

**Д. О. Босий, О. І. Саблін, Д. М. Курган,  
В. В. Ковальчук, Р. В. Маркуль**

**БЕЗПЕКА ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ  
ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ**

**ДНІПРО  
2025**

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**Український державний університет науки і технологій**

**Д. О. Босий, О. І. Саблін, Д. М. Курган,  
В. В. Ковальчук, Р. В. Маркуль**

**БЕЗПЕКА ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ  
ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ**

*Монографія*

Дніпро – 2025

УДК 625.1/5-049.5:620.93

Б39

**Рецензенти:**

д-р техн. наук, проф. *Андрієнко П. Д.*  
д-р техн. наук, проф. *Фалендиш А. П.*

**Автори:**

*Босий Д. О.* – підрозділи 1.3, 2.2, 3.1, 4.2;  
*Саблін О. І.* – вступ, підрозділи 1.3.2, 2.3.2, 3.1.2, 4.1;  
*Курган Д. М.* – підрозділи 1.1, 2.1.1-2.1.4;  
*Ковальчук В. В.* – підрозділи 1.2, 2.1.5;  
*Маркуль Р. В.* – підрозділ 3.2.

Рекомендовано до друку вченою радою Українського державного університету науки і технологій (протокол № 13 від 25.06.2025 р.)

**Б 39** Безпека та енергоефективність транспортної інфраструктури : монографія / Д. О. Босий, О. І. Саблін, Д. М. Курган, В. В. Ковальчук, Р. В. Маркуль ; за заг. ред. д-ра техн. наук, проф. О. І. Сабліна ; Укр. держ. ун-т науки і технологій. – Електрон. вид. – Дніпро : УДУНТ, 2025. – 248 с.

**ISBN 978-617-8314-86-6 (PDF)**

Монографія присвячена дослідженню сучасних підходів до підвищення безпеки, надійності та енергоефективності об'єктів критичної транспортної інфраструктури, зокрема залізничного транспорту. У роботі розглянуто питання моніторингу технічного стану елементів залізничної колії, штучних споруд і енергетичних систем залізничного транспорту, а також моделювання процесів, що визначають їх технічний стан, експлуатаційні характеристики та енергоефективність з урахуванням сучасних викликів.

Монографія розрахована на наукових та інженерно-технічних працівників залізниць, які займаються питаннями проектування і експлуатації колійної інфраструктури та пристроїв тягового електропостачання, а також може бути корисною студентам спеціальностей G3 «Електрична інженерія», J7 «Залізничний транспорт».

Рис. 156, табл. 28, бібліогр. 192 назв.

УДК 625.1/5-049.5:620.93

© Босий Д. О., 2025  
© Саблін О. І., 2025  
© Курган Д. М., 2025  
© Ковальчук В. В., 2025  
© Маркуль Р. В., 2025

## Зміст

Вступ .....	6
<b>Сучасний розвиток систем моніторингу технічного стану об'єктів критичної інфраструктури транспорту .....</b>	<b>8</b>
1.1. Системи моніторингу та діагностування технічного стану залізничної колії.....	8
1.1.1. Основні положення .....	8
1.1.2. Вимірювання напружень в елементах колії тензодатчиками .....	9
1.1.3. Вимірювання прискорень коливань рейок і шпал акселерометрами .....	13
1.1.4. Вимірювання швидкості поширення хвиль в баласті .....	15
1.2. Системи і методи моніторингу та діагностування технічного стану штучних споруд залізниць .....	20
1.2.1. Аналіз сучасних систем діагностики та моніторингу стану об'єктів критичної інфраструктури залізниць.....	20
1.2.2. Опис системи діагностики та моніторингу технічного стану та лабораторні тестування системи моніторингу.....	24
1.2.3. Практичне застосування системи діагностики та моніторингу технічного стану тунельного шляхопроводу залізниці .....	32
1.2.4. Рекомендації щодо підбору параметрів системи діагностики та моніторингу технічного стану споруд.....	38
1.3. Моніторинг енергетичних об'єктів транспорту та напрями підвищення їх енергоефективності.....	40
1.3.1. Сучасні технології моніторингу технічного стану елементів енергетичної інфраструктури залізниць .....	40
1.3.2. Вплив підвищення енергоефективності тяги на технічний стан інфраструктури залізниць. Обмеження енергоефективності.....	62
1.3.2. Підвищення енергоефективності транспортної інфраструктури. Регулювання напруги, використання накопичувачів та відновлюваних джерел в системах тягового енергозабезпечення.....	73
Список використаних джерел до розділу 1 .....	86
<b>Дослідження змін технічного стану та енергоефективності об'єктів критичної інфраструктури транспорту.....</b>	<b>95</b>
2.1 Розлад елементів залізничної колії .....	95

2.1.1. Основні положення. Порівняння математичних моделей з погляду можливостей врахування технічного стану залізничної колії.....	95
2.1.2. Введення в моделі «рухомий склад – колія» зміни стану підрейкової основи.....	98
2.1.3. Моделювання розвитку локальної нерівності залізничної колії.....	105
2.1.4. Моделювання пошарового забруднення баласту .....	108
2.1.5. Прогнозування розладнання хрестовин стрілочних переводів залізниць на основі експериментальних даних моніторингу .....	113
2.2. Дослідження режимів систем електропостачання залізниць в задачах підвищення надійності енергозабезпечення тяги поїздів .....	119
2.2.1. Моделювання струморозподілу в тягових мережах з урахуванням інтелектуально-керованих елементів систем тягового електропостачання .....	119
2.2.2. Розрахунки систем тягового електропостачання в просторово-часових координатах .....	123
2.3.2. Дослідження впливу режимів роботи тягових мереж на ефективність і безпеку суміжних підсистем .....	142
Список використаних джерел до розділу 2.....	150
<b>Технології підвищення безпеки транспортної інфраструктури на основі вдосконалення методів її діагностики, утримання та енергоефективності.....</b>	<b>153</b>
3.1. Підвищення надійності та ефективності електропостачання поїздів на основі вдосконалення режимів тягових мереж .....	153
3.1.1. Розподілені системи онлайн-моніторингу та регулювання напруги в тяговій мережі.....	153
3.1.2. Регулювання режимів тягового електропостачання для підвищення ефективності рекуперації енергії поїздів .....	169
3.2. Контроль напружено-деформованого стану в проміжних скріпленнях залізничної колії.....	185
3.2.1. Технологія контролю та утримання рейкової колії із пружними проміжним скріпленням.....	185
3.2.2. Експериментальні дослідження роботи рейкової колії із проміжним скріпленням.....	190
3.2.3. Технологія контролю та утримання рейкової колії із проміжним скріпленням.....	198

Список використаних джерел до розділу 3.....	206
<b>Удосконалення безпеки та енергоефективності об'єктів транспортної інфраструктури в умовах дії різного роду загроз .</b>	<b>208</b>
4.1. Використання ризик-орієнтованого підходу до аналізу енергетичної безпеки транспорту .....	208
4.1.1. Теоретичні передумови та ідентифікація ризиків .....	208
4.1.2. Методи оцінки та моделювання ризиків .....	212
4.1.3. Методи забезпечення енергетичної стійкості і безпеки транспортної інфраструктури .....	217
4.2. Підвищення рівня безпеки і захищеності транспортної інфраструктури від повітряних загроз на основі їх акустичної ідентифікації.....	221
4.2.1. Постановка завдань.....	221
4.2.2. Огляд методів ідентифікації повітряних небезпек.....	224
4.2.2. Існуючі рішення для моніторингу залізничної інфраструктури.....	226
4.2.3. Аналіз акустичних сигнатур повітряних загроз .....	229
4.2.4. Методи ідентифікації повітряних загроз.....	233
4.2.5. Розробка апаратного та програмного забезпечення вбудованого ШІ-рішення .....	240
Список використаних джерел до розділу 4.....	243

## Вступ

Транспортна система відіграє ключову роль у мобільності суспільства та є важливим фактором функціонування і економічного розвитку країни. Безперебійність її роботи і надійність ланцюгів постачання потребують інвестиції в утримання і технологічний розвиток транспортної інфраструктури, впровадження інновацій та забезпечення диверсифікації постачальників і видів енергії.

Функціонування залізничного транспорту, як основного перевізника в Україні, визначається надійністю його критичної інфраструктури, до якої, зазвичай, відносять об'єкти колійного господарства та систему енергозабезпечення. Тобто залізничний транспорт як частина транспортної системи країни містить свою енергетичну підсистему, без якої неможливе його нормальне функціонування. Технічний стан даних об'єктів повинен задовольняти вимогам щодо обсягів, швидкості та безпеки перевезень, енергоефективності та надійності, що набуває особливого значення в умовах глобальних викликів.

Високий ступень зносу основних фондів інфраструктури залізниць обмежує можливості її модернізації за рахунок прямого впровадження новітніх рішень, оскільки сучасні технології потребують адаптації до реального технічного стану об'єктів. Це стосується як систем енергопостачання, так і колійної інфраструктури, де важливо поєднати інноваційні підходи з практичною доцільністю їх використання у наявних умовах.

Безпека та енергоефективність транспортної інфраструктури перебувають у нерозривному взаємозв'язку. Високий рівень енергоефективності не лише знижує енергоємність перевізного процесу, а й підвищує надійність та стійкість системи, роблячи її менш вразливою до перебоїв у постачанні. У свою чергу, ефективні заходи безпеки на основі підвищення ресурсу залізничної колії дозволяють зберігати швидкість і надійність доставки вантажів навіть в умовах кризових чи надзвичайних ситуацій.

Метою цієї монографії є комплексне дослідження проблем моніторингу, прогнозування та поліпшення технічного стану колійної інфраструктури, енергоефективності та енергетичної безпеки залізничного транспорту в цілому. У роботі розглядаються методи оцінювання та поліпшення технічного стану елементів колії,

енергоефективності тягових мереж в умовах енергодефіциту та ризиків з урахуванням можливих сценаріїв загроз для підвищення надійності транспортних вузлів і зниження енергоємності перевізного процесу.

Автори усвідомлюють, що тема безпеки та енергоефективності транспортної інфраструктури є набагато ширшою і багатогранною. Водночас у даній монографії вона розглядається з урахуванням реалій, які відображають сучасні виклики та потреби галузі в контексті обраного змісту та практичних завдань, що дозволяє запропонувати системні підходи для підвищення безпеки та енергоефективності саме у сфері транспортної інфраструктури.

## **Розділ 1**

# **Сучасний розвиток систем моніторингу технічного стану об'єктів критичної інфраструктури транспорту**

## **1.1. Системи моніторингу та діагностування технічного стану залізничної колії**

### **1.1.1. Основні положення**

Залізнична інфраструктура відіграє ключову роль у забезпеченні безпечного, надійного та ефективного функціонування транспортної системи держави. Технічний стан залізничної колії безпосередньо впливає на швидкість руху поїздів, комфорт пасажирів, витрати на обслуговування, а головне – на безпеку перевезень. У зв'язку з цим особливої актуальності набуває впровадження сучасних систем моніторингу та діагностування колійного господарства, які дозволяють своєчасно виявляти відхилення від нормативних параметрів, прогнозувати розвиток дефектів та оптимізувати процеси технічного обслуговування.

Останні роки характеризуються стрімким розвитком технологій збору, обробки та аналізу даних, що сприяє переходу від періодичних інспекцій до безперервного або автоматизованого моніторингу технічного стану колії. Такі системи забезпечують підвищену точність, оперативність і об'єктивність контролю, що особливо важливо в умовах зростання навантаження на інфраструктуру та впровадження високошвидкісного руху.

Сьогодні існує багато способів моніторингу стану залізничної колії. В більшості випадків перевіряється або геометричний обрис залізничної колії або параметри її взаємодії з рухомих складом.

Для контролю характеристик взаємодії колії і рухомого складу використовуються відповідні датчики які можуть встановлюватися як на елементи залізничної колії так і на рухомий склад.

Однією з основних вимог до такої системи моніторингу є її вартість та обмеження в споживанні електричного живлення, яке повинне самовідновлюватися. Тому кількість датчиків, що можуть використовуватися на одній ділянці суттєво обмежена. З іншої сторони система моніторингу повинна охоплювати як можна більшу кількість факторів, що впливають на стан колії. Тому як основний параметр, що контролюється, розглядається жорсткість залізничної колії. На показники жорсткості колії будуть мати вплив як порушення в стані скріплень, шпал, забруднення і деградація баласту, так і зміни в геометричному обрисі колії, такі як просідання та нерівності.

### **1.1.2. Вимірювання напружень в елементах колії тензодатчиками**

Вимірювання напружень вигину в елементах колії може виконуватися тензодатчиками. В більшості випадків такі датчики встановлюються на рейках. Відносна простота та економічність таких датчиків дає змогу встановлювати їх у будь-якому місці рейки, яке не має прямого контакту з колесом, і в реальному часі отримувати дані про вигинальні напруження в головці, шийці та підшві рейки під дією рухомого складу. Приклад ділянки залізничної колії, обладнаної такими датчиками, показано на рис. 1.1. Детальніший опис конструкції такої вимірювальної системи наведено в роботах [1-4].

За допомогою таких датчиків можна оцінювати не лише стан самих рейок, а й підрейкової основи загалом як одного з чинників, що впливають на прогин рейки. Для цього, як і в більшості розрахунків напружено-деформованого стану колії, достатньо використовувати відоме квазістатичне диференціальне рівняння прогину рейки – рівняння (1.1). У роботі [5] методика розрахунку напружень у вмонтованих рейках ґрунтується саме на такому диференціальному рівнянні прогину рейки; у роботі [4] це рівняння застосовується для порівняння статичного та динамічного методів розрахунку силового впливу колеса на рейку; у роботі [6] – для розрахунку напружень у

конструктивних елементах верхньої будови колії при організації руху швидкісних пасажирських поїздів.

$$\frac{d^4 z}{dx^4} + 4k^4 z = 0, \quad (1.1)$$

де  $z$  – вертикальний прогин рейки;  $x$  – відстань від точки прикладання сили (положення колеса на рейці) до розрахункового перерізу;

$$k = \sqrt[4]{\frac{U}{4EI}}, \quad (1.2)$$

де  $U$  – модуль пружності підрейкової основи;  $E$  – модуль пружності рейкової сталі;  $I$  – момент інерції рейки.



Рис. 1.1. Залізнична ділянка з встановленими на рейках тензометричними датчиками

Виходячи з класичного розв’язання рівняння (1.1) для рейки як балки, що опирається на суцільну рівнопружну основу, напруження вигину будуть визначатися за рівнянням:

$$\sigma = \frac{fP}{4kW} \mu, \quad (1.3)$$

де  $f$  – коефіцієнт, що враховує положення датчика по перерізу рейки (голівка, край підшви, ось підшви тощо);  $P$  – сила тиску від колеса на рейку;  $W$  – момент опору рейки;  $\mu$  – функція зміни напружень по довжині рейки:

$$\mu = e^{-kx}(\cos kx - \sin kx). \quad (1.4)$$

З рівняння (1.3) очевидно, що коефіцієнт  $\mu$  може бути визначений експериментально через відношення напружень в перерізі під колесом і на певній відстані  $x$ :

$$\mu = \frac{\sigma_x}{\sigma_0}, \quad (1.5)$$

де  $\sigma_0$  – напруження в рейці в перерізі під колесом;  $\sigma_x$  – напруження в рейці в перерізі на відстані  $x$  від колеса.

На рис. 1.2 показано приклад запису тензометричним датчиком, встановленим на рейці при проходженні пасажирського поїзда зі швидкістю 175 км/год. Вертикальна вісь показує електричну напругу в вольтах, яку фіксує вимірювальний прилад. Цей показник може бути перетворений до механічного напруження в МПа.

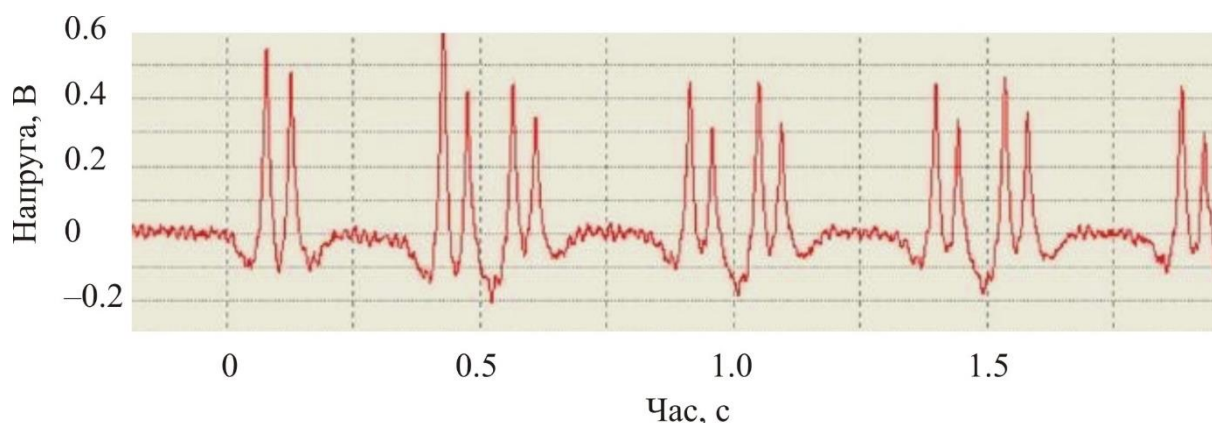


Рис. 1.2. Приклад запису дії на рейку від проходження пасажирського поїзда із швидкістю 175 км/год

Через рівняння (1.2) та (1.5) коефіцієнт  $\mu$  однозначно визначає модуль пружності підрейкової основи  $U$ . Цей показник можна прийняти як узагальнену характеристику стану підрейкової основи [1, 7]. На рис.1.3 показана залежність модуля пружності підрейкової основи від співвідношення напружень (коефіцієнта  $\mu$ ) і різної відстані між датчиками в діапазоні від 0.5 до 1.5 м.

Напруження по довжині рейки затухають доволі швидко. Тому датчики на рейках бажано встановлювати близько, наприклад, через одну-дві шпали. Слід уникати використання відстаней більших за величину  $\pi/2k$ . На рис. 1.2 лінії для  $x = 1.25$  і  $x = 1.5$  м обмежені за цим показником. Для запобігання впливу суміжних коліс рухомого складу можна враховувати тільки крайнє розташування поїзду, коли перше

колесо локомотиву наїхало на переріз з першим датчиком. Краще встановлення послідовності не з двох, а з трьох датчиків, що дає можливість усереднювати результат, та контролювати роботу датчиків.

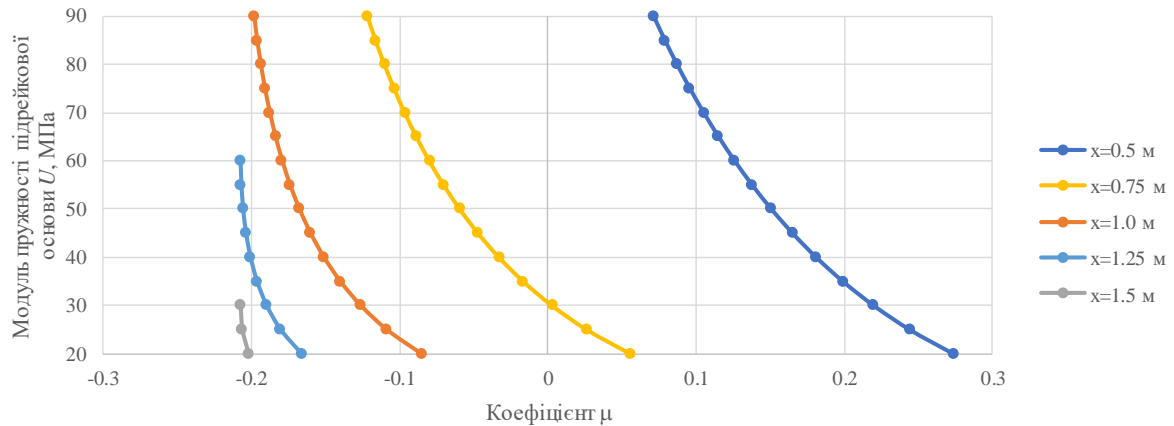


Рис. 1.3. Залежність модуля пружності підрейкової основи від визначеного значення коефіцієнту  $\mu$

Тензодатчики можуть застосовуватися для вимірювання напружено-деформованого стану інших елементів залізничної колії. Зокрема, тензодатчики у вигляді месдоз застосовуються для встановлення в таких шарах залізничної колії як баласт та земляне полотно [7], рис. 1.4.



Рис. 1.4. Встановлення месдоз в баластному шарі залізничної колії

Метод вимірювання згинальних напружень у рейках за допомогою тензометрів ґрунтується на використанні недорогих датчиків, які легко встановлюються у доступних місцях. Отримані значення напружень не лише опосередковано вказують на загальний стан колії, а й дозволяють безпосередньо оцінити один із показників її експлуатаційної якості – осьове навантаження поїздів. Серед недоліків цього методу варто зазначити низьку чутливість результатів до змін загального модуля деформації підрейкової основи.

### **1.1.3. Вимірювання прискорень коливань рейок і шпал акселерометрами**

Акселерометри широко застосовуються для вимірювання прискорень об'єкта, на якому вони встановлені. За принципом дії вони можуть бути п'єзоелектричними, ємнісними, індуктивними тощо. Акселерометри дозволяють вимірювати вібраційні прискорення елементів залізничної колії у трьох напрямках – у вертикальній площині, горизонтально та вздовж колії. Наприклад, різні автори використовували акселерометри у своїх дослідженнях для оцінки стану елементів колії, зокрема баласту [8], стрілочних переводів [9], гофрованих металевих конструкцій [10] тощо.

Окрім амплітуди вібрацій, вимірювання за допомогою акселерометрів дає змогу визначити силу, що діє на об'єкт, використовуючи класичне визначення сили як добутку маси об'єкта на його прискорення. Тому акселерометри часто застосовуються на елементах рухомого складу (локомотивах, вагонах) для визначення сил взаємодії між колесами і візком, візком і кузовом тощо, з огляду на те, що маси цих частин відомі та залишаються сталими під час руху.

Схожа проблема виникає при визначенні сил між елементами залізничної колії, оскільки для цього також потрібно знати їх масу. Наприклад, що слід вважати масою рейки або баласту для розрахунку сил, які діють на них на основі виміряного прискорення. Маси елементів, що працюють не за принципом жорсткого зміщення, а на основі пружного прогину, є величинами, які змінюються з часом, і потребують обґрунтованого трактування залежно від поставленого завдання [11]. Можливо, саме необхідність використання додаткових математичних інструментів для подальшого аналізу результатів вимірювань прискорень на елементах колії пояснює їх обмежене

практичне застосування. Водночас уже сьогодні існують приклади розв'язання таких задач.

У роботі [12] результати, отримані шляхом вимірювання прискорень на рейках, підтверджують гіпотезу про те, що на високих швидкостях (автори проводили вимірювання на швидкості 300 км/год) для безбаластної колії динамічний профіль колеса, що взаємодіє з рейкою, відповідає багатокутнику 20-го порядку. У роботі [13] результати вимірювання прискорень на рейках і елементах підрейкової основи використовувалися для оцінки шумового забруднення на ділянках залізничної колії з плитною основою. У роботі [14] вібраційні прискорення рейок використовувалися для оцінки технічного стану баластної колії.

Частотний аналіз вібрацій у елементах верхньої будови колії було проведено в роботі [15] для оцінки ефективності роботи проміжних рейкових скріплень.

Автономний пристрій для моніторингу стану стрілочного переводу, що передбачає вимірювання вібраційних прискорень його елементів, було запропоновано в роботі [16].

Методику оцінювання стану коліс рухомого складу запропоновано в роботі [17].

На рис. 1.5 наведено фрагменти експериментів із встановленням акселерометрів на підшву рейки та на поверхню шпали поблизу вузла кріплення рейки.



Рис. 1.5. Встановлення акселерометрів: а) на підшві рейки; б) на поверхні шпали

У результаті вимірювань автори цього дослідження отримали амплітуди прискорень у трьох напрямках від різного рухомого складу. Детальніший опис конструкції такої вимірювальної системи надано в роботі [10].

На рис. 1.6 показано приклад реєстрації вертикальних прискорень на бетонній шпалі від пасажирського поїзда, що рухався зі швидкістю 130 км/год. Частота реєстрації становила 1 кГц.

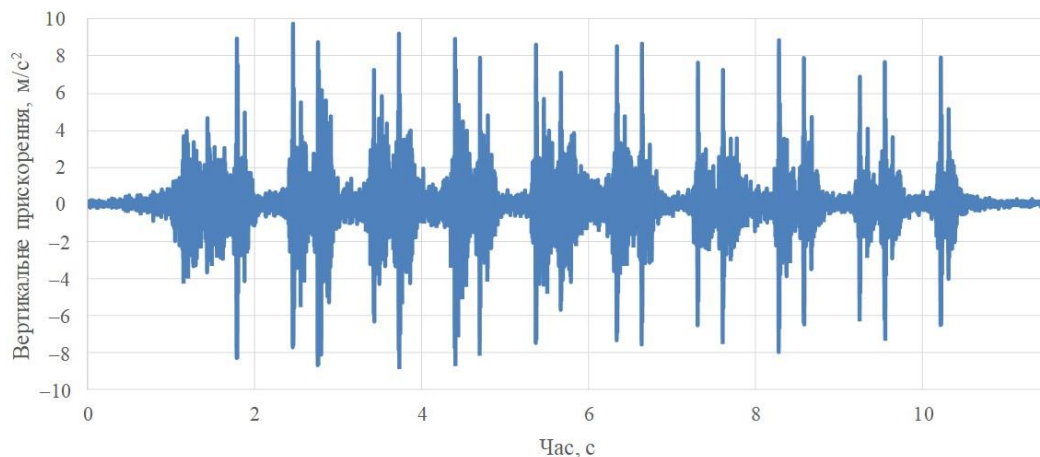


Рис. 1.6. Запис вертикальних прискорень на шпалі від пасажирського поїзда зі швидкістю 130 км/год

Метод вимірювання прискорень вібрацій рейок і шпал базується на застосуванні акселерометрів, які встановлюються у доступних місцях елементів колії та є поширеним типом сенсорів. Отримані результати залежать не лише від стану залізничної колії, а й від технічного стану рухомого складу, зокрема коліс. Це розширює сферу застосування системи моніторингу. Водночас така залежність від великої кількості факторів є суттєвим недоліком. Для виокремлення і оцінювання вібрацій, зумовлених певним чинником, необхідний амплітудно-частотний аналіз сигналу та інші математичні інструменти, тому інтерпретація результатів не завжди є однозначною.

