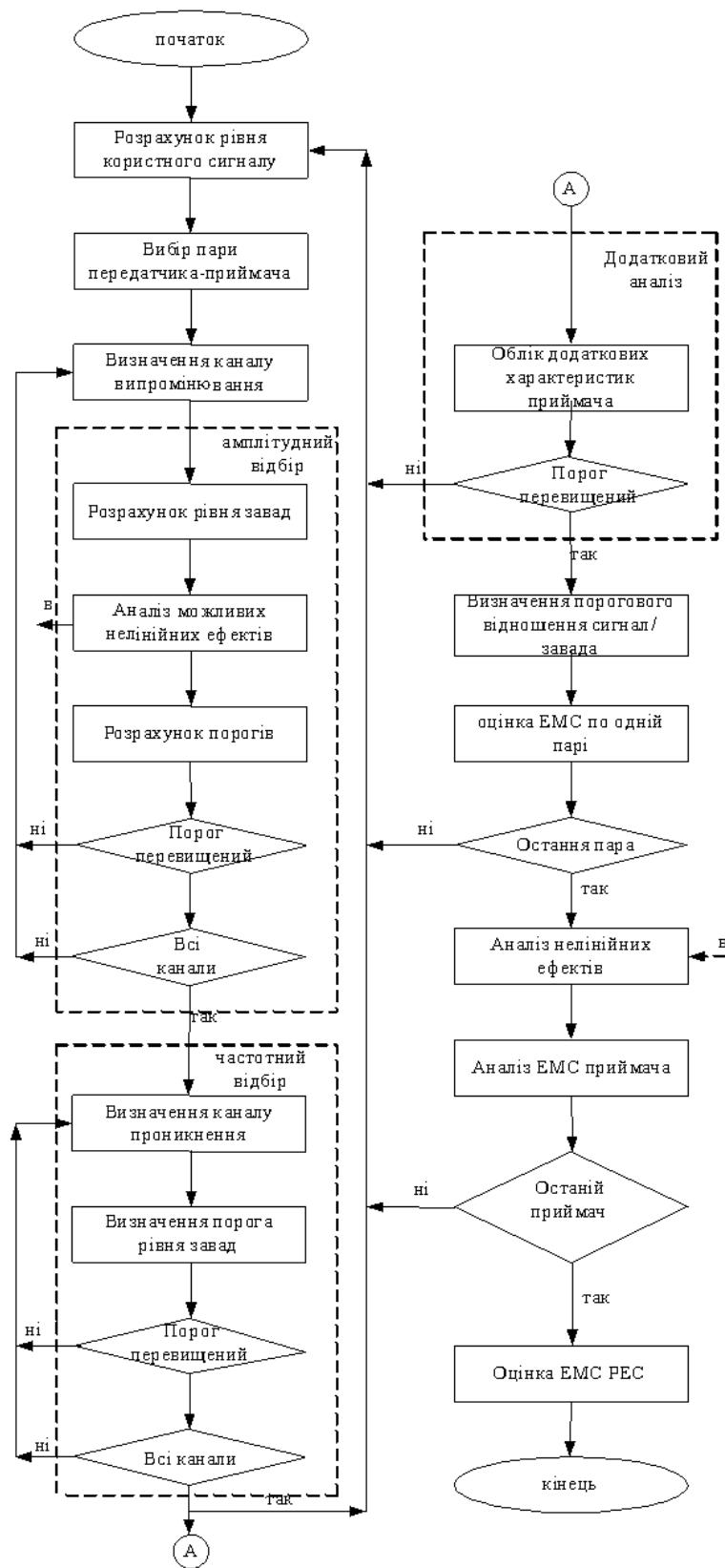


Рисунок 1.1- Блок-схема впливу заважаючих сигналів між парами «приймач-передач»

Після відбору потенційно небезпечних джерел радіозавад проводиться обчислення порогового та прогнозованого відношення сигнал-завада для кожного джерела. Далі аналізується вплив випромінювачів на основний і побічний канали прийому, а також досліджуються нелінійні ефекти.

1.2 Вплив небажаних випромінювань передавачів на ефективність радіозв'язку

За визначенням ГОСТ, основне випромінювання радіопередавача (РПУ) є випромінюванням, яке відбувається в необхідній смузі радіочастот, призначеній для передачі сигналу [13, 16, 19, 26, 31]. Ця смуга частот, що вказує на мінімальні вимоги до пропускної здатності системи, має забезпечувати передачу сигналу з необхідною швидкістю і якістю. Однак на практиці радіовипромінювання часто займає більш широку смугу частот.

Випромінювання радіопередавачів може виходити за межі необхідної смуги частот, створюючи небажані завади для інших систем, що працюють на тих самих або суміжних частотах. Відповідно до норм, ширина цієї зайнятої смуги частот не повинна перевищувати 20% від смуги необхідної. Це означає, що радіовипромінювання передавачів може виходити за межі призначеної частоти, спричиняючи перешкоди для суміжних радіосистем.

Для коректного вимірювання використовується поняття смуги частот на рівні X дБ (щодо вихідного рівня в 0 дБ). Зазвичай для цього X приймають рівним -30 дБ. Це дозволяє визначити так звану зайняту смугу частот (рис. 1.2), що дає чітке уявлення про те, як поширюється завада в спектрі [13, 16, 19].

Крім того, відхилення несучої частоти випромінювання також може стати джерелом радіозавад для інших працюючих РЕЗ на тій самій частоті. Тому встановлені міжнародні норми для максимально допустимих відхилень частоти радіопередавачів від присвоєної частоти. Наприклад, для радіостанцій сухопутної рухомої служби, що використовують кутову модуляцію ($\sim 10^{-5}$),

максимальне значення відносного відхилення частоти від номінального значення не повинно перевищувати $(+5, -5) \times 10^{-8}$ в режимі 100% несучої протягом місяця [19, 21, 22, 33].

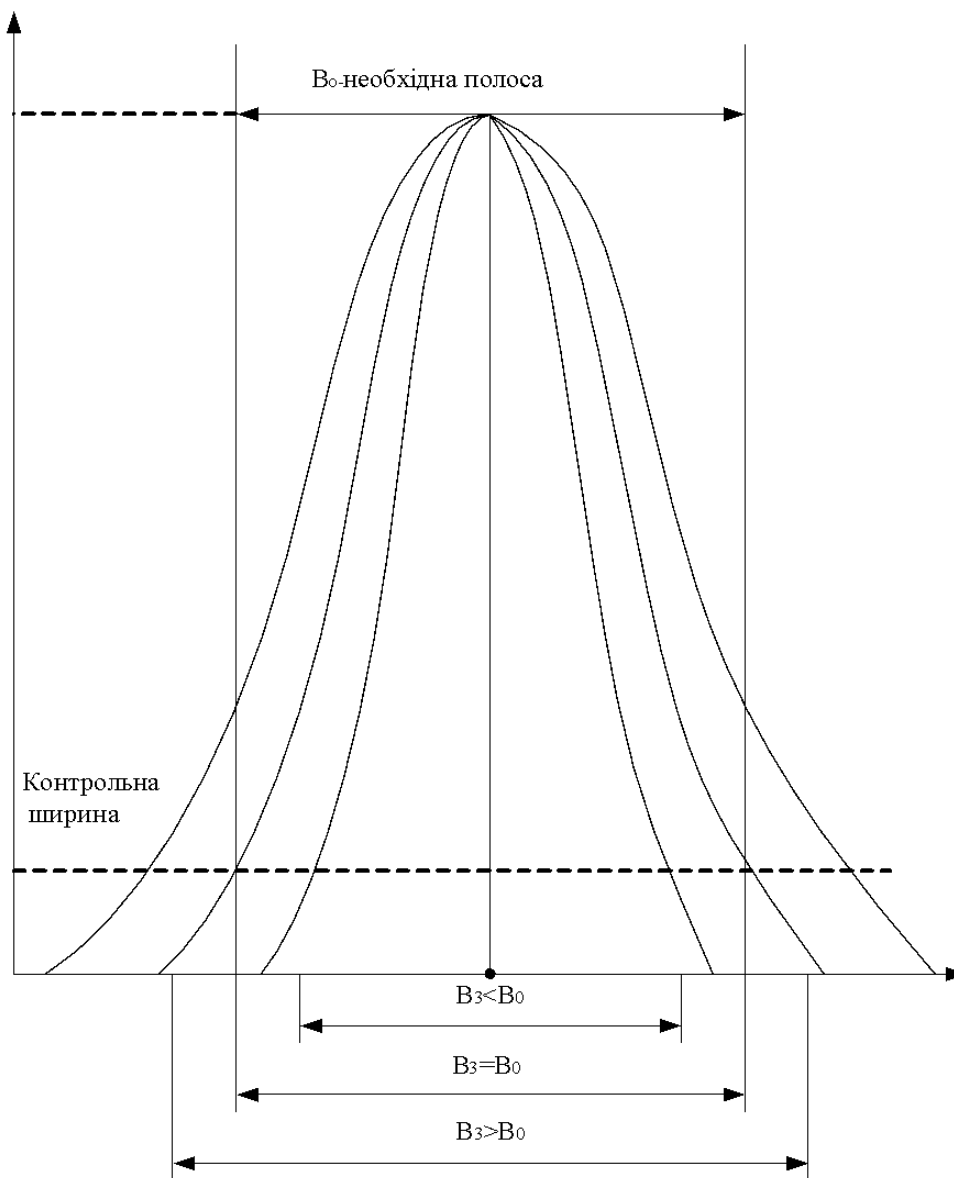


Рисунок 1.2 – Випромінювання передатчика

Забезпечення стабільності частоти та мінімізації відхилень досягається через застосування кварцових стабілізаторів частоти та синтезованих генераторів. Використання кварцових резонаторів, зокрема вакуумних, герметизованих та негерметизованих, дозволяє досягти високої

точності стабілізації частоти в межах від $\pm 0,5 \times 10^{-6}$ до 100×10^{-6} в діапазоні робочих температур від -10°C до $+60^\circ\text{C}$ [26, 29 – 33].

Для підвищення стабільності частоти радіопередавачів застосовується термостатування кварцових резонаторів. В цьому процесі кварцовий резонатор поміщається в термостат, який підтримує сталу температуру. Точність підтримки температури залежить від датчика, який може регулювати її в межах від $1-2^\circ\text{C}$ до $0,01^\circ\text{C}$. Завдяки такому підходу генератори можуть підтримувати стабільність частоти в діапазоні від $\pm 2,5 \times 10^{-5}$ до $\pm 5 \times 10^{-8}$, а в деяких випадках навіть до $\pm 5 \times 10^{-9}$ [29 – 33].

Для перебудови генераторів використовують синтезатори частоти, що дозволяють змінювати робочу частоту генератора. Перебудова може здійснюватися двома основними методами: прямим синтезом, коли сигнал генерується безпосередньо, або непрямим синтезом, коли сигнал створюється в самому генераторі. Для точного регулювання частоти використовують системи фазової автопідстроювання частоти (ФАПЧ), які порівнюють вихідну частоту з еталонною та автоматично коригують її (табл.1.2) [19, 26, 31, 32].

Таблиця 1.2 – Методи стабілізації та перебудови частоти в радіопередавачах*

Процес	Опис	Діапазон стабільності частоти
Термостатування кварцу	Кварцовий резонатор поміщається в термостат, який підтримує сталу температуру. Точність температури контролюється датчиком.	Частота: $\pm 2,5 \times 10^{-5}$ до $\pm 5 \times 10^{-8}$
Прямий синтез частоти	Сигнал генерується безпосередньо в генераторі.	Зміна частоти за допомогою синтезатора
Непрямий синтез частоти	Сигнал генерується в самому перебудованому генераторі, з подальшим коригуванням частоти.	Частота порівнюється з еталонною частотою через ФАПЧ
Система ФАПЧ	Використовується для порівняння інтервалів з еталонною частотою,	Точність на рівні $\pm 5 \times 10^{-9}$

	автоматично коригує частоту генератора.	
--	---	--

** розроблено автором на основі даних з відкритих джерел*

Небажані радіовипромінювання [29 - 33] (радіовипромінювання за межами необхідної смуги радіочастот) можна поділити на два типи: позасмугові та побічні радіовипромінювання (табл. 1.3).

Таблиця 1.3 – Типи радіовипромінювань та їх характеристика*

Тип радіовипромінювання	Опис
Позасмугове випромінювання	Небажане випромінювання в частотній смузі, що примикає до необхідної смуги, результат модуляції сигналу.
Побічне випромінювання	Небажане випромінювання, що виникає внаслідок нелінійних процесів у РПУ.

** розроблено автором на основі даних з відкритих джерел*

1. Позасмугові радіовипромінювання – це небажані випромінювання, що виникають у частотному діапазоні, який примикає до необхідної смуги радіочастот. Вони є результатом модуляції сигналу, що перевищує межі цієї смуги.

2. Побічні радіовипромінювання – це небажане випромінювання, що виникає внаслідок нелінійних процесів в радіопередавальному устаткуванні (РПУ), які не пов'язані безпосередньо з модуляцією. До побічних випромінювань відносяться: випромінювання на гармоніках та субгармоніках, комбіновані, інтермодуляційні і паразитні випромінювання.

Позасмугові випромінювання можна зменшити за допомогою обмеження спектра модуляції, що реалізується через фільтрацію. Однак, окрім цього, існують і нелінійні ефекти, такі як перемодуляція або обмеження модуляційних характеристик, які призводять до появи гармонік і комбінацій частот. Для забезпечення лінійної модуляційної характеристики необхідно враховувати, що це може погіршити енергетичні показники генератора. Наприклад, при лінійній модуляційній характеристиці в недонапруженому

режимі генератора з кутом відсічення понад 90° спостерігається значне зниження коефіцієнта корисної дії генератора.

Для підвищення коефіцієнта корисної дії передавача його вихідні каскади повинні працювати в нелінійному режимі з кутом відсічення в межах $0^\circ < 180^\circ$. У такому режимі відбувається нелінійне обмеження сигналу, що призводить до появи вищих гармонік.

Одним з ефективних способів зменшення випромінювань на парних гармоніках є використання двотактних схем у вихідних каскадах. Теоретично, в такій схемі, при відсіченні кута $0^\circ = 90^\circ$, повинні бути повністю відсутні парні гармоніки, а також третя гармоніка, оскільки при зазначеному куті коефіцієнт розкладу $\alpha_3 = 0$. Однак, на практиці, через асиметрію схеми, парні гармоніки все ж таки можуть існувати, хоча й на зниженому рівні. Відсутність повної стабільності кута відсічення робить складним усунення третьої гармоніки, що особливо важко реалізується в перебудовуваних передавачах, де зміна частоти перебудови призводить до змін у режимі вихідного каскаду і порушення узгодження з антенно-фідерним трактом [21, 22].

Ще одним важливим методом зменшення рівня гармонік є використання антенних фільтрів, які можуть бути як відбивного, так і поглинаючого типу (рис. 1.2) [13, 16, 19, 22, 26, 29- 31].

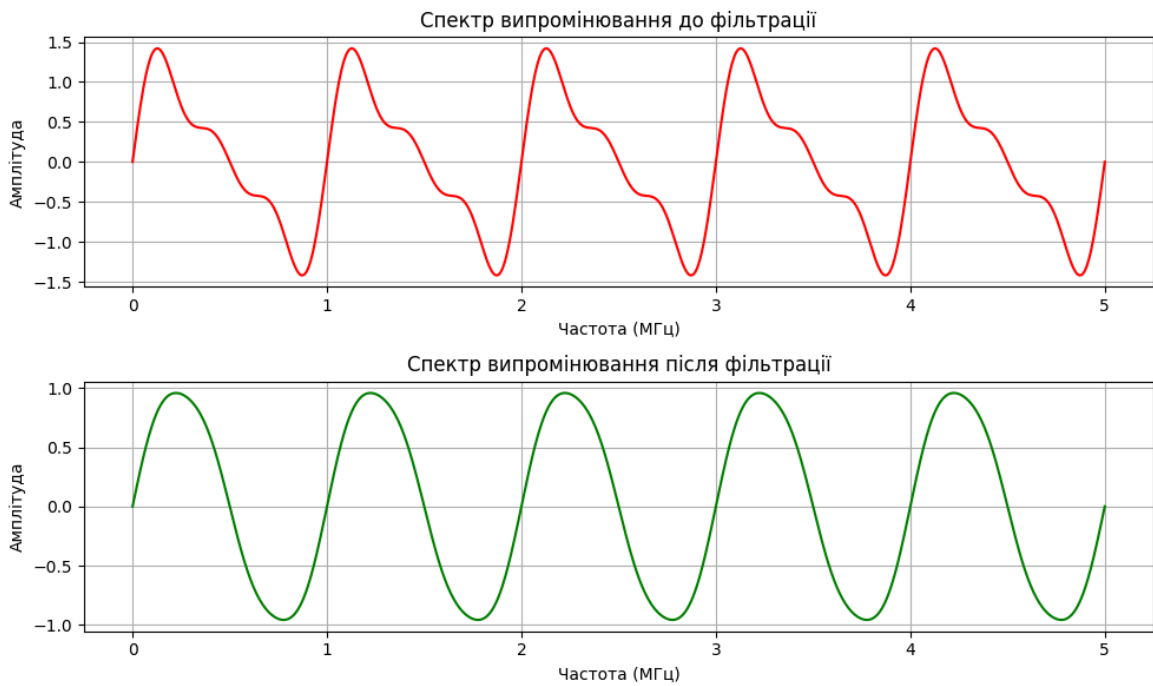


Рисунок 1.2 – Спектр випромінювання до і після фільтрації

Фільтри відбивного типу (фільтр-пробка) найефективніші на частотах нижче 1 ГГц, оскільки вони здатні відображати енергію на гармоніках, суттєво впливаючи на режим вихідного каскаду. Однак на вищих частотах більш ефективними є поглинаючі фільтри, оскільки вони краще зменшують рівень завад. В результаті комплексного використання таких фільтрів, разом з іншими заходами, можна досягти значного зниження рівня гармонік – це в межах 40–60 дБ відносно основного випромінювання.

Іншим важливим механізмом виникнення небажаних випромінювань на гармоніках є нелінійні ефекти в попередніх і задаючих ланцюгах. Такі випромінювання особливо характерні для передавачів, що використовують множення частоти задаючого генератора в попередніх каскадах. Хоча проміжна та кінцева фільтрація несучого коливання допомагає знизити рівень на гармоніках, повністю усунути їх складові спектра на субгармоніках не завжди вдається.

1.3 Аналіз впливу індустриальних радіозавад

Індустриальні радіозавади – це електромагнітні завади, що виникають внаслідок діяльності промислових об’єктів: електричні мережі, промислове обладнання та засоби автоматизації. Вони можуть поширюватися на великі відстані і спричиняти перешкоди в роботі радіоелектронних пристроїв, особливо в діапазонах високих частот [13, 16, 19, 20, 21, 23, 27, 32]. Основними джерелами таких завад є високовольтні лінії електропередачі (ЛЕП), генератори, електричні двигуни та промислове обладнання (табл. 1.4).

Розвиток енергетики призводить до створення потужних електричних мереж. Сучасні електростанції можуть генерувати потужність до кількох мільйонів кВт, а високовольтні лінії електропередачі (ЛЕП) досягають напруги до 750 кВ змінного струму при частоті 50 Гц, а також 800–1500 кВ постійного струму. Такий високий рівень напруги створює значний потенціал для виникнення електромагнітних завад, особливо в радіодіапазоні.

Найбільший вплив на радіоелектронні системи мають ЛЕП, через коронні розряди, витоки струму та втрати в ізоляторах. Це відбувається в умовах стаціонарного режиму навантаження лінії, коли струм і напруга залишаються стабільними, і створюються постійні електричні поля. В результаті цього виникають викиди електромагнітної енергії, що можуть істотно впливати на радіосигнали, які проходять поряд із лініями передачі, викликаючи завади.

Таблиця 1.4 – Джерела виникнення індустриальних радіозавад та їх вплив*

Джерело радіозавди	Опис	Вплив на радіоелектронні системи	Заходи мінімізації завад
Високовольтні лінії	Лінії з напругою до 750 кВ змінного струму та	Викликають коронні розряди,	Удосконалення якості

електропередачі (ЛЕП)	800-1500 кВ постійного струму.	витоки струму, втрати в ізоляторах. Створюють електромагнітні завади в радіодіапазоні.	ізоляторів, фільтрація.
Генератори та електричні двигуни	Електричні пристрої, що створюють потужні електричні поля та радіозавади.	Впливають на радіоелектронні пристрої через низькочастотні завади.	Екранування, фільтрація, стабілізація частоти.
Промислове обладнання та засоби автоматизації	Пристрої, що використовуються в промисловості для керування та автоматизації процесів.	Генерують завади через електричні пульсації та модуляційні ефекти.	Застосування фільтрів і додаткове екранування.
Втрати в ізоляторах ЛЕП	Дефекти в матеріалі ізоляції (тріщини, пористість, забруднення) призводять до зниження ефективності ізоляції.	Підвищують рівень коронних розрядів, що створюють електромагнітні завади.	Оновлення і очищення ізоляторів, використання нових матеріалів.

** розроблено автором на основі даних з відкритих джерел*

Втрати в ізоляторах ЛЕП значною мірою обумовлені дефектами в матеріалі ізоляції. Це можуть бути волосяні тріщини на зовнішній поверхні, внутрішні тріщини, пористість кераміки або глазури, раковини в порцеляні та забруднення поверхні ізоляторів. Коли ці дефекти досягають критичного рівня, вони призводять до зниження ефективності ізоляції, що в свою чергу призводить до виникнення коронних розрядів та парових розрядів. Для цього важливими є параметри питомого поверхневого опору (p_s), який має бути більшим за 10^{12} Ом, та об'ємного опору (i_p), що перевищує 10^{13} Ом [13, 16, 27, 32].

Як видно з табл. 1.4, існують також фізичні умови, за яких ізоляційні матеріали не можуть виконувати свою роль на належному рівні. Для таких ситуацій важливими є параметри питомого поверхневого та об'ємного опору діелектрика. Коли питомий поверхневий опір (p_s) перевищує 10^{12} Ом, а

об'ємний опір (ρ_p) – 10^{13} Ом, на ізоляторах можуть виникати коронні розряди, що є джерелами радіозавад.

У стаціонарному режимі навантаження ЛЕП, коли струм і напруга залишаються стабільними, за умови високої напруги на лінії, виникають постійні електричні поля навколо проводів. Це може викликати втрати енергії через коронні ефекти і створювати додаткові електромагнітні завади, які знижують ефективність роботи радіоелектронних пристроїв, що працюють біля цих ліній.

Загалом, електромагнітні завади, пов'язані з високовольтними ЛЕП, вимагають застосування спеціальних засобів для їх мінімізації, таких як покращення якості ізоляторів, використання фільтрів для придушення завад та впровадження технологій, що дозволяють знижувати рівень коронних розрядів у лініях електропередач (рис. 1.3).

Як видно з рис. 1.3, коронні та часткові розряди викликають періодичні коливання сигналу, внаслідок чого виникають суттєві завади в радіоелектронних системах, особливо в зонах з високою напругою в електричних мережах.

У таких умовах, при відповідних значеннях питомих опорів матеріалів, коли струми провідності вже не мають суттєвого впливу на розподіл напруженості електричного поля, часткові розряди на ізоляторах починають проявлятися як ємнісні процеси. Ці розряди супроводжуються виникненням пачок імпульсів, чия кількість безпосередньо залежить від напруги в лінії. Зі збільшенням напруги, кількість імпульсів в пачці зростає. Наприклад, для ліній з напругою 6/10 кВ у пачці може бути 4-6 імпульсів, а для ліній ДПР цей показник зростає до 5-9 імпульсів [13, 16].

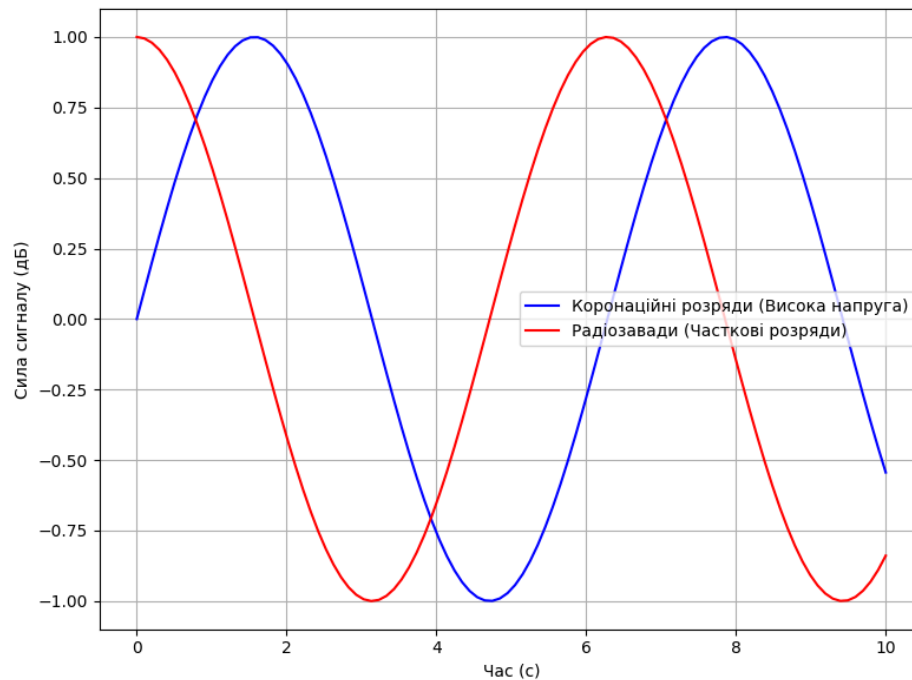


Рисунок 1.3 – Вплив коронних та часткових розрядів на радіозв'язок

Додатково радіозавади контактного походження можуть виникати не тільки через комутаційні процеси в мережах живлення, але й через порушення контакту між окремими ізоляторами в гірлянді. Наприклад, між товкачем і шапкою сусідніх ізоляторів, коли між ними потрапляє бруд. Такий дефект служить місцем для виникнення часткових розрядів і значно посилює інтенсивність радіозаводів.

При наявності напруги на проводах лінії виникає електричне поле, напруженість якого залежить від величини напруги. Якщо на поверхні проводів є неоднорідності, такі як подряпини, задирки або забруднення, то ці ділянки утворюють області з підвищеними градієнтами потенціалу. Коли градієнт потенціалу перевищує пробивну напругу повітря, виникає електричний розряд, відомий як місцевий коронний розряд. Цей розряд проявляється у вигляді коротких імпульсів струму ($10^{-7} - 10^{-8}$ с), які виникають навколо проводів, перпендикулярно поверхні.

Рівень радіозавод, що виникають через коронні розряди, значною мірою залежить від стану поверхні проводів. Тому основним методом зменшення таких завод є ретельне очищення проводів від бруду і частинок.

Допустимі індустріальні радіозавади регламентуються ГОСТом (табл. 1.5).

Як видно з таблиці, для різних типів високовольтних ліній електропередачі (ЛЕП) і електричних підстанцій існують встановлені допустимі рівні радіозаводів у смузі частот 0,5 ... 1000 МГц.

Таблиця 1.4 – Допустимий рівень завад [13, 16]

Джерело радіозавади	Допустимий рівень завад (дБмкВ/м)
ЛЕП 0,5-50 кВ	-50
ЛЕП 110-220 кВ	-48
ЛЕП 330-750 кВ	-45
Підстанції 0,5-50 кВ	-52
Підстанції 110-220 кВ	-50
Підстанції 330-750 кВ	-47

Найбільший рівень завад спостерігається для ЛЕП з напругою 0,5-50 кВ, де допустимий рівень завад становить -50 дБмкВ/м. Для підстанцій з напругою 0,5-50 кВ рівень завад є аналогічним, що свідчить про однаковий вплив на радіоелектронні системи на цих етапах енергетичної інфраструктури.

У разі високовольтних ЛЕП напругою 110-220 кВ і 330-750 кВ допустимі рівні завад дещо знижуються, що може бути пов'язано з хорошою (поліпшеною) ізоляцією або більш ефективними методами зменшення радіозаводів у таких лініях.

Вимірювання радіозаводів від підстанцій також проводиться аналогічно. Значні відхилення від нормативів можуть виникати в ЛЕП через перенапруження, які бувають комутаційними та квазістаціонарними. Комутаційні перенапруги спричиняються раптовими змінами в схемах, такими як короткі замикання або аварійні відключення, що викликають великі струми до 100 кА та коливальні перехідні процеси. Квазістаціонарні перенапруги обумовлені ємністю лінії і нелінійними ефектами в трансформаторах, що можуть спричинити завади як на основній частоті 50 Гц, так і на гармоніках у

діапазоні 0,1-3,5 кГц, особливо в трифазних лініях передачі з випрямлячами (тягові підстанції, плавильні печі тощо).

В табл. 1.5 показано основні параметри контактних мереж і електричних транспортних засобів, що впливають на рівень радіозаводів. Радіозаводи варіюються залежно від типу електричного транспорту і рівня напруги, з яким вони працюють. Найбільший рівень радіозаводів спостерігається в електровозах і приміських електропоїздах, де вплив на частотах 0,15-300 МГц досягає значних значень.

Це пов'язано з високими струмами, що проходять через контактні мережі і генерують завади.

Таблиця 1.5 – Радіозавади контактних мереж та електричного транспорту*

Тип транспорту/джерела радіозаводів	Напруга/Характеристика	Рівень радіозаводів (дБмкВ/м)
Міський електротранспорт (трамвай)	600-800 В постійного струму	-
Електрифіковані магістральні залізниці (постійний струм)	3300 В постійного струму	-
Електрифіковані магістральні залізниці (змінний струм)	27,5 кВ змінного струму	-
Електровози	65 ... 40 дБмкВ / м (0,15...30 МГц)	до 40 дБмкВ/м (на 300 МГц)
Приміські електропоїзди	60 ... 34 дБмкВ / м (0,15 ... 300 МГц)	до 34 дБмкВ/м (до 300 МГц)

**складено автором на основі даних з відкритих джерел*

Також важливо відзначити, що рівень завад може суттєво варіюватися залежно від типу енергозабезпечення та особливостей роботи електричного транспорту, що вимагає ретельного контролю та заходів щодо зниження цих впливів на радіоелектронні пристрої.

Протишумні пристрої на залізничному транспорті включають системи, що зменшують рівень радіозаводів як у діапазоні поїзного радіозв'язку, так і на частотах радіомовлення. Вони також знижують вплив радіозаводів від

внутрішнього електрообладнання рухомого складу, зокрема через порушення контакту між струмоприймачем та контактним проводом [19, 20, 21, 23, 27].

Для зниження рівня радіозавад, що виникають при роботі внутрішнього обладнання, необхідно обмежити шляхи проникнення завад у високовольтні лінії, що проходять через дах електровоза або електропоїзда, а також у контактну мережу через струмоприймач. Для цього використовуються спеціальні пристрої, такі як блокувальні конденсатори, підключені до високовольтного вводу або вторинних обмоток силових трансформаторів, а також замикаючі контури, що включаються в шини високовольтного введення.

Додатково, для зниження рівня радіозавад, що виникають через порушення контакту між контактним проводом і полозом струмоприймача, застосовуються електричні фільтри, що збільшують опір у ланцюзі розтікання струмів завад. Ці фільтри складаються з дроселів для рухомого складу змінного струму та замикаючих контурів, настроєних на частоту поїзного радіозв'язку.

Для локомотивів і поїздів, що оснащені радіостанціями та працюють у мережі живлення, де створюються інтенсивні радіозаводи, повинні застосовуватися індивідуальні фільтри для придушення завад. Типовими прикладами є фільтри ФП-5 і ФП-6, які є симетричними П-образними фільтрами низьких частот (ФНЧ) [19, 20, 21, 23, 27].

У табл. 1.5 наведено удосконалені характеристики фільтрів ФП-5 і ФП-6, зокрема, підвищена здатність до пропускання потужних струмів (до 20 А для ФП-6), що дозволяє використовувати їх в умовах інтенсивної радіозавадної обстановки.

Наведені характеристики фільтрів, таких як ФП-5 і ФП-6, показують їхню важливість у процесі зниження рівня радіозавад, що виникають внаслідок роботи електрообладнання на залізничному транспорті. Проте, для досягнення більш комплексного захисту від завад на електровозах змінного струму, окрім застосування фільтрів, необхідно враховувати і інші заходи. Зокрема, важливим є впровадження спеціалізованих схем, які дозволяють більш ефективно

придушувати радіозавади та забезпечити стабільність роботи радіоелектронних систем на транспорті.

Таблиця 1.5 – Характеристики фільтрів ФП-5 та ФП-6 *

Параметри	ФП-5	ФП-6
Смуга частот	0,15...1000 МГц	0,15...1000 МГц
Число проводів	2	2
Робочий струм	10 А	20 А
Затухання, що вносяться	60 дБ	60 дБ
Номинальна напруга		
постійного струму	500 В	500 В
змінного струму (50 Гц)	220 В	220 В
змінного струму (400 Гц)	115 В	115 В
Температурний діапазон	-40°C до +85°C	-40°C до +85°C
Ефективність фільтрації	99%	99%
Габаритні розміри	150 × 80 × 50 мм	160 × 90 × 55 мм
Механічна стійкість	Витримує вібрації до 5G	Витримує вібрації до 7G

* складено автором на основі даних з відкритих джерел

На рис. 1.4 та рис. 1.5 показані схеми придушення радіозавад на електровозах змінного та постійного струмів. Ці схеми поєднують фільтраційні та захисні елементи, що дозволяють знижувати рівень завад і забезпечувати належну роботу радіоелектронних систем на різних типах електровозів.

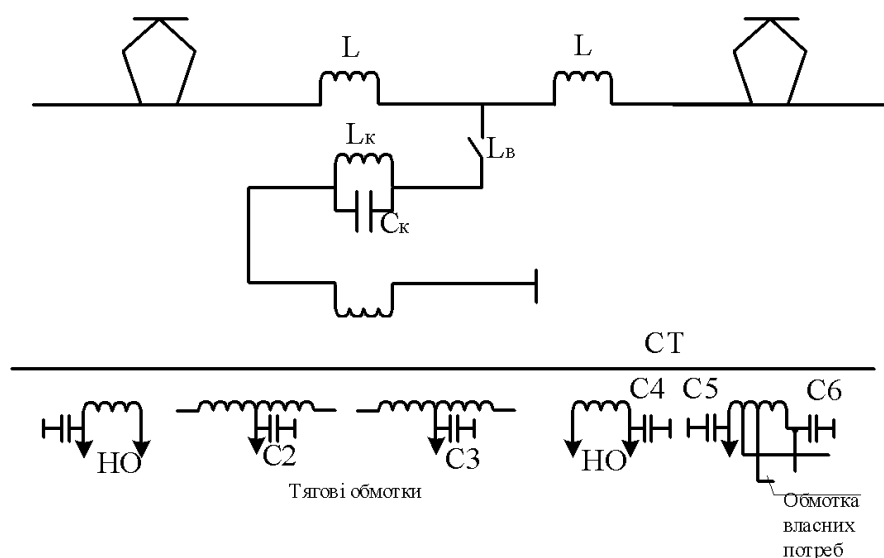


Рисунок 1.4 – Схема придушення радіозавад на електровозах змінного струму з використанням фільтраційних та захисних елементів

Протизавадні пристрої для електровозів змінного струму, показані на рисунку 1.4, включають в себе кілька основних елементів для ефективного придушення радіозавад. Зокрема, до складу пристрою входять дроселі (L), встановлені на кожному струмоприймачі, замикаючий контур ЛКСК, налаштований на частоту поїзного радіозв'язку (2,13 МГц) та підключений до ланцюга високовольтного введення. Блокувальні конденсатори (С1-С6) підключаються до кінцевих висновків вторинних несекціонованих обмоток АЛЕ силового трансформатора. Ємність цих конденсаторів варіюється від 0,01 до 0,05 мкФ, а їх номінальна напруга становить 10 кВ [20, 21, 23, 27].

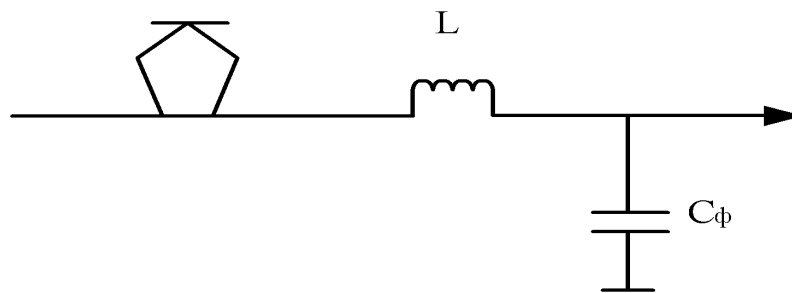


Рисунок 1.5 – Схема придушення радіозавад на електровозах постійного струму із застосуванням комбінації фільтрів і захисту від завад

Щодо протизавадних пристроїв для електропоїздів постійного струму, як показано на рис. 1.5, вони складаються з фільтру LCф, який встановлюється на кожному радіоприймачі. Окрім цього, до складу пристроїв входять фільтри, що забезпечують допустиме значення напруги радіозавад у бортовій мережі, зокрема фільтри для регуляторів напруги (типи РРН, ВР) та фільтри для генераторів управління [23, 27].