#### **1.1.4. Вимірювання швидкості поширення хвиль в баласті**

Баластний шар залізничної колії відіграє важливу роль у забезпеченні довговічності та надійної експлуатації колії. Однак, внаслідок динамічних навантажень у баласті, досить швидко, накопичуються залишкові деформації та напруження. Це впливає на ступінь ущільнення баласту.

Для контролю ущільнення баласту у процесі експлуатації використовуються різні методи. Одним із сучасних та нових методів є оцінка ущільнення баласту методом вимірювання швидкості поширення звукової хвилі удару. Це можна виконувати із використанням акселерометрів, геофонів тощо.

У відомих методах SASW (Spectral Analysis Surface Waves) та MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) [18, 19] використовується принцип кінематичної та динамічної інтерпретації імпульсного відклику поверхневих хвиль. Однак, ці методи мають недолік через низьку роздільну здатність оцінки властивостей ґрунтів із неоднорідностями.

Слід зазначити, що контроль ущільнення баласту в умовах експлуатації дасть можливість проводити оцінку якості виконання ремонтних робіт, таких як підбивка баласту, що має прямий вплив на довговічність залізничної колії. Це підтверджується працями вчених [20–24].

У праці [25, 26] доведено, що забезпечення проектного ступеню ущільнення баластної призми та ґрунтової ущільнюючої засипки сприяє надійній роботі інженерних споруд залізниці.

У працях [27–29] авторами проведені дослідження поведінки баласту під впливом дії рухомого навантаження залізниці.

У працях [30–32] авторами наголошується актуальність експериментальної оцінки ступеню ущільнення баластного шару залізничної колії. Огляд неруйнівних методів оцінки ущільнення баластного шару колії наведено у праці [33].

Одними із потужних методів аналізу поширення звукових хвиль у баластній призмі, є методи «Machine and deep learning» [34–37], а також методи кластерного та дискримінантного аналізу для виявлення характерних ознак ущільнення баластного шару.

У межах даної статті розглядається метод оцінки ступеню ущільнення баластної призми із використанням інерційних технологій, а саме акселерометрів.

Для оцінки ступеню ущільнення баластної призми залізничної колії використовується метод визначення швидкості поширення звукової хвилі удару. Де швидкість поширення хвилі визначається за формулою:

$$v = \frac{s}{t_1 - t_0}, \quad (1.6)$$

де  $S$  – відстань від ударника до акселерометра;  $t_0$  – час задання імпульсу;  $t_1$  – час проходження хвилі від задання імпульсу – ударнику до приймача імпульсу – акселерометра.

Схема пристрою для вимірювання ступеню ущільнення баластної призми наведена на рис. 1.7.

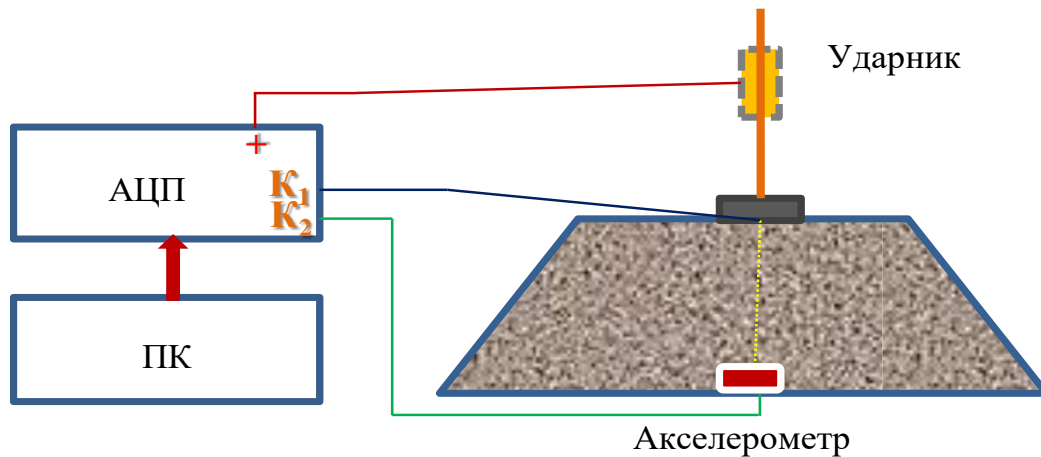


Рис. 1.7. Схема вимірювання ущільнення баласту залізничної колії

У якості датчика для реєстрації часу поширення звукової хвилі удару використано аналоговий датчик прискорень ADXL 335. Аналогова інформація із датчика прискорень записується із частотою 30 кГц і зберігається у пам'яті комп'ютера.

Для задання удару використано металевий ударник по якому із фіксованої висоти падає вантаж вагою 1 кг і обдаряється у металеву пластину. У результаті виникає звукова хвиля.

У момент удару за допомогою замикання контактів один на канал мікроконтролера, а другий контакт на живлення від мікроконтролера +3,3 В фіксується початковий момент часу удару і далі за допомогою мікрофонів MEMS типу ADMP401 відбувається фіксація моменту приходження імпульсу через товщу баласту.

Для реєстрації точного часу поширення звукової хвилі від ударника до акселерометра необхідно знати початок задання удару. У результаті це буде час  $t_0$ . Для його фіксації задіяно два канали на аналогово-цифровому перетворювачу. Один канал подається на +3,3 В, а канал K1 – на аналоговий вхід, що буде відповідати ударнику. Канал K2 подається на акселерометр. У результаті падіння ударника на металеву пластину відбувається замикання контактів і в результаті на каналі K1 буде сигнал величиною 3,3 В. Це вказує на початок задання удару, а відповідно і початок поширення звукової хвилі  $t_0$ . Далі хвиля

поширюється через товщу баластної призми і приходять до акселерометру. Час приходу хвилі на акселерометр становить  $t_1$ . Різниця часу  $t_1 - t_0$  відповідає часу поширення звукової хвилі від ударника до акселерометру.

Для вимірювання часу проходження звукової хвилі удару використовується скляний ящик, у який насипано пісок. На дно ящика вмонтовано акселерометр (рис. 1.8).

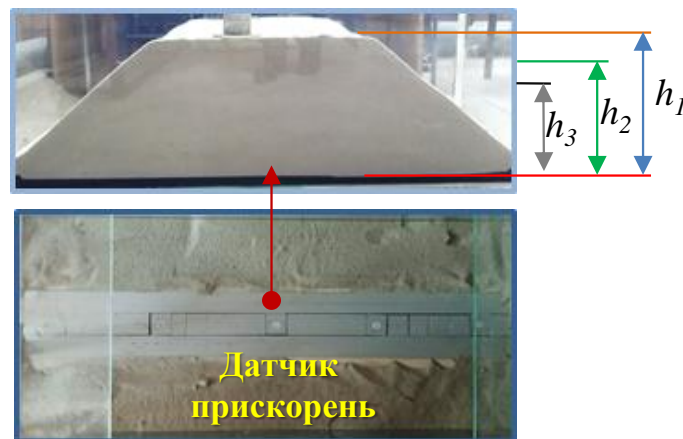


Рис. 1.8. Вигляд баластної призми та розташування датчику прискорень:  
 $h_1$  – висота при неущільненому стані баластної призми;  $h_2$  – проміжне ущільнення баласту;  $h_3$  – максимальне ущільнення баласту

Вимірювання часу проходження звукової хвилі виконувалося у трьох циклах експерименту: насипна щільність баластної призми, проміжне ущільнення і максимальне пошарове ущільнення баластної призми. Висота від підшви до верху баластної призми у неущільненому стані становила  $h_1 = 305$  мм, при проміжному ущільненню –  $h_2 = 295$  мм та при максимальному ущільненню висота баластної призми склала  $h_3 = 270$  мм.

Записи поширення хвиль удару в трьох циклах експерименту наведено на рис. 1.9.

Як бачимо від моменту удару до моменту часу приходу хвилі до акселерометру спостерігається прямолінійна відстань. Вона відповідає часу поширення звукової хвилі удару. При цьому відстань змінюється у залежності від ступеню ущільнення баластної призми. У випадку збільшення ступеню ущільнення баластної призми відстань (кількість точок) від початку задання імпульсу до приходу на акселерометр зменшується.

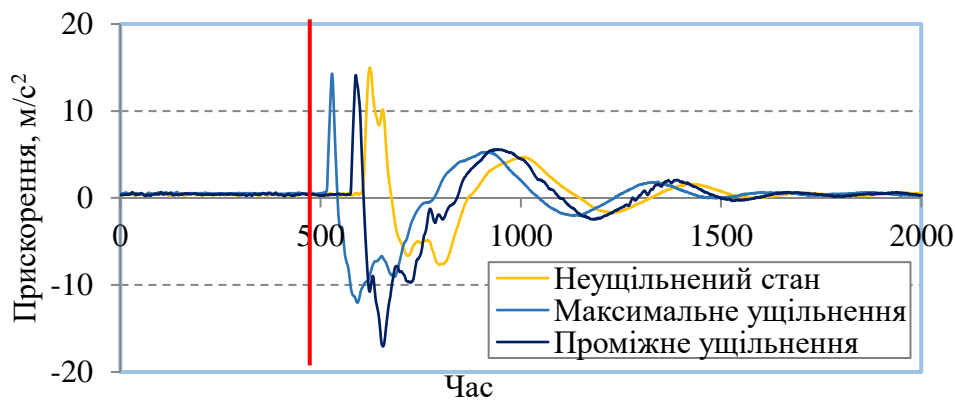


Рис. 1.9. Записи поширення звукових хвиль у трьох циклах експерименту

Результати експериментальних визначень швидкості проходження звукової хвилі наведено на рис. 1.10.

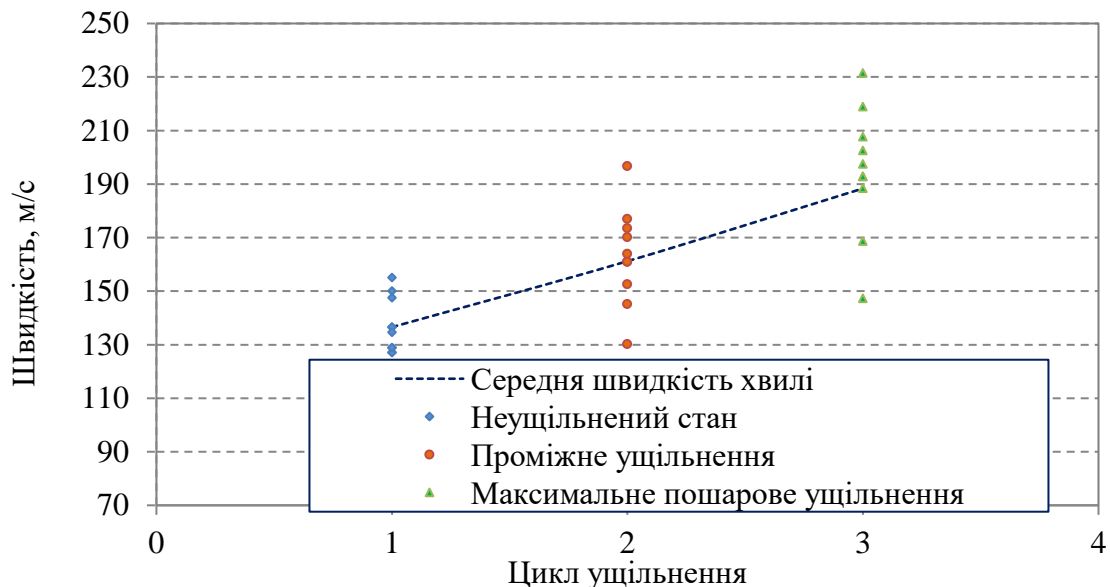


Рис. 1.10. Швидкість поширення звукової хвилі

У випадку розуцільненого стану баластної призми середня швидкість поширення пружної хвилі удару складає 137 м/с, при проміжному ущільненні баласту – 161 м/с та при максимальному пошаровому ущільненні – 188 м/с.

Метод вимірювання швидкості поширення хвиль у шарі баласту дозволяє безпосередньо оцінити стан баластного шару — важливого елемента всієї залізничної колії. Проте застосування цього методу безпосередньо на діючій колії потребує встановлення датчика під шар баласту, що створює певні технологічні труднощі. Крім того, поєднання високої швидкості поширення пружних хвиль у баласті з

його відносно малою товщиною вимагає використання апаратури, здатної фіксувати та обробляти сигнали на значно вищих частотах, ніж це необхідно при використанні попередніх методів.

## **1.2. Системи і методи моніторингу та діагностування технічного стану штучних споруд залізниць**

### **1.2.1. Аналіз сучасних систем діагностики та моніторингу стану об'єктів критичної інфраструктури залізниць**

На сьогодні розроблено достатню кількість технологій, на базі яких створено ефективні системи моніторингу тунелів, мостів, поїздів, залізничних колій та цивільних споруд [38]. Ці системи дозволяють виконувати вимірювання механічних навантажень і напружень в різних елементах з метою своєчасного виявлення змін у конструкціях і матеріалах та оперативного реагування. Система моніторингу може виявляти несправності на ранній стадії і, таким чином, дозволяє проводити роботи з технічного обслуговування та ремонту, що призводить до скорочення експлуатаційних витрат та переходу на технічне обслуговування залежно від поточного стану інфраструктури.

На залізничному транспорті відомий досвід використання технологій TFDS (Train Freight Detection System) [39] на основі високошвидкісної відеофіксації компонентів поїзду та аналізу зображень на предмет потенційних несправностей, або застосування технології розподіленого акустичного зондування DAS (Distributed Acoustic Sensing) [40] на основі акустичного впливу на сигнали в оптоволоконному кабелі, прокладеному вздовж залізниці. Дані технології дозволяють виявляти злами рейок, стеження за рухом поїздів, виконувати моніторинг технічного стану рухомого складу, функції охорони залізничної інфраструктури та виявлення небезпек з боку довкілля для вживання термінових безпекових заходів, де обробка великого об'єму інформації прискорюється за рахунок алгоритмів штучного інтелекту.

Технічний стан об'єктів критичної інфраструктури залізниць відіграє важливу роль у забезпеченні безпечного руху транспортних одиниць із встановленими швидкостями. У Директиві 2016/796 [41] зазначено, що основним критерієм працездатності транспортних споруд є забезпечення безпеки руху.

Комплексний аналіз взаємодії колії та рухомого складу в умовах прискореного руху поїздів виконується на основі експериментальних досліджень динамічної взаємодії колії та рухомого складу залізниць проведено на прямій ділянці колії із рейками Р65 при швидкості рухомого складу 176 км/год. Схема дослідної ділянки з установкою вимірювальних пристроїв наведена на рис. 1.11.

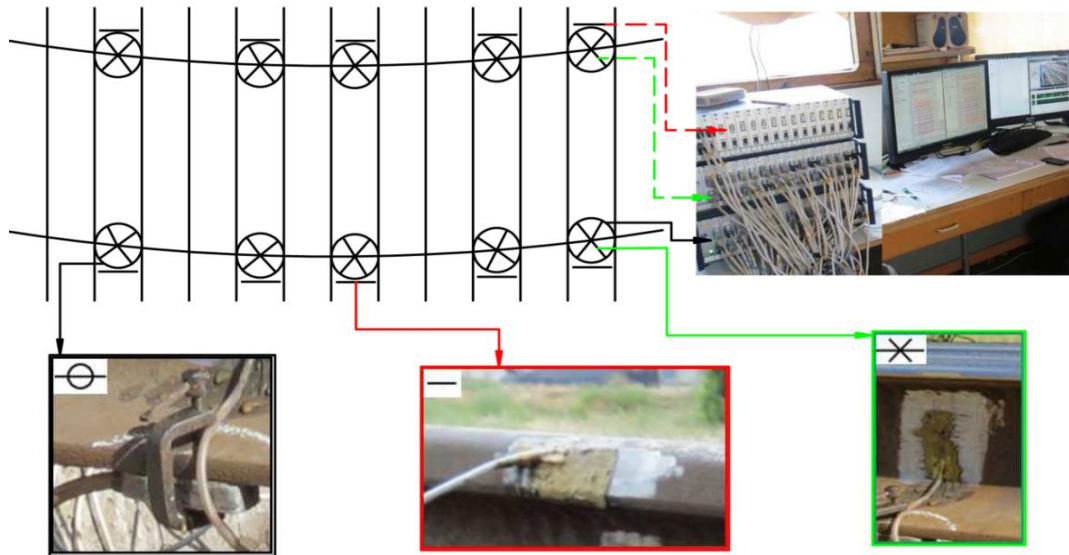


Рис. 1.11. Схема установки вимірювальних пристроїв на дослідній ділянці колії

На першому етапі обробки даних визначаються осі екіпажів, які чинять на колію найбільший вплив. Для рухомих складів це, як правило, перші по ходу осі в направляючого візку.

Первинні вибірки мають порівняно невеликий обсяг, тому таку перевірку зручно виконувати за вищими моментами: асиметрії  $A$  та ексцесу  $E$ :

$$A = \frac{1}{ns^3} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^3, \quad (1.7)$$

$$E = \frac{1}{ns^4} \sum_{i=1}^n (X - \bar{X})^4 - 3, \quad (1.8)$$

де  $n$  – обсяг вибірки;  $X_i (i = 1, 2, \dots, n)$  – поточне значення випадкової величини;  $\bar{X}$  – вибіркове середнє;  $S$  – вибіркове середньоквадратичне відхилення.

В основу досліджень входила оцінка силової складової, напружень

в елементах верхньої та нижньої будови колії від дії рухомого складу нового покоління. У результаті проведених досліджень встановлено, що середні значення напружень в елементах верхньої і нижньої будови колії не перевищують максимально-допустимих. Отримані експериментальні дані менші за максимально-допустимі значення на величину: напруження у кромці головки рейки – 86,44 %; напруження у кромках підшви рейки – 81,51 %; напруження у шпалах – 80,5 %; напруження у баласті – 65,79 %; напруження у земляному полотні – 60 %; значення вертикальної сили – 71,13 % та значення бічної сили – 76,91 %.

Порівняльні значення вище перелічених дослідних параметрів зображено графічно на рис. 1.12.

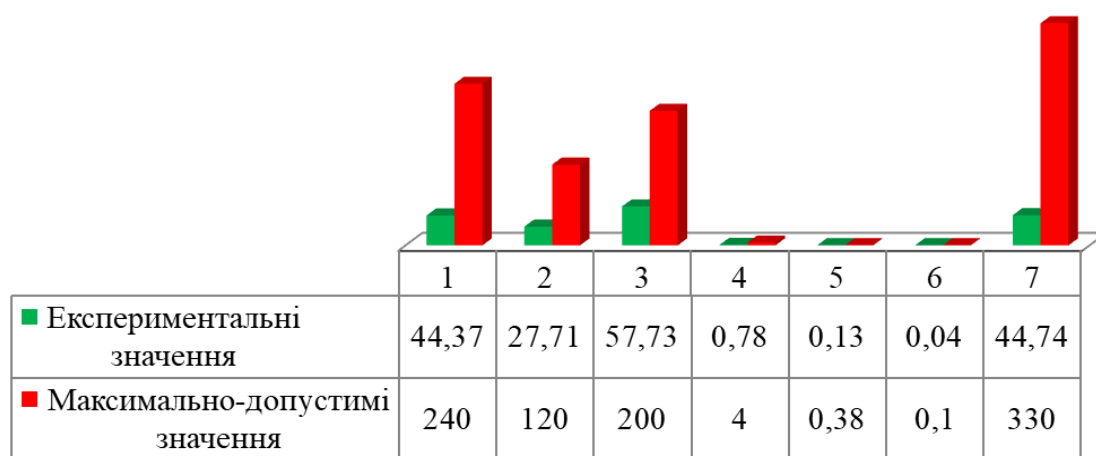


Рис. 1.12. Порівняльні значення отриманих результатів: 1 – напружень у кромці підшви рейки; 2 – бічної сили; 3 – вертикальної сили; 4 – напружень у шпалі; 5 – напружень у баласті; 6 – напружень у земляному полотні; 7 – напружень у кромці головки рейки

На основі проведених експериментальних досліджень встановлено, що при існуючій конструкції залізничної колії доцільно розвивати тенденції подальшого підвищення швидкості руху. Під час збільшення швидкості руху від 140 до 160 км/год, значення досліджуваних вище вказаних параметрів зменшуються: вертикальної сили (9,39 %), бічної сили (19,79 %); напружень в кромці підшви рейок (15,86 %); напружень в кромці головки рейок (16,67 %); напружень в шийці рейки (8,74 %). Це говорить про присутність достатнього запасу міцності елементів залізничної колії. Що стосується поточного утримання, одночасно знаючи ділянки колії, де буде реалізовано підвищення швидкості руху, необхідно своєчасно

виконувати роботи із контролю та ліквідації відступів від норм у відповідності із нормативною документацією.

Для контролю технічного стану об'єктів критичної інфраструктури залізниць проводяться візуальні огляди та інструментальні вимірювання. Однак у працях [42–43] зазначено, що такі методи перевірки не можуть забезпечити достовірної оцінки технічного стану об'єктів критичної інфраструктури. Також не дають можливості прогнозувати термін служби або розладнання окремих їх складових. Тому актуальним є розробка та впровадження систем контролю технічного стану об'єктів критичної інфраструктури залізниць.

У країнах Європейського Союзу відомими є інерційні системи ESAH-M та ESAH-F. Вони використовуються для контролю технічного стану конструкцій залізничної колії [42–50]. Складаються із 3D-датчика прискорень, мають пристрій для оцифровки і зберігання отриманої інформації. Відмінностями між цими системами є тільки те, що система ESAH-M є переносною і нею здійснюються вимірювання тільки у визначений час на одній конструкції залізничної колії (стрілочному переводі), а система ESAH-F встановлюється на рухомому складі залізничного транспорту, і проводить вимірювання прискорень на буксі колісної пари при русі поїзда ділянкою колії.

Однак зазначені системи діагностики мають обмежені можливості, оскільки результати вимірювань містять значну складову ручної роботи, потребують розробки додаткових алгоритмів для обробки виміряного сигналу прискорень. До того ж системи не мають автономного живлення та можливості розширення. Для цього потрібно створювати нову систему. При великих швидкостях рухомого складу можуть пропускати діагностичні дані. Володіють значним енергоспоживанням при обробці даних і їх відображенні на дисплеї пристрою.

Отже, враховуючи досвід запровадження систем діагностики технічного стану елементів транспортної інфраструктури залізниць у країнах Європейського Союзу та їх недоліки, у науковій роботі запропоновано інерційну систему діагностики технічного стану об'єктів критичної інфраструктури залізниць [42–44].

### 1.2.2. Опис системи діагностики та моніторингу технічного стану та лабораторні тестування системи моніторингу

Інерційна система діагностики об'єктів критичної інфраструктури залізниць складається із аналогово-цифрового перетворювача із 32 канали для підключення аналогових триосьових інерційних датчиків прискорень, датчиків шуму та високочастотних лінійних датчиків переміщень (рис. 1.13). Більш детально система описана у патентах та наукових працях [51–55].



Рис. 1.13. Система діагностики технічного стану об'єктів критичної інфраструктури залізниць

АЦП володіє входом-виходом синхронізації та аналоговим виходом, який дає змогу відтворити вимірний сигнал. Для накопичення інформації та роботи програмного забезпечення використано ноутбук моделі LG K1-322CR з операційною системою Microsoft Windows, із зовнішнім жорстким диском з об'ємом 1 ТВ.

З метою збереження та резервування отриманих даних, їх обробки та візуального відтворення застосовано авторське програмне забезпечення «WegweiserS08-15». Програмне забезпечення складається з наступних підсистем: збору вимірювальної інформації; визначення рівня прискорень; оцінки переміщень споруди внаслідок дії динамічного навантаження від рухомих транспортних одиниць.

Принцип роботи системи базується на вимірюванні вертикальних та горизонтальних прискорень коливань, які виникають при проїзді рухомого складу залізничного транспорту. Величина цих прискорень є мірою зміни технічного стану об'єктів критичної інфраструктури залізниць. Виміряні первинні дані оцінюються на основі визначених критеріїв при застосуванні комплексних алгоритмів. При

неприйнятних відхиленнях від справного стану отримані дані передаються у центр діагностики споруд, відтак плануються подальші заходи стосовно відновлення технічного стану споруд (рис. 1.14).

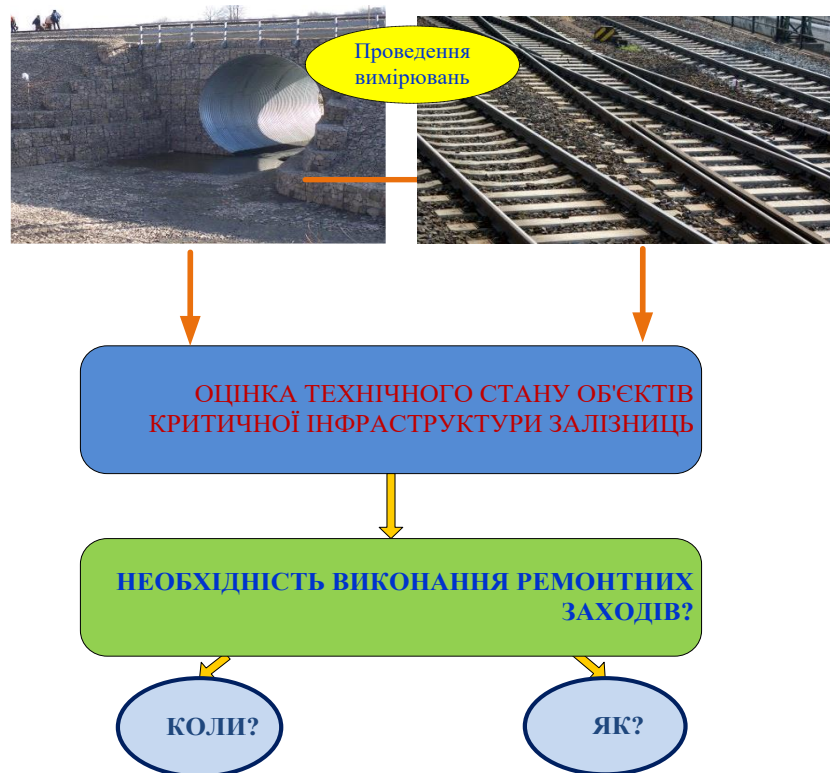


Рис. 1.14. Структурна схема діагностики технічного стану об'єктів критичної інфраструктури залізниць

Оптимальні моменти виконання та виду робіт встановлюватимуться на основі зібраних статистичних даних вимірювань за тривалий період часу та розробленої статистичної моделі. Із використанням статистичних та економічних методів встановлюються оптимальні моменти, які забезпечують, з однієї сторони, – мінімальну кількість вартісних робіт із поточного утримання, а з іншої – своєчасність їх проведення, що призводить до продовження життєвого циклу та підвищення несучої здатності та довговічності об'єктів критичної інфраструктури залізниць.

Розроблена система реалізує дві функціональні можливості: оцінку показників технічного стану та безпечного функціонування об'єктів критичної інфраструктури залізниць, а також виконання вимірювань прискорень в автономному режимі «чорного ящика» з подальшою статистичною обробкою.

Таким чином, запропонована система діагностики технічного стану об'єктів критичної інфраструктури залізниць дозволить перейти на новий рівень в еволюції традиційної технології діагностики, а саме: транспортна інфраструктура із автоматизованою технологією утримання при мінімальній участі людини.

З метою перевірки достовірності отримуваних даних переміщень із запропонованої системи були проведенні її експериментальні випробування у лабораторії Дрезденського технічного університету на гідропульсі типу ZWIC HB 160.

Програма експериментальних випробувань передбачала імітацію руху рухомого складу залізниць при різних швидкостях руху і параметрах геометричних нерівностей, із визначенням значень прискорень та переміщень (рис. 1.15).

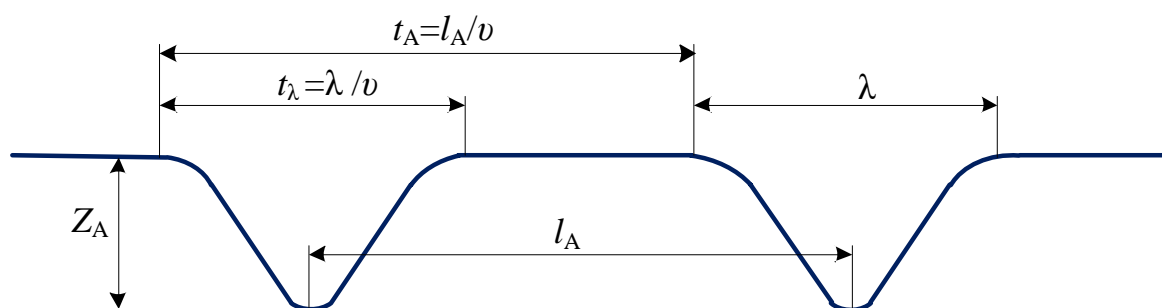


Рис. 1.15. Принципова схема до визначення значень прискорень

Залежно від швидкості та геометричних параметрів нерівності (рис. 1.15), прискорення визначається за формулою:

$$\ddot{z}_A = \frac{z_A}{2} \left( 2\pi \cdot \frac{v}{\lambda} \right)^2, \quad (1.9)$$

де  $z_A$  – глибина нерівності;  $\lambda$  – довжина нерівності;  $v$  – швидкість руху транспортних засобів.

Тривалість імпульсу та значення прискорень, залежно від геометричних параметрів нерівності, наведено у табл. 1.1.

Випробування системи полягало в тому, що, порівнюючи значення переміщень штапу гідропульсу із значеннями переміщень, які отримані системою непрямым методом (за допомогою акселерометра), оцінюємо точність визначення переміщень при різних умовах експлуатації.

Таблиця 1.1

## Програма експериментальних випробувань системи

№ п/п	Довжина нерівності $\lambda$ , м	Глибина нерівності $Z_A$ , мм	Відстань між візками $l_A$ , м	Швидкість $v$ , м/с	$t_A$ , с	$t_\lambda$ , с	Прискорення $\ddot{z}_A$ , м/с <sup>2</sup>
1	6	2	12	10	1,2	0,6	0,1
2				20	0,6	0,3	0,4
3				30	0,4	0,2	1,0
4				40	0,3	0,15	1,8
5				50	0,24	0,12	2,7
6				60	0,2	0,1	3,9

Такі дослідження є базовими для коректної оцінки значень переміщень, отриманих за значеннями вимірних прискорень, методом математичної обробки сигналу прискорень.

Вигляд процесу експериментальних випробувань системи наведено на рис. 1.16.

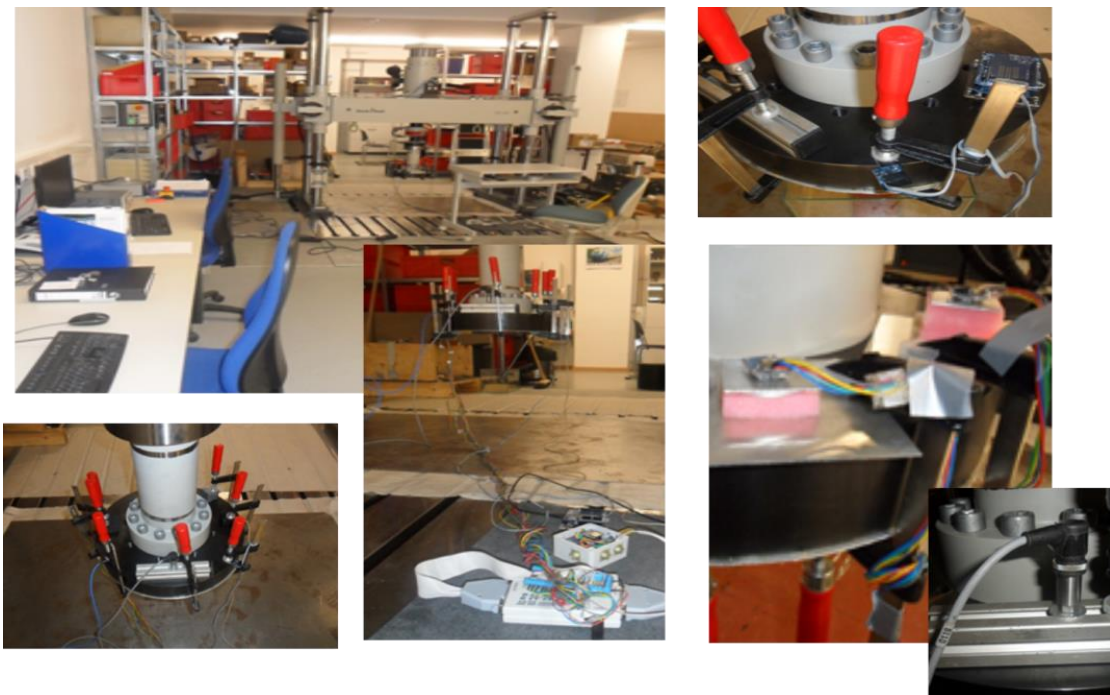


Рис. 1.16. Експериментальні тестування системи діагностики об'єктів критичної інфраструктури залізниць на гідропульсі ZWIC HB 160 у лабораторії ТУ Дрезден

Результати запису прискорень запропонованою системою діагностики при швидкості руху транспортних засобів 49 км/год наведено на рис. 1.17, а при швидкості руху 156 км/год – на рис. 1.18.

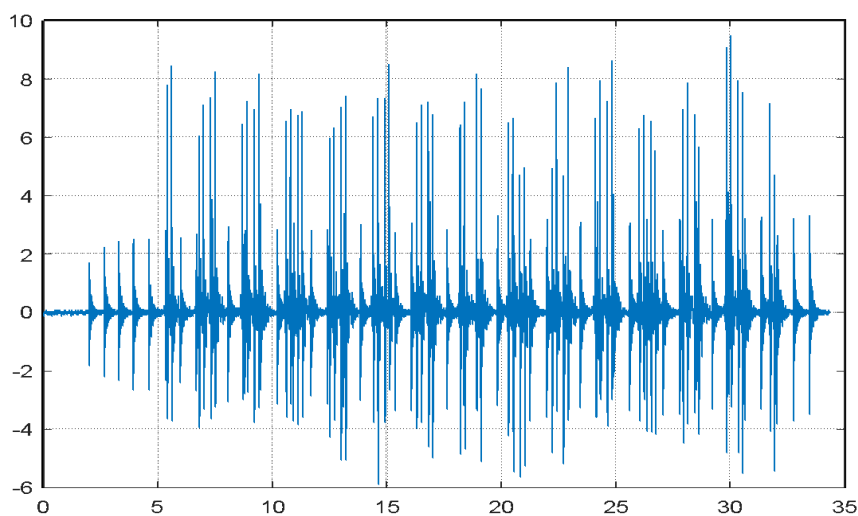


Рис. 1.17. Запис прискорень системою при швидкості 49 км/год

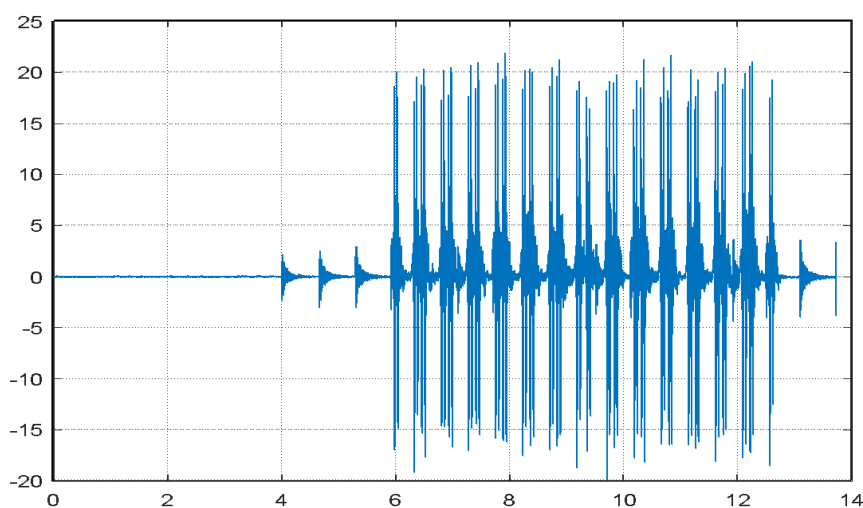
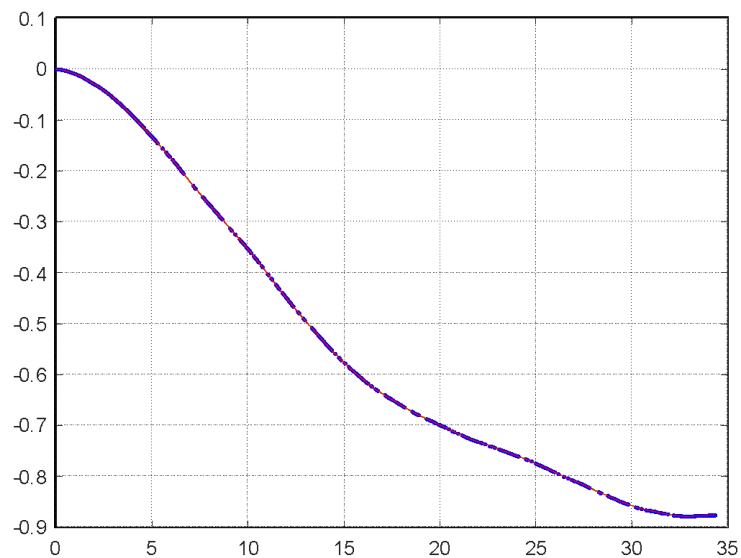


Рис. 1.18. Запис прискорень системою при швидкості 156 км/год

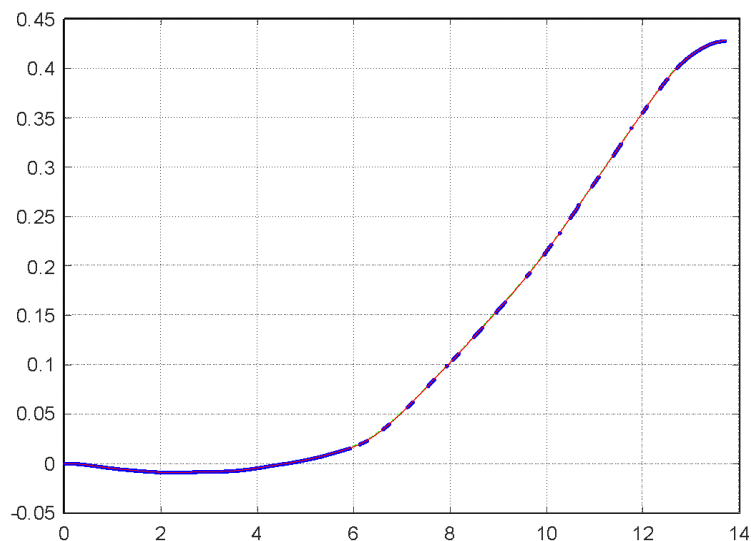
Для виключення високочастотних складових у спектрі вхідного сигналу і вибору для аналізу смуги частот, які відповідають власним коливанням системи, в процесі обробки виміряних значень прискорень використовуємо цифрову фільтрацію сигналу, відповідно до робіт [56–68]. Для цього розроблено програмне забезпечення із усунення дріфту сигналу методом згладжування сигналу сплайнами на окремих ділянках. Крім цього, дана програма дозволяє прочитати дані, які передає мікроконтролер з відповідною швидкістю передачі та заданою довжиною пакету даних з СОМ-порта комп'ютера. Вона також

візуалізує отримані дані в числовому та графічному вигляді. Для збереження інформації здійснюється експорт даних у пакет Microsoft Excel, з побудовою відповідних графіків у зручному для користувача вигляді.

На рис. 1.19, *a*, *b* наведено результати фільтрації сигналу сплайнами при швидкості транспортних засобів 49 км/год та 156 км/год відповідно.



*a)*



*b)*

Рис. 1.19. Фільтрація сигналу сплайнами: *a* – при швидкості 49 км/год, *b* – при швидкості 156 км/год

Для визначення швидкості необхідно значення прискорень  $a_x$  та  $a_y$  проінтегрувати із трапецеїдальним наближенням [66] за формулами:

$$V_x = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{(a_{x_{i-1}} + a_{x_i})}{2} \cdot \Delta t \right],$$

$$V_y = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{(a_{y_{i-1}} + a_{y_i})}{2} \cdot \Delta t \right],$$
(1.10)

де  $\Delta t$  – інтервал часу між значеннями прискорень.

Для отримання значень переміщення проінтегруємо значення швидкостей  $V_x$  та  $V_y$  по двох осях за формулами:

$$S_x = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{(V_{x_{i-1}} + V_{x_i})}{2} \cdot \Delta t \right],$$

$$S_y = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{(V_{y_{i-1}} + V_{y_i})}{2} \cdot \Delta t \right],$$
(1.11)

Результати переміщень, отримані при використанні запропонованої інерційної системи і швидкості транспортних засобів 49 км/год, наведені на рис. 1.20, а при швидкості 156 км/год – на рис. 1.21.

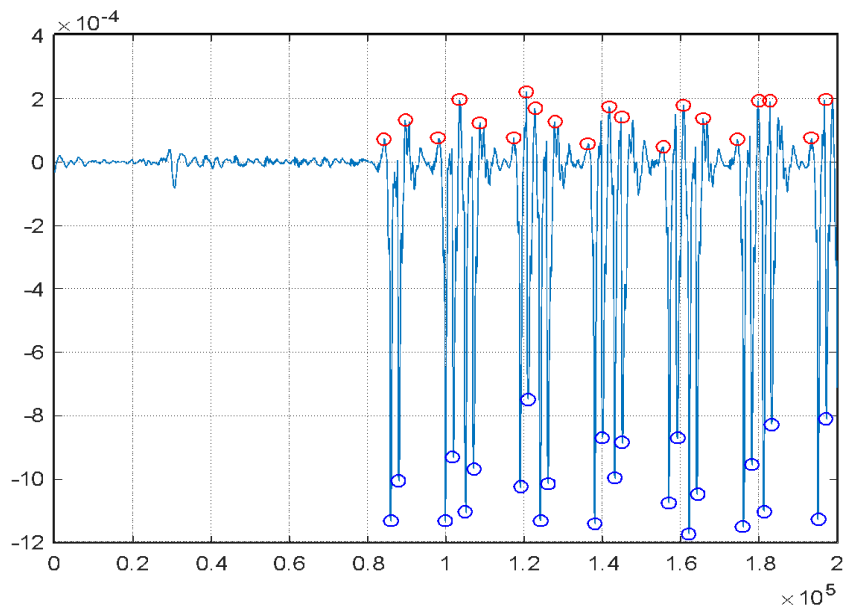


Рис. 1.20. Переміщення при швидкості 49 км/год

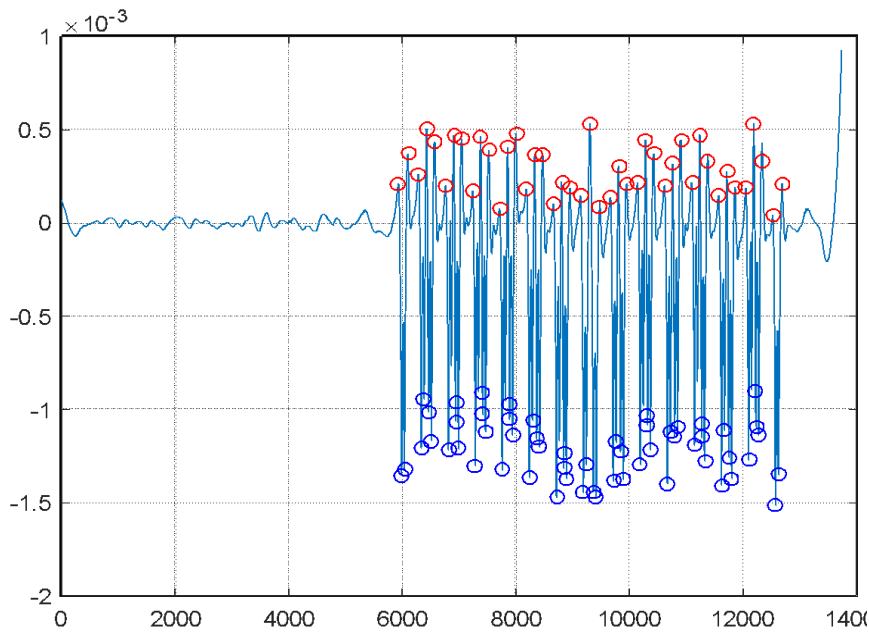


Рис. 1.21. Переміщення при швидкості 156 км/год

Порівняння реальних значень переміщень штапу гідропульсу із переміщеннями, отриманими за допомогою розробленої системи, показало, що точність визначення переміщень складає 0,1 мм, як при малих швидкостях руху, так і при великих. Порівняльна оцінка наведена у табл. 1.2.

Таблиця 1.2

**Результати порівняння переміщень**

Показник	Швидкість 49 км/год	Швидкість 156 км/год
Середнє значення, мм, ADX335	1,72	1,66
Середнє значення, мм, Hidropuls	1,88	1,59
Середньоквадратичне відхилення	9,92	9,82

Похибка вимірювань переміщень при швидкості транспортних засобів 49 км/год складає 8,5 %, а при швидкості 156 км/год – 4,2 %. Отже, на основі проведених лабораторних експериментів встановлено, що запропонована система діагностики має високу точність вимірювання значень переміщень, тому може мати практичне застосування для проведення оцінки технічного стану об'єктів критичної інфраструктури залізниць.

### 1.2.3. Практичне застосування системи діагностики та моніторингу технічного стану тунельного шляхопроводу залізниці

Проведено експериментальні дослідження споруди із металевих гофрованих конструкцій, яка експлуатується під залізничною колією. Геометричні розміри шляхопроводу: поперечний переріз споруди – еліпс із шириною 9,23 м, висотою 8,12 м та довжиною 34,19 м. Фасади шляхопроводу із сторони входу та виходу наведено на рис. 1.22.

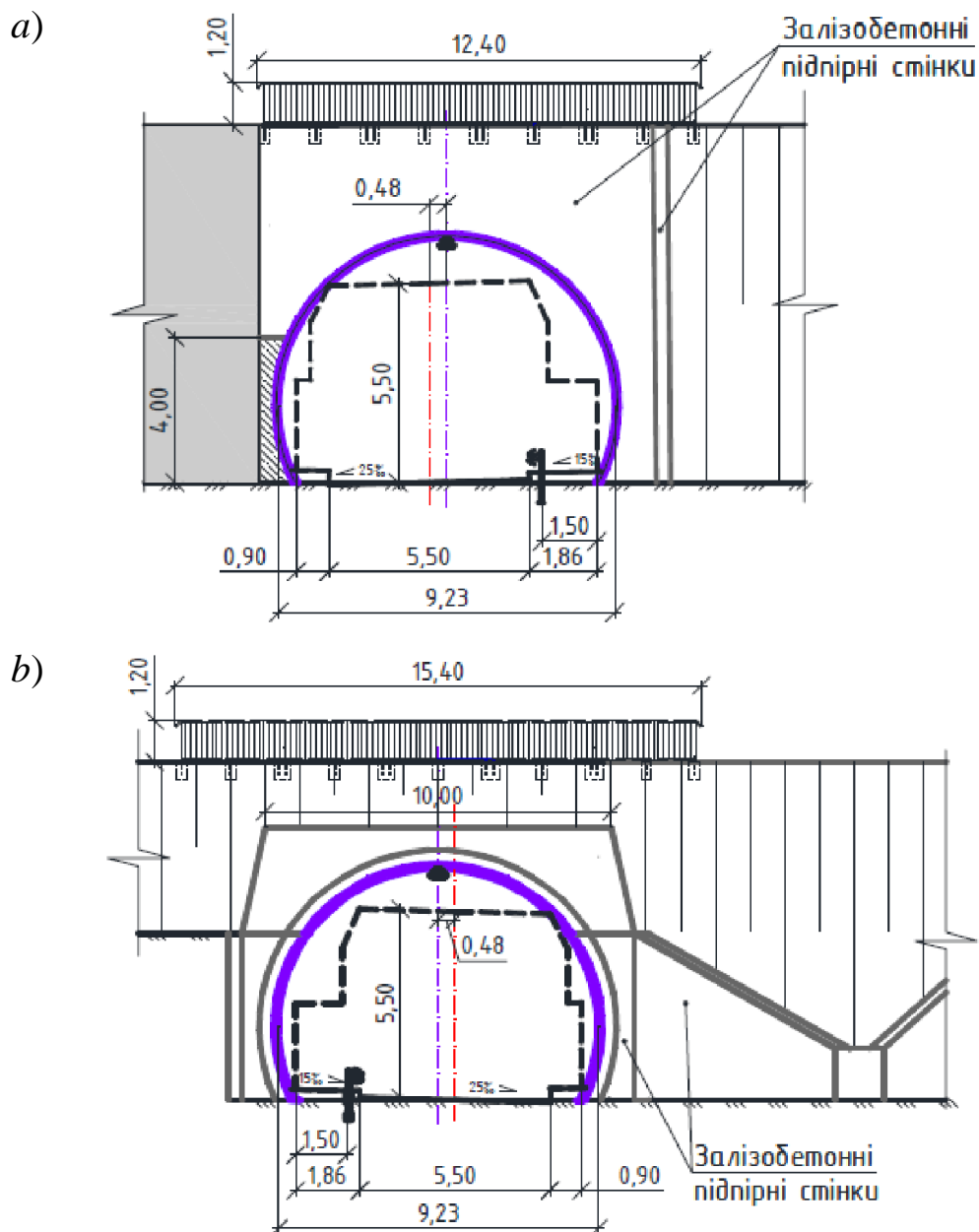


Рис. 1.22. Фасад шляхопроводу зі сторони входу (a) та виходу (b)

При дослідженні несучої здатності шляхопроводу із МГК використано розроблену інерційну систему. Експеримент полягав у тому, що за допомогою системи отримували значення прискорень, які далі обробляли за допомогою авторської програми «WegweiserS08-15» і визначали переміщення вершини та бокових горизонтальних сторін металевої гофрованої конструкції шляхопроводу.