Для забезпечення належної роботи електричних потягів та зниження впливу радіозавад необхідне оснащення тепловозів, дизель-поїздів та інших транспортних засобів, що мають електричну передачу, спеціальними

протизавадними пристроями. До таких пристроїв відносяться фільтри для головного генератора, тягових двигунів, допоміжних електричних машин, а також регулятори напруги бортової мережі. Важливою складовою є впровадження протизавадних пристроїв у механізми, що створюють значний рівень завад, такі як колекторні електродвигуни та генератори, що є основними джерелами інтенсивних радіозавад через зміну опору в процесі роботи щіток на колекторних пластинах.

Особливо інтенсивні радіозавади виникають від апаратів дугового зварювання, спектри випромінювань яких можуть бути чутні на кілька кілометрів навіть у міських умовах. Суттєвим чинником є також зростання кількості автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння, що вимагає врахування радіозавад від системи запалювання, які можуть досягати рівня до 20 дБмкВ/м на відстані 10 м.

Таким чином, комплексний підхід до зменшення радіозавад є критично важливим для забезпечення стабільної роботи електричних транспортних засобів

2 АНАЛІЗ ПРИЧИН І ТИПІВ ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ

2.1 Класифікація похибок вимірювання

Завдання вимірювання точності та визначення похибок є критичним в усіх галузях науки, техніки та промисловості, особливо в таких складних системах, як залізничний транспорт. Вимірювання є основою для забезпечення належного контролю параметрів технічних засобів, що безпосередньо впливають на безпеку та ефективність роботи транспорту. Точність вимірювань є важливою для забезпечення стабільної роботи систем управління рухом поїздів, моніторингу стану контактної мережі, а також для підтримання належного рівня електричної та технічної безпеки [17, 18, 19, 23, 24, 26, 29, 33].

Актуальність вимірювання похибок у системах залізничного транспорту зростає у зв'язку з постійним впровадженням нових технологій, підвищенням вимог до точності та надійності обчислень, а також з необхідністю забезпечення безпеки руху та збереження вантажів. Похибки вимірювань можуть виникати через різноманітні чинники, зокрема через неточності в роботі датчиків, зовнішні завади, умови експлуатації або технічні характеристики вимірювальних приладів.

У випадку залізничного транспорту особливу роль відіграють вимірювання, що стосуються контролю за електричними та механічними параметрами, наприклад, при вимірюванні стану контактних мереж, навантаження на потяги, температури та вологості, а також рівня електричних та радіозавад. Тому розуміння видів похибок, їх класифікація та аналіз причин їх виникнення є важливим кроком для забезпечення якості і точності вимірювань.

Похибки вимірювань можна класифікувати за різними ознаками та критеріями, що дозволяє систематизувати їх і забезпечити більш точний контроль за точністю вимірювань (рис. 2.1) [17, 18, 24, 26, 29, 33].

До основних критеріїв класифікації похибок вимірювань належать

наступні.

1. За джерелом виникнення. Цей критерій класифікації визначає, з яких причин виникають похибки.

2. За закономірністю або характером змінювання (в часі або за ансамблем). Цей критерій класифікації вказує на те, як змінюється похибка з часом або під час серії вимірювань.

3. За формою або способом відображення кількісних характеристик похибки вимірювань. Цей критерій класифікації визначає, як описується похибка, тобто як ми можемо виразити її кількісно.

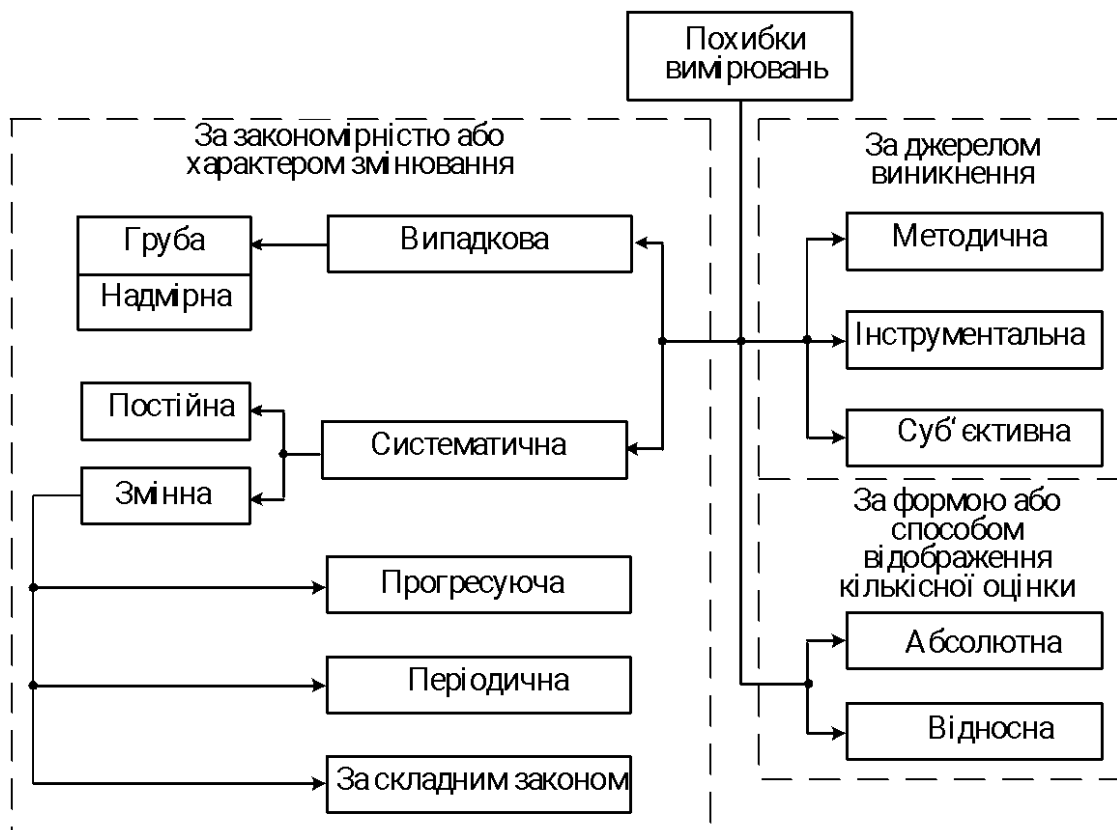


Рисунок 2.1 – Узагальнююча схема типів похибок вимірювання

Для подальшого аналізу, розглянемо більш детально кожен з критеріїв

класифікації похибок, що дозволить глибше зрозуміти їх природу та визначити способи мінімізації їх впливу на результати вимірювань. Це дозволить перейти до розробки методики вимірювання рівнів радіозавад, що є метою дипломної роботи.

2.2 Похибки вимірювання, що виникають через джерела впливу

У сучасній метрології важливим аспектом є чітке розмежування похибок вимірювань за джерелами їх виникнення. У цьому контексті виділяються три основні категорії похибок: методичні, інструментальні та суб'єктивні. Кожен із цих типів похибок має свою специфіку і потребує окремого аналізу для забезпечення точності вимірювань, особливо у складних технічних умовах, таких як залізничний транспорт [17, 18, 19, 23, 24, 26, 29, 33].

1. Методичні похибки. Виникають через недосконалість самого методу вимірювання, незалежно від використовуваних засобів вимірювання (ЗВТ) (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Види методичних похибок *

Тип похибки	Опис	Приклад
Неадекватність фізичної моделі	Модель не відповідає реальним характеристикам об'єкта.	Вимірювання напруги з вольтметром, що не враховує гармоніки в сигналі.
Зміна залежності між величинами	Використання проміжних перетворень, які впливають на результат.	Використання перетворювачів для вимірювання температури, що дають похибки через неідеальне перетворення.
Похибка передавання величини	Неідеальне з'єднання між об'єктом і ЗВТ, що спотворює сигнал.	Втрата сигналу через погано з'єднані проводи або погані контакти.

**складено автором на основі даних з відкритих джерел*

Як видно з табл. 2.1, методичні похибки включають:

– неадекватність фізичної моделі об'єкта вимірювання: коли модель, що використовується для оцінки величини, не відповідає реальним характеристикам об'єкта. Наприклад, якщо для вимірювання змінної напруги використовується вольтметр, розрахований тільки на синусоїдальні сигнали,

внаслідок наявності гармонік у реальному сигналі виникає методична похибка;

– зміна залежності між вимірюваною та проміжною величинами: коли під час вимірювань використовується перетворення, яке впливає на результат;

– передавання вимірюваної величини: похибка може виникати через неідеальне з'єднання між об'єктами вимірювання та ЗВТ.

2. Інструментальні похибки (приладові). Ці похибки залежать від властивостей або недосконалості самих ЗВТ. Вони можуть виникати через:

– невідповідність характеристик вимірювальних приладів вимогам задачі;

– вплив зовнішніх факторів на роботу ЗВТ, таких як температура, вологість чи вібрації.

3. Суб'єктивні похибки. Цей тип похибок виникає через вплив оператора, який виконує вимірювання. Вони можуть бути обумовлені:

– психофізіологічними факторами: здатність до концентрації уваги, швидкість реакції, фізичний стан оператора;

– взаємним розташуванням очей і шкали на аналогових приладах (похибка паралакса);

– округленням показів приладу: відмінності у зчитуванні даних, залежно від того, хто проводить вимірювання. На рис. 2.2 показано вплив гармонік.

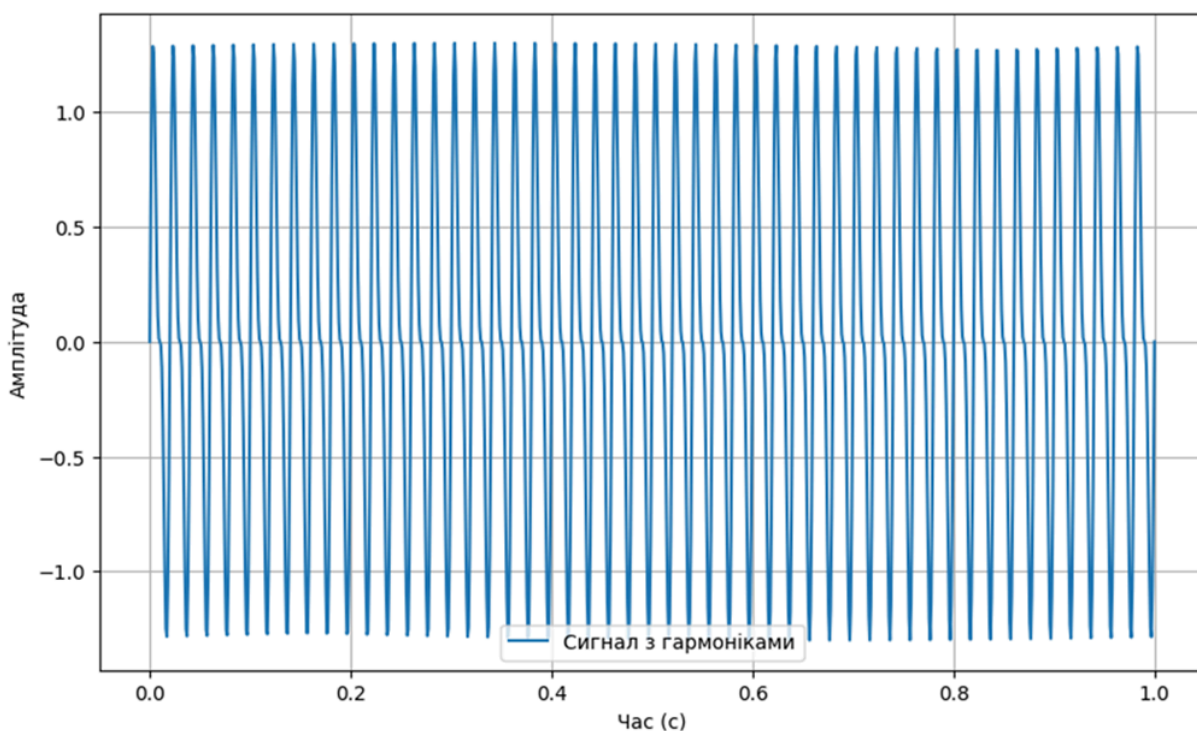


Рисунок 2.2 – Вплив гармонік на вимірювання

Як видно з рисунку, основний синусоїдальний сигнал (50 Гц) поєднується з гармоніками (2-й гармонік), що змінює форму сигналу. Така комбінація може спричинити похибку вимірювання, якщо вимірювальний прилад не здатний врахувати ці гармоніки. Тобто на практиці важливо не лише оцінити ці похибки, але також і розробити методи для їх мінімізації. А саме.[17, 18, 24, 26, 29, 33].

1. Використання цифрових вимірювальних приладів для автоматичного відліку показників.
2. Адаптація методів вимірювань до специфічних умов (наприклад, врахування особливостей залізничного транспорту).
3. Введення регламентованих норм для кожного типу похибок, щоб обмежити їхній вплив на точність вимірювань (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Допустимі методичні похибки для різних типів вимірювань за ГОСТами

Тип вимірювання	ГОСТ/Норматив	Допустима похибка	Коментар

Вимірювання змінної напруги	ГОСТ 8.171-87	$\pm 0.5\%$	Для синусоїдальних сигналів, без гармонік
Вимірювання змінного струму	ГОСТ 8.171-87	$\pm 1.0\%$	Для синусоїдальних сигналів
Частота (від 1 до 300 МГц)	ГОСТ 8.356-89	$\pm 0.2\%$	Для синусоїдальних сигналів, врахування гармонік
Рівень радіозавад на ЛЕП	ГОСТ 12.1.007-76	до 60 дБмкВ/м	Для високовольтних ліній електропередачі
Похибки при використанні аналізаторів спектра	ГОСТ 24830-81	до $\pm 1.0\%$	Для вимірювання гармонік на ЛЕП та електричних мережах

**складено автором на основі даних з відкритих джерел*

Як видно з табл.2.2, допустимі межі похибок для кожного типу вимірювання строго визначені стандартами ГОСТ[13, 16, 18, 19, 23, 24, 26, 29, 33].

Однак навіть при наявності цих стандартів, врахування усіх джерел похибок та точне налаштування методів вимірювань є необхідним для досягнення високої точності результатів вимірювань, особливо для підприємства критичної інфраструктури, яким є залізничний транспорт.

2.3 Аналіз впливу похибок вимірювань за закономірністю їх змінювання

Похибки вимірювань, в залежності від їх закономірності чи характеру змінювання, можна класифікувати на випадкові та систематичні. Це важливо для аналітичного розрахунку повної похибки вимірювань, оскільки різні типи похибок потребують використання різних математичних методів для підсумовування та мінімізації їх впливу [13,16, 17, 18, 19, 33].

1. Випадкові похибки

Випадкові похибки виникають через непередбачувані зміни умов вимірювання та зовнішні фактори, що не можуть бути заздалегідь передбачені

або контролювані. Вони зумовлені, наприклад, нестабільністю в роботі приладів або змінами умов навколишнього середовища, таких як температура чи вологість.

Характеристики випадкових похибок:

– випадкові похибки змінюються без певної закономірності при повторних вимірюваннях однієї й тієї ж величини;

– вони піддаються зменшенню за допомогою статистичної обробки багатьох вимірювань;

– випадкові похибки не можуть бути усунені повністю, але їхній вплив можна мінімізувати, збільшуючи кількість вимірювань.

2. Систематичні похибки (табл. 2.3). Відрізняються від випадкових тим, що вони змінюються за певним законом і можуть бути передбачені або зменшені.

2.1 Постійні систематичні похибки:

– мають сталу величину і не змінюються від вимірювання до вимірювання;

– виникають через недосконалість вимірювальних приладів або методів вимірювання;

– систематичні похибки важко виявити без спеціальних перевірок або калібрування.

2.2 Змінні систематичні похибки – змінюються в часі або під час вимірювань.

Наприклад, це можуть бути похибки, викликані старінням компонентів вимірювального приладу, або похибки через зміни умов навколишнього середовища (температура, вологість).

2.3 Прогресуючі (дрейфові) похибки

Прогресуючі похибки змінюються монотонно у часі, збільшуючись або зменшуючись. Це може бути викликано старінням компонентів вимірювального приладу, таких як зниження напруги в акумуляторах чи зменшення опору елементів.

Таблиця 2.3 – Характеристика систематичних похибок *

Тип похибки	Опис	Приклад
Постійні систематичні	Незмінні з часом похибки, викликані дефектами приладів чи методами.	Неточність шкали вимірювального приладу.
Змінні систематичні	Змінюються в часі або під час вимірювання за певним законом.	Старіння резисторів в приладі, зміни через температуру.
Прогресуючі (дрейфові)	Монотонно збільшуються чи зменшуються з часом.	Зменшення напруги акумулятора, зміна параметрів через старіння.
Похибки з складним законом	Виникають через комбінацію факторів, кожен з яких змінюється.	Вплив температури, вологи, механічні зміни.

* складено автором на основі даних з відкритих джерел

Особливості прогресуючих похибок:

– можуть бути скориговані введенням поправок у вимірювання на певних інтервалах часу;

– вимагають безперервної корекції для зменшення їх впливу.

2.4 Похибки, що змінюються за складним законом

Ці похибки виникають через взаємодію кількох факторів, кожен з яких змінюється за своїм законом. Вони складніші для прогнозування та коригування, оскільки їх природа комбінована.

Особливості таких похибок [17, 18, 19, 29, 33].

– їх складно передбачити або коригувати без спеціальних досліджень і додаткових вимірювань;

– можуть бути викликані не тільки технічними, а також фізичними змінами у навколишньому середовищі (наприклад, вплив температури, магнітних полів тощо).

Математичне сподівання повної похибки вимірювань є її систематичною складовою, яку можна подати як формулу:

$$M = \sum \Delta x_i \quad 2.1$$

де M – загальна помилка;

Δx_i – окремі компоненти помилки.

Якщо постійна систематична похибка вимірювань відома, вона коригується за допомогою поправок:

$$X_{\text{виправлений}} = X - \Delta x_{\text{систематична}} \quad 2.2$$

де $X_{\text{виправлений}}$ – виправлений результати вимірювання;

X – вхідний результат вимірювання;

$\Delta x_{\text{систематична}}$ – величина систематичної похибки.

3. Грубі похибки [17, 18, 19, 23, 24, 26, 29, 33].

Грубі похибки – це похибки, які істотно відрізняються від нормальних значень і виникають через помилки оператора або несправність приладів. Ці похибки можна виявити й усунути через повторні вимірювання або контроль результатів.

Характеристики грубих похибок:

- виникають через помилки при застосуванні ЗВТ, короточасні зміни в електричних колах або механічні удари;
- часто з'являються через помилки оператора (наприклад, неправильний відлік показів);
- повинні фільтруватись за допомогою статистичних методів.

У загальному вигляді, якщо припустити, що повна похибка результату вимірювання складається з систематичної та випадкової похибки, то математичне сподівання (очікування) повної похибки можна розглядати як суму систематичної та випадкової складових. Абсолютна систематична складова

визначається як постійна частина похибки, тоді як центрована випадкова складова є змінною величиною, яка змінюється випадковим чином. Тому, за будь-яким законом розподілу, абсолютну повну похибку вимірювань можна подати у вигляді:

$$\Delta = \Delta_c + \overset{\circ}{\Delta}, \quad (2.3)$$

де $\Delta_c = M[\Delta]; \overset{\circ}{\Delta} = \Delta - M[\Delta] = \Delta - \Delta_c;$

M – математичне сподівання (очікування) повної похибки.

Крім того, якщо постійна систематична похибка Δ_c відома, її можна коригувати, щоб отримати виправлений результат вимірювання \tilde{X} , використовуючи формулу:

$$\tilde{X} = X - \Delta_c. \quad (2.4)$$

Завдяки цьому коригуванню при розрахунках отримуємо більш точніший результат вимірювання.

У випадках, якщо ж систематична похибка невідома або її неможливо точно визначити, результат вимірювання вважається невивиправленим, хоча такий термін і не застосовується на практиці.

2.4 Кількісні характеристики похибок вимірювань: способи вираження та порівняння

Кількісні характеристики похибок вимірювань можуть бути представлені у двох формах: абсолютній та відносній. Кожна з цих форм має своє значення для визначення точності вимірювань [13, 17, 24, 26, 29, 33]. Розрізняють

абсолютні та відносні похибки, що є важливими для аналізу результатів і мінімізації їх впливу (табл. 2.4).

Таблиця 2.4 – Кількісне відображення похибок вимірювання

Тип похибки	Опис	Формула	Приклад
Абсолютна похибка	Різниця між вимірним значенням і істинним значенням	$\Delta X = X - X_y$	Вимірювання напруги: 220 В (похибка 0,1 В)
Відносна похибка	Відношення абсолютної похибки до істинного або виміряного значення	$X_{\text{відносна}} = X/\Delta X$	Відносна похибка напруги 0,1% для вимірювання 220 В
Поправка	Значення, яке додається до результату для усунення систематичних похибок	$X_y = X + \Pi$	Поправка на систематичну похибку в градусі при вимірюванні температури

1. Абсолютна похибка вимірювання. Визначається як різниця між результатом вимірювання X та істинним значенням вимірюваної величини. Якщо істинне значення невідоме, використовують умовно істинне значення X_y , отримане за результатами більш точних вимірювань. Математично формула розрахунку має наступний вигляд:

$$\Delta X = X - X_i = X - X_y. \quad (2.5)$$

До абсолютної похибки також відноситься поняття «поправка» (в формулі показик Π), яка дозволяє усунути систематичні похибки $\Delta_c = \Delta X$. Тоді формула 2.5 приймає наступний математичний вираз:

$$X_y = X + (-\Delta X) = X + \Pi. \quad (2.6)$$

З математичного виразу (2.6) можна зробити висновок, що якщо до результату вимірювання X додати абсолютну похибку з протилежним знаком, то отримаємо більш точне значення, умовно істинне (дійсне) значення вимірюваної величини X_y або виправлений результат вимірювання. Це дозволяє уточнити результат вимірювання X .

Введення поправки до результату вимірювання здійснюється для усунення постійної систематичної похибки. Постійна систематична похибка, яка "зсуває" всі результати вимірювань на однакову величину, ускладнює її виявлення. Це, у свою чергу, створює труднощі в процесі введення відповідної поправки, адже ця похибка не проявляється при повторних вимірюваннях і може бути виявлена лише за допомогою спеціальних перевірок або калібрування.

2. Коригувальний коефіцієнт. Використовується для зменшення мультиплікативних систематичних похибок, коли результат вимірювання множиться на коефіцієнт, що компенсує частину цієї похибки. Це дозволяє отримати більш точний результат вимірювання, усунувши вплив систематичних похибок, що виникають через недосконалість вимірювального процесу або обладнання. Формула коригувального коефіцієнта:

$$\tilde{X} = k_k X, \quad (2.7)$$

де k_k – показник коригувальний коефіцієнт.

Абсолютна похибка вимірювання, хоча і важлива для оцінки точності результату, не може бути єдиним індикатором цієї точності. Вона лише характеризує відхилення від істинного значення, однак сама по собі не дає уявлення про точність вимірювань. Наприклад, якщо абсолютна похибка вимірювання напруги складає 0,1 В, то ця величина буде мати різний вплив

залежно від рівня вимірюваної величини.

Уявімо, що вимірюються дві величини: напруга 10 В та 100 В. Якщо для обох вимірювань абсолютна похибка складає 0,1 В, то на значенні 100 В ця похибка буде меншою порівняно з вимірюванням 10 В. Це означає, що при вимірюванні високих значень похибка має менший відносний вплив на результат, що вказує на важливість порівняння похибки з самими виміряними величинами для правильного оцінювання точності вимірювань.

Виходячи з цього, для більш коректної оцінки точності вимірювань необхідно використовувати відносну похибку, яка дає змогу оцінити похибку вимірювань незалежно від величини вимірюваної фізичної величини.

3. Відносна похибка вимірювань. Відображає пропорцію між абсолютною похибкою та самою величиною, що вимірюється, дозволяючи таким чином адекватно порівнювати точність вимірювань різних величин. Відносна похибка вимірювань (у відносних одиницях) визначається за формулою:

$$\delta X = \Delta X / X_i = \Delta X / X_y = \Delta X / X, \quad (2.8)$$

або відображається у відсотках:

$$\delta X = (\Delta X / X_i) 100 = (\Delta X / X_y) 100 = (\Delta X / X) 100, \%$$

Відносна похибка вимірювання тісно пов'язана з кількісним визначенням точності вимірювань. Іноді точність вимірювань оцінюють як величину, зворотну до модуля відносної похибки. Наприклад, чим менша відносна похибка, тим вища точність вимірювань. Проте в науковій і технічній практиці зазвичай говорять саме про відносну похибку вимірювання, а не про точність. При проведенні вимірювань необхідно обов'язково обчислювати абсолютну похибку, оскільки вона є важливою для коректного запису результату. Однак для порівняння точності різних вимірювань більш зручним є використання відносної похибки, яка дає змогу оцінити точність результатів вимірювання.

3 РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ВИМІРЮВАНЬ РАДІОЗАВАД В УКХ ДІАПАЗОНІ

3.1 Створення вимог до методики вимірювання рівнів радіозавад в УКХ діапазоні в умовах залізничного транспорту

Методика вимірювання рівнів радіозавад в УКХ діапазоні призначена для оцінки параметрів каналу поїзного радіозв'язку та його технічних засобів, які працюють в межах гектометрових і метрових хвиль, в автоматичному та ручному режимах.

Необхідність розробки цієї методики зумовлена сучасними вимогами до вимірювальної техніки, що передбачають впровадження новітніх технологій та цифрових методів, а також комп'ютерних технологій. Це дозволяє зменшити роль оператора в процесах вимірювання та обробки результатів, водночас забезпечуючи підвищений рівень контролю.

Методика вимірювання рівнів радіозавад в УКХ діапазоні є частиною комплексного обладнання для вагонів-лабораторій, яке використовується для автоматизації, телемеханіки та радіозв'язку на залізниці.

Метою цієї методики є поліпшення функціонування каналів поїзного радіозв'язку шляхом підвищення точності та достовірності вимірювань, а також розширення спектра контрольованих параметрів для прогнозування відхилень параметрів каналів від встановлених норм, з метою своєчасного коригування.

Це досягається завдяки створенню на основі сучасної обчислювальної техніки та методик вимірювання, які здатні автоматизувати комплексне вимірювання параметрів каналів та технічних засобів радіозв'язку, обробляти, фіксувати й архівувати результати вимірювань. Така система дозволяє збільшити обсяг вимірювань, підвищити їх точність та достовірність, а також прогнозувати якість каналів без додаткових витрат часу і ресурсів на персонал (табл. 3.1).

В табл.3.1 представлено основні аспекти запропонованої методики вимірювання.

Таблиця 3.1 – Описання характеристик методики вимірювань рівнів радіозавад в УКХ діапазоні

Аспект методики	Описання
Призначення методики	Оцінка параметрів каналу поїзного радіозв'язку та технічних засобів, що працюють в УКХ діапазоні (гектометрові і метрові хвилі) в автоматичному та ручному режимах.
Необхідність розробки	Зумовлена вимогами до сучасної вимірювальної техніки, включаючи використання цифрових методів і комп'ютерних технологій, а також зменшення ролі оператора.
Частина обладнання	Є складовою частиною обладнання вагонів-лабораторій для автоматизації, телемеханіки і радіозв'язку на залізниці.
Мета розробки	Поліпшення функціонування каналів радіозв'язку через підвищення точності і достовірності вимірювань та розширення спектра контрольованих параметрів.
Досягнення мети	Створення обчислювальної техніки для комплексного вимірювання параметрів каналів, обробки результатів, їх архівування і протоколювання.
Переваги методики	Підвищення обсягу і точності вимірювань, прогнозування якості каналу без збільшення трудовитрат персоналу.

Проведений в попередніх розділах аналіз, дозволив сформулювати основні завдання методики вимірювань рівнів радіозавад, а саме.

1. Забезпечення можливості вимірювання рівнів сигналів і завад у каналах ПРЗ в гектометровому, метровому та сантиметровому діапазонах довжин хвиль.

2. Вимірювання несучих частот і величини девіації частоти радіостанцій ПРЗ.

3. Визначення значень викличних і контрольних частот, а також величини нелінійних перекручувань.

4. Проведення вимірювань просторової координати вагонів-лабораторій для точного визначення їх місцезнаходження.

5. Візуалізація процесу вимірювань та відображення результатів у реальному часі.

6. Реєстрація та збереження результатів вимірювань з прив'язкою до часового та просторового контексту.

7. Архівування даних вимірювань для подальшої обробки та аналізу.

8. Обробка вимірювальних даних згідно з погодженою методикою, з урахуванням специфікацій і вимог до точності.

9. Генерація протоколів вимірювань, діаграм рівнів сигналів і завад по маршруту, актів вимірювань та іншої необхідної документації згідно з встановленими стандартами.

В сукупності, все це дозволяє обґрунтувати основні функціональні вимоги та задачі методики вимірювань для ефективного контролю за рівнями радіозавад у транспортних системах.

3.2 Основні положення методики вимірювання рівнів радіозавад

Сучасні вимірювальні системи повинні бути побудовані з урахуванням швидко змінюваних технологій, зокрема, з використанням персональних комп'ютерів, вбудованих обчислювальних систем і високопродуктивних сенсорів. Завдяки цьому, автоматизований вимірювальний комплекс для визначення рівнів радіозавад в УКХ діапазоні має бути інтегрованим рішенням, яке забезпечує надійність, точність і масштабованість, а також використовує передові технології для збору та обробки даних.

Незалежно від конкретної архітектури і використання вимірювальних засобів, автоматизований вимірювальний комплекс реалізується на основі персональної ЕОМ або вбудованих обчислювальних модулів, встановлених на

вагоні-лабораторії. Для підвищення зручності і ефективності всього процесу вимірювання, система повинна бути інтегрована з інтернетом речей (IoT) та мати можливість віддаленого моніторингу та управління.

До основних елементів запропонованої методики вимірювання належать.

1. Блок керування, реєстрації та відображення результатів вимірювань.

1.1 Використовує сучасні персональні ЕОМ або мобільні платформи для обробки даних в реальному часі.

1.2 Збирає дані з датчиків і вимірювальних приладів, обробляє їх за заданими алгоритмами і відображає на інтерактивних екранах, забезпечуючи зручне представлення результатів.

1.3 Інтерфейс повинен підтримувати різні формати візуалізації результатів (графіки, діаграми, карти), з можливістю збереження та архівування даних для подальшого аналізу.

2. Блок вимірювання параметрів каналів поїзного радіозв'язку.

2.1 Включає серійні вимірювальні прилади, що здатні точно вимірювати параметри каналів в УКХ діапазоні.

2.2 Прилади повинні бути адаптовані до специфічних умов залізничного транспорту, здатні працювати в жорстких умовах (високі/низькі температури, вібрація, шум).

3. Радіостанції та радіозв'язок.

3.1 Забезпечують вимірювання рівнів сигналу і завад для каналів поїзного радіозв'язку, які працюють в гектометровому і метровому діапазонах.

3.2 Важливо забезпечити можливість вимірювання на різних частотах і в різних умовах.

4. Датчики.

4.1 Вимірювання параметрів оточення (температура, вологість, швидкість руху) для точного коригування даних.

4.2 Важливо, щоб система підтримувала інтеграцію з додатковими датчиками для збору широкого спектра даних в реальному часі.

5. Функціональні вимоги.

5.1 Формування керуючих команд для автоматизації вимірювальних процедур.

5.2 Прогнозування і візуалізація результатів з можливістю коригування в реальному часі.

5.3 Інтеграція даних з різних джерел для комплексного аналізу рівнів радіозавад.

5.4 Безперервне архівування вимірюваних даних та підтримка їх зберігання в хмарних сервісах для доступу та аналізу з будь-якого місця.

6. Контроль справності апаратних засобів.

6.1 Вбудовані алгоритми для перевірки працездатності системи в реальному часі та оперативного виявлення несправностей.

6.2 Система має бути здатна до самодіагностики і відправляти автоматичні повідомлення операторам у випадку виявлення несправностей.

Завдяки застосуванню сучасних алгоритмів і обчислювальних технологій, методика вимірювання рівнів радіозавад в УКХ діапазоні повинна включати наступні етапи.

1. Збір та обробка даних в реальному часі з різних вимірювальних пристроїв.

2. Візуалізація результатів через інтерактивний інтерфейс для оперативного відображення параметрів.

3. Прогнозування відхилень від норми за допомогою математичних моделей і алгоритмів машинного навчання, що дозволяє оперативно реагувати на зміни і коригувати вимірювання.

4. Автоматичне протоколювання та архівування результатів вимірювань з подальшим доступом до них для аналітичних і перевірочних процедур.

5. Дистанційне керування та моніторинг через інтернет-платформи для управління вимірюваннями на відстані.

Таке поєднання новітніх технологій з вимогами до точності і надійності вимірювань дозволить значно підвищити ефективність вимірювань.

3.3 Алгоритмічне забезпечення методики визначення рівнів радіозавад в УКХ діапазоні

Алгоритм функціонування методики визначення рівнів радіозавад в УКХ діапазоні має включати не лише процедури вимірювання параметрів каналів та обробки отриманих результатів, але й забезпечити інтеграцію функцій для управління процесами вимірювання, перевірки достовірності даних, сповіщення оператора про виявлені аномалії, а також для автоматизації всіх етапів процесу. Крім того, розробка алгоритму потребує створення бази даних, яка включатиме інформацію про діапазони можливих значень вимірюваних параметрів, їх точність, маршрути переміщення вимірювальних одиниць та стандартні процедури обробки даних. У табл. 3.1 представлені нормативні значення параметрів сигналів, що використовуються в даній методиці, які є основою для подальших вимірювань та аналізу результатів.

Таблиця 3.1 – Нормативні значення параметрів сигналів у частотних діапазонах

Параметри сигналів	Частотний діапазон		
	2 МГц	160 МГц	
		3	Транспорт
1. Потужність передавача (несуча частота), Вт	8 – 12	8 – 12	12
2 Допустиме відхилення частоти передавача від номінальної, Гц (відповідно до відомчих норм)	213 (63)	3000 (900)	1500 (450)
3 Максимальна девіація частоти передавача, кгц, за умов модуляції сигналами тонального виклику, кгц (не більше)	3	10	5
	1,5-2,5	5	3-5
4 Ширина смуги частот випромінювання передавача, кгц, не більше (на рівнях):			
	– 40 дБ	13,2	23,1
– 60 дБ	22,4		35,2

5 Коефіцієнт нелінійних спотворень передавача, %, не більше	10	10	5
6 Параметри системи виклику і контролю			
6.1 Частоти тонального виклику, Гц: – відділення зі з'єднанням до лінійного каналу – ДСП станцій – локомотивів – ремонтних бригад на перегоні		700 1400 1000 2100	
6.2 Відхилення частоти викличних сигналів, %, не більше		1,5	
6.3 Тривалість передачі сигналів виклику, сек., у межах		3-5	
6.4 Частота контролю прийому виклику, Гц		890	
6.5 Тривалість передачі сигналу контролю виклику, сек – затримкою включення, сек.		1-2 0,8	
6.6 Допустиме відхилення частоти сигналу контролю виклику, %, не більше		5	

В табл.3.2 представлено припустимі рівні радіозавад.

Таблиця 3.2 - Рівні радіоперешкод (припустимі)

Вид тяги	Рівні радіоперешкод, дБ на частотах			
	простой		при русі	
	2,13 МГц	153 МГц	2,13 МГц	153 МГц
Електровози постійного струму	45	18	58	30
Електровози змінного струму	46	26	60	46
Тепловози	30	14	40	26

Для реалізації цієї системи важливим етапом є розробка програмного забезпечення для управлінського вузла, який забезпечує виконання всіх необхідних функцій, таких як вимірювання, обробка даних, візуалізація,

паспортизація, архівування тощо, а також забезпечує синхронну роботу всього комплексу.

На початкових етапах розробки створюється загальна схема алгоритму роботи комплексу, не вдаючись до глибокої деталізації конкретних процедур чи процесів взаємодії управлінського вузла з радіостанціями. Детальний зміст процедур, а також те, як ці етапи відображаються на моніторі управління, наведено в табл.3.3.