Для цього було реалізовано дві схеми розміщення акселерометрів. Схема 1 – датчики розміщені під віссю непарної колії та схема 2 – датчики розміщені під віссю парної колії. У кожній схемі використано по три датчики прискорень. Два датчики були розміщені у вершині конструкції шляхопроводу (найбільший вертикальний розмір) та чотири на бокових горизонтальних сторонах конструкції шляхопроводу (найбільший горизонтальний розмір). Схеми розміщення датчиків прискорень наведено на рис. 1.23, *a*, *b*.

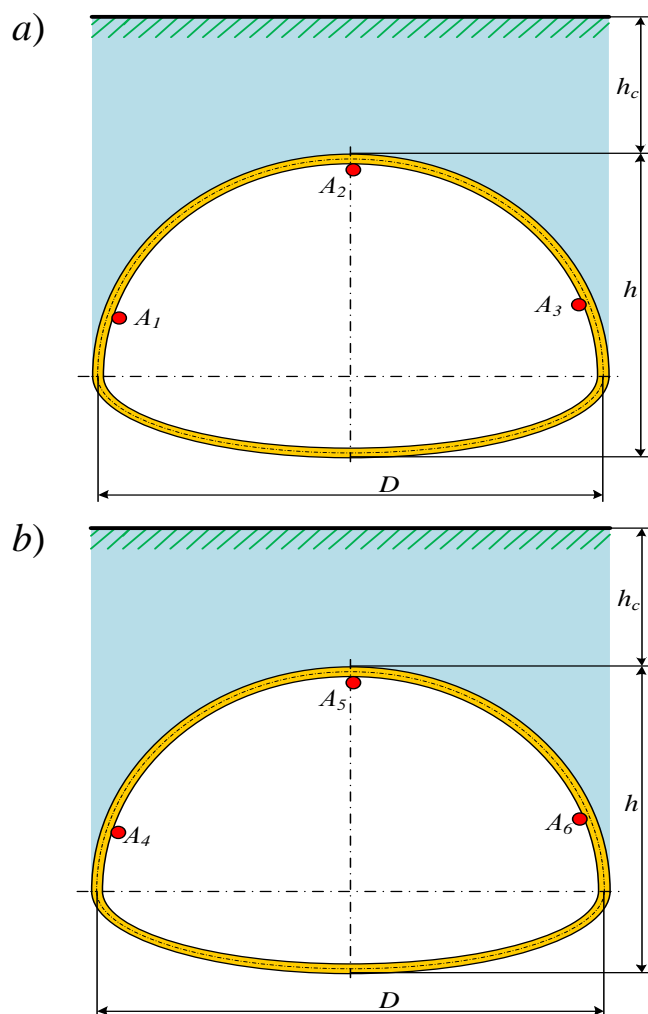


Рис. 1.23. Схеми розміщення датчиків прискорень під віссю непарної колії (*a*) та під віссю парної колії (*b*):  $A_1$ – $A_6$  – акселерометри

Програма експериментальних досліджень передбачала вимірювання прискорень від дії поїздів, які рухаються магістральною залізницею за графіком у напрямку Котовськ–Знам’янка і навпаки.

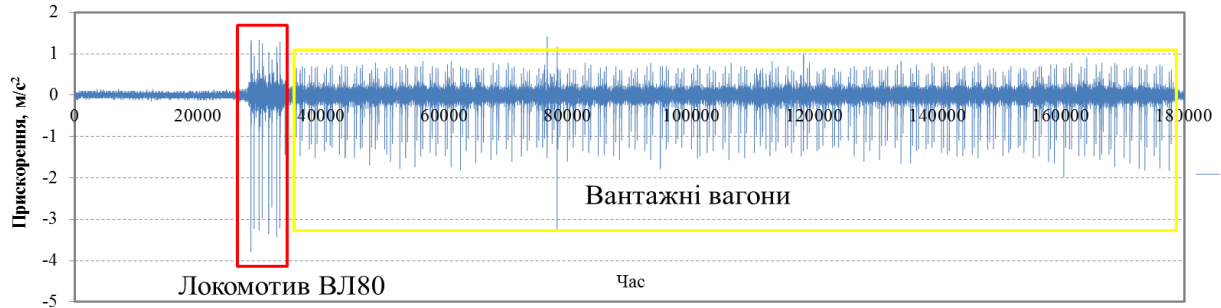
У ході проведення експерименту по непарній колії прослідували два вантажні поїзди та один пасажирський, а по парній колії – один пасажирський [69]. Процес проведення експериментальних випробувань металевих гофрованих конструкцій шляхопроводу наведено на рис. 1.24.



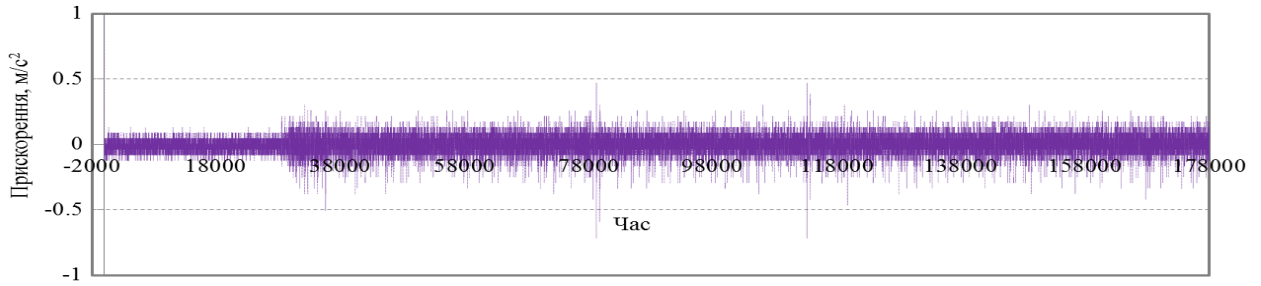
Рис. 1.24. Процес проведення експериментальних інерційних випробувань металевих гофрованих конструкцій шляхопроводу

Вигляд ліній запису прискорень, які виникають у вершині металевій гофрованої конструкції шляхопроводу та на її боковій горизонтальній стороні від дії вантажного поїзду, наведено на рис. 1.25, а від дії пасажирського поїзду – на рис. 1.26. Із ліній запису прискорень, які виникають у металевій гофрованій конструкції шляхопроводу, відслідковуються ділянки прискорень, спричинені тяговим рухомим складом та вагонами, які йдуть за ним. При проїзді вантажного поїзду максимальні значення прискорень виникають від тягового рухомого складу і вдвічі менші від вантажних вагонів.

Цікавою особливістю є розподіл прискорень у вершині металевій гофрованої конструкції при зміні швидкості руху пасажирського поїзду. На рис. 1.26, а можна побачити, що при збільшенні швидкості рухомого складу значення прискорень, які виникають у конструкції шляхопроводу від дії останніх вагонів, є вдвічі більшими від значень прискорень, які виникають від тягового рухомого складу [69].

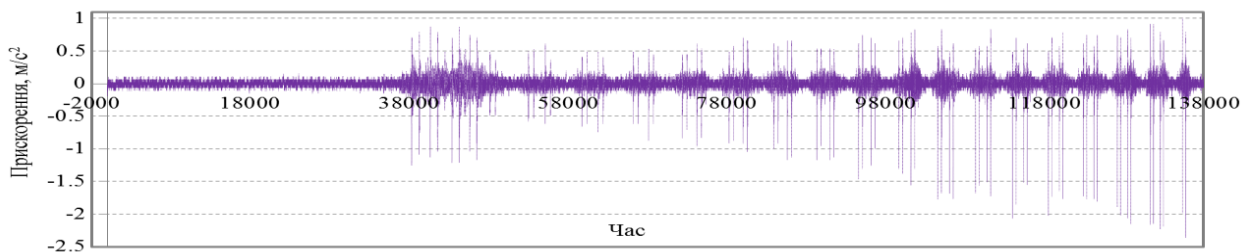


a)

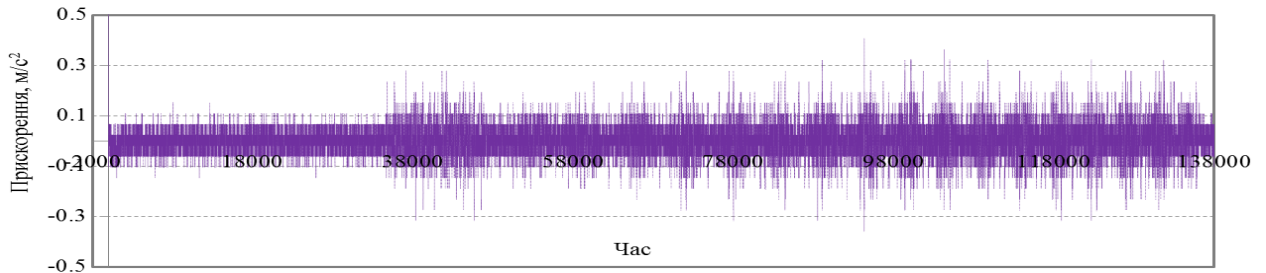


b)

Рис. 1.25. Прискорення у вершині металевої гофрованої конструкції шляхопроводу (a) та бокових горизонтальних сторонах конструкції (b) при проїзді вантажного поїзду



a)



b)

Рис. 1.26. Прискорення у вершині металевої гофрованої конструкції шляхопроводу (a) та бокових горизонтальних сторонах конструкції (b) при проїзді пасажирського поїзду

Тому при оцінці несучої здатності споруд із металевих гофрованих конструкцій необхідно виконувати багатоваріантний розрахунок залежно від швидкості рухомих транспортних одиниць.

Далі на основі вимірних значень прискорень за допомогою методів обробки сигналу прискорень, наведених вище, отримано переміщення металеві гофрованої конструкції у точках встановлення датчиків прискорень. Вигляд ліній запису переміщень, які виникають у вершині металеві гофрованої конструкції шляхопроводу та на бокових горизонтальних стінках конструкції від дії вантажного поїзду, наведено на рис. 1.27, а від дії пасажирського – на рис. 1.28.

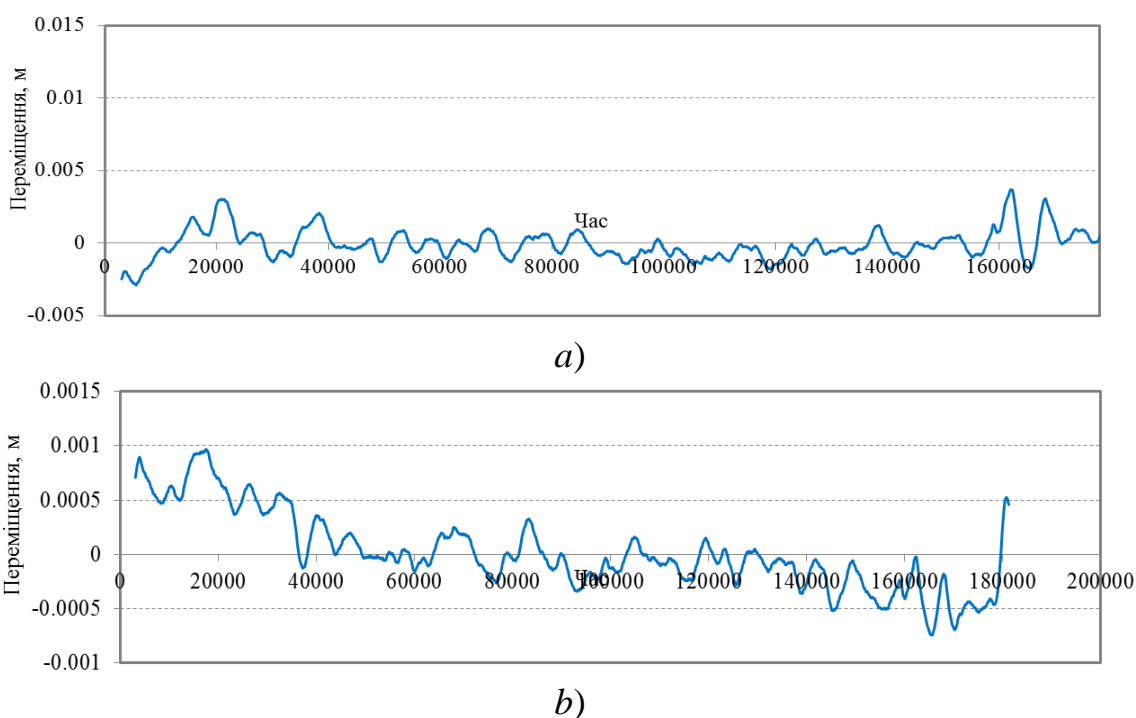
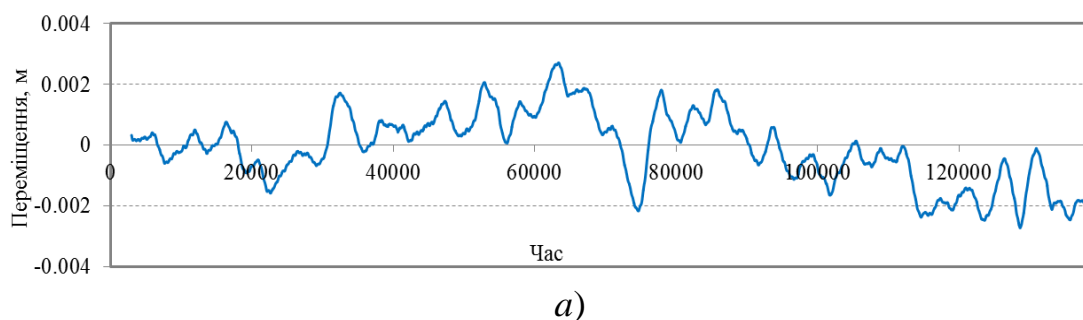


Рис. 1.27. Переміщення вершини металеві гофрованої конструкції шляхопроводу (a) та бокових горизонтальних стінок конструкції (b) при проїзді вантажного поїзду



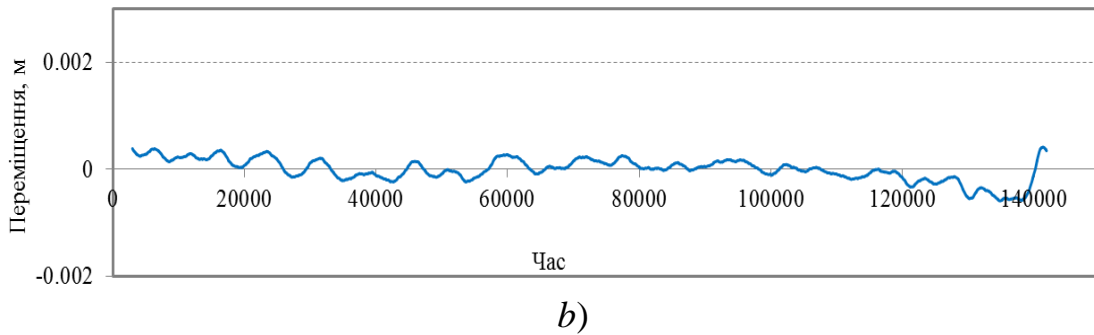


Рис. 1.28. Переміщення вершини металевої гофрованої конструкції шляхопроводу (а) та бокових горизонтальних стінок конструкції (b) при проїзді пасажирського поїзда

Значення максимальних прискорень та переміщень, які виникають на вершині металевої гофрованої конструкції шляхопроводу (вертикальний розмір по осі Z) та на бокових горизонтальних стінках конструкції шляхопроводу (горизонтальний розмір по осі X), наведено у табл. 1.3 та табл. 1.4 відповідно.

Таблиця 1.3

**Максимальні прискорення, які виникають у металевій гофрованій конструкції шляхопроводу**

Вид поїзду	Горизонтальний розмір конструкції		Вертикальний розмір конструкції		Горизонтальний розмір конструкції	
	A1	A4	A2	A5	A3	A6
Пасажирський	0,40	–	2,36	–	0,42	–
Вантажний	0,88	–	3,77	–	0,71	–
Вантажний	2,63	–	7,99	–	2,35	–
Пасажирський	–	1,96	–	6,21	–	1,77

Таблиця 1.4

**Максимальні переміщення горизонтального та вертикального розмірів металевої гофрованої конструкції шляхопроводу**

Вид поїзду	Горизонтальний розмір конструкції		Вертикальний розмір конструкції		Горизонтальний розмір конструкції	
	A1	A4	A2	A5	A3	A6
Пасажирський	0,41	–	1,02	–	0,63	–
Вантажний	1,07	–	1,54	–	0,91	–
Вантажний	0,51	–	1,63	–	0,65	–
Пасажирський	–	0,39	–	1,11	–	0,8

Із табл. 1.3 видно, що максимальні значення прискорень, які виникають у вершині металевій гофрованої конструкції шляхопроводу при проїзді вантажного поїзда, становлять  $7,99 \text{ м/с}^2$ , а при проїзді пасажирського –  $6,21 \text{ м/с}^2$ .

Із проведених динамічних інерційних випробувань встановлено, що максимальні значення переміщень вертикального розміру конструкції шляхопроводу отримано при проїзді вантажного поїзда, величиною  $1,63 \text{ мм}$ , а на бокових горизонтальних сторонах конструкції шляхопроводу –  $1,07 \text{ мм}$ . При проїзді пасажирського поїзду максимальні значення переміщень вертикального розміру конструкції шляхопроводу склали  $1,11 \text{ мм}$ , а на бокових сторонах конструкції –  $0,63 \text{ мм}$ .

Величина відносних деформацій вертикального розміру конструкції шляхопроводу (по осі Z) при динамічних випробуваннях становить  $0,020 \%$  від вертикального розміру споруди, а величина відносних деформацій горизонтального розміру конструкції шляхопроводу (по осі X) –  $0,012 \%$  від горизонтального розміру споруди.

Отже, величини відносних деформацій вертикального та горизонтального розмірів металевій гофрованої конструкції шляхопроводу є меншими за  $3 \%$ , які регламентуються нормами, тому це дає змогу зробити висновок, що несуча здатність металевих гофрованих конструкцій забезпечена.

#### **1.2.4. Рекомендації щодо підбору параметрів системи діагностики та моніторингу технічного стану споруд**

З метою отримання достовірних результатів контрольних вимірювань значень деформацій у характерних перетинах металевій гофрованої конструкції потрібно організувати моніторинг змін значень прискорень і встановити наявності залежності цих змін від зовнішніх експлуатаційних факторів, а саме, транспортних засобів.

Аналіз графічних зображень збільшення прискорень, а відповідно і зусиль служить індикатором змін технічного стану споруд із металевих гофрованих конструкцій. Ці процеси можливо якісно оцінити тільки при значній кількості статистичної інформації. При цьому весь обсяг інформаційних даних, які відображають зміни геометричних параметрів окремих елементів металевій гофрованої

конструкцій, необхідно реєструвати в безперервному режимі реального часу, оскільки поодинокі виміри не здатні надати вичерпних відомостей про технічний стан транспортних споруд із металевих гофрованих конструкцій.

Вимірювання прискорень слід проводити у визначених місцях транспортної споруди. Рекомендується проводити вимірювання прискорень у склепінні труби та на горизонтальних сторонах металевої гофрованої конструкції. Технічні вимоги до акселерометрів, залежно від їх розміщення на транспортній споруді, наведені у табл. 1.5.

Таблиця 1.5

**Загальні технічні вимоги до акселерометрів для діагностики МГК**

№	Місце встановлення акселерометра	Діапазон прискорень, м/с <sup>2</sup>	Діапазон частот, Гц
1	Склепіння споруди	± 100	< 1000
2	Горизонтальний діаметр споруди	± 50	< 1000

На основі багатоваріантних статистичних значень вертикальних та горизонтальних прискорень можна проводити оцінку технічного стану транспортних споруд. Вчасне встановлення геометричних відхилень параметрів споруди від нормативних значень дозволить попередити погіршення технічного стану споруди, а відтак і дозволить забезпечити відновлення проектної несучої здатності та довговічності транспортних споруд із металевих гофрованих конструкцій.

Для оцінки показника безпеки руху рухомого складу залежно від технічного стану споруди запропоновано метод оцінки, який ґрунтується на значеннях вимірних вертикальних та поперечних прискорень. Такі підходи описані авторами у роботах [57–59].

Для гранично можливих значень прискорень, які не впливають на несучу здатність та довговічність споруд із МГК, рекомендується критерій неперевищення максимальних значень прискорень у склепінню конструкції споруди (вертикальний розмір споруди) 10 м/с<sup>2</sup>, як такий, що ґрунтується на неперевищенні максимальних відносних деформацій труби 3 %, відповідно до вимог нормативних документів [70].

Розглянуті підходи діагностики технічного стану об'єктів критичної інфраструктури залізниць методами статистичної обробки сигналу прискорень є перспективними дослідженнями, які дозволять

надійно планувати технічні рішення із поточного утримання критичної інфраструктури. Це в комплексі призведе до зменшення витрат, а з іншої сторони, надасть можливість підвищити термін експлуатації об'єктів критичної інфраструктури залізниць, таких, як транспортні споруди із металевих гофрованих конструкцій, стрілочні переводи, земляне полотно залізничної колії та підвищити стан безпеки руху за рахунок вчасного попередження розвитку несправностей.

Контроль технічного стану металевих гофрованих конструкцій транспортних споруд може бути ефективний внаслідок реалізації методики, яка базується на використанні сучасних інтернет-технологій і мікропроцесорів. Вона дозволяє забезпечити постійний моніторинг зміни статистичних показників роботи споруди, отриманих у реальному часі.

Економічний ефект від впровадження методу діагностики об'єктів критичної інфраструктури залізниць виникає внаслідок скорочення витрат праці на проведення візуальних оглядів споруд та дорогого вимірювального обладнання.

### **1.3. Моніторинг енергетичних об'єктів транспорту та напрями підвищення їх енергоефективності**

#### **1.3.1. Сучасні технології моніторингу технічного стану елементів енергетичної інфраструктури залізниць**

Електрифікована залізнична інфраструктура по всьому світу пропонує значні переваги, підвищуючи стійкість та ефективність транспортних мереж. Електропоїзди створюють менше викидів парникових газів та зменшують забруднення довкілля, сприяючи досягненню глобальних кліматичних цілей, вони є більш енергоефективними та економічно вигідними на поточний момент і найближчій перспективі порівняно з вуглеводневим транспортом.

У всьому світі країни інвестують в електрифіковані залізниці для покращення зв'язку, підтримки економічного зростання та сприяння сталому розвитку. Такі регіони, як Європа, Азія та деякі частини Північної Америки, є лідерами у розгалуженості електрифікованих залізничних мереж, демонструючи переваги цього чистішого, швидшого, енергоефективного виду транспорту.

Надійність та ефективність функціонування електрифікованих залізниць безпосередньо залежать від стабільної роботи систем

тягового електропостачання (СТЕ). Ця критично важлива інфраструктура, що включає тягові підстанції, контактну мережу та лінії електропередач, функціонує в умовах високих електричних та механічних навантажень, а також є вразливою до кліматичних впливів та зовнішніх загроз, включно з цілеспрямованими диверсійними або військовими діями. Перехід від традиційних підходів регламентного обслуговування (реактивного та планово-попереджувального) до концепції проактивного управління на основі даних (predictive maintenance) є ключовим фактором для забезпечення безпеки, підвищення енергоефективності та стійкості залізничного транспорту. Сучасні технології моніторингу відіграють у цьому переході центральну роль.

Повітряні лінії та системи тягового електропостачання на електрифікованих залізницях стикаються з кількома проблемами, включаючи знос, пошкодження, пов'язані з погодними умовами, та необхідність регулярного технічного обслуговування для забезпечення надійності та безпеки. Ці проблеми можуть призвести до перебоїв у роботі та високих витрат на технічне обслуговування.

Вирішення цих проблем базується на використанні сучасних технологій. Так, наприклад, концепція Інтернету речей (IoT) пропонує перспективні рішення цих проблем, забезпечуючи моніторинг у режимі реального часу та прогнозне технічне обслуговування. Пристрої IoT можуть збирати дані про стан повітряних ліній та компонентів електропостачання, що дозволяє завчасно виявляти потенційні несправності та ефективно планувати технічне обслуговування. Крім того, вимірювання електричних параметрів, таких як напруга на електрифікованих лініях та струми, має вирішальне значення для оптимізації ефективності. Ці вимірювання допомагають ефективно керувати розподілом електроенергії, зменшуючи втрати енергії та забезпечуючи роботу системи в безпечних та оптимальних умовах. Такий проактивний підхід не тільки мінімізує час простою та знижує витрати, але й підвищує загальну надійність, безпеку та ефективність залізничної мережі.

Основні характеристики найбільш перспективних технологій, які сьогодні використовуються або можуть бути інтегровані для моніторингу технічного стану елементів енергетичної інфраструктури залізничного транспорту наведено в табл. 1.6 [71]. Вибір тої чи іншої технології ґрунтується на економічній доцільності, специфічних

задачах моніторингу, вимогах до точності даних та можливості її інтеграції з існуючими системами управління.

Таблиця 1.6

**Сучасні методи моніторингу енергетичних об'єктів залізниць**

Метод / технологія	Опис
Безпілотні авіаційні комплекси (БПЛА) та машинний зір	Використання дронів, оснащених тепловізорами, LiDAR-сканерами та камерами високої чіткості для швидкої дистанційної інспекції. Зібрані дані аналізуються за допомогою алгоритмів машинного зору для автоматичного виявлення місць перегріву, механічних пошкоджень та контролю габаритів контактної мережі
Розподілені волоконно-оптичні системи моніторингу	Перетворення волоконно-оптичного кабелю на суцільний сенсор. Дозволяє в реальному часі вимірювати температуру (DTS) та фіксувати акустичні події/вібрації (DAS) по всій довжині лінії для виявлення перегрівів, обривів чи стороннього втручання
Інтернет речей (IoT) та аналітика на "грані" (Edge Computing)	Оснащення ключових вузлів (трансформаторів, вимикачів) мережею сенсорів для безперервного збору даних. Edge Computing забезпечує миттєву обробку критичних даних на місці, наприклад, аналіз якості живлення (Power Quality Analysis) за допомогою методів DDFT + SVM
Цифрові двійники (Digital Twins) та інтелектуальні системи	Створення динамічної віртуальної моделі енергетичної інфраструктури, яка інтегрує дані з SCADA, IoT та БПЛА. Використовується для прогнозування відмов та оптимізації обслуговування; симуляції сценаріїв в реальному часі з метою зниження енергоспоживання; ідентифікації дефектів за допомогою передових моделей штучного інтелекту (напр., LLM в системах типу DefectTwin)

Війна в Україні підкреслила вразливість критичної інфраструктури до атак недорогими безпілотними апаратами (дронами), які можуть завдати значної шкоди дорогим об'єктам, таким як залізничні або енергетичні системи. Ця ситуація наголошує на нагальній потребі у посиленні заходів безпеки та інтеграції систем ідентифікації дронів у системи моніторингу реального часу. Традиційні системи протиповітряної оборони не завжди здатні виявляти та перехоплювати ці дрони через їхню низьку висоту польоту

та малий розмір. Відтак, впровадження технології виявлення дронів на основі IoT в інфраструктуру моніторингу стає критично важливим. Ці системи можуть надавати сповіщення в реальному часі та відстежувати несанкціоновану активність дронів, допомагаючи захистити життєво важливу залізничну та енергетичну інфраструктуру від потенційних загроз. Вирішуючи цю нову загрозу, залізничні оператори можуть краще захистити свої активи, забезпечуючи безперервну та безпечну роботу своїх мереж.

Загальновідомою є система WAMS (система моніторингу широкого простору) – це широкомасштабна система моніторингу, що використовується в енергетичному секторі для моніторингу та контролю стану електричних мереж на великих територіях. Вона включає набір апаратних та програмних інструментів, розроблених для підвищення надійності та стабільності енергосистеми.

Метою цього підрозділу є дослідження сучасних технологій для систем моніторингу широкого спектру (WAMS) в контексті моніторингу залізничних активів у режимі реального часу. Це включає вивчення використання WAMS для відстеження механічних параметрів повітряних проводів, таких як натяг та знос, для забезпечення надійності та безпеки електрифікованих залізниць. Крім того, робота досліджує інтеграцію децентралізованих та автономних систем ідентифікації за допомогою дронів.

Використання систем Smart Grid, що інтегрують електричні мережі з інформаційними технологіями та комунікаційними рівнями, вирішує проблеми традиційних мереж, такі як неефективне управління енергією та аварії. Останні досягнення зосереджені на контролі та моніторингу в реальному часі через двонаправлений зв'язок. Наприклад, у статті [72] представлено розробку в реальному часі для ефективного моніторингу та управління енергосистемою за допомогою віддаленого хмарного сервера, що дозволяє автентифікованим користувачам отримувати доступ до мережі та керувати нею з будь-якого місця, покращуючи універсальний контроль та час відгуку. Майбутня робота спрямована на розробку більш ефективних методів управління енергією та оптимізацію її постачання.

Енергомонітори мають вирішальне значення для ефективних електричних мереж, особливо з появою IoT, що дозволяє здійснювати глобальний моніторинг електричних систем. В статті [73] представлено двоканальну систему моніторингу електричних параметрів з використанням комплекту M5Stack Core2 та датчиків

PZEM 004T V3.0, дані з яких надсилаються до хмарної бази даних ThingSpeak і доступні через веб- та мобільні додатки. Валідація порівняно з комерційним IoT-пристроєм показала точність до 1,95% за потужністю та 0,81% за енергією, що робить її недорогим, багатофункціональним рішенням для моніторингу електричних параметрів та виявлення проблем в електричних системах. У майбутній роботі буде розглянуто вплив магнітних полів та покращено комп'ютерну безпеку для систем віддаленого моніторингу.

Основна увага до об'єктів Smart Grid зумовлена інтеграцією "зелених" джерел енергії в електричні мережі, що вимагає потужних інструментів для гнучкого вимірювання якості електроенергії. У цій статті [74] представлено SEMCE DAQ, систему, розроблену для моніторингу параметрів якості електроенергії в реальному часі та зберігання даних для довгострокового аналізу, що відповідає стандартам IEC 61000 та EN 50160. SEMCE DAQ перевершує існуючі рішення за обсягом даних, організацією бази даних та гнучкістю, пропонуючи високу точність та швидкий час відгуку. Її програмна архітектура підтримує майбутні вдосконалення, що робить її економічно ефективним та потужним варіантом для застосувань у Smart Grid системах.

Ці дві роботи [75-76] присвячені моніторингу та діагностиці залізничних систем для підвищення безпеки та експлуатаційної ефективності. У першій статті розглядається PAMAR SMD, пристрій для моніторингу та діагностики залізничних контактних мереж, що надає дані в реальному часі про напругу живлення, температуру, вологість та стан системи на всій території. Ця система підвищує безпеку залізничного руху, зменшує витрати на відновлення та мінімізує компенсації за затримки. Друга стаття зосереджена на моніторингу стану струмоприймачів в умовах експлуатації залізниці. Вона описує станцію, яка виявляє проблеми зі струмоприймачами, аналізуючи підйом контактних дротів під час проходження поїздів, що забезпечує надійний та безпечний залізничний транспорт шляхом виявлення невідповідних сил тиску на контактну мережу. Обидві системи спрямовані на покращення безпеки та надійності залізничних операцій за допомогою передових методів моніторингу.

Система Siemens Sicat® CMS (Catenary Monitoring System) [77] забезпечує безперервний моніторинг сил натягу в контактному та несучому тросах за допомогою безконтактних методів вимірювання. Вона збирає та оцінює дані з датчиків, передаючи відфільтровану

інформацію до центрів управління для швидкого виявлення стану контактної мережі та локалізації пошкоджень. Ключові особливості включають неінвазивне вимірювання, що запобігає зносу обладнання компенсаторів натягу, надійне виявлення несправностей шляхом моніторингу нахилу маятникового важеля (і, опосередковано, сили натягу), можливість модернізації існуючих установок, а також мінімальні вимоги до простору та обслуговування. Система працює ефективно з тривогами та повідомленнями про несправності, що ініціюються подіями, забезпечуючи точне виявлення несправностей без перевантаження даними.

Ці статті [78-79] досліджують розробку енергозберігаючих технологій в електрифікованих транспортних системах, зосереджуючись на оптимальному управлінні перетворювачами, накопичувачами та відновлюваними джерелами енергії в системах тягового електропостачання. Розуміючи ці закони управління, дослідження має на меті мінімізувати необхідну встановлену потужність та зменшити капітальні витрати. Для практичної реалізації система вимагає вимірювань розподілу напруги на відстанях, що досягається за допомогою пристроїв вимірювання напруги постійного струму та бездротової передачі даних. Запропонована система моніторингу напруги використовує резистивний дільник, мікроконтролер Atmega128RFA1 та кілька операційних підсилювачів для точних та синхронних вимірювань. Поєднання цих підходів підвищує загальну ефективність та економічну вигідність енергозберігаючих технологій у транспортних системах.

Розвиток безпілотних літальних апаратів (БПЛА) становить значну загрозу для критичних інфраструктур через потенційне зловмисне використання. У цій статті [80] представлена автономна платформа для виявлення дронів на великій відстані, розроблена для зменшення цих загроз. Новизна системи полягає в інтеграції апаратного та програмного забезпечення для ефективною локалізації порушника, з використанням компонента ситуаційної обізнаності, який регулює фокусну відстань камери та обробляє медіадані за допомогою нейронної мережі на основі регіонів. Вона використовує багатопотокові подвійні вхідні медіа-потоки для зменшення затримки, і при виявленні дронів реєструє вторгнення з описом подій та медіа-доказами. Платформа, що працює на NVIDIA GeForce GTX 1080, продемонструвала точність 95,5% у виявленні дронів на відстані 250

метрів під час експериментальної валідації в середовищах, що імітують типові сценарії критичної інфраструктури.

Зростаюча популярність дронів у різних сферах, включаючи інженерію, медицину, логістику та безпеку, викликає значні занепокоєння щодо безпеки фізичної інфраструктури та приватності через потенційне зловмисне використання. У цій статті [81] пропонується нове рішення для автоматизованого виявлення та ідентифікації дронів з використанням акустичних ознак та алгоритмів глибокого навчання. Вирішуючи проблему відсутності доступних акустичних наборів даних дронів, дослідження представляє гібридний акустичний набір даних дронів, що поєднує записані аудіофрагменти дронів та штучно згенеровані зразки за допомогою генеративно-змагальних мереж (GAN). Ефективність різних алгоритмів глибокого навчання — згорткових нейронних мереж (CNN), рекурентних нейронних мереж (RNN) та згортково-рекурентних нейронних мереж (CRNN) — оцінюється для виявлення та ідентифікації дронів. Результати демонструють переваги використання технік глибокого навчання та гібридного набору даних для покращеного виявлення нових та незнайомих дронів, підтверджуючи потенціал GAN у генерації реалістичних аудіо-зразків для підвищення точності виявлення.

Стрімке зростання популярності дронів збільшує ризик їх зловмисного використання, що вимагає автоматизованих систем виявлення для запобігання несанкціонованим втручанням. Дослідження [82] представляє автоматизовану систему виявлення дронів з використанням YOLOv4, навчену на наборах даних дронів та птахів. Продуктивність моделі оцінювалася за допомогою середньої точності (mAP), кількості кадрів на секунду (FPS), точності, повноти та F1-метрики. Крім того, було зібрано два типи відео з дронами для перевірки швидкості виявлення на різних висотах. Результати продемонстрували вищу продуктивність порівняно з попередніми дослідженнями, досягнувши mAP 74,36%, точності 0,95, повноти 0,68 та F1-метрики 0,79. Виявлення на відео показало FPS 20,5 для DJI Phantom III та 19,0 для DJI Mavic Pro.

Розглянуті роботи висвітлюють інтеграцію передових технологій у широкомасштабні системи моніторингу (WAMS) та системи виявлення дронів для підвищення безпеки, ефективності та надійності критичних інфраструктур. Недорогі рішення, що використовують IoT, хмарні обчислення та передові апаратні компоненти, забезпечують

високу точність та продуктивність, що є важливим для практичного розгортання. Включення механічних параметрів, таких як фізичний стан та вплив навколишнього середовища, у ці системи покращує їхню надійність та стійкість. У сфері виявлення дронів використання алгоритмів глибокого навчання та гібридних наборів даних підвищує точність ідентифікації, збалансовуючи точність та економічну ефективність. Ці досягнення разом забезпечують ефективний моніторинг, виявлення несправностей та захист критичної інфраструктури, зберігаючи при цьому доступність.

Основною частиною WAMS є блок векторних вимірювань (PMU), який виконує точне вимірювання напруги та струму із синхронізацією за часом. Загальновідомий PMU складається з трансформатора струму та напруги, аналого-цифрового перетворювача, GPS-модуля, блоку обробки сигналів та модуля зв'язку. Існують також альтернативні методи вимірювання напруги та струму замість використання традиційного перетворення за допомогою вимірювальних трансформаторів.

Традиційне визначення WAMS зазвичай не включає моніторинг механічних параметрів ліній, таких як натяг і температура, оскільки WAMS зосереджується переважно на моніторингу електричних параметрів енергосистеми, таких як напруга, струм, частота та фазовий кут. Однак сучасні підходи до управління енергетичними системами та розвиток технологій Smart Grid передбачають інтеграцію різних типів даних для забезпечення більш комплексного моніторингу та управління. Відомо, що вимірювання натягу та температури допомагає виявляти обриви контактної мережі, протидіяти крадіжкам та вандалізму щодо залізничних активів, а також запобігати обривам через обледеніння дротів.

Для надійного електропостачання і регулювання режимів живлення тяги поїздів важливим є вимірювання напруги та струму в мережі. Традиційна схема вимірювання напруги та струму для високовольтних тягових ліній електропередач, що працюють на змінному струмі 27,5 кВ, складається зі спеціальних трансформаторів струму та напруги. Для тягових ліній, що працюють на постійному струмі 3,3 кВ, для вимірювання використовуються дільники напруги та шунти. Але вони мають дуже великий недолік — небезпечний електричний потенціал на вимірювальних пристроях через відсутність гальванічної розв'язки. За допомогою модулів бездротового зв'язку цю проблему можна вирішити, одночасно забезпечивши збір та передачу

даних. Найпростішим у такому випадку є використання дільників напруги, побудованих на прецизійних високовольтних резисторах, разом з АЦП та модулем бездротового зв'язку (рис. 1.29).

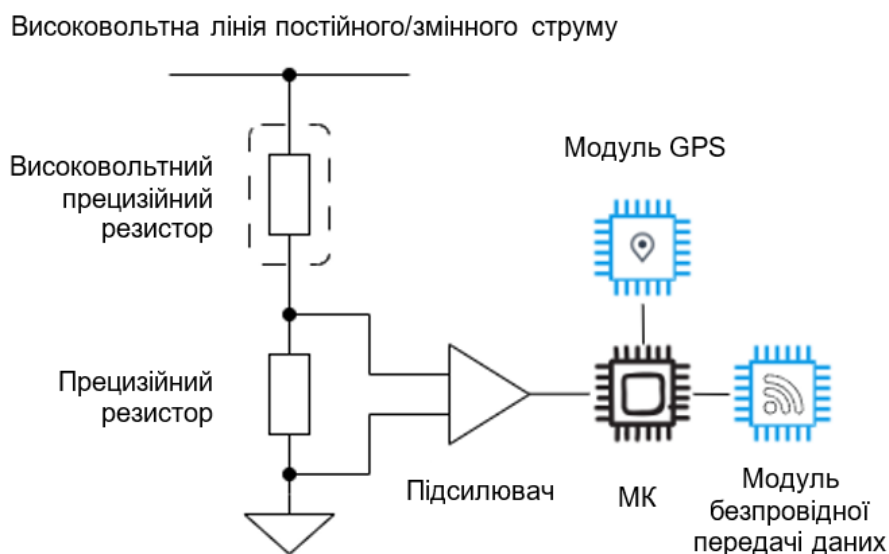


Рис. 1.29. Топологія вимірювання напруги для бездротової передачі даних

Протікання струму у провіднику створює навколо нього пропорційне магнітне поле, яке може бути виміряно датчиками струму, побудованих на одну із двох безконтактних електричних явищ: для вимірювання постійного струму (DC) – ефект Холла, для змінного струму (AC) – електромагнітна індукція (рис. 1.30). І датчик на ефекті Холла, і індуктивний датчик мають гальванічну розв'язку, що є значною перевагою порівняно з традиційними схемами вимірювання струму.

Датчик на ефекті Холла складається із трьох основних компонентів: осердя, елемента Холла (напівпровідникова пластина) та схеми обробки сигналу. Провідник зі струмом проходить через магнітопроникне осердя, яке концентрує магнітне поле провідника. Елемент Холла встановлюється в невеликому прорізі осердя під прямим кутом до силових ліній сконцентрованого магнітного поля. Постійний струм в одній площині збуджує елемент Холла. Коли збуджений елемент Холла піддається впливу магнітного поля від осердя, він створює різницю потенціалів (напругу), яку можна виміряти та підсилити до сигналів технологічного рівня в діапазоні 4...20 мА або замикання контакту.

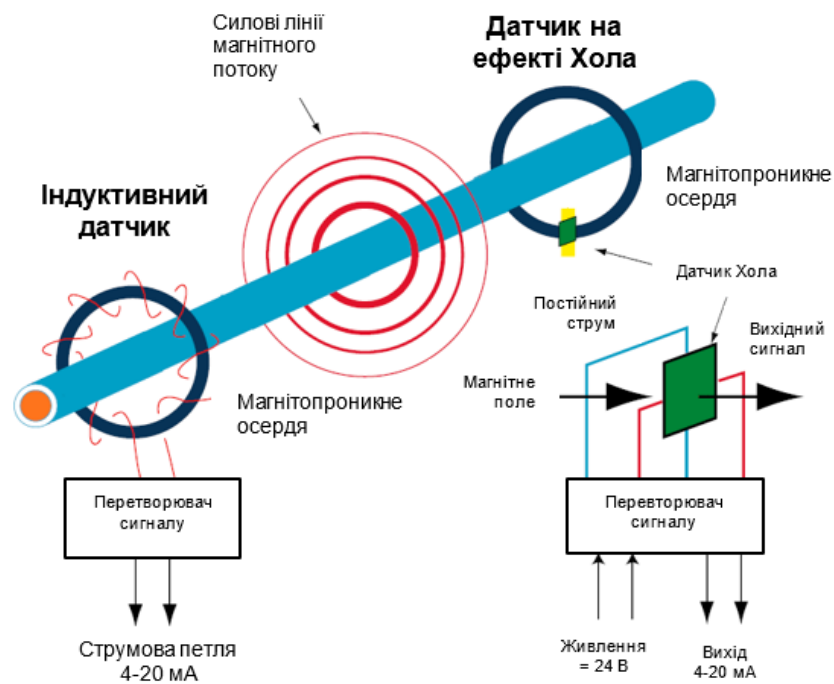


Рис. 1.30. Принципи роботи індуктивних датчиків та датчиків на ефекті Холла

Оскільки датчик Холла повністю ізольований від контрольованої напруги, він не становить небезпеки та майже не має внесеного повного опору. Він також забезпечує точне та повторюване вимірювання як для змінного, так і для постійного струму. Перетворювачі на ефекті Холла вимагають більше енергії, ніж звичайні двопровідні системи з живленням по струмовій петлі. Тому більшість датчиків Холла є три- або чотирипровідними пристроями.

Залежно від конструкції, перетворювачі на ефекті Холла можуть вимірювати частоти від постійного струму до кількох кілогерц. Оскільки вони, як правило, дорожчі за шунти або індуктивні перетворювачі, їх використання зазвичай обмежується вимірюванням постійного струму. Порівняно з індуктивним перетворювачем, їхнім головним недоліком є обмежений діапазон вимірювань.

Індуктивний датчик складається з осердя з обмоткою та блоку обробки сигналу. Провідник зі струмом проходить через магнітопроникне осердя, яке посилює магнітне поле провідника. Змінний струм постійно змінює потенціал з позитивного на негативний і навпаки, зазвичай з частотою 50 або 60 Гц. Розширюване та згасаюче магнітне поле індукує струм в обмотках. Це принцип, за яким працюють усі трансформатори.

Провідник зі струмом зазвичай називають первинною обмоткою, а обмотку осердя — вторинною. Вторинний струм перетворюється на напругу та обробляється для виведення сигналів технологічного рівня в діапазоні 4...20 мА або замикання контактів. Індуктивне вимірювання забезпечує як високу точність, так і широкий діапазон вимірювань, а вихідний сигнал є гальванічно розв'язаним від контрольованої напруги. Ця ізоляція забезпечує безпеку персоналу та створює майже непомітні втрати (падіння напруги) в контрольованому колі.

Індуктивні датчики призначені для вимірювання потужності змінного струму і зазвичай працюють в діапазоні від 20 Гц до 100 Гц, хоча деякі пристрої можуть працювати і в кілогерцовому діапазоні. Добре спроектований індуктивний датчик може бути сконфігурований як двопровідний пристрій для зменшення вартості монтажу.

Ефект Холла та індукція використовують різні методи для вимірювання магнітного поля навколо провідника зі струмом. Датчик на ефекті Холла найкраще підходить для постійного струму, а індуктивний датчик — для змінного. Оскільки контактний дріт не можна охопити датчиком для вимірювання струму через взаємодію зі струмоприймачем, може використовуватися непрямий метод вимірювання струму. У цьому випадку струм розраховується за вимірюною напругою у двох точках на заданій ділянці, за умови, що опір проводу точно відомий.

Важливе значення для надійного струмозйому має натяг контактного дроту. Натяг дротів, що використовуються в залізничних контактних мережах, має дуже важливе значення для надійності та оптимізації витрат на технічне обслуговування. Моніторинг натягу дозволяє прогнозувати відхилення від проектного стану контактної мережі та попереджати про несправності або випадки вандалізму.

Залізничні контактні мережі поділені на секції, і кожна секція має відповідний тип анкерування. Найбільш поширеним є компенсований метод анкерування, що означає, що анкерний пристрій створює постійний натяг контактного дроту, незалежно від будь-яких змін його довжини через температуру.

Для вимірювання натягу дроту поширеною практикою є застосування перетворювача сили, також відомого як тензодатчик (load cell). Тензодатчик слугує перетворювачем сили або датчиком сили, який перетворює прикладену силу, будь то натяг, стиснення чи тиск, в електричний сигнал. Величина електричного сигналу прямо пропорційна величині сили, що діє на тензодатчик.

Тензорезистор (strain gauge) виготовляється з дуже тонкого дроту або фольги, розташованих у вигляді сітки та прикріплених до гнучкої основи. Коли форма тензорезистора змінюється, відбувається зміна його електричного опору. Дріт або фольга в тензорезисторі розташовані таким чином, що при прикладанні сили в одному напрямку виникає лінійна зміна опору.

Сила натягу розтягує тензорезистор, змушуючи його ставати тоншим і довшим, що призводить до збільшення опору. Сила стиснення діє протилежним чином. Тензорезистор стискається, стає товщим і коротшим, і опір зменшується. Тензорезистор кріпиться до гнучкої основи, що дозволяє легко наносити його на тензодатчик, відтворюючи найдрібніші зміни, які необхідно виміряти (рис. 1.31).

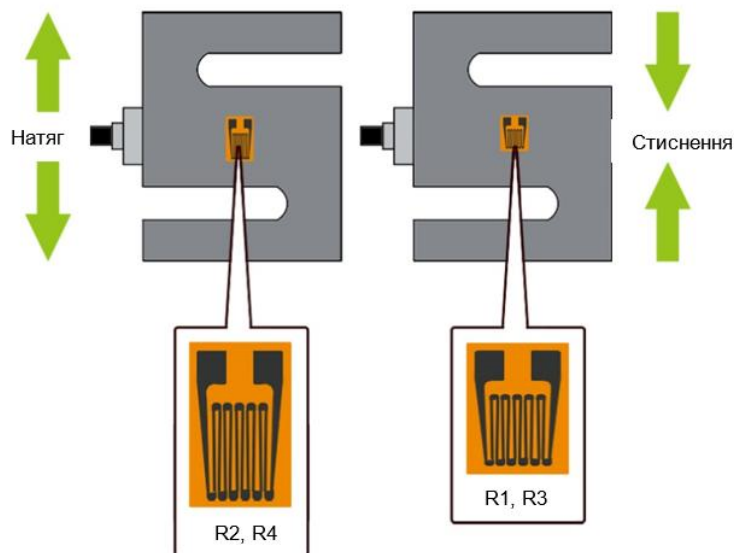


Рис. 1.31. Принципи роботи датчиків навантаження

Оскільки зміна опору, виміряна одним тензорезистором, є надзвичайно малою, точно виміряти ці зміни складно. Збільшення кількості тензорезисторів, що застосовуються разом, підсилює ці малі зміни до більш вимірюваного рівня. Набір із 4 тензорезисторів, увімкнених у певну схему, є застосуванням моста Уїтстона (рис. 1.32).

У тензодатчику резистори замінюються тензорезисторами, розташованими так, що вони по черзі зазнають розтягування та стиснення. Коли на тензодатчик діє сила, структура та опір тензорезисторів змінюються, і вимірюється напруга  $V_0$ .

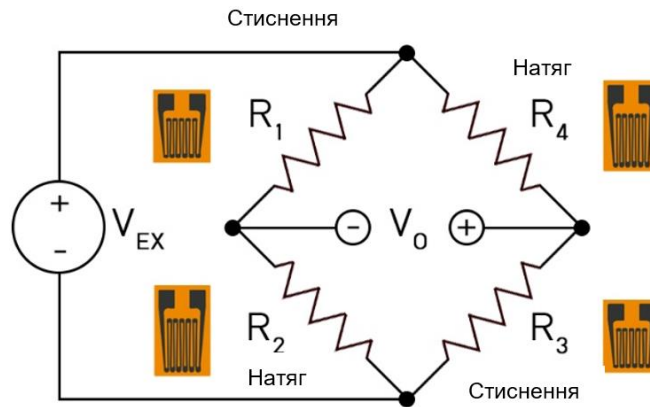


Рис. 1.32. Схема увімкнення тензорезисторів

За отриманими даними,  $V_0$  можна легко визначити за допомогою рівняння

$$V_o = \left( \frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_{EX}$$

З практичного досвіду, для вимірювання натягу контактного дроту більш придатними є тензодатчики S-типу. Тензодатчики S-типу зазвичай використовуються в підвісних вагах або у застосуваннях, пов'язаних зі зважуванням підвішених ємностей. Ці тензодатчики розроблені як універсальні, здатні вимірювати як сили натягу, так і сили стиснення. У застосуваннях на розтяг тензодатчики S-типу можна зручно підвішувати на скобах і розтягувати для точного вимірювання прикладеної сили. З іншого боку, у застосуваннях на стиск їх можна встановлювати між двома об'єктами за допомогою наявної верхньої та нижньої різьби, що дозволяє точно вимірювати сили стиснення (рис. 1.33).