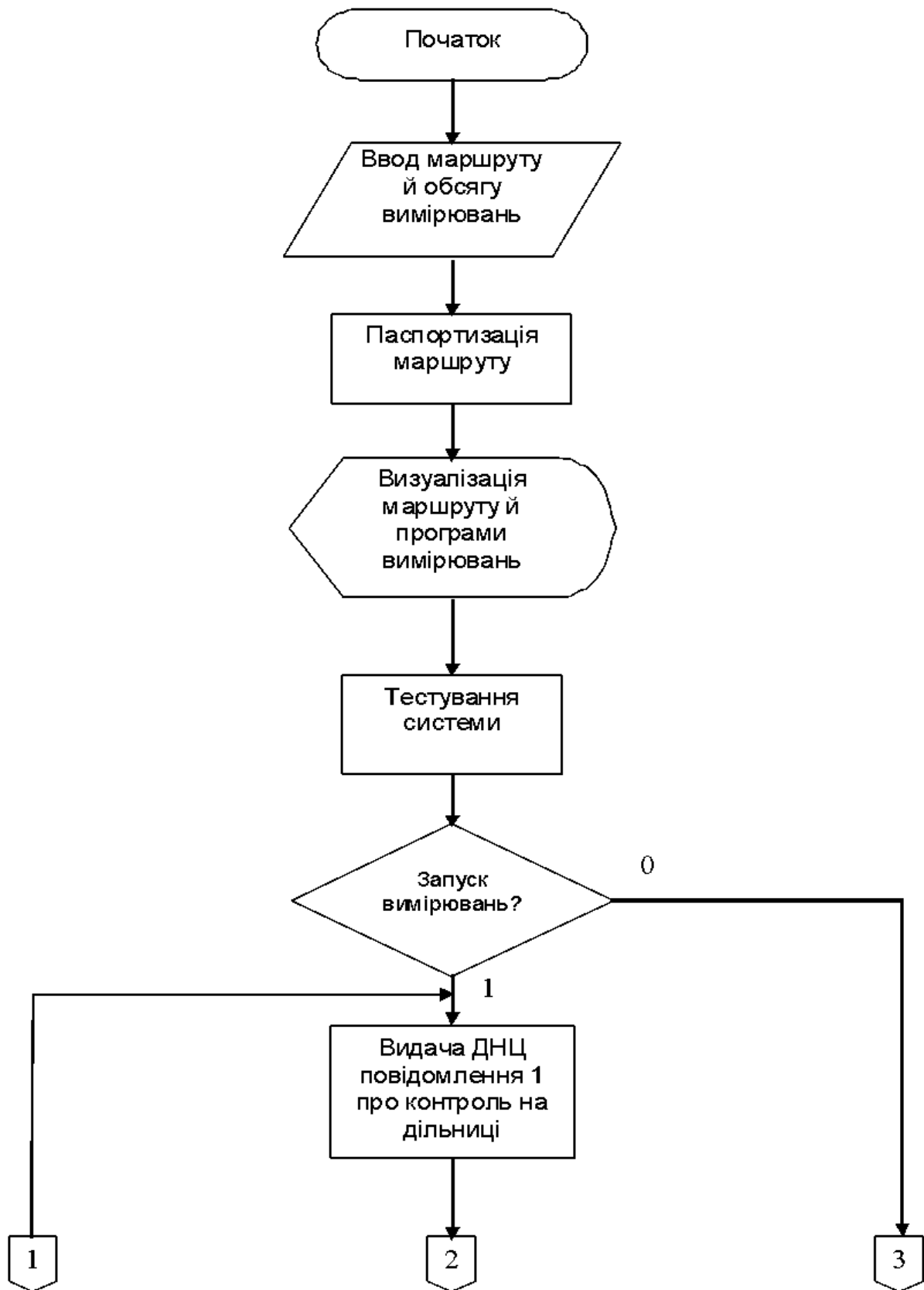
Таблиця 3.3 – Процедури вимірювання та відображення на моніторі

Етап	Назва етапу	Процес та відображення на екрані монітора
1	Ініціалізація роботи	Запуск системи з відображенням початкової заставки. Застосунок активує основні підсистеми. Виведення на екран схеми ПЗД та меню для вибору підсистеми.
2	Визначення маршруту та налаштувань	Оператор задає маршрут руху по схемі ПЗД та визначає типи вимірювань і алгоритми обробки. На екрані відображається маршрут та план вимірювань.
3	Паспортизація параметрів	Встановлення очікуваних значень вимірюваних величин на основі паспортних даних чи попередніх вимірювань. Виведення на екран підсумків паспортизації.
4	Тестування системи	Перевірка сумісності використовуваних вимірювальних приладів та радіостанцій. Визначення готовності системи через контроль сигналів і тестування. Виведення результатів на екран та архівування.
5	Запуск вимірювань	Перевірка параметрів (час, координати лабораторії, персонал). Виведення на екран введених даних і команди на запуск вимірювань.
6	Повідомлення ДНЦ	Під час в'їзду на нову ділянку видається повідомлення про контроль каналу ПРЗ. Реєстрація відповіді ДНЦ на екрані та архівування.

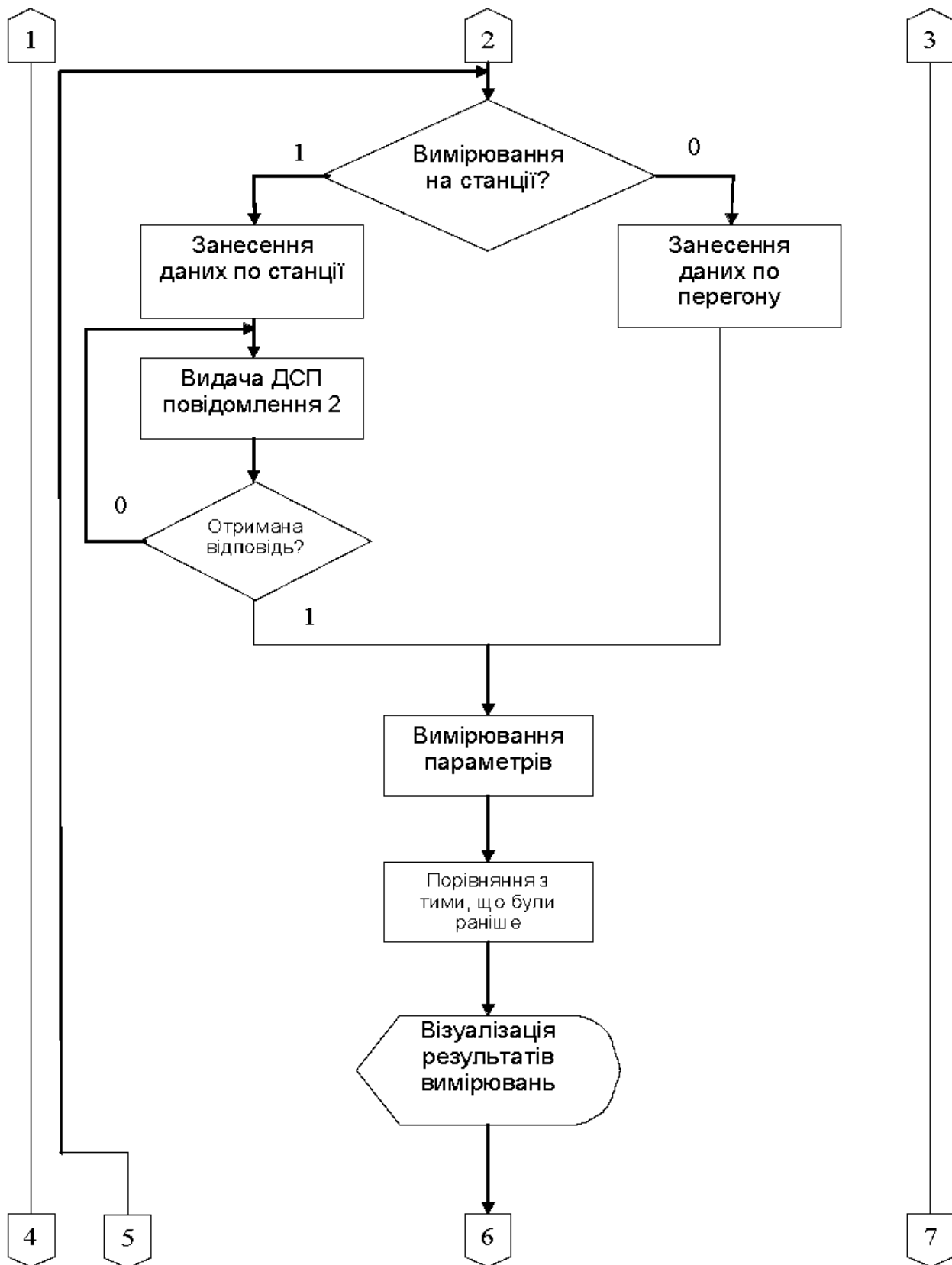
7	Вимірювання на станціях і перегонах	Операція контролю параметрів з більшим акцентом на станціях. Виведення на екран повідомлення для чергового (ДСП) і архівування для перевірки справності каналу.
8	Періодичні вимірювання	Вимірювання параметрів за програмою в різних точках маршруту. Підготовка результатів, візуалізація змін.
9	Завершення вимірювань	Виведення повідомлення про завершення вимірювань при досягненні кінцевої точки маршруту та завершенні програми.
10	Обробка результатів	Завершення обробки результатів вимірювань. Виведення та архівування даних по маршруту.
11	Протоколювання результатів	За необхідності роздруковуються протоколи, діаграми та графіки по маршруту чи ділянках.
12	Завершення роботи	Вимкнення вимірювальних приладів, закриття файлів та програм. Підсумкове повідомлення на екрані про завершення роботи.

Як видно з таблиці 3.3, у розробці алгоритму функціонування методики вимірювання рівнів радіозавад важливим є не лише визначення процедур вимірювань та обробки даних, але й інтеграція системи управління, яка забезпечує контроль за процесом вимірювань. Кожен етап цього алгоритму має чітко визначену процедуру, що включає управління вимірюваннями, відображення результатів на моніторі та забезпечення коректної роботи апаратного забезпечення. Наприклад, на початковому етапі запускається програма, що забезпечує активацію всіх підсистем, а також формується маршрут руху і програма вимірювань. Протягом вимірювань система постійно відслідковує стан приладів, фіксує координати вимірювальної лабораторії та надає операторам інформацію про статус вимірювань. В результаті вся процедура вимірювань, від початку до кінця, забезпечується комплексним контролем і автоматичним протоколюванням, що підвищує точність та ефективність системи.

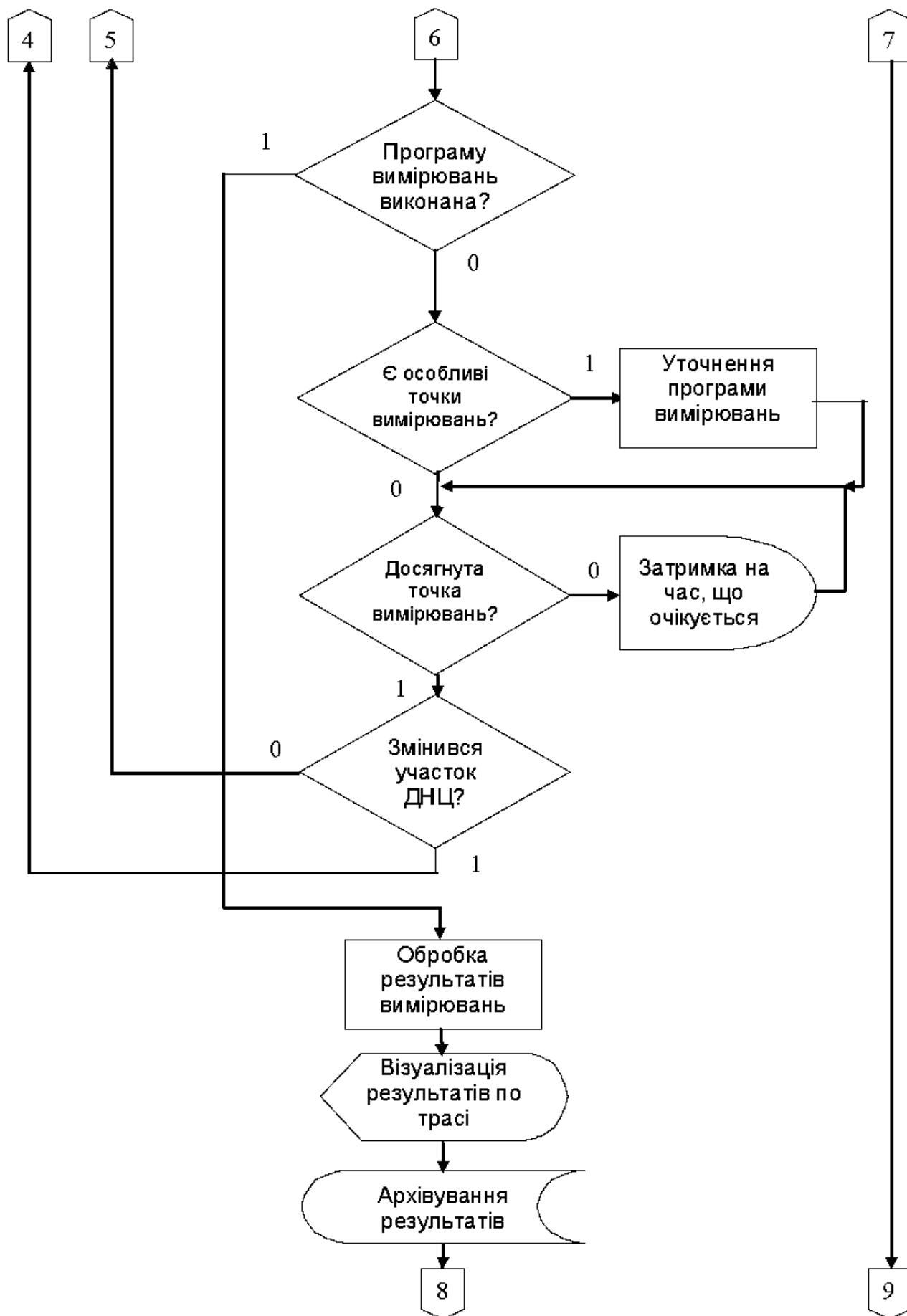
На рис. 3.1 представлена блок-схема алгоритму реалізації методики вимірювання рівнів радіошумів, яка показує основні етапи та процедури, необхідні для проведення точних вимірювань у рамках поїзного радіозв'язку.



Продовження рис. 3. 1



Продовження рис. 3.1



Продовження рис. 3.1

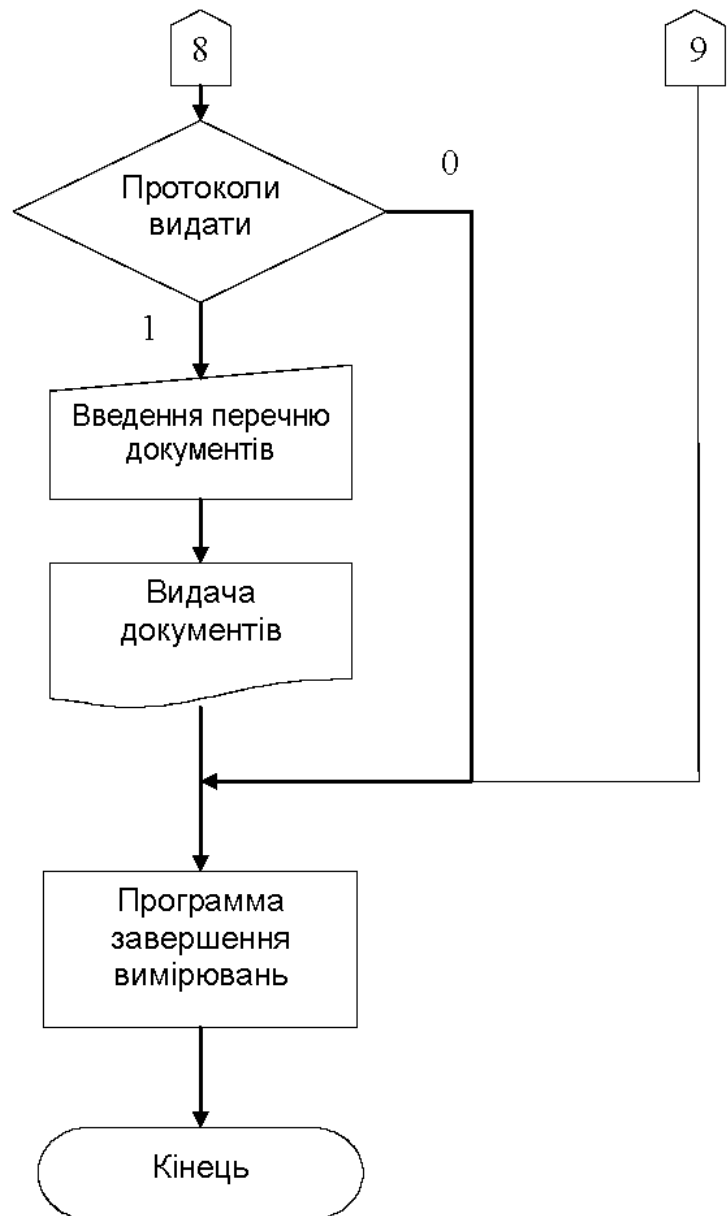


Рисунок 3.1 – Блок-схема реалізації методики визначення рівнів радіозавод

В алгоритмі реалізації методики вимірювання, не враховані деякі важливі умови та вимоги, що мають бути включені в процес розробки програмного забезпечення, а саме.

1. Дозвіл на введення вихідних даних і зміни процедури повинна мати лише особа з відповідним паролем, що гарантує безпеку доступу до налаштувань.

2. Оператор повинен мати можливість призупинити автоматичний режим роботи на будь-якому етапі та перейти до зміни процедури або виконати вимірювання вручну, що дозволяє оперативно реагувати на зміни умов.

3. Вимірювання рівня завад і шумів може проводитися лише при вимкнених передавачах системи ПРЗ, що підтверджується сигналом «Канал вільний» на виході радіостанції.

4. Вимірювання параметрів стаціонарних радіостанцій повинно здійснюватися за допомогою запитального сигналу від ДНЦ або ДСП на радіостанцію РВ, ініційованого командою «Виклик».

5. Вимірювання рівня несучої, викличних частот, девіації частоти та нелінійних перекручувань має проводитись при роботі лише однієї радіостанції ПРЗ на передачу, що дозволяє уникнути перехресних завад.

Для контролю якості провідного каналу ПРЗ необхідно передавати спеціальний іспитовий сигнал з тональною частотою $F_{\text{кон}}$. Після проходження цього сигналу проводиться вимірювання нелінійних перекручувань. Для цього розпорядницька станція (СР), яка розташована в ДНЦ, повинна бути оснащена схемою з виборчим приймачем для додаткової викличної частоти $F_{\text{вик}}$ і формувачем контрольної посилки з частотою $F_{\text{кон}}$. Радіостанція РВ вимірювальної лабораторії отримує команду від вузла управління, щоб надіслати запитальний сигнал $F_{\text{вик}}$. СР повинна у відповідь передати контрольну посилку $F_{\text{кон}}$, без прослуховування сигналу у ДНЦ.

Процедура вимірювання має забезпечувати виявлення факту одночасної роботи двох або більше стаціонарних чи рухомих радіостанцій. У такому випадку повинна бути відправлена команда ДСП того станційного пункту, де знаходиться контрольована радіостанція, із запитом про відправку викличного сигналу для ремонтної служби «РЕМ».