Пропускна здатність повітряних ліній електропередач часто обмежується критичною температурою лінії, яка залежить від величини переданого струму та умов навколишнього середовища, тобто температури повітря, вітру, опадів тощо. Для більш ефективного та безпечного використання існуючих ліній електропередач з урахуванням критичних температур та для вжиття заходів безпеки під час потенційно небезпечних подій необхідна динамічна оцінка допустимого теплового навантаження.

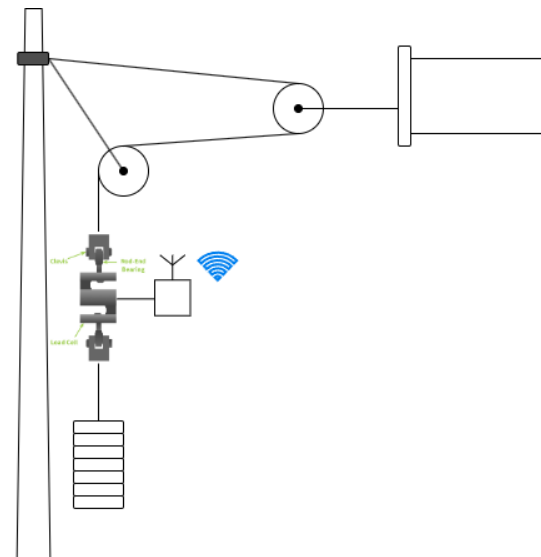


Рис. 1.33. Схема кріплення S-подібного тензодатчика до анкерного стовпу повітряної залізничної лінії

Ще одним важливим застосуванням вимірювання температури проводів є активація систем захисту від обмерзання. Як правило, це рішення приймається працівниками вручну на основі спостережень. Впровадження автоматизованих систем вимірювання температури усуває людські помилки з цього процесу прийняття рішень, тим самим запобігаючи несправностям та заощаджуючи ресурси. Датчик температури є широко визнаною темою, тому подальші пояснення в цьому контексті не потрібні. Вкрай важливо, щоб датчики температури були встановлені якомога ближче до самого проводу, щоб забезпечити точні вимірювання.

Додатковим сенсором в системі моніторингу можуть виступати аудіодатчики – нова функція в WAMS, особливо корисна для виявлення несанкціонованого доступу до критичної інфраструктури або діагностики неочікуваної поведінки. Традиційний аудіозапис споживає значні ресурси, що робить його непрактичним для розподілених систем. Для економії енергії та ресурсів замість нього можна використовувати цифрові мікрофони, засновані на нових принципах.

Мікрофон з імпульсною модуляцією щільності (PDM) використовує сигма-дельта модулятор для передискретизації акустичних сигналів з високою частотою (рис. 1.34) [83].

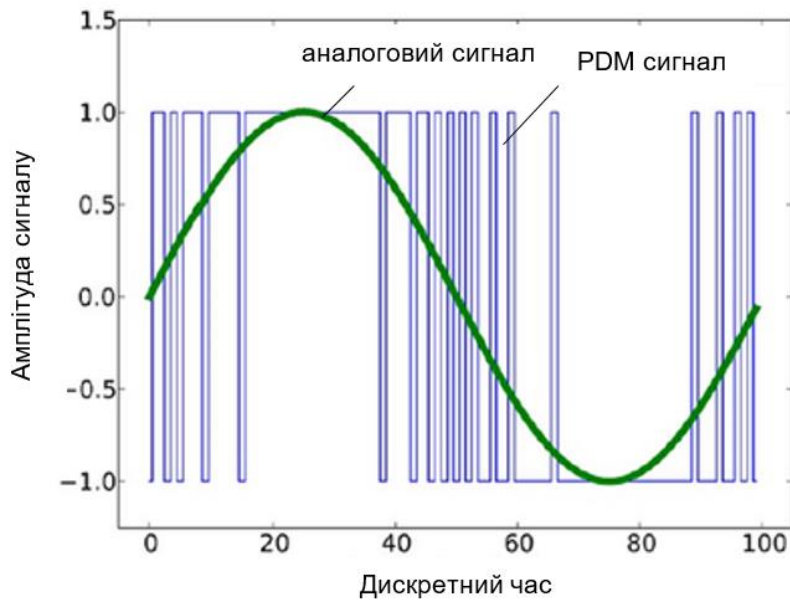


Рис. 1.34. Порівняння форм сигналів PDM та аналогових сигналів

Логіка методу PDM є відносно складною, але вимагає лише двох дротів: тактового сигналу та даних. Ведучий пристрій (приймач) надає тактові сигнали для двох ведених пристроїв, ініціюючи вибір джерела 1/2 як вхідних даних по передньому фронту (лівий канал) та задньому фронту (правий канал) тактового сигналу (рис. 1.35).

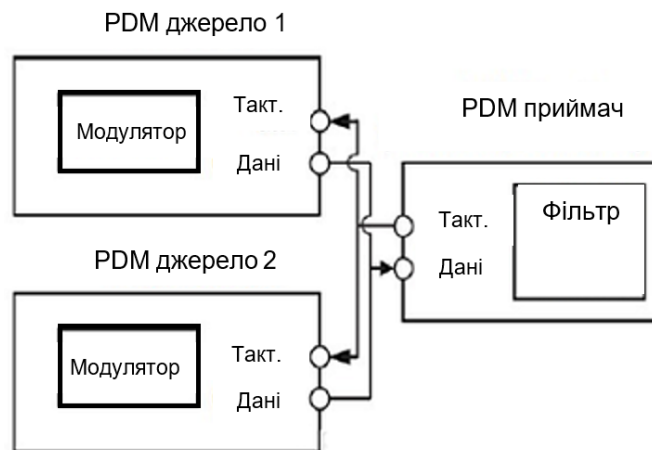


Рис.1.35. Структура потоку даних PDM

Він видає 1-бітний PDM-сигнал, де щільність одиниць і нулів кодує амплітуду аудіосигналу. Щоб інтегрувати цей сигнал у цифрові аудіосистеми, він зазвичай піддається децимації, щоб відповідати частоті дискретизації аудіо в основній смузі. PDM, або передискретизований 1-бітний звук, представляє цифрові сигнали з

високочастотною тактовою дискретизацією, на відміну від більш інтуїтивного квантування сигналів PCM. Перетворення сигналів PDM у корисні амплітудні компоненти вимагає децимаційного фільтра, на відміну від PCM, яка безпосередньо забезпечує показники амплітуди.

Цифровий мікрофон використовує тактовий сигнал, що надається головним пристроєм, для синхронізації виводу двійкових даних. Смуга пропускання інтерфейсу PDM обмежена цією тактовою частотою, яка має бути вищою за частоту вихідного сигналу мікрофона, щоб ефективно формувати шум. Збільшення тактової частоти дозволяє формувати шум, зміщуючи шум у звуковій частоті до вищих частот.

Частота передискретизації (OSR або коефіцієнт проріджування) – це відношення тактової частоти інтерфейсу PDM до частоти дискретизації основної смуги частот. Типова OSR дорівнює 64, але конкретні стандарти можуть відрізнятися. OSR та смуга пропускання разом визначають необхідну тактову частоту відповідно до теореми Найквіста, забезпечуючи, щоб частота дискретизації принаймні вдвічі перевищувала смугу пропускання аудіо.

Мінімальна тактова частота, необхідна для повного діапазону аудіочастот (20 Гц – 20 кГц), становить 2,56 МГц (з OSR 64). Цей поширений тактовий генератор 2,4 МГц може досягти аудіосмуги пропускання 18,75 кГц (OSR64). Існують декілько стандартних частот дискретизації аудіо. Використання високих ультразвукових частот вимагає, щоб тактова частота інтерфейсу PDM була значно вищою за чутну частоту. Смуга пропускання 40 кГц (з OSR 64) вимагає тактової частоти 5,12 МГц або вище

Отже, PDM – це економічно ефективний спосіб передачі цифрового аудіо, в моно- або стереоформаті, за допомогою пари «тактовий сигнал/дані». Незважаючи на властиві обмеження однобітного представлення, при ретельному проектуванні можна досягти надзвичайно високої якості звуку. Опція інтерфейсу APx PDM генерує та аналізує PDM-сигнали нативно, що значно спрощує проектування та усунення несправностей у всіх аспектах тракту PDM-сигналу.

Для передачі вимірних даних можуть використовуватися різні технології. Традиційний підхід передбачає дротові системи передачі даних, але вони часто не є економічно ефективними або масштабованими. Це призвело до того, що бездротова технологія стала кращим методом передачі даних.

Мобільні мережі забезпечують широке покриття, але кожен пристрій зазвичай працює за платним тарифом і залежить від різних умов трафіку інших користувачів. Технологія WiFi пропонує швидке з'єднання для передачі даних, але використовує власні протоколи передачі даних. У промисловому застосуванні особливо виділяються дві технології: ті, що використовують відкриті протоколи даних. Ці рішення є економічно ефективними, забезпечують надійне покриття та є енергоефективними.

Першим варіантом передачі є використання технології ZigBee – це технологія бездротового зв'язку, що працює на стандарті IEEE 802.15.4 і в першу чергу розроблена для низькошвидкісних мереж з низьким енергоспоживанням [84], що дозволяє бездротовим пристроям у додатках ZigBee проводити більшу частину часу в енергозберігаючих режимах. Вона працює глобально в діапазонах частот 868 МГц, 915 МГц та 2,4 ГГц, забезпечуючи максимальну швидкість передачі даних до 250 Кбіт/с. Розроблений Zigbee Alliance, він забезпечує безперебійне підключення та зв'язок між пристроями в персональних мережах (PAN), підкреслюючи простоту, надійність та енергоефективність.

Назва «ZigBee» походить від складного танцювального візерунка медоносних бджіл, відомого як «танець виляння». Медоносні бджоли використовують цей танець для ефективної передачі інформації всередині своїх колоній. Термін «ZigBee» походить від дзижчання (zig), яке видають бджоли, махаючи крилами. Ця технологія була названа «ZigBee», щоб відобразити її мету – забезпечити простий та ефективний зв'язок між пристроями.

Мережі ZigBee використовують зіркову, сітчасту або кластерну топології (рис. 1.36), кожна з яких впливає на надійність та функціональність. Зіркова топологія підключає пристрої безпосередньо до центрального хаба, що ідеально підходить для простого керування та надійних з'єднань з центральним контролером. Сітчасті мережі з'єднують вузли для кількох шляхів зв'язку, забезпечуючи стійкість та гнучкість маршрутизації даних. Кластерні мережі поєднують переваги зіркової та сітчастої топології для оптимізованої продуктивності, адаптуючись до різних потреб у зв'язку. Вибір правильної топології залежить від розміщення пристрою, вимог до зв'язку та факторів навколишнього середовища для оптимальної продуктивності мережі.

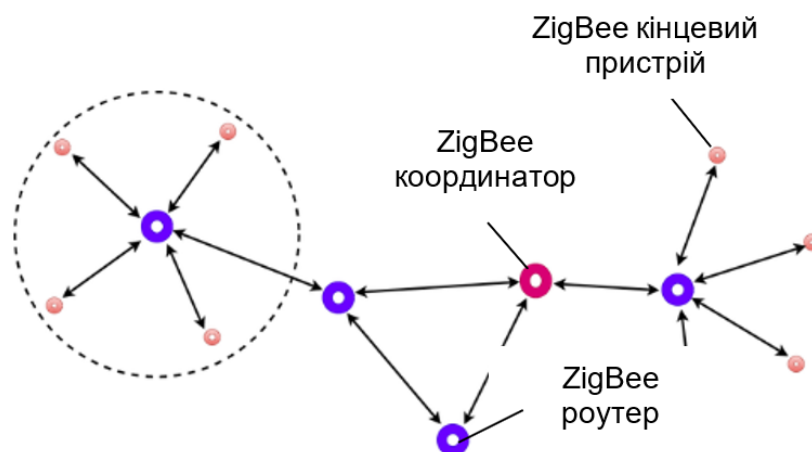


Рис. 1.36. Топологія мережі ZigBee

Стандарт ZigBee характеризується низьким енергоспоживанням, тривалим часом роботи акумуляторів пристроїв та працює з низькою швидкістю передачі даних 20-250 кбіт/с з коротким радіусом зв'язку 75-100 метрів. Він може похвалитися швидким часом підключення до мережі близько 30 мілісекунд та може підтримувати як малі, так і великі мережі, хоча практично до 240 пристроїв. ZigBee пропонує економічно ефективну реалізацію завдяки протоколу з відкритим кодом та має надзвичайно низький робочий цикл для економії енергії. Працюючи в діапазонах частот 868 МГц, 915 МГц та 2,4 ГГц з кількома каналами, ZigBee є стабільною та широко використовуваною бездротовою технологією в різних галузях промисловості, а постійні вдосконалення обіцяють подальший розвиток у майбутньому.

Наднизьке енергоспоживання є ключовим аспектом системного проектування технології ZigBee, що дозволяє забезпечити тривалий термін служби пристроїв, які живляться від неперезаряджуваних батарей. ZigBee вирізняється як потужна та стабільна бездротова технологія, що має високий попит у різних галузях промисловості. Її можливості роблять її цінним активом для різноманітних застосувань. Оскільки ZigBee продовжує розвиватися та зазнавати подальших оновлень і оптимізацій, вона має потенціал принести ще більш вражаючі досягнення в майбутньому.

ZigBee втілює ефективний та адаптивний зв'язок, подібний до того, як бджоли обмінюються інформацією в межах своїх колоній. Він дозволяє таким пристроям, як датчики, насоси та клапани, ефективно взаємодіяти незалежно від фізичного розташування в мережі. Ця гнучкість досягається завдяки відкритому пакетному протоколу, що забезпечує безпечну та надійну передачу даних. Архітектура ZigBee

сприяє економічно ефективному розгортанню зі збільшеним терміном служби батарей пристроїв завдяки інтегрованим механізмам енергозбереження. Ця можливість мінімізує частоту заміни батарей, забезпечуючи довгострокову експлуатаційну надійність у різних застосуваннях у розумних будинках, промисловій автоматизації та інших середовищах Інтернету речей.

Іншим варіантом передачі даних є використання технології LoRa – це технологія радіочастотної модуляції для малопотужної широкопasmової мережі (LPWAN), розроблена Semtech [85]. Вона забезпечує надзвичайно далекі лінії передачі даних, що охоплюють до п'яти кілометрів у міських районах та понад 15 кілометрів у сільській місцевості з прямою видимістю. Винятковою особливістю LoRa є її наднизьке енергоспоживання, що дозволяє пристроям з живленням від батарейок служити до 10 років. Працюючи в зірчастій топології та використовуючи відкритий протокол LoRaWAN, ця технологія ідеально підходить для застосувань, що потребують широкого покриття, глибокого проникнення в будівлі та ефективного збору невеликих обсягів даних з численних малопотужних пристроїв.

Технологія LoRa забезпечує тривалий термін служби батарей пристроїв, мінімізуючи енергію, необхідну для нечастої передачі невеликих пакетів даних. Працюючи на власній модуляції з розширеним спектром, отриманій на основі Chirp Spread Spectrum (CSS), LoRa використовує канали з фіксованою пропускну здатністю 125 кГц або 500 кГц для висхідного каналу та 500 кГц для низхідного каналу (рис. 1.37).

Технологія використовує ортогональні коефіцієнти розширень для динамічної оптимізації потужності та швидкості передачі даних (табл. 1.8). Пристрої, розташовані ближче до шлюзів, використовують нижчі коефіцієнти розширення для ефективної передачі, тоді як ті, що розташовані далі, використовують вищі коефіцієнти для підвищення чутливості прийому, хоча й з нижчою швидкістю передачі даних.

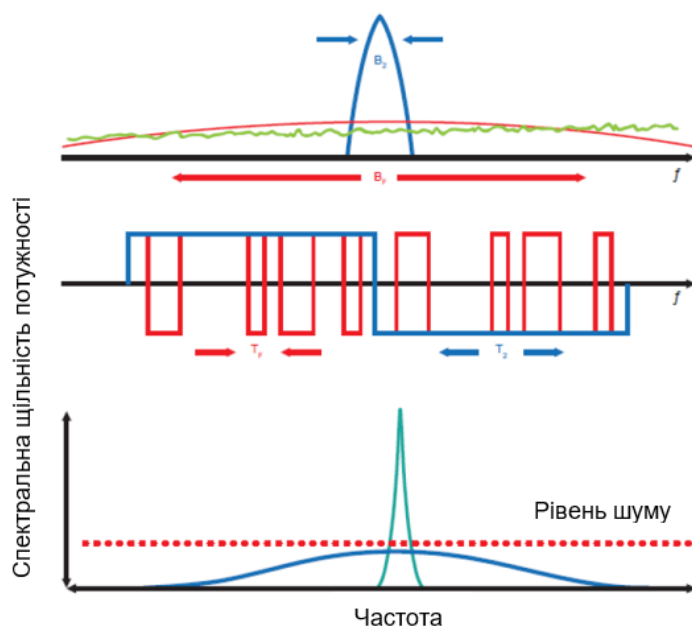


Рис. 1.37. Спектральна щільність потужності сигналу технології LoRa

Такий підхід розширює смугу пропускання сигналу за межі початкової, забезпечуючи надійний зв'язок з низьким енергоспоживанням без необхідності точних тактових генераторів.

Таблиця 1.7

**Коефіцієнти розподілення LoRa [15]**

Коефіцієнт розподілення (SF) при передачі повідомлень вгору на частоті 125 кГц	Швидкість передачі	Діапазон передачі (залежить від місцевості)	Час використання ефіру для пакету з 11 байтів
SF10	980 bps	8 км	371 мс
SF9	1760 bps	6 км	185 мс
SF8	3125 bps	4 км	103 мс
SF7	5470 bps	2 км	61 мс

Технологія LoRa Chirp Spread Spectrum (CSS) на відміну від Semtech пропонує недорогу, малопотужну, але надійну альтернативу DSSS, яка не вимагає високоточного опорного тактового генератора. У модуляції LoRa розширення спектру сигналу досягається шляхом генерування чирп-сигналу, частота якого безперервно змінюється, як показано на рис. 1.38.

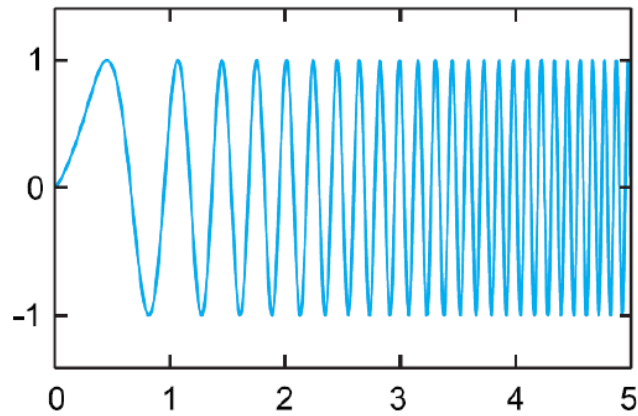


Рис. 1.38. Ілюстрація модуляції сигналу LoRa Chirp Spread Spectrum

LoRaWAN підходить для передачі невеликих пакетів даних (наприклад, даних з датчиків) на великі відстані. Модуляція LoRa забезпечує значно більшу дальність зв'язку при низькій пропускній здатності порівняно з іншими конкуруючими технологіями бездротової передачі даних. На наступному рисунку показано деякі технології доступу, які можна використовувати для бездротової передачі даних, та їхні очікувані дальності передачі в порівнянні з пропускною здатністю.

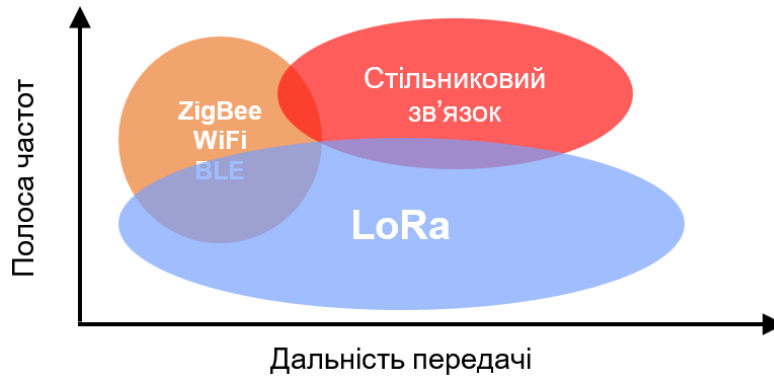


Рис. 1.39. Технології бездротового доступу та їхні очікувані дальності передачі залежно від пропускної здатності

На основі аналізу розглянутих технологій авторами запропонована концепція децентралізованої системи вимірювання високої напруги (WAMS) для залізничних повітряних ліній (рис. 1.39, а) та пристрій з прямим вимірюванням високої напруги та бездротовим зв'язком даних (рис. 1.39, б). Результат моніторингу режиму напруги на шинах тягової підстанції 3,3 кВ та струму в лінії наведено на рис. 1.41.

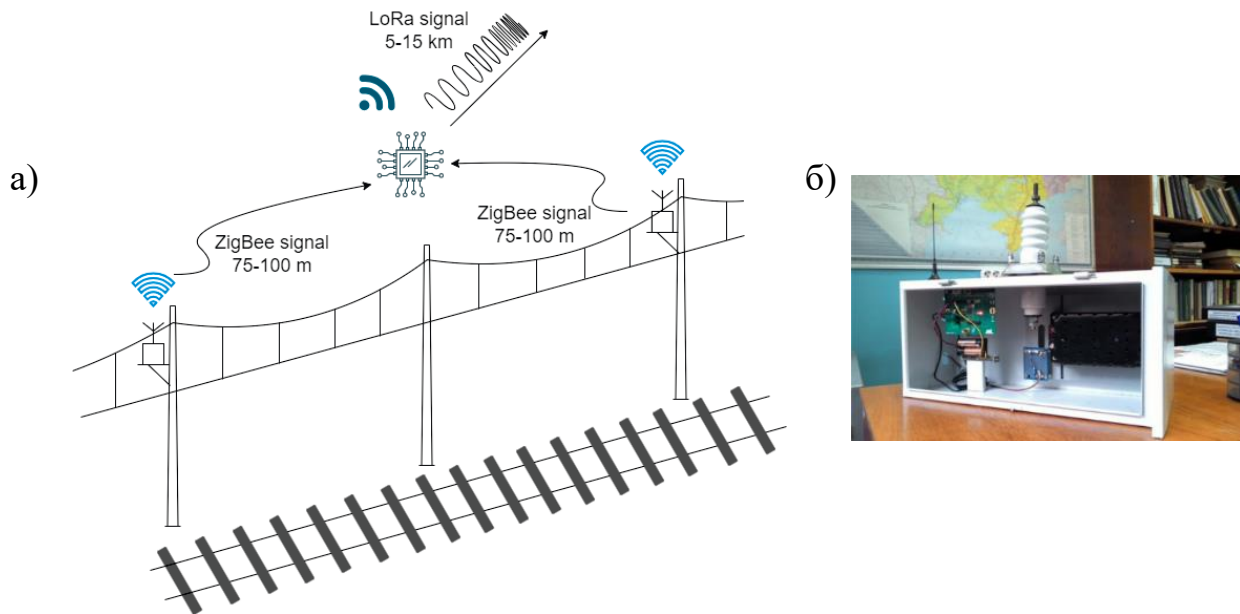


Рис. 1.40. Концепція децентралізованої системи управління ресурсами (WAMS) для енергетичних повітряних ліній залізниць (а), прототип розробленого пристрою з прямим вимірюванням високої напруги та бездротовим зв'язком даних (б)

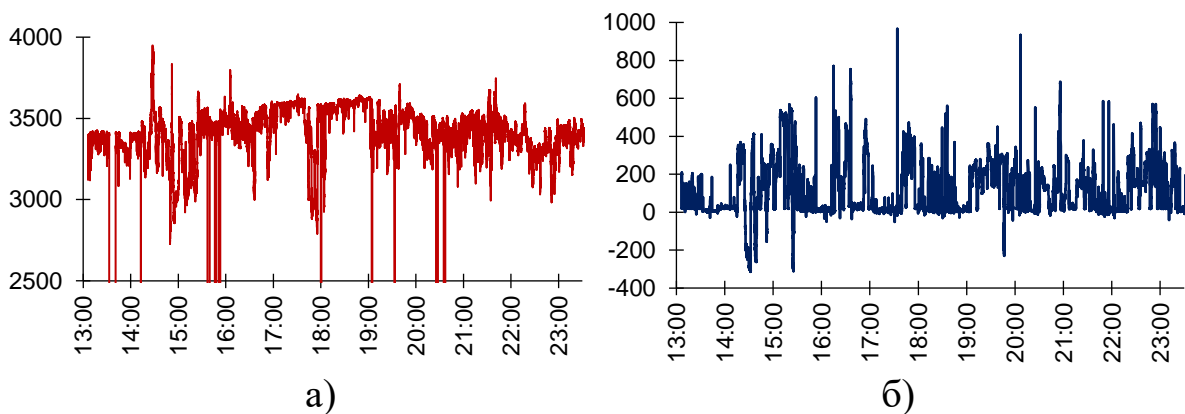


Рис. 1.41. Часовий моніторинг напруги (а) та струму (б) в лінії тягової електропередачі 3,3 кВ отриманий на розробленому прототипі

Отже розглянуті технології сенсорних датчиків для децентралізованої системи моніторингу дозволяють контролювати широкий спектр параметрів залізничних повітряних ліній. Розширюючи традиційний моніторинг струму та напруги, запропонована система включає датчики для механічних параметрів, таких як натяг дроту. Вона також дозволяє інтегрувати цифрові мікрофони для виявлення та аналізу звуків, потенційно ідентифікуючи загрози, такі як польоти дронів. Для передачі даних досліджено

можливість впровадження недорогої, енергоефективної бездротової технології. Запропонована децентралізована система моніторингу широкого діапазону залізниць використовує ці досліджені технології, застосовуючи ZigBee для збору даних між сусідніми датчиками та LoRa для передачі критичної та узагальненої інформації.

### **1.3.2. Вплив підвищення енергоефективності тяги на технічний стан інфраструктури залізниць. Обмеження енергоефективності**

Найбільший потенціал енергозбереження на залізничному транспорті міститься у раціональному використанні кінетичної енергії руху поїздів, використанні рекуперативного гальмування та зниженні втрат електроенергії в кожній підсистемі залізничного транспорту, що суттєво залежить від можливостей системи тягового електростачання, технічного стану транспортних засобів, організації руху поїздів та досвідченості локомотивних бригад.

Ефективність основних експлуатаційних показників електрифікованих залізниць, таких як швидкість руху поїздів, пропускна та провізна спроможність ділянок визначається в першу чергу режимом напруги в тяговій мережі. Правилами улаштування системи тягового електростачання залізниць України встановлені діючі значення напруги на шинах тягових підстанцій і струмоприймачах електрорухомого складу (ЕРС) у нормальному і вимушеному режимах системи електричної тяги. Очевидно, що напруга на струмоприймачах електровозів, які знаходяться на фідерній зоні, не може бути постійною і рівною 3,0 кВ навіть за наявності на зоні пристроїв регулювання. Однак прагнення до звуження діапазону відхилення напруги є основною умовою забезпечення номінального режиму роботи тягових і допоміжних машин електровоза. При цьому необхідно враховувати, що підвищення рівня напруги на струмоприймачі електровоза сприяє підвищенню технічної швидкості руху поїзда, а при збереженні споживаної потужності веде до зниження струму електровоза. Тому для досягнення більш високих енергетичних показників системи тягового електростачання постійного струму та підвищення енергоефективності ЕРС при високих швидкостях руху необхідно впроваджувати системи для звуження діапазону відхилення напруги на струмоприймачах швидкісного ЕРС.

Основними вимогами, що висуваються з боку електрорухомого складу до системи тягового електропостачання є забезпечення рівня напруги на струмоприймачі, який би гарантував досягнення заданої швидкості, обумовленої графіком руху, та забезпечував надійну та справну роботу всіх елементів ЕРС.

Вплив зміни напруги на зміну швидкості руху електровозів постійного струму з двигунами послідовного збудження з врахуванням схеми з'єднання тягових двигунів, приведенного ухилу, коефіцієнту послаблення збудження та ваги поїзда змінюється в межах [86]

$$\frac{dv}{dU} = 0.01 \dots 0.03, \frac{\text{км/год}}{\text{В}}.$$

Із наведеного діапазону значень випливає, що залежність зміни швидкості від зміни напруги при усталеному режимі роботи ЕРС невелика, що обумовлено значною інерційністю поїзда. Але при зниженій напрузі збільшується час розгону поїзда для досягнення встановленої швидкості та час ходу електровоза під струмом для її збереження. Таким чином, збільшується загальний час ходу потягу під струмом, що призводить до додаткових витрат електроенергії.

При слідуванні поїзда розрахунковим підйомом зниження напруги на струмоприймачі призводить до зростання температури обмоток електродвигунів та зниження пропускної спроможності ділянки через збільшення часу ходу поїзда. Також зниження напруги зменшує продуктивність роботи допоміжного обладнання, а саме мотор-вентиляторів та мотор-компресорів. Внаслідок цього погіршуються умови охолодження тягових двигунів та іншого електрообладнання, збільшується час відпуску пневматичних гальм поїзда.

За умовами надійності роботи ЕРС, з одного боку, повинен забезпечуватись рівень напруги, не нижчий за мінімально допустимий з умов нагрівання тягових двигунів та двигунів допоміжного обладнання. З іншого – не перевищувати максимально допустимого значення за потенційними умовами на колекторі для запобігання виникнення кругового вогню. На ділянках з можливістю рекуперації напруга в тяговій мережі повинна забезпечувати мінімально допустиме значення на струмоприймачах електровозів, що знаходяться в режимі тяги і не перевищувати значення на струмоприймачі рекуперуючого електровозу.

Таким чином, напруга в тяговій мережі повинна задовольняти вимогам (1.13) для забезпечення сталої швидкості поїзда та умов режиму рекуперації. Також значення напруги в контактній мережі повинне

забезпечувати мінімальні втрати електроенергії при реалізації графіка руху поїздів

$$U_{\min} < U_{e_{\text{тяг}}} \leq U_{\text{ТМ}} < U_{e_{\text{рекуп}}} \leq U_{\max}, \quad (1.12)$$

де  $U_{\min}$  – мінімально допустиме значення напруги в контактній мережі;  $U_{e_{\text{тяг}}}$  – значення напруги на струмоприймачі електровозу в режимі тяги;  $U_{\text{ТМ}}$  – напруга в тяговій мережі;  $U_{e_{\text{рекуп}}}$  – значення напруги на струмоприймачі електровозу в режимі рекуперації;  $U_{\max}$  – максимальне значення напруги в контактній мережі.

Відповідно до вимог стандарту ДСТУ EN 50163:2016 [87] для нормального руху поїздів на шинах тягових підстанцій та струмоприймачах ЕРС нормативний діапазон напруг повинен забезпечуватися в межах, що наведено в табл. 1.8.

Таблиця 1.8

**Нормативні значення напруги на шинах тягових підстанцій і струмоприймачах ЕРС різних систем електричної тяги**

Вид електрифікованого транспорту	Напруга, кВ							
	На шинах ТП					На струмоприймачі ЕРС		
	$U_{\min 2}$	$U_{\min 1}$	$U_{\text{ном}}$	$U_{\max 1}$	$U_{\max 2}$	$U_{\min}$	$U_{\text{ном}}$	$U_{\max}$
Магістральні залізниці змінного струму	17,50	19,0 <sup>2)</sup>	25,0	27,5	29,0	19,0	25,0	29,0
Промислові залізниці змінного струму	—	—	10,5	11,5	—	7,5	10,0	11,5
Магістральні і промислові залізниці постійного струму	—	2,0 <sup>2)</sup>	3,3	3,60	3,9 <sup>1)</sup>	2,2	3,0	3,9 <sup>1)</sup>
Наземний міський електротранспорт (трамвай, тролейбус)	—	—	0,60	0,70	—	0,40	0,55	0,70 <sup>1)</sup>
Метрополітен	—	—	0,825	0,975	—	0,55	0,75	0,975 <sup>1)</sup>

В табл. 1.8 використанні такі позначення:  $U_{\min 2}$  та  $U_{\max 2}$  – відповідно мінімальна і максимальна нестабільні напруги з допустимою дією до  $t \leq 10$  хв.,  $U_{\min 1}$  і  $U_{\max 1}$  – відповідно мінімальна і максимальна стабільні напруги з необмеженою дією ( $t = \infty$ ),  $U_{\text{ном}}$ ,  $U_{\min}$ ,  $U_{\max}$  – відповідно номінальна, мінімальна і максимальні напруги тривалої дії.

**Примітки:** 1. В режимі рекуперації допускається підвищення напруги в контактній мережі до 4000 В для залізниць, 720 В для трамвайно-тролейбусних ліній і 1000 В для метрополітенів. Електрорухомий склад, що використовується в міжнародному сполученні, повинен витримувати цю напругу протягом короткого періоду часу – до 5 хв. 2. Для деяких країн цей норматив становить 2,4 кВ, 2,7 кВ, 2,9 кВ (постійний струм) і 19,0 кВ, 21,0 кВ, 24,0 кВ (змінний струм) відповідно на слабонавантажених, навантажених і швидкісних лініях.

3. Країни, для яких нормативи напруги відрізняються від наведених значень по стандарту EN 50163, повинні користуватися національними нормативами до приведення їх у відповідність зі стандартом EN 50163.

Але чітке дотримання поставлених вимог неможливе, оскільки на величину розмаху і тривалість змін напруги діє багато чинників, тому даний процес можна розглядати як стохастичний. Серед впливаючих факторів, можна відзначити рівень напруги на шинах тягових підстанцій, який характеризується досить великим розкидом значень, викликаних коливаннями напруги в живлячій енергосистемі та змінами тягового навантаження. Не менш важливими є втрати напруги в тяговій мережі, які, в свою чергу, залежать від струму електровозу, його місцезнаходження та взаємного розташування інших потягів на фідерній зоні та їх режимів роботи. Очевидно, доцільним було б забезпечення такого режиму напруги в тяговій мережі, який би найбільшою мірою задовольняв поставленій умові (1.12).

Найбільший потенціал енергозбереження на електрифікованому транспорті в плані зниження енергоємності перевізного процесу та експлуатаційних витрат криється у використанні на електрорухомому складі рекуперативного гальмування. Підвищення середньосітьового коефіцієнту повернення електроенергії навіть на 1 % перекидає річну ефективність усіх заходів енергозбереження в області електричної тяги [88]. Сумарно подібне призводить до зниження на 0,5...0,7 % питомої витрати електроенергії на тягу поїздів.

Однак окрім зазначеного важливого позитивного енергетичного і експлуатаційного ефекту рекуперації цей режим додаткові експлуатаційні витрати і має ряд специфічних недоліків, що проявляються на рівні дії декількох залізничних підсистем, таких як організація руху, тягове електропостачання, інший рухомий склад, колія, пристрої автоматики і зв'язку. Вказані підрозділи залізниць мають як позитивні, так і негативні наслідки використання рекуперативного гальмування в експлуатаційній роботі. Практично в кожному господарстві і службі залізниці виникають додаткові витрати, що необхідні для забезпечення можливості застосування рекуперації, так і прибутки, що утворюються за рахунок генерації і економії електроенергії, підвищення пропускних здібностей ділянок доріг, забезпечення безпеки руху поїздів і поліпшення ряду інших експлуатаційних показників перевізного процесу. Тому за аналогією з важковаговим рухом, віддачу від рекуперативного гальмування можна

оцінювати тільки за сумарним економічним ефектом, що досягається в цілому по мережі залізниць, а не по окремих дорогах і їх господарствам.

До комплексу факторів, що визначають необхідність, ефективність і власне можливість застосування рекуперативного гальмування, відносяться наступні.

По службі руху:

- підвищення пропускної спроможності ділянок доріг за рахунок підвищення швидкості на спусках, зниження часу обробки составів після спуску;
- прискорення обороту локомотивів і вагонів, у зв'язку з цим зниження їх потреби;
- підвищення безпеки руху поїздів за рахунок наявності в поїзді додаткового засобу гальмування.

По локомотивному господарству:

- зниження питомої витрати електроенергії на тягу поїздів за рахунок її повернення в контактну мережу та зниження витрат на власні потреби ЕРС;
- підвищення технічної швидкості руху за рахунок особливостей характеристик рекуперативного гальмування – підтримка постійної швидкості на спусках (замість її перепадів при поєднанні режимів пневматичного гальмування і вибігу);
- збільшення середньодобового пробігу і продуктивності локомотивів за рахунок зростання технічної швидкості, а також зниження часу простою локомотива з поїздом на станціях обробки (немає масової заміни колодок).

По господарству електропостачання – економія електричної енергії при рекуперативному гальмуванні, підвищення напруги в тяговій мережі та зниження витрат енергії в тяговій мережі.

По вагонному господарству:

- економія гальмівних колодок і зниження витрат на їх заміну;
- економія на обточуванні колісних пар.

На ділянках з інтенсивним використанням електричного (реостатного чи рекуперативного) гальмування внаслідок підвищеного динамічного впливу на колію, в основному в поперечному напрямку, збільшується інтенсивність бокового зносу рейок, вихід з ладу дерев'яних шпал, вилучення елементів стикових, проміжних скріплень і протиугонів. Так існують дослідження [89] щодо збільшення вартості утримання колії на гірських ділянках при різних режимах – тяга, вибіг

і гальмування (пневматичне і рекуперативного) для поїздів масою до 4000 т. Характерно, що як для режиму тяги на підйомі, так і для режиму рекуперації на спусках здорожчання утримання колії (по відношенню до рівнинних ділянок) практично однаково. Різниця між пневматичним гальмуванням і рекуперацією (так само як і реостатним гальмуванням) становить лише частину підвищення витрат на утримання колії на затяжних спусках.

Найбільша економія коштів досягається в господарстві управління перевезеннями, вагонному господарстві і в господарстві електропостачання. Значні витрати від рекуперації несе колійне господарство. У локомотивному господарстві, господарстві сигналізації та зв'язку витрати, пов'язані із застосуванням рекуперації, в порівнянні з зазначеними підрозділами незначні.

Найбільша віддача від повернення електроенергії в контактну мережу (при зіставленні економії і витрат) спостерігається після проведення ремонту колії. По мірі пропущеного вантажопотоку ефективність знижується за рахунок розладу колії. При деякому пороговому значенні сумарні витрати на підтримку колії починають перевершувати доходи від застосування рекуперативного гальмування. Так, залежно від радіуса кривих (300...650 м) і ухилу (9...18 %), його величина коливається від 300 до 600 млн ткм бруто. Після досягнення цього порогу доцільно проводити капітальний або середній ремонт колії. Однак їх терміни можуть бути меншими, ніж економічно доцільні за умовами міцності і надійності колії.

Важливо відзначити, що при максимальних розмірах руху вантажних поїздів, що перевищують 85 % заповнення пропускних спроможностей, вираш у вартості виражений від зниження витрат в поїздо-годинах на ділянках з великими спусками починає значно (майже на порядок) перевищувати витрати на реалізацію рекуперативного гальмування по всім господарствам. При критичному заповненні графіка руху поїздів (вище 90 %) рекуперація стає абсолютно необхідною за умов забезпечення перевезень.

Оскільки вантажообіг на електрифікованих ділянках останнім часом наближається до порогу заповнення пропускних здібностей, ефективність використання рекуперативного гальмування важко переоцінити. Враховуючи сказане, необхідно спрямувати зусилля всіх причетних господарств не на протидію розширення полігонів використання рекуперації, а на пошук технічних рішень, що знижують її негативні наслідки, як загальногалузеве завдання.

У суміжних господарствах повинні бути вжиті заходи, що зменшують негативний вплив рекуперативного гальмування на експлуатаційні показники. Так у колійному господарстві необхідно створювати посилені колійні конструкції, в локомотивному і електропостачанні – компенсувати реактивну потужність і знижувати гармонійний склад струмів рекуперації. В господарстві автоматики, телемеханіки і зв'язку слід підвищувати заводозахищеність рейкових кіл. У ряді випадків, можливо, доведеться відійти від типових конструкцій і пристроїв і прийняти нестандартні рішення, орієнтовані для застосування на ділянках стійкої рекуперації енергії.

Коли в умовах енергодефіциту ведеться всебічний пошук альтернативних джерел енергії (вітер, сонце, біопаливо, диверсифікація вугілля і т.д.), нехтувати таким потужним джерелом, як обернена кінетична енергія потягу, не можливо. Застосуванню рекуперації повинно сприяти впровадження сучасних високоенергоємних накопичувачів, які в найближчі роки можуть бути доступні для систем тягового електропостачання.

В задачах підвищення енергоефективності рекуперації необхідно враховувати негативний вплив електрорухомого складу на елементи залізничної інфраструктури, що поширюється на наступні взаємодіючі підсистеми: системи автоматики (СЦБ), систему тягового електропостачання (СТЕ), систему зовнішнього електропостачання (СЗЕ); залізничну колію, експлуатаційну роботу (графіки руху поїздів), механічне обладнання самого рухомого складу (РС) та інші суміжні пристрої.

На сьогодні розроблені методи оптимізації режимів рекуперації в системах транспорту є переважно однопараметричними і вирішують завдання по одному з критеріїв ефективності функціонування однієї підсистеми, за який приймається або максимум енергії рекуперації [89-92], або мінімум негативного впливу рекуперації на систему тягового електропостачання і суміжні підсистеми [93-95]. При вирішенні даної задачі необхідний системний підхід і врахування взаємного впливу параметрів оптимізації режиму рекуперації на отримання бажаного економічного ефекту. Аналіз взаємодій підсистем електричної тяги при рекуперації поїздів дозволяє виділити і класифікувати наступні показники ефективності використання рекуперації, яким повинні задовольняти режими рекуперативного гальмування: надійність і безпека, енергоефективність та екологічність. Структурування цих показників щодо різних зрізів взаємодіючих підсистем електричної

тяги з урахуванням їх взаємного впливу один на одного та область їх цільових значень наведена табл. 1.9, із якої випливає наявність показників ефективності рекуперації, підвищення яких погіршує інші. Кожен показник у свою чергу є складною функцією багатьох змінних, врахування яких є складною задачею через їх невизначеність та випадкову складову. Отже, вдосконалення режимів рекуперативного гальмування при реалізації всіх цільових функцій являє собою рішення багатопараметричної задачі оптимізації.

Таблиця 1.9

**Класифікація основних показників ефективності рекуперації**

Взаємодія підсистем	Показники ефективності застосування рекуперації		
	Надійність і безпека	Енергоефективність	Екологічність
ЕРС-СТЕ	Напруга на струмоприймачі $U_c \leq U_{км}^{max}$ ; безвідмовна робота іншого ЕРС при порушенні режиму напруги $U_c > U_{км}^{max}$	Енергія рекуперації $W_{рек} \rightarrow \max$ ; втрати енергії рекуперації $\Delta W_{рек} \rightarrow \min$	Гранично допустимі електромагнітні випромінювання $E \leq E_{max}$ ; $H \leq H_{max}$ ; Викиди $CO_2 \rightarrow \min$ ; блукуючих струми $I_{блук} \rightarrow \min$
ЕРС-СЦБ	Гранично допустимий рівень завад від струму рекуперації: коефіцієнт гармонік $k_r \rightarrow \min$	Енергія рекуперації $W_{рек} \rightarrow \max$ ; втрати енергії рекуперації $\Delta W_{рек} \rightarrow \min$	
СТЕ-СЗЕ	Якість енергії рекуперації: пік-фактор $\Pi \rightarrow \min$ ; коэф. форми $k_\phi \rightarrow \min$ ; коэф. гарм. $k_r \rightarrow \min$ ; коэф. несиметрії $k_{U2} \rightarrow \min$	Енергія рекуперації $W_{рек} \rightarrow \max$ ; втрати рекуперативної енергії $\Delta W_{рек} \rightarrow \min$ ; надлишкова енергія рекуперації $W_{рек}^{надл} \rightarrow \min$	
ЕРС-колія	Міжремонтні терміни $T_{рем} \rightarrow \max$	Енергія рекуперації $W_{рек} \rightarrow \max$ ; збиток від уgonу рейок $C_{угон} \rightarrow \min$	
ЕРС-РС	Збільшення ресурсу мех. гальм і бандажів (міжрем. пробігу) $T_{рем} \rightarrow \max$	Споживання енергії на тягу $W \rightarrow \min$	Викиди металевого пилу від терття $\Delta m \rightarrow \min$

Незалежно від того, застосовується реостатне чи рекуперативне гальмування, процес взаємодії рухомого складу і верхньої будови колії визначається наступними чинниками: наявністю ухилів і кривих ділянок колії, вагою, довжиною та швидкістю руху поїздів, потужністю локомотива або групи локомотивів, тобто максимальної гальмової сили.

Концентрація великої гальмівної сили (до 80 % від максимальної сили тяги) на короткій ділянці колії (довжині локомотива) призводить до значного зростання угону колії, який перед локомотивом не завантажений – на ньому немає рухомого складу (в процесі тяги колія завантажена, тому угін менший). Це призводить до обривів рейкових з'єднувачів, руйнування ізоляційних стиків, збоїв у роботі рейкових кіл та пристроїв АЛСН.

Крім того, висока гальмівна ефективність в голові поїзда з локомотивною тягою та набігання незагальмованих задніх вагонів сприяють встановленню вагонів першої третини поїзда в рейковій колії з перекосом. Останнє веде до підвищеного тертя гребнів колісних пар вагонів у бічних поверхнях рейок, підвищеного угону колії і його розшивці, зростанню бокового зносу рейок, подрізу бандажів колісних пар вагонів і навіть локомотивів (при кратній тязі в голові поїзда). Збільшення ваги та довжини поїздів різко погіршує розглянуту ситуацію.

Небезпека вичавлювання вагона обумовлена наступними причинами:

- величиною уповільнення головної частини поїзда, в ролі якої виступає або тільки локомотив при електричному гальмуванні, або локомотив з групою вагонів при пневматичному гальмуванні;
- завантаженням вагона, що визначає положення автозчеплення по висоті і натискання колеса на рейку, створює силу тертя між колесом і рейкою в поперечному напрямку, зменшення якої сприяє вичавленню порожнього вагона;
- ступенем зносу гребня бандажа і бічної грані рейки (як вже відзначалося, саме небезпечне поєднання – новий гребінь і зношена бічна грань рейки);
- поперечною силою, що впливає на колісну пару, особливо при недостатньому підвищенні зовнішньої рейки в кривій, зношеної поверхні катання бандажа і новій рейці і навпаки, при великих значеннях распираючих сил (від перекосу поздовжніх вісей вагонів) при гальмуванні в прямій;

- вагою незагальмованих вагонів хвостової частини поїзда і родом вантажу в них. Ці вагони наносять сильний удар по вагонах, що знаходяться в середній частині поїзда;
- моментом опору обертання візка відносно кузова, який різко зростає при виключенні ресорного підвішування (установці на упор) в наслідок перевантаження вагона;
- зміною характеру бокового зносу рейок;
- різним розташуванням по висоті головок автозчеплень у сусідніх вагонів.

Наприклад, при згинанні рейки на верстаті перед укладанням в криву кінець довжиною близько 1 м залишається не зігнутих. Тому там, де крива великого радіусу різко переходить в пряму, не тільки змінюється характер бокового зносу рейок, але колесо з боку рейки піддається удару, а кут набігання колеса на рейку змінюється. Небезпека вповзання колеса на рейку в такій точці зростає в 10 разів і більше.

Особливо це небезпечно при гальмуванні наливних поїздів на спусках взимку, так як вантаж при охолодженні зменшується в об'ємі і отримує можливість переміщатися в цистерні. При цьому передній за напрямом руху візок перевантажується, а задній розвантажується. В процесі гальмування автозчеплення переднього візку опускається вниз і як би «просідає» під заднє, яке розташовується вище. Обидва вони згинаються вгору з такою силою, що у багатьох цистерн ударна розетка деформує буферний брус і стає під кутом до  $15^\circ$  і більше до горизонту. Задній візок в цьому випадку має підвищену ймовірність сходу. Якщо ж врахувати ще наявність поперечних распираючих сил, підвищений момент обертання візку, поєднання нового гребня із зношеною бічною гранню рейки, зміна кривизни рейки в кривій в зоні стику, то вповзання колісної пари на рейки стає цілком імовірним.

Нерідко і монолітний вантаж, погано закріплений, може зміститися на одну сторону і збільшити момент обертання візка відносно кузова, що підтверджується наявністю блискучої поверхні ковзуна з одного боку. Зсув від центру вагона незакріплених ящиків з монолітним вантажем може бути причиною сходу вагона з рейок.

На безпеку вичавлювання вагонів впливає швидкість. При збільшенні швидкості руху зменшується коефіцієнт зчеплення; крім того, у певні моменти в результаті вертикальних коливань надресорної будови колісна пара частково розвантажується. Все це призводить до зменшення сили тертя між колесом і рейкою в поперечному напрямку

і ударному навантаженню рейки гребнем колісної пари. Тому навіть при малих значеннях поперечних складових стискаючих сил, які виникають через перекося вагонів у рейковій колії при стисненні поїзда хвостовими вагонами, відзначається різке зростання горизонтальних сил у колії, що сприяє не тільки її розшивці, але і перекиданню (вивертанню) рейки на прямих ділянках колії.

Однак внаслідок малого коефіцієнта тертя гальмівних колодок при високій швидкості руху поїзда уповільнення головної частини при пневматичному гальмуванні незначне і поздовжні стискаючі сили в середній частині поїзда будуть менше, так як головні вагони легко просуваються, а отже, є менша небезпека вичавлювання.

У разі малої швидкості руху головна частина поїзда інтенсивно уповільнюється, набігання незагальмованих хвостових вагонів збільшує небезпеку вичавлювання. При електричному гальмуванні створення великої гальмівної сили (із застосуванням піску) при високій швидкості руху підвищує небезпеку вичавлювання порожнього рухомого складу, що перебуває у головній частині поїзда.

Наостанок треба зазначити, що дослідження питань динамічного впливу зосередженого гальмування на знос верхньої будови колії активно проводилися давно, починаючи з 70-80 років минулого століття вченими і фахівцями багатьох наукових шкіл. Результати цих досліджень дозволили зробити висновки про те, що експлуатаційні витрати на відновлення верхньої будови колії, розбалансованої режимами електричного гальмування поїздів практично повністю покриваються економією коштів на ремонт обладнання автогальм, таким чином застосування рекуперації для зниження енергоємності перевезень з цього боку є економічно беззаперечним.