Для забезпечення належної якості радіозв'язку та нормальної роботи радіо- та телевізійних приймачів поблизу залізничного полотна необхідно дотримуватись встановлених стандартів та вимог щодо рівня радіоперешкод у визначених частотних діапазонах, таких як 0,15...300 МГц. Рівні радіозавад на

стоянці та під час руху повинні бути в межах значень, наведених у табл. 3.4, що вимірюються за допомогою стандартних вимірників радіозавад.

Таблиця 3.4 – Рівні радіозавад та частотні діапазони вимірювання*

Частотний діапазон	Рівень радіоперешкод на стоянці (дБ)	Рівень радіоперешкод при русі (дБ)	Стандарт для вимірювань
0,15 – 30 МГц	до 60	до 60	ГОСТ 12.1.007-76
30 – 1000 МГц	до 50	до 50	ГОСТ 8.171-87
2,13 МГц	до 55	до 55	ГОСТ 12.1.007-76
153 МГц	до 60	до 60	ГОСТ 12.1.007-76

* складено автором на основі даних з відкритий джерел

Для вимірювання рівня радіозавад у вагоні-лабораторії за допомогою скануючого приймача AR-5000, необхідно використовувати смугу пропускання 15 кГц на частотах 2,13 і 2,15 МГц, а також смугу 110 кГц на частотах діапазону 153 МГц. Ці параметри найбільш близькі до норм для вимірювальних приладів радіозавад у діапазонах 0,15 – 30 МГц і 30 – 1000 МГц.

Калібрування скануючого приймача, як вимірювального приладу для радіозавад, повинно бути включено в план метрологічної атестації вимірювального комплексу вимірювальної лабораторії.

Процедура вимірювання рівня радіосигналів і радіозавад під час руху вимірювальної лабораторії передбачає реєстрацію рівнів сигналу та завад у ближній зоні дії кожної стаціонарної радіостанції ПРЗ. Одночасно реєструються час, координати точки вимірювання та швидкість руху. Діаграма рівнів сигналу вимірюється з певним інтервалом дальності під час віддалення від радіостанції, а іншу частину діаграми знімають під час зворотного проїзду, використовуючи можливість завдання реверсивного маршруту через навігаційний приймач GPS.

Якщо сигналу немає, скануючий приймач продовжує вимірювання рівнів радіозавад, і інформація виводиться на екран лише у разі перевищення обраного середнього рівня.

4 РЕЗУЛЬТАТИ ПРОВЕДЕНОГО ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

На основі проведених досліджень в розділах 2 та 3, було реалізовано методику вимірювання рівнів радіозавад в УКХ діапазоні. Для дослідження обрано безпроводову мережу доступу на основі протоколу IEEE 802.11n.

Для проведення вимірювань рівня сигналу було охоплено всі поверхи університету. Результати вимірювань показали сильну залежність загасання сигналу від положення приймальної антени. На рис. 4.1 пунктирною лінією зображена залежність загасання сигналу від відстані між передавальною та приймальною антенами, розрахована за емпіричною формулою. Середнє значення загасання на відстані 10 м від передавача склало близько 75 дБ, а відхилення від цього значення досягало 13 дБ.

З метою більш точного аналізу, за допомогою формул (4.1) та (4.2), розраховано математичне очікування (МО) та середні квадратичні відхилення (СКО) для максимальних викидів сигналів. Результати представлені в табл. 4.1

Математичне очікування максимальних викидів сигналів для кожного вимірювання з ансамблю при зміні ширини смуги, обмеженої спектром послідовностей коротких відеоімпульсів, визначається за формулою:

$$MO = \frac{\sum n_i}{N}$$

$$MO = \frac{\sum n_i}{N}, \quad (4.1)$$

де N – кількість вимірювань;
 n – порядковий номер вимірювання.

Середнє квадратичне відхилення максимальних викидів функцій сигналів щодо їх математичних очікувань розраховується за формулою:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (U_i - MO_i)^2}{N}} = \sqrt{\frac{\sum (U_i - MO_i)^2}{N}}, \quad (4.2)$$

де U_i – рівень сигналу при i -му значенні; MO_i – математичне очікування при i -му значенні; N – кількість вимірювань.

Таблиця 4.1 – Рівень сигналу на різних відстанях та його математичні показники (МО і СКО)

Відстань №	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
1	-28	-32	-34	-37	-39	-44	-50	-54	-59	-63	-66
2	-30	-32	-33	-35	-39	-42	-47	-51	-58	-62	-64
3	-29	-31	-33	-35	-38	-41	-46	-50	-58	-61	-64
4	-27	-30	-32	-34	-38	-41	-45	-50	-56	-60	-62
5	-28	-32	-34	-36	-39	-43	-49	-54	-60	-62	-65
6	-29	-31	-33	-35	-38	-41	-46	-52	-59	-61	-63
7	-31	-32	-34	-36	-40	-43	-48	-52	-58	-61	-64
8	-30	-33	-35	-37	-41	-45	-49	-53	-59	-63	-66
9	-29	-30	-34	-36	-39	-42	-46	-52	-59	-61	-64
10	-33	-34	-36	-39	-40	-44	-49	-54	-59	-64	-66
11	-32	-34	-36	-38	-40	-44	-49	-52	-58	-62	-64
12	-28	-32	-34	-36	-39	-43	-47	-52	-59	-61	-64
13	-30	-32	-33	-35	-39	-41	-46	-50	-56	-59	-62
14	-27	-30	-33	-35	-39	-42	-47	-51	-59	-61	-64
15	-29	-31	-32	-34	-37	-41	-46	-51	-57	-62	-64
16	-30	-32	-34	-36	-38	-43	-47	-52	-58	-61	-64
17	-31	-33	-35	-37	-40	-44	-48	-52	-59	-62	-64
18	-32	-33	-35	-37	-39	-42	-47	-51	-58	-61	-63
19	-30	-31	-34	-36	-40	-44	-48	-53	-59	-61	-64
20	-29	-32	-33	-35	-39	-43	-48	-52	-59	-62	-64
21	-28	-30	-33	-35	-39	-43	-47	-51	-58	-60	-63
22	-29	-31	-34	-36	-40	-43	-47	-52	-58	-61	-64
23	-30	-32	-34	-37	-39	-42	-47	-51	-58	-61	-64
24	-28	-30	-33	-35	-39	-41	-46	-51	-59	-62	-64
25	-30	-33	-35	-39	-40	-46	-49	-49	-56	-61	-66
26	-29	-32	-31	-37	-41	-41	-49	-56	-63	-67	-67
27	-28	-30	-34	-37	-39	-39	-47	-55	-59	-59	-65
28	-30	-32	-36	-38	-38	-40	-48	-54	-59	-63	-67
29	-32	-33	-35	-37	-40	-45	-53	-55	-60	-64	-66
30	-29	-34	-36	-38	-40	-42	-49	-56	-59	-61	-65
Σ	-919	-100	-105	-111	-118	-128	-149	-160	-179	-190	-199
		0	3	8	6	4	5	8	4	2	4
МО	-30.6	-33.3	-35.2	-37.2	-39.5	-42.8	-49.8	-53.6	-59.7	-63.3	-66.4

СКВ	1.622	1.802	1.933	2.123	2.918	2.273	2.308	2.399	2.402	2.458	2.533
-----	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

За результатами розрахунків побудовано діаграму залежностей показника МО від різних значень відстані (рис. 4.1).

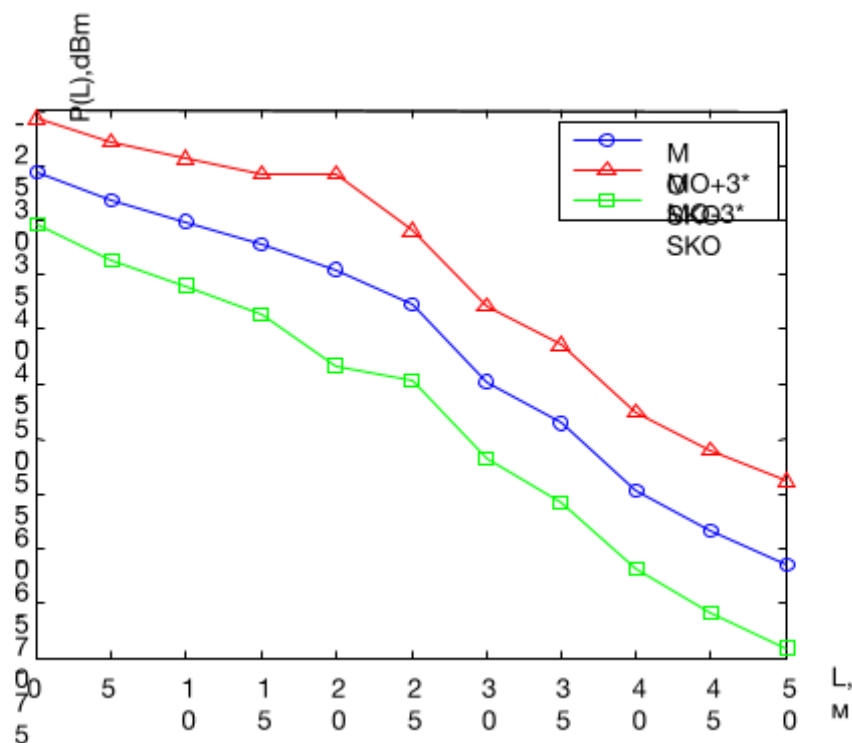


Рисунок 4.1 – Залежність математичного очікування (МО) результатів вимірювань рівнів радіосигналу в УКХ-діапазоні

Згідно з результатами розрахунків та побудованої діаграми залежності математичного очікування (МО) від різних значень відстані, можна зробити наступні висновки.

1. Зі збільшенням відстані між передавальною та приймальною антеною, рівень сигналу поступово зменшується, що є природною фізичною закономірністю для радіосигналів.

2. Математичне очікування (МО) показує значне зниження рівня сигналу на відстані понад 10 м, при цьому відхилення (СКО) залишаються порівняно стабільними.

3. Середнє значення МО для відстані 10 м складає близько -35,2 дБ, а максимальні відхилення (СКО) для цього значення досягають 1,93 дБ, що вказує на досить високу стабільність вимірювань.

4. Найбільше значення МО досягається на відстані 0 м, що відповідає найкращому рівню сигналу, рівному -30,6 дБ.

5. Загальний тренд показує, що при збільшенні відстані на кожні 10 м, рівень сигналу зменшується приблизно на 2–3 дБ, що є значним фактором для ефективності радіозв'язку.

5. Враховуючи значення СКО, можна говорити про хорошу точність вимірювань, оскільки відхилення залишаються в межах допустимих значень.

Ці дані дозволяють прогнозувати якість зв'язку на різних відстанях та підтверджують необхідність застосування коригувальних заходів для забезпечення стабільності радіозв'язку в УКХ діапазоні на великих відстанях.

INTRODUCTION

Rail transport is a critical component of the transportation infrastructure, where reliable and high-quality communication is an integral part of the transportation management system. Uninterrupted radio communication ensures effective coordination between rolling stock, technical systems and dispatching, which in turn affects the safety, efficiency and effectiveness of the transportation process. Reliable and stable communication channels are key to ensuring railroad safety, as even the slightest disruption in their operation can lead to serious incidents that directly affect traffic safety and cargo security. This emphasizes the importance of proper organization and continuous monitoring of radio communications in railway transport, including assessment of radio interference levels that may adversely affect the quality of communication.

The relevance of this study is due to the need to improve existing methods for measuring radio interference levels in wireless access systems that are actively used in railway transport. Due to the development of the latest communication technologies and the increase in interference, the accuracy of estimating interference levels is becoming critical to ensure the stable operation of radio systems. In particular, there is a growing need to improve measurement techniques in ultra-short wave bands, especially above 1 GHz, where communication systems are subject to significant interference, which makes it difficult to operate them efficiently.

Laboratory cars are actively used to monitor radio communication systems operated by railways. They allow for measurement and control of radio communication parameters directly in real-world operation. In the past, attempts have been made to develop and use individual service devices, such as a deviometer or signal strength meter based on the 42RTM-A2-4M radio receiver, as well as entire measuring systems

for radio communication laboratory cars. However, one of the main drawbacks of these developments is the lack of proper metrological support, which significantly reduces the accuracy and reliability of measurement results.

Based on the growing relevance of the problem, **the aim of the study** is to develop a new methodology for measuring radio interference levels, which will allow accurate assessment of the interference situation in a given frequency range. This will improve the quality of communication and the stability of wireless systems in railway transport, which is critical for the safety, efficiency of transportation and stable operation of railway control systems.

The object of research is radio communication systems used in railway transport, in particular wireless systems operating in different frequency bands.

The subject of the research is methods for measuring radio interference levels in railway communication systems, in particular in the ultra-short wave bands and above 1 GHz, as well as the development of approaches to assessing the interference situation and the impact of radio interference on the quality and stability of these systems.

Thus, the study focuses on the development of a measurement methodology that will provide an accurate assessment of radio interference levels, which will increase the efficiency of railway transport radio systems in conditions of changing interference, ensuring safety and stability of operation in various operating conditions.

1 ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE AND ITS IMPACT ON RADIO SYSTEMS OF RAILWAY TRANSPORT

1.1 Classification and characterization of radio interference sources

Electromagnetic radio interference is one of the main factors limiting the efficiency of radio equipment. It occurs in the form of unnecessary electromagnetic oscillations that affect radio receiving devices, distorting the useful information transmitted over the radio channel. Such interference can significantly reduce the range of radio systems and degrade the quality of communication [27, 30, 32]. Since radio interference can occur in different environments and from different sources, their classification is important for understanding the nature of their impact and ways to combat them [21, 25, 27].

Sources of electromagnetic radio interference can be conditionally divided into two main categories by origin: natural and artificial [27, 32].

1. Natural sources of radio interference include a variety of natural phenomena that cause electromagnetic oscillations in the environment. Such sources include.

1.1 Terrestrial sources: these are natural phenomena occurring in the atmosphere and on the Earth, in particular electrical discharges during thunderstorms, aurorae, accumulation of static discharges, and inhomogeneities in the radio wave propagation medium.

1.2 Extraterrestrial sources: electromagnetic radiation from the sun, planets, stars, and magnetic storms that can significantly affect radio signals traveling through the ionosphere.

1.3 Device noise: Each radio receiving device has a certain level of its own noise, which can cause additional interference with radio systems.

2. Artificial sources of radio interference include technical devices and equipment resulting from human activity. They can occur in many areas, and the main sources are as follows.

2.1 Radioelectronic devices: this group includes radio broadcasting stations, radio communication equipment, navigation systems, radar stations, satellite communication equipment and other devices operating on the basis of electromagnetic energy radiation.

2.2 Power supply devices: This includes current collectors, power generators, power converters, power lines, switchgear, and automation equipment that may generate high-frequency interference.

2.3 Electrical equipment: industrial machines, tools, office equipment, as well as control and measurement equipment that can act as a source of electromagnetic interference.

2.4 Ignition systems: internal combustion engines, electric vehicles, lighting devices and household appliances can be sources of interference.

2.5 Industrial equipment: includes welding machines, ultrasonic devices, medical equipment and other industrial devices that are sources of high-frequency interference.

Industrial radio interference, which is the result of the activities of industrial facilities, has a different spectral composition and intensity. Such radio interference can affect radio receivers even at considerable distances, reaching several kilometers from the source. This is especially true for areas with a high concentration of industrial enterprises or infrastructures using various electronic systems. The impact of such interference can be significant at frequencies of several hundred megahertz, which requires special methods for measuring and assessing radio interference levels [27, 30, 32].

The level of radio interference can be measured in different units, depending on the purpose of the measurement and the nature of the interference [13, 15, 18, 26, 29, 33]:

1. Units of field strength - to measure radio interference propagating in the form of electromagnetic waves, units such as volts per meter (V/m), microvolts per meter ($\mu\text{V}/\text{m}$), or decibels relative to 1 μV per meter (dBm) are used. This allows you to measure the level of field strength generated by a radio interference source, which is especially important for determining the impact of such interference on radio receivers.

2. Power Density Units - To assess the impact of interference on radio systems at a more technical level, power density units are used, such as watts per square meter (W/m^2) or decibels relative to power in watts per square meter (dBW/m^2). This allows you to determine how much energy is transmitted through a unit area at a particular frequency, which helps in assessing the interference impact on different frequency channels.

3. Frequency distribution of the radio interference level - to characterize the frequency spectrum loading with radio interference, measurements are also made in units that show how the radio interference level varies with frequency, for example, in decibels of milliwatts per square meter per kilohertz ($\text{dBmW}/\text{m}^2 \text{ kHz}$). This allows for a more accurate assessment of the spectral impact of interference and determining at which frequencies the radio system is most susceptible to interference [29, 31, 33].

This classification takes into account the relationship between the types of radio interference and their sources, as well as their impact on the spectrum and time characteristics of radio systems [20, 27, 30, 32].

Different types of radio interference can be classified according to their spectral and temporal characteristics. According to these criteria, there are three main types of radio interference (Table 1.1) [27, 30, 32].

Table 1.1 - Types of radio interference and their characteristics

Тип радіозавади	Characteristics	Example
Spectrally concentrated (narrowband)	Fluctuations that change slowly over time usually have a narrow frequency spectrum.	Radio communication
Pulsed	Broadband, with short-term, high-frequency power peaks.	Lightning discharges
Fluctuating	Random oscillations with an uncertain frequency and amplitude.	Space noise, device noise

Radio interference affects a variety of systems and devices, which are grouped under the concept of electromagnetic radio interference receptors. Like interference sources, receptors can be divided into natural and artificial. Artificial receptors, in turn, are divided into two groups [20, 27, 30, 32].

1. Receptors that work on the principles of extracting information from the surrounding electromagnetic field. This group includes radio receiving devices. Some of the main characteristics of radio receivers are:

- bandwidth is the frequency range in which the device can receive a signal;
- sensitivity is the ability of the receiver to receive a useful signal at certain power levels;
- susceptibility to unwanted reception channels is the sensitivity to radio interference levels whose frequencies do not fall into the frequency band occupied by the useful signal. This parameter is measured in dB in relation to the receiver's sensitivity to the useful signal.

2. Receptors that, according to the principle of their operation, should not respond to external electromagnetic fields. This group includes:

- radio electronic devices (e.g., low frequency amplifiers (LFOs), video frequencies, communication equipment, telephones, etc.);
- industrial and general use equipment (devices for monitoring, control, automation, display devices, etc.).

This division allows us to more accurately determine how different devices react to interference and develop protection methods for each type of receptor, depending on their characteristics and operating principles.

To effectively solve the problem of radio interference, it is necessary to go through several stages, each of which focuses on different aspects of combating this phenomenon.

Stage I. Provides for an in-depth study and analysis of the electromagnetic situation at the facility [26, 31]. This includes both measuring the levels of radio interference and creating models that describe the interaction of various sources of interference with radio electronic equipment. Such analyses help to determine which devices and systems are most vulnerable to radio interference, as well as to assess the ways in which they can penetrate the equipment. An important step at this stage is also the accumulation of statistical data, which allows for the creation of predictive models for further calculations and optimization.

Stage II. This stage is aimed at implementing measures to improve the radio interference immunity of radio electronic equipment (REE) [16, 22, 30]. This stage includes a set of technical and organizational measures aimed at minimizing the impact of interference. Technical measures include improving the characteristics of the RF equipment: these may include new filtering solutions, shielding, special protection schemes, or increasing the dynamic range. All these measures help to reduce the sensitivity of devices to interference, which allows for stable and uninterrupted operation of radio systems.

Organizational measures at this stage are focused on optimizing the operation of a set of radio equipment within a wide radio system. This includes creating a strategy for the efficient use of the frequency spectrum, managing temporary operating modes, and determining the optimal conditions for the placement and coordination of radio electronic equipment. All these measures contribute not only to reducing the impact of radio interference, but also to ensuring high quality and reliability of the system in real-world operation [19, 21, 22].

To take into account the effects of interfering signals on nonlinear receivers, it is necessary to assess the impact of simultaneous radiation from several sources. To simplify the calculations, the model includes only those sources that can significantly affect the normal operation of the REW, excluding those that do not pose a threat. The selection of such sources is based on a predefined threshold, which allows focusing only on the most dangerous radiation. The algorithm for analyzing electromagnetic interference between receiver-transmitter pairs is shown in Fig. 1.1. As can be seen from the figure, Stage I involves energy selection based on the amplitude of the signals. Stage II includes frequency selection, which takes into account the selective characteristics of the receiver. Stage III involves the application of additional estimates that take into account other impact parameters.

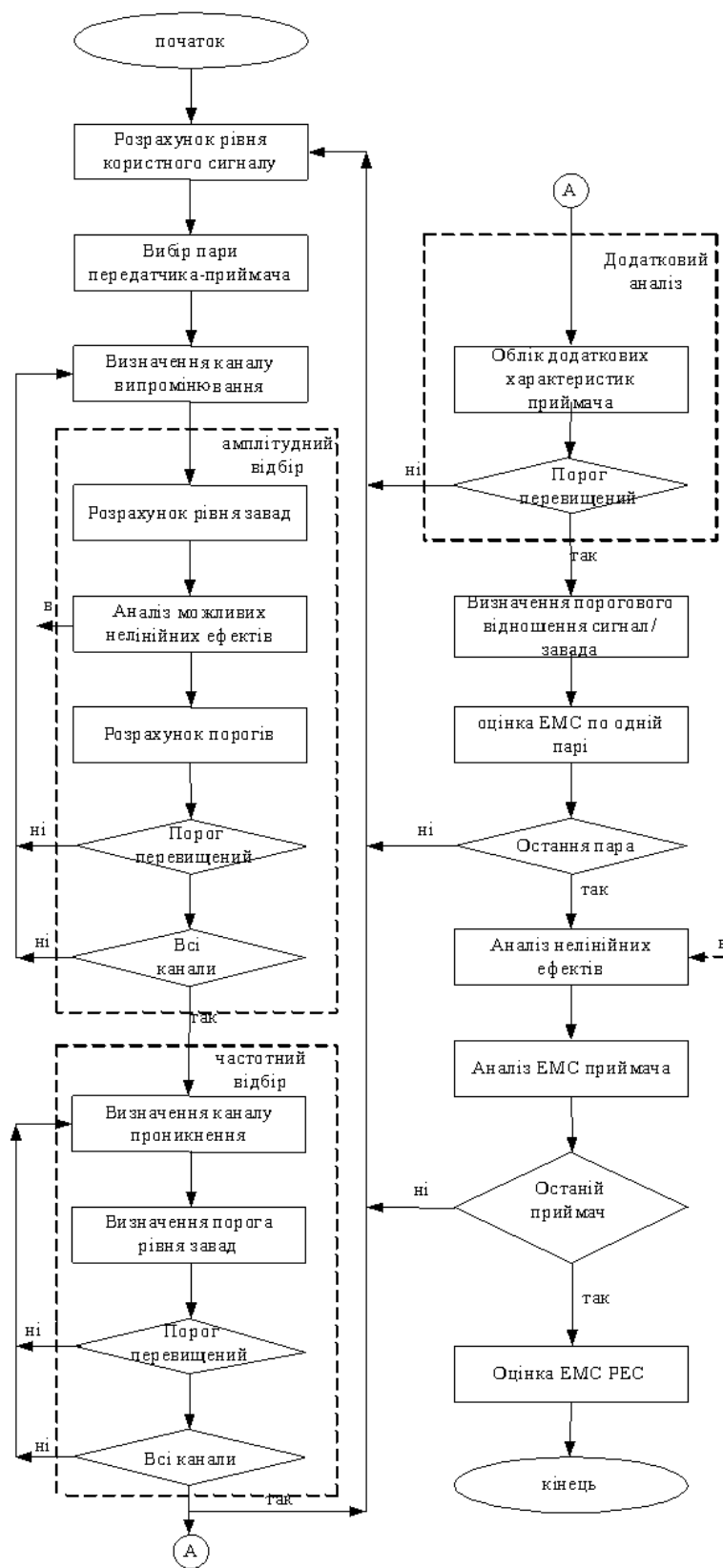


Figure 1.1 Flowchart of the influence of interfering signals between pairs of “receiver-transmitter”

After the selection of potentially dangerous sources of radio interference, the threshold and predicted signal-to-noise ratio for each source are calculated. Next, the impact of the emitters on the main and side reception channels is analyzed, and nonlinear effects are investigated.

ВИСНОВКИ

На основі проведеного дослідження та результатів моделювання, можна зробити наступні висновки.

Залізничний транспорт є невід'ємною частиною транспортної інфраструктури, і надійний радіозв'язок є критично важливим для забезпечення безпеки та ефективності перевезень. Зокрема, важливе значення має точне вимірювання рівнів радіозавад, які можуть негативно вплинути на якість зв'язку і, як наслідок, на безпеку руху.

Розвиток новітніх технологій і збільшення завадових впливів на сучасні радіосистеми зумовлюють необхідність удосконалення методик вимірювання рівнів радіозавад. Особливо актуально це в умовах залізничного транспорту, де безперебійний зв'язок є важливим фактором безпеки. Виявлення та точне вимірювання завад у діапазонах УКХ і вище 1 ГГц є критичним для ефективної роботи систем.

В межах дипломного дослідження розроблена нова методика вимірювань рівнів радіозавад, що забезпечує точну оцінку завадової обстановки в умовах реальної експлуатації залізничного транспорту. Це дозволяє підвищити достовірність вимірювань, поліпшити якість оцінки стану радіоканалів і зменшити трудовитрати при одночасному збільшенні обсягів вимірювань.

Визначення просторових координат за допомогою супутникових навігаційних систем (GPS/ГЛОНАС) дозволяє значно підвищити точність вимірювань і забезпечити безпеку та оперативність радіозв'язку. Важливим аспектом є візуалізація результатів вимірювань, що значно підвищує зручність роботи оператора і дозволяє оперативно реагувати на зміни у завадовій обстановці.

Застосування запропонованої методики дозволяє не лише підвищити точність вимірювань, а й зменшити витрати на обслуговування та метрологічне забезпечення вимірювального обладнання. Впровадження цієї

методики в реальних умовах залізничного транспорту забезпечить значний прогрес у моніторингу та контролі за якістю радіозв'язку.

Розроблена методика дозволяє прогнозувати рівень радіозавад та оперативно виявляти відхилення від норм, що дає змогу своєчасно вживати коригувальні заходи для забезпечення стабільності зв'язку. Це особливо важливо для підтримки надійної роботи систем радіозв'язку у мінливих умовах експлуатації.

Експериментальне моделювання та статистичні розрахунки показали, що зі збільшенням відстані між передавачем та приймачем рівень сигналу знижується, однак відхилення залишаються в межах допустимих значень, що свідчить про високу точність запропонованої методики.

Застосування алгоритмів для обробки вимірювальних даних і відображення результатів на моніторах дозволяє інтегрувати методику в систему моніторингу та управління, що підвищує ефективність та автоматизацію процесу вимірювань. Окрім того, ця методика дозволяє проводити віддалений моніторинг і керування через інтернет-платформи, що є важливим для великих залізничних мереж.

Отже, проведені дослідження та розробка методики вимірювань рівнів радіозавад у УКХ діапазоні дозволяють суттєво покращити якість радіозв'язку на залізничному транспорті, підвищити безпеку руху і стабільність роботи систем управління, забезпечуючи вищий рівень технічного обслуговування та моніторингу.

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та робототехніки

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

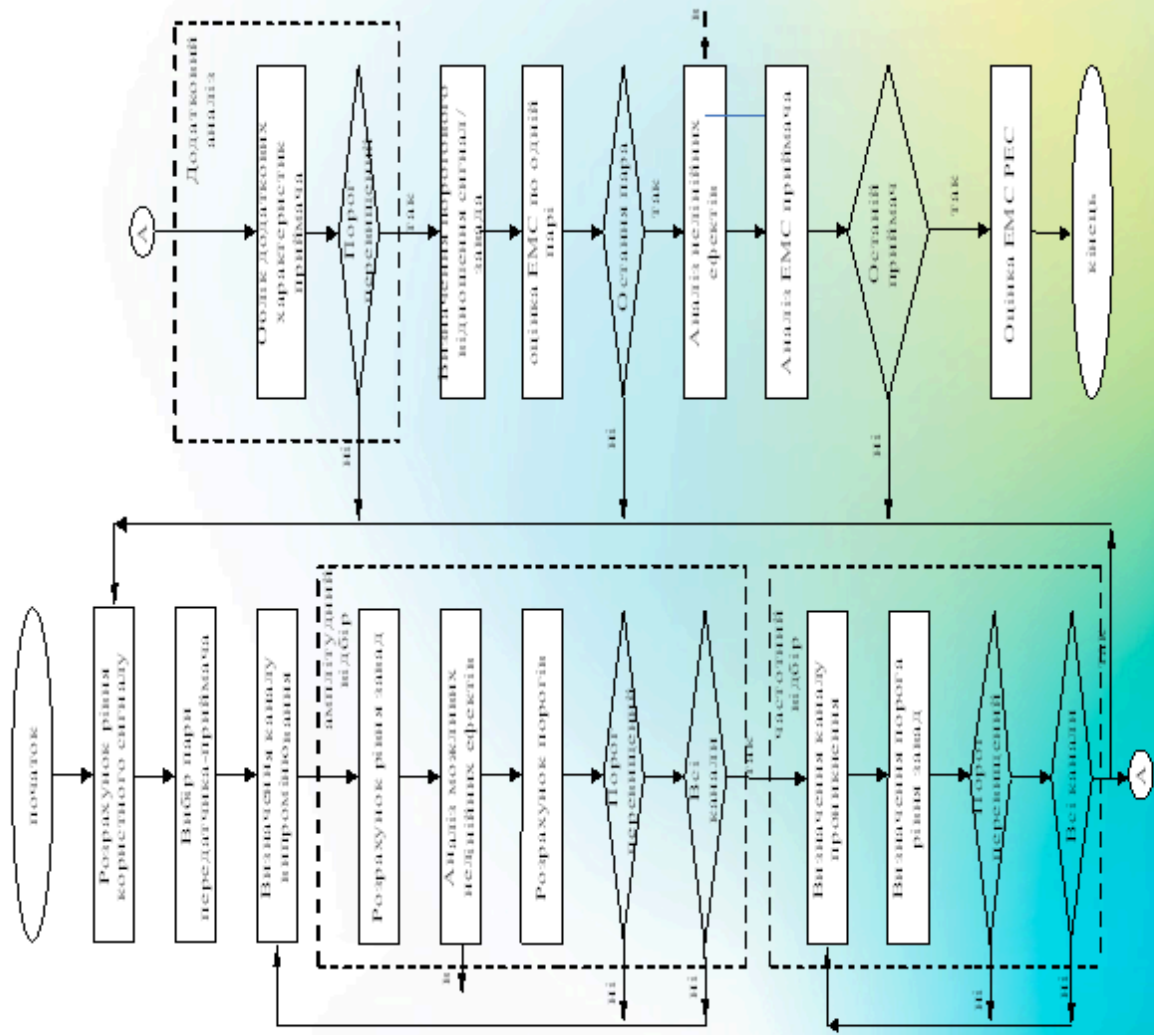
Розробка методики вимірювань рівнів радіозавад

Студент: Анастасія ЧЕРВОНЕНКО

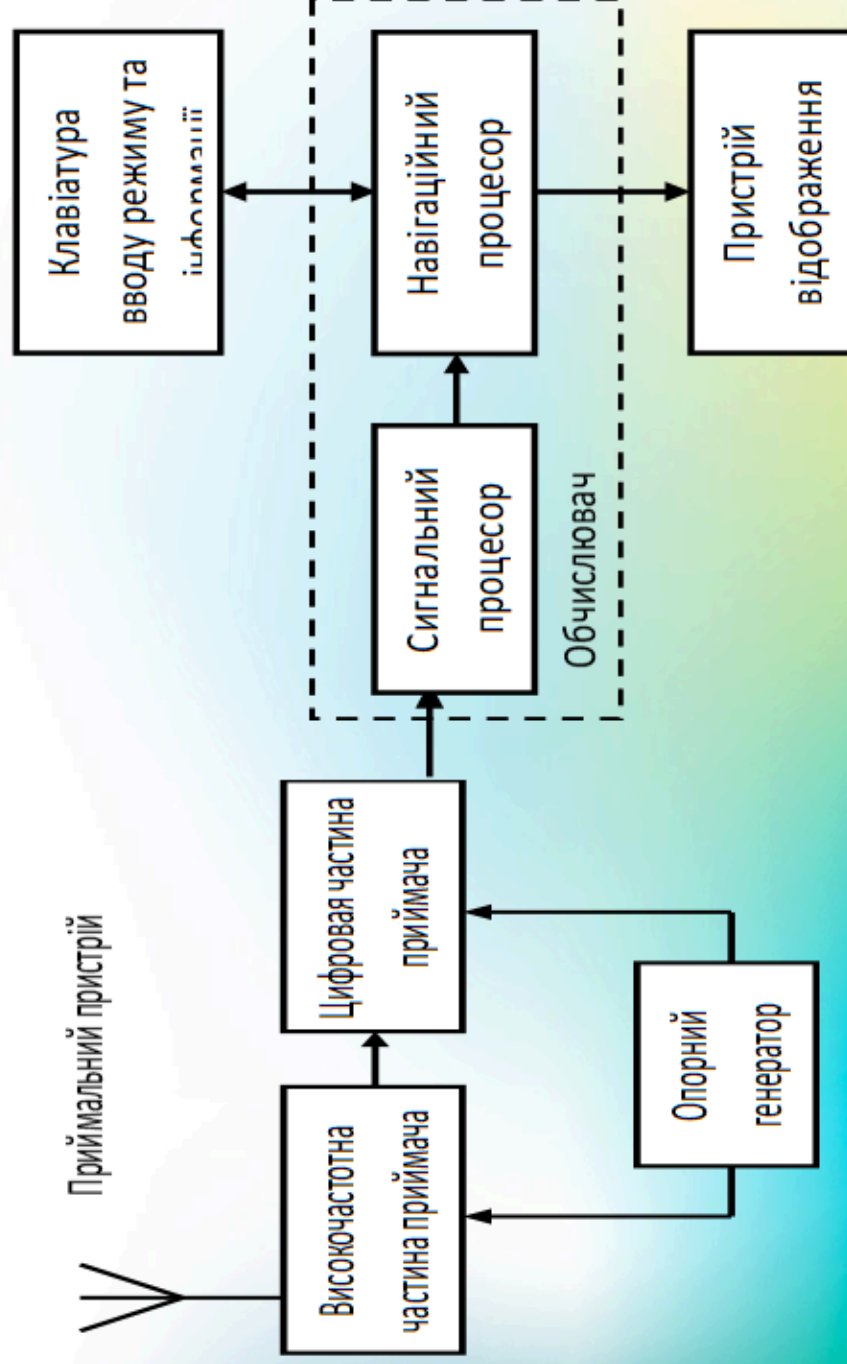
Керівник: професор Володимир ЛИСЕЧКО

1

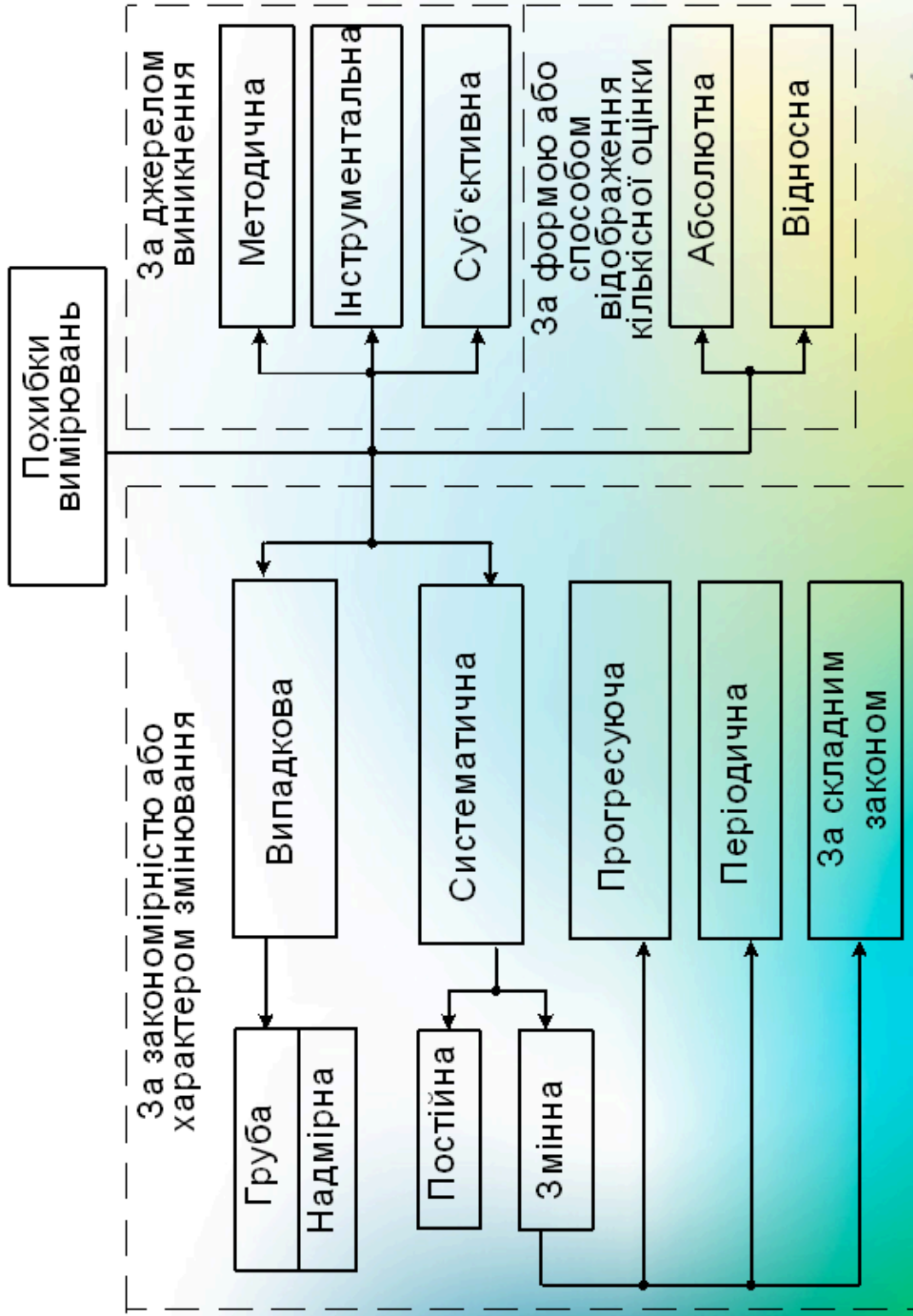
Алгоритм визначення заважаючих впливів



Структурна схема навігаційного приймача



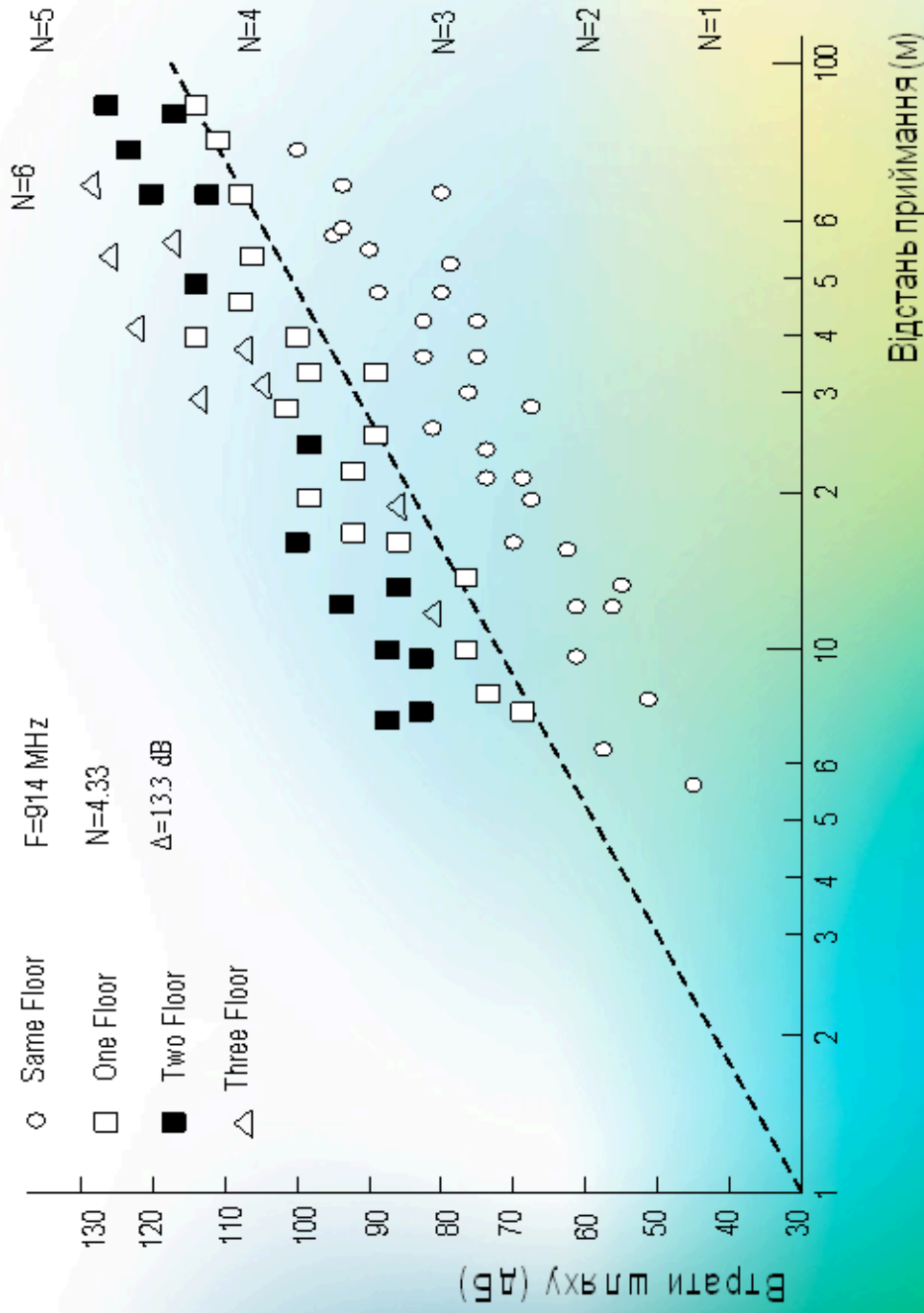
Класифікація похибок вимірювань



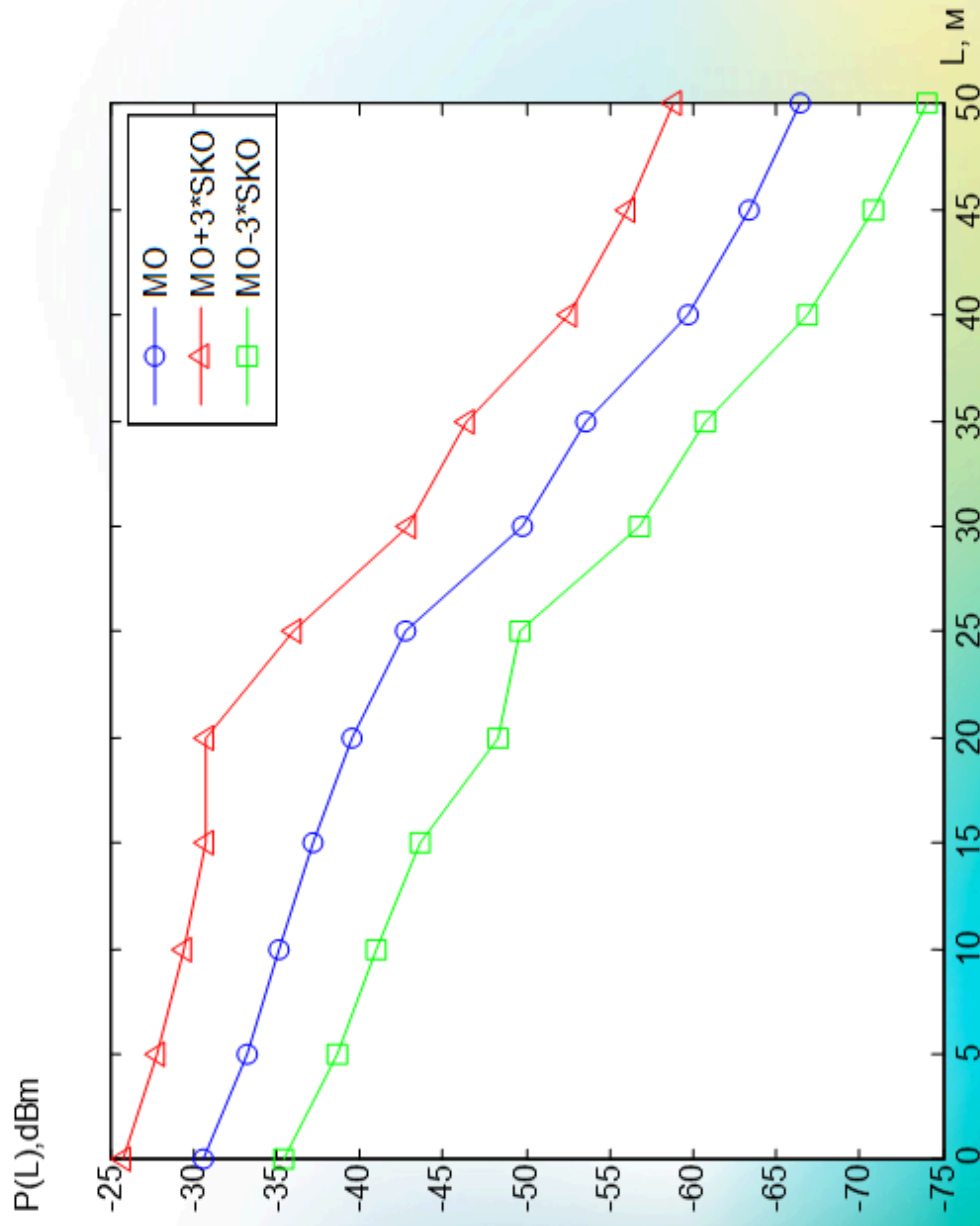
Залежність рівня сигналу від відстані, та значення МО та СКО

№	Відс, м										
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
1	-30	-33	-35	-39	-41	-46	-52	-56	-61	-65	-68
2	-33	-35	-37	-41	-44	-48	-52	-60	-66	-67	
3	-29	-30	-34	-36	-39	-40	-49	-53	-62	-64	-66
4	-30	-32	-33	-35	-41	-45	-47	-50	-58	-63	-64
5	-28	-33	-35	-38	-40	-40	-53	-55	-59	-66	-68
6	-31	-34	-37	-36	-38	-39	-50	-54	-59	-60	-64
7	-30	-30	-35	-38	-38	-46	-54	-52	-62	-64	-66
8	-32	-32	-34	-37	-37	-43	-42	-50	-59	-61	-67
9	-30	-35	-38	-39	-38	-47	-51	-53	-59	-62	-66
10	-35	-36	-37	-39	-40	-43	-52	-50	-58	-66	-68
11	-29	-34	-34	-37	-40	-41	-49	-54	-60	-64	-68
12	-30	-37	-37	-39	-37	-40	-50	-55	-61	-62	-67
13	-31	-33	-36	-38	-39	-43	-54	-57	-58	-59	-65
14	-32	-35	-35	-36	-42	-42	-51	-59	-62	-67	-67
15	-30	-35	-34	-37	-40	-41	-48	-52	-59	-65	-67
16	-30	-33	-32	-34	-36	-39	-50	-54	-60	-66	-68
17	-34	-37	-39	-39	-39	-42	-48	-55	-62	-66	-68
18	-31	-32	-37	-37	-40	-44	-47	-55	-60	-64	-66
19	-31	-31	-35	-38	-42	-45	-48	-57	-59	-62	-65
20	-32	-34	-35	-36	-39	-44	-50	-49	-59	-64	-68
21	-30	-35	-37	-38	-40	-43	-51	-54	-63	-61	-67
22	-32	-33	-33	-34	-41	-42	-52	-55	-60	-59	-66
23	-32	-34	-33	-35	-39	-47	-53	-54	-59	-65	-65
24	-29	-33	-37	-39	-40	-45	-50	-49	-58	-67	-68
25	-30	-33	-35	-39	-40	-46	-49	-49	-56	-61	-66
26	-29	-32	-31	-37	-41	-41	-49	-56	-63	-67	-67
27	-28	-30	-34	-37	-39	-39	-47	-55	-59	-59	-65
28	-30	-32	-36	-38	-38	-40	-48	-54	-59	-63	-67
29	-32	-33	-35	-37	-40	-45	-53	-55	-60	-64	-66
30	-29	-34	-36	-38	-40	-42	-49	-56	-59	-61	-65
МО	-919	-1000	-1054	-1117	-1185	-1284	-1494	-1604	-1793	-1903	-1995
СКО	30,6	33,3	35,2	37,2	39,5	42,8	49,8	53,6	59,7	63,4	66,5
СРБ	1,623	1,801	1,934	2,124	2,919	2,274	2,309	2,398	2,403	2,459	2,532

Залежність загасання сигналу від відстані



Залежність математичного очікування результатів вимірювань рівнів радіосигналу в УКХ-діапазоні



СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Про електронні комунікації: Закон України від 16.12.2020 р. № 1089-IX із змінами та доповненнями. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1089-20#Text>.

2. Про національну комісію, що здійснює державне регулювання у сферах електронних комунікацій, радіочастотного спектра та надання послуг поштового зв'язку: Закон України від 16.12.2021 р. № 1971-IX із змінами та доповненнями. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1971-20#Text>.

3. План розподілу і користування радіочастотним спектром в Україні: затв. Постановою Кабінету Міністрів України від 19.12.2023 р. № 1340. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1340-2023-%D0%BF#Text>.

4. Порядок виконання та надання розрахунку електромагнітної сумісності для загальних користувачів: затв. Постановою Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах електронних комунікацій, радіочастотного спектра та надання послуг поштового зв'язку від 03.08.2022 р. № 133. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1340-2023-%D0%BF#Text>

5. Порядок ведення реєстру присвоєнь радіочастот загальних користувачів: затв. Постановою Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах електронних комунікацій, радіочастотного спектра та надання послуг поштового зв'язку від 17.08.2022 р. № 149. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1134-22#Text>.

6. Реєстр радіоелектронних засобів та випромінювальних пристроїв, що можуть застосовуватися на території України в смугах радіочастот

загального користування (станом на 26.05.2020 р). URL:
<https://nkrzi.gov.ua/index.php?r=site/index&pg=59&id=4182&language=uk>

7. Правила технічної експлуатації залізниць України/Міністерство транспорту України. ЦРБ 0004. Київ: «Транспорт України», 2007. 256 с.

8. ЦШ-0049. Інструкція з експлуатації засобів маневрового та гіркового радіозв'язку, пристроїв двостороннього паркового зв'язку. Київ: Тов «Швидкий рух», 2007. 37 с.

9. Правила експлуатації поїзного радіозв'язку: затв. Наказом Державної адміністрації залізничного транспорту України від 24.09.2007 р. № 452-Ц. Київ: Тов «Видавничий дім «САМ», 2007. 45 с.

10. ЦД-0058. Інструкція з руху поїздів і маневрової роботи на залізницях України: затв. Наказом Міністерства транспорту та зв'язку України від 31.08.2005 р. № 507. Київ: Тов «Швидкий рух», 2005. 32 с.

11. ЦШ-0047. Інструкція з технічного обслуговування направляючих ліній (хвилеводів) поїзного радіозв'язку. Київ: Тов «Швидкий рух», 2007. 22 с.

12. Про впровадження каналної сітки радіочастот 12,5 кГц для засобів зв'язку УКХ діапазону: Рішення НКРЗІ № 411 від 19.10.2006 р. URL:
<https://nkrzi.gov.ua/index.php?r=site/index&pg=59&id=4182&language=uk>

13. ДСТУ 4184:2003. Радіостанції з кутовою модуляцією суходільної рухомої служби. Класифікація. Загальні технічні вимоги. Методи вимірювання. Київ, 2003. 50 с.

14. ЦШ-0058. Правила організації та розрахунку мереж поїзного радіозв'язку /Державна адміністрація залізничного транспорту України Укрзалізниця. Київ, 2009. 123 с.

15. ДСТУ 4184:2003. Радіозв'язок. Терміни та визначення. Загальні технічні вимоги. Методи вимірювання. Київ, 2003. 50 с.

16. ДСТУ EN 55011:2019. Промислові, наукові та медичні пристрої. Характеристики радіозавод. Граничні значення та методи вимірювання (EN 55011:2016, IDT). – К. : ДП «УкрНДНЦ», 2019. – 40 с.

17. Бондаренко М. В. Основи метрології та вимірювальної техніки : навчальний посібник / М. В. Бондаренко, О. І. Луньов. – Х. : ХНУРЕ, 2018. – 256 с.
18. Володарський Є. Т. Основи теорії похибок вимірювань : навчальний посібник / Є. Т. Володарський. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2017. – 232 с.
19. Волошин В. С. Основи радіотехнічних вимірювань : підручник / В. С. Волошин, П. М. Сіроштан. – Харків : ХНУРЕ, 2020. – 306 с.
20. Захист від радіозавад на транспорті : підручник / В. П. Лисечко, В. І. Хоменко, М. О. Самойленко та ін. – Полтава : НУ «Полтавська політехніка», 2021. – 320 с.
21. Капустін А. С. Електромагнітна сумісність і завадостійкість радіоелектронних засобів : навчальний посібник / А. С. Капустін. – К. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 280 с.
22. Лебедев С. А. Техніка високих частот та радіовимірювання : підручник / С. А. Лебедев, В. М. Кисельов. – Київ : НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2019. – 410 с.
23. Лисечко В. П. Метрологія, стандартизація та сертифікація у телекомунікаціях : навчальний посібник / В. П. Лисечко, С. В. Жук. – Полтава : НУ «Полтавська політехніка», 2020. – 256 с.
24. Метрологічне забезпечення вимірювань у системах зв'язку : навчальний посібник / В. М. Мартиненко, В. П. Лисечко, І. М. Гончаренко. – Полтава : НУ «Полтавська політехніка», 2022. – 312 с.
25. Основи радіозв'язку на залізничному транспорті : підручник / О. С. Жученко, М. О. Гармаш, І. М. Чернієнко та ін. – Х. : УкрДУЗТ, 2020. – 298 с.
26. Пашковський В. Г. Радіовимірювальні прилади та їх застосування : навчальний посібник / В. Г. Пашковський, О. В. Нестеренко. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2018. – 320 с.

27. Радіозавади та електромагнітна сумісність : навчальний посібник / В. І. Костін, С. П. Білоус, І. В. Мироненко. – Дніпро: НТУ «Дніпровська політехніка», 2021. – 315 с.

28. Радіотехнічні системи залізничного транспорту: Навч. посібник/ С. В. Панченко, С. І. Приходько, А. О. Єлізаренко та ін. – Харків: УкрДУЗТ, 2024. – 146 с.

29. Ткаченко С. Й. Методи та засоби вимірювання в телекомунікаціях : підручник / С. Й. Ткаченко, О. В. Корсунський. – Одеса : ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2019. – 345 с.

30. Electromagnetic Compatibility Engineering / Henry W. Ott. – Hoboken, New Jersey : Wiley-Interscience, 2020. – 880 p.

31. Methods of Measuring Radio Interference Levels / J. K. Fordham, T. R. Morley. – London : Artech House, 2018. – 420 p.

32. Radio Frequency Interference: Measurement and Analysis Techniques / Edited by Kenneth Wyatt, Randy J. Jost. – Boston : Academic Press, 2019. – 386 p.

33. Signal and Noise Measurement Techniques for Communication Systems / Richard A. Poisel. – Norwood: Artech House, 2019. – 456 p.