Ще один специфічний негативний ефект режиму рекуперації в системах рейкового електрифікованого транспорту пов'язаний з роботою рейкової електричної мережі. Оскільки земля є добрим провідником електричного струму, а рейкове коло не має надійної електричної ізоляції від землі, то частина струму, що повертається на підстанцію, відгалужується в землю і проходить як по рейках, землі, так і по підземних металевих спорудах (трубах, каркасах підземних споруд, броні і оболонках кабелів та ін.). Для протикорозійного захисту металоконструкцій від протікання тягового струму застосовується катодний захист, який перестає функціонувати в умовах зміни полярності блукаючих струмів, що має місце в режимі рекуперації. Оскільки в цьому випадку позитивний потенціал переходить на рейки

та рухається в просторі, то статичні системи поляризованого дренажу стають не ефективними. Зниження впливу блукаючих струмів на суміжні металоконструкції, в тому числі при рекуперації енергії, виконується в напрямку зменшення поздовжнього опору рейкової мережі та збільшення перехідного опору між рейками і землею. Це досягається за допомогою переходу до безстикової колії, з'єднання стиків і окремих ланок всіх ниток рейок мідними проводами для їх паралельної роботи, використанні щебеневого або гравійного баласту рейкової колії, встановлення ізолюючих деталей між рейками і арматурою залізобетонних шпал, просочуванні дерев'яних шпал в масляних ізоляційних рідинах.

Таким чином, проблема підвищення енергоефективності залізничного транспорту, навіть на прикладі ефективності використання рекуперації, є багатофакторною і багаторівневою, оскільки одночасно зачіпає питання взаємодії і взаємовпливу декількох підсистем залізниць, тому вимагає комплексного підходу до її розв'язання.

### **1.3.2. Підвищення енергоефективності транспортної інфраструктури. Регулювання напруги, використання накопичувачів та відновлюваних джерел в системах тягового енергозабезпечення**

Через глобальні екологічні та енергетичні проблеми енергоємність транспортних систем залишається актуальним предметом наукових досліджень, що потребує постійного аналізу та переоцінки можливостей розвитку технологічного прогресу.

Одним з відомих напрямків зниження енергоємності та підвищення енергетичних показників систем електрифікованого транспорту є використання силових накопичувачів енергії [86]. Через наявність в режимах електроспоживання коливань, що викликані інерційністю руху та можливістю рекуперативного гальмування, застосування накопичувачів дозволяє демпфірувати ці коливання, підвищити ефективність використання рекуперованої енергії, знизити втрати енергії та встановлену потужність системи тягового електропостачання. Крім цього, тимчасове зберігання енергії рекуперації в накопичувачах має суттєву перевагу перед її поверненням в первинну мережу, оскільки не залежить від режимів роботи районних навантажень та не викликає

організаційних питань при компенсації вартості відданої енергії в систему зовнішнього електропостачання.

До використання енергоємних пристроїв вдаються також і автовиробники в результаті пошуку альтернативних видів палива для автомобілів. Цьому сприяє розвиток технологій виготовлення пристроїв накопичення і зберігання електроенергії та перетворювальної техніки.

Перший у світі масовий гібридний автомобіль Toyota Prius з'явився у 1997 році, для приводу якого застосовувався двигун внутрішнього згорання сумісно з електродвигуном. Через 13 років з'явився електромобіль Tesla, здатний проїхати на одному заряді до 300 км. Саме поява автомобіля Tesla започаткувала еру автономного електричного транспорту. Після цього більшість автовиробників зі світовим ім'ям налагодили випуск електрокарів, працюючих від акумуляторних батарей.

На сьогодні у світі нараховується більше 58 млн. електромобілів та їх кількість неперервно зростає. Лідером серед країн світу за темпами переходу на електромобілі є Норвегія, кількість електромобілей у якій складає близько 754 тис. В Україні експлуатується більше 160 тис. електромобілів, в Польщі на кінець серпня 2025 року зареєстровано близько 107 тис. електрокарів [96].

Через зростаючу кількість фактів використання енергоємних пристроїв виникає задача налагодження їх ефективної взаємодії з енергетичною інфраструктурою електрифікованого транспорту для зниження енергоємності перевізного процесу.

На сьогодні високими темпами розвивається електромобілебудування як персонального так і громадського електротранспорту (рис. 1.42).



Рис. 1.42. Сучасні електробуси різних виробників: а) польський Urbino 12 electric, компанія Solaris Bus & Coach S.A.; б) голландський VDL Citea SLF-120 Electric, компанія VDL Bus & Coach bv; в) німецько-турецький E-Bus S18, компанія Sileo GmbH; г) Vitovt Max Electro

Так на щорічній найбільшій міжнародній виставці транспортної техніки і технологій InnoTrans (м. Берлін) у 2017 році було продемонстровано унікальний експонат – зчленований електробус моделі E433 Vitovt Max Electro (рис. 1.36, г). Свою техніку також регулярно представляють різні виробники подібної техніки, такі як польська компанія Solaris Bus & Coach S.A., голландська VDL Bus & Coach bv і німецько-турецька Sileo GmbH.

Електробус Urbino 12 electric, визнаний як «Автобус 2017 року» в Європі, оснащується порталним мостом ZF AVE130 з двома вбудованими електромоторами (номінальна потужність кожного – 60 кВт, пікова – 125 кВт) і літій-тітанатними акумуляторами [97], з трьома способами заряду: через мережу, через встановлений на даху пантограф під час зупинок на маршруті або за допомогою індукційної системи.

Електробус Citea SLF-120 Electric виробництва VDL Bus & Coach bv має схожу концепцію: оснащується літій-іонними акумуляторами [97], які можна заряджати через мережу між зміними, а також час від часу через пантограф під час роботи. Оптимальний варіант передбачає пробіг не менше 200 км на одній зарядці.

Компанія Sileo представила зчленований 18-метровий електробус E-Bus S18, який оснащений батареєю з 474 літій-залізо-фосфатних акумуляторів з ємністю 300 кВт·год, що достатньо для покриття на одній зарядці 250-кілометрової дистанції. Електроприводом є чотири електродвигуни потужністю 120 кВт кожен, що дозволяють розвивати швидкість до 75 км/год.

Електробус моделі Vitovt Max Electro, на відміну від інших електробусів, оснащений передовою системою накопичувачів електроенергії на базі суперконденсаторів (іоністорів), що дозволяє забезпечити рух по маршруту з швидкою підзарядкою на кінцевих зупиночних пунктах за допомогою спеціальних зарядних станцій [97]. Підзарядка проходить в автоматичному режимі через напівпантограф. При розряді накопичувачів не більше 30 % підзарядка триває приблизно 5...7 хвилин. За цей час електробус повинен встигнути накопичити енергію, достатню для проходження з повним навантаженням як мінімум 12-кілометрової дистанції. Суперконденсатори для цих електробусів виготовляються китайською компанією "Сіньджу" (Xinzhu). Суперконденсатори мають досить високі показники надійності і довговічності: число циклів заряду-розряду - понад 100 тисяч, ресурс - близько 10 років [97].

Одним з сучасних прикладів інтелектуальної транспортної інфраструктури можна вважати проект Hedgehog Applications для систем електропостачання зарядних станцій електробусів і електромобілів від акумуляторних батарей високої енергоємності (рис. 1.43), встановлених на залізничних станціях, що одержують живлення від рекуперації електропоїздів [98].

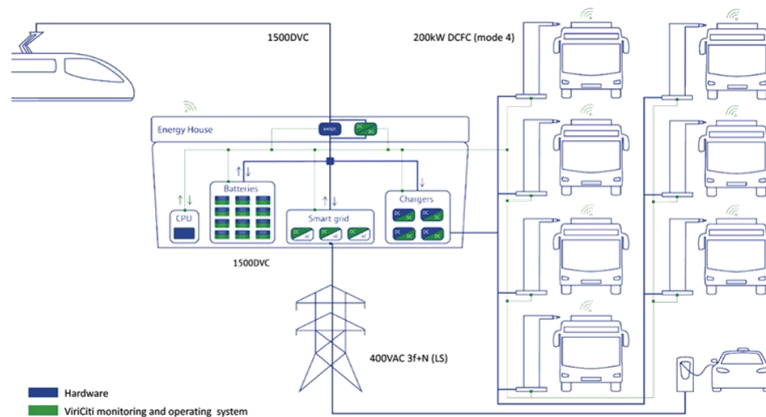


Рис. 1.43. Структурна схема взаємодії енергетичних інфраструктури міського електротранспорту та електрифікованої залізниці (проект Hedgehog Applications) [98]

При цьому забезпечується гарантована рекуперація поїздів незалежно від наявності тягових навантажень на лінії. Кількість енергії, яка може бути отримана таким чином відповідає потребам автобусних компаній невеликих міст.

Розглянуте вище дозволяє підсумувати, що зараз в якості накопичувачів на транспорті можуть використовуватись різні типи акумуляторних елементів, вибір яких повинен забезпечувати покриття як короткочасних, так і тривалих періодів електроспоживання та рекуперації. При цьому для стаціонарного розташування, як правило, використовуються механічні або хімічні вторинні джерела електроенергії, а при бортовому розташуванні необхідна комбінація хімічних і суперконденсаторних елементів. В якості бортових накопичувачів в перспективі можна розглядати і самі електромобілі при їх перевезенні в пасажирських поїздах між містами [78, 99].

Іншим напрямом підвищення енергоефективності транспортної інфраструктури є застосування на тягових підстанціях залізниць пристроїв автоматичного регулювання та керованих перетворювальних агрегатів зі стабілізацією вихідної напруги. Це

дозволяє ліквідувати лише вплив коливань живлячої енергосистеми та падіння напруги на внутрішньому опорі тягових підстанцій. Вплив втрат напруги в опорі проводів контактної мережі міжпідстанційної зони від тягового навантаження зберігається. Тому, в окремих випадках, при жорстких вимогах до якості напруги, наприклад, на ділянках зі швидкісним рухом, впровадження стабілізації лише на шинах тягових підстанцій буде недостатнім. Для вирішення даної проблеми додатково стабілізують напругу в контактній мережі.

Досягнення і стабілізація заданого рівня напруги на міжпідстанційній зоні потребує побудови розподіленої системи вимірювань та на її основі системи керування у реальному часі. Однак, як зазначалось в [86] створення такої слідкуючої системи при наявності декількох потягів в зоні, коли втрата напруги до кожного з них буде відрізнитись, дуже важке та не доцільне. Тому широкого застосування набули системи стабілізації на посту секціонування, які довели свою ефективність значно знизивши коефіцієнт варіації напруги на струмоприймачах електрорухомого складу.

На сучасному етапі розвитку техніки та технологій стає можливим створення слідкуючої системи автоматичного керування та побудова на її базі системи для забезпечення заданого рівня напруги на струмоприймачах електровозів, що дозволить досягти енергооптимальних режимів роботи СТЕ [86].

В останні роки в енергетиці простежується тенденція до децентралізації виробництва електроенергії, що обумовлено вичерпанням традиційних енергоносіїв і збільшенням частки генераторів відновлюваної енергії, з усіх видів якої Україна найбільш багата на сонячну [100]. Для умов України з її високою щільністю населення найбільш перспективні не великі геліостанції, що займають спеціально виділену велику площу, а розподілені генератори, розміщені вздовж існуючих об'єктів з лінійним розташуванням в просторі. До числа таких об'єктів належать і залізниці з їх земельними смугами відчуження, які приписані до доріг. На цих смугах можна розміщувати розподілені фотоелектричні генератори.

Інтеграція джерел розподіленої генерації (ДРГ) в систему тягового електропостачання постійного струму вимагає розробки нових принципів проектування, функціонування і управління режимами роботи тягового електропостачання [101]. Необхідність їх розробки обумовлена наступними чинниками: змінюється структура електричної системи, потужність генерації ДРГ визначається

зовнішніми чинниками (в першу чергу інтенсивністю сонячного випромінювання і вітрового потоку) і мало залежить від режиму роботи електричної мережі, до якої вони приєднані. Установки ДРГ можуть мати коливальний або переривчастий характер генерації потужності, яка може привести до сильних коливань потужності в системі і впливати на режими її роботи, більшість ДРГ приєднані до мережі за допомогою силових електронних перетворювачів (інверторів), які дуже чутливі до рівнів напруги. Звідси, необхідно вирішувати низку запитань: визначення впливу ДРГ на стабільність роботи тягових підстанцій, тягових і інших споживачів, які приєднані до шин тягової підстанції з урахуванням допустимих режимів роботи споживачів, розробка рекомендацій відносно особливостей приєднання цього типу генерації до електричних мереж залізниць, функціонування пристроїв релейного захисту і автоматики, забезпечення необхідного рівня надійності електропостачання споживачів з необхідними якісними характеристиками, типу вживаного накопичувача і місця його установки. На сьогоднішній день вирішення вказаних завдань здійснюється з застосуванням смарт-технологій, одним із завдань яких є, тому числі, забезпечення якості електричної енергії [78].

Електроенергію, що генерується розподіленими джерелами можна або безпосередньо використовувати для тяги поїздів, або акумулювати на тягових підстанціях (або пунктах підживлення) разом з енергією рекуперативного гальмування. Загальні застосування акумульованої енергії в тягових енергосистемах включають наступне:

- регенерація енергії;
- регулювання напруги;
- згладження піків навантаження;
- зсув навантаження.

Провали напруги в тяговій мережі, що обумовлені тимчасовим перевантаженням енергосистеми, як правило, за рахунок багатьох поїздів, що працюють в безпосередній близькості один від одного, або за рахунок одночасного прискорення кількох поїздів в одній зоні, можуть бути згладжені за рахунок накопиченої енергії. У системах регулювання напруги накопичення енергії використовується для зменшення рівня флуктуації в тяговій мережі та збереження коливань напруги в робочому діапазоні. Пристрої акумулювання енергії також можуть забезпечити наявність достатнього електричного навантаження для пом'якшення перенапруг, обумовлених

регенеративним гальмуванням поїздів у місцях, де є недостатнє електричне навантаження.

Для згладження піків споживання електроенергії накопичувачі використовуються для акумулювання та відпуску електроенергії з метою скорочення короткострокових коливань у споживанні потужності. Метою пікового згладження є зменшення пікових потреб енергії для мінімізації розміру електрообладнання та / або для здійснення фінансової вигоди шляхом зменшення витрат на споживання електроенергії.

Зсув навантаження аналогічний застосуванню згладження піків споживання електроенергії, але з наміром перемістити велику кількість електричної енергії від одного періоду часу до іншого. Мета переміщення навантаження полягає в тому, щоб реалізувати фінансову вигоду шляхом зменшення витрат на споживання електроенергії та / або енергопостачання, акумулюючи енергію в періоди її недорогої вартості, а потім повертаючи її назад у систему в періоди підвищення вартості. Для вирішення цього завдання запропонована структура з поздовжньою лінією постійного струму, яка пов'язує фотогенератори в послідовний електричний ланцюг, та напівпровідниковими перетворювачами для її підключення до приймача електроенергії, в якості якого може виступати контактна мережа залізниці постійного струму [90]. Загальна структура системи наведена на рис. 1.44. Сонячні панелі встановлюються в смугі відчуження і з'єднуються один з одним паралельно-послідовно в фотомодулі.

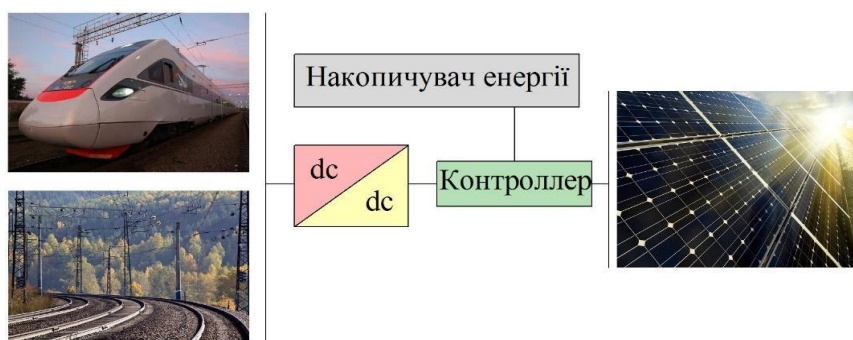


Рис. 1.44. Структурна схема підсилення тягового електропостачання відновлюваними джерелами енергії

Кожен фотомодуль приєднаний до узгоджувачого перетворювача (УП), який використовується для максимізації енергії, отриманої від фотомодуля, а також для гальванічної розв'язки від подальших частин системи.

Вихід УП виповнюється на постійному струмі при низькій напрузі, допустимій за умовами електробезпеки. Безпосереднє підключення фотомодуля з УП безпосередньо до контактної мережі (КМ) є недоцільним і вимагало б застосування індивідуального розв'язуючого трансформатора з високовольтною ізоляцією вторинної обмотки. Тому, паралельно КМ на її опорах або окремо в смузі відчуження прокладається поздовжня лінія (ПЛ) постійного струму, яка з'єднає окремі фотомодулі в єдине послідовне коло (рис. 1.45).

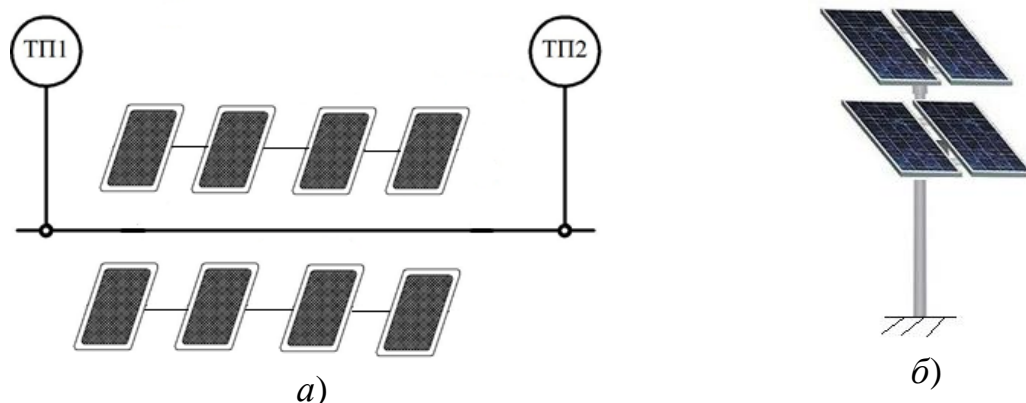


Рис. 1.45. Розташування сонячних панелей вздовж МПЗ: а – структурна схема; б – варіант розміщення сонячних панелей на опорі

Зважаючи на те, що підсилюючий пункт буде розміщуватись на опорах контактної мережі, необхідно досягти якомога менших масогабаритних показників пристрою. В перетворювальних ланцюгах джерел живлення трансформатор є найбільш громіздким елементом, і тому доцільним є зменшення його об'єму [102]. Існує три основні способи підвищення компактності трансформатора:

1. Застосування надпровідних обмоток;
2. Застосування для магнітопроводу нових матеріалів з більшою індукцією насичення;
3. Підвищення робочої частоти напруги.

На практиці найбільшого застосування отримав останній спосіб. Однак, збільшення робочої частоти призводить до збільшення динамічних втрат в ключах імпульсного перетворювача та може призвести до зростання сумарних втрат, що перевищують допустиме значення. Сумарна потужність втрат в IGBT обмежена максимально допустимим значенням температури напівпровідникової структури та значенням теплового опору потоку тепла в охолоджуюче середовище. Так, наприклад, для силового IGBT модуля *FZ3600R17HP4* фірми

*Infineon* допустима потужність розсіювання становить 21 кВт. Відповідно до методики, запропонованої в [103], максимально допустиме значення частоти комутації модуля IGBT, відповідаюче такій потужності розсіювання, при амплітуді струму на виході інвертора майже 800 А становить 8341 Гц. Робота силових модулів на такій частоті може призвести до недопустимого перевищення температури. Для запобігання перегріву розроблені і розробляються високоефективні системи охолодження повітряного, водяного і випарного типів. Використання сучасних високоефективних систем охолодження забезпечить номінальний температурний режим роботи модуля, але й значно підніме вартість всієї установки в цілому. Тому критична частота перемикавання силових ключів не є оптимальною. Доцільніше обирати значення частоти комутації зі співвідношення «потужність теплових втрат/вартість системи охолодження».

Критична частота роботи імпульсного перетворювача також може бути обмежена властивостями матеріалу магнітопроводу трансформатора та вимогами з охолодження та ізоляції. Відповідно до критерія подібності оптимальних за масогабаритними показниками трансформаторів [104, 105], з підвищенням робочої частоти габарити і маса трансформатора можуть бути зменшені до певної межі, що відповідає значенню критичної частоти. Це викликане дією низки фізичних факторів, наприклад: зменшення коефіцієнта передачі трансформатора, падіння напруги на індуктивності розсіювання, обмеження можливості розміщення обмотки в вікні магнітопроводу і т. і. Допустима робоча частота трансформатора визначається, головним чином, магнітними та електричними властивостями матеріалу магнітопроводу. Підвищення частоти призводить до зростання нагріву сердечника, що зумовлено, з одного боку, дією вихрових струмів, а з іншого – зменшенням площі поверхні охолодження (внаслідок зменшення габаритів трансформатора). Тому для зменшення температури нагріву необхідно знижувати вихрові струми в сердечнику. Для цього потрібно застосовувати магнітом'які матеріали з питомим опором більшим, ніж у електротехнічних сталях. Останнім часом, в області силового трансформаторобудування широке розповсюдження отримали аморфні сплави, які мають випадкову (некристалічну) структуру. У традиційних вторинних джерелах електроживлення невеликої потужності використовуються трансформатори з сердечниками з порошкових магнітних матеріалів (феритів) при величині частоти порядку десятків кілогерц і більше. В

даному застосуванні (енергетичному) трансформатори матимуть досить велику потужність. Тому доцільна зміна конструкції розв'язуючих трансформаторів і перехід від порошкових магнітних матеріалів до стрічкових при зниженні робочої частоти до значень порядку декількох кГц.

Для зменшення втрат від вихрових струмів, низьковольтні обмотки доцільно виготовляти з тонкої провідникової стрічки з шириною, рівній висоті котушки. Для слабкострумкових (високовольтних) обмоток можна зберегти традиційне намотування провідником з круглим поперечним перерізом.

Основними факторами, що впливають на вибір частоти, є енергетичні і масогабаритні характеристики силових трансформаторів як найбільш дорогих елементів даної системи.

Для отримання характеристик трансформаторів було використано методику роботи [105]. Прийнято, що сумарна потужність вторинних обмоток в трансформаторі дорівнює потужності  $S$ , що передається. Геометричні характеристики представлено в відносних одиницях, прийнявши в якості базисного лінійного розміру ширину  $a$  несучого обмотки стержня сердечника, в якості базисної площі  $a^2$  і в якості базисного об'єму  $a^3$ . Відносні геометричні характеристики позначено зірочкою.

При спорудженні великих сонячних електростанцій (СЕС) велике значення має розмір площі, яка потрібна для розміщення сонячної електростанції та є одним з важливих параметрів для проектування СЕС. При цьому слід розуміти, що розмір площі знаходиться практично в прямій залежності від максимальної потужності сонячної станції – чим більше фотоелектричних модулів (сонячних батарей) буде змонтовано, тим більше буде потужність, але і тим більша площа буде потрібна для їх установки. Крім того, до загальної площі фотомодулів доведеться додати технологічні проходи та відстань між окремими модулями, щоб запобігти взаємного затінення панелей.

Для мінімізації площі сонячної станції та уникнення спорудження допоміжних ліній, що будуть передавати енергію від станції до споживача, більш доцільним варіантом є розташування сонячних батарей рівномірно вздовж міжпідстанційних зон на окремих опорах.

Сумарна потужність сонячних панелей для системи розраховується виходячи з встановленої потужності підсилюючого пункту та залежить від пори року та географічного розташування. При розрахунках необхідно також враховувати втрати на перетворення

постійної напруги в постійну або змінну, заряд-розряд акумуляторів та втрати в провідниках.

Сонячне випромінювання величина непостійна та залежить від багатьох факторів – від пори року, добового періоду, погодних умов та географічного положення. Ці фактори також повинні враховуватись при розрахунках кількості сонячних панелей. У разі використання системи напротязі всього року, розрахунок повинен виконуватись для найнесприятливіших місяців з точки зору сонячного випромінювання.

Одним із перспективних напрямів підвищення енергоефективності систем електрифікованого транспорту є впровадження накопичувачів електроенергії (НЕ), без яких, доречі, неможлива ефективна інтеграція відновлюваних джерел в систему тягового електропостачання. На даний час існує достатній позитивний досвід експлуатації НЕ на метрополітенах і міському електротранспорті. На ТП переважно використовуються інерційні механічні НЕ, як найбільш узгоджені з електромеханічними характеристиками транспортних навантажень. Комплекс з 2-5 енергоблоків дозволяє акумулювати енергію потужністю 1,5...2,5 МВт, що дозволяє забезпечувати пуск та розгін двох електропоїздів до швидкості 60 км/год [86].

На сьогоднішній день в пристроях СТЕ пропонуються до використання різні типи накопичувачів [90], але доцільність застосування того чи іншого типу накопичувача до цього часу не обґрунтована в повній мірі. На рис. 1.46 показано деякі обрані типи накопичувачів енергії, причому для порівняння ефективності їх застосування наведені питомі енергії (відношення накопиченої енергії до маси накопичувача) та питомі потужності (відношення потужності заряду/розряду до маси накопичувача). Значення основних параметрів, що визначають енергетичні та часові зарядно/розрядні властивості головних типів накопичувачів енергії, наведені в табл. 1.10 [86].

Для застосування в системі розподіленого живлення, накопичувач енергії повинен функціонувати в умовах різкої зміни навантаження та компенсувати коливання напруги при мінімальному часі відновлення. Як показує аналіз доступних джерел [106], на сьогоднішній день найбільш перспективним напрямком є застосування батарейних систем накопичення електричної енергії (БСНЕ), дозволяючих зменшити коливання споживаної потужності і рознести в часі фази накопичення та віддачі електроенергії.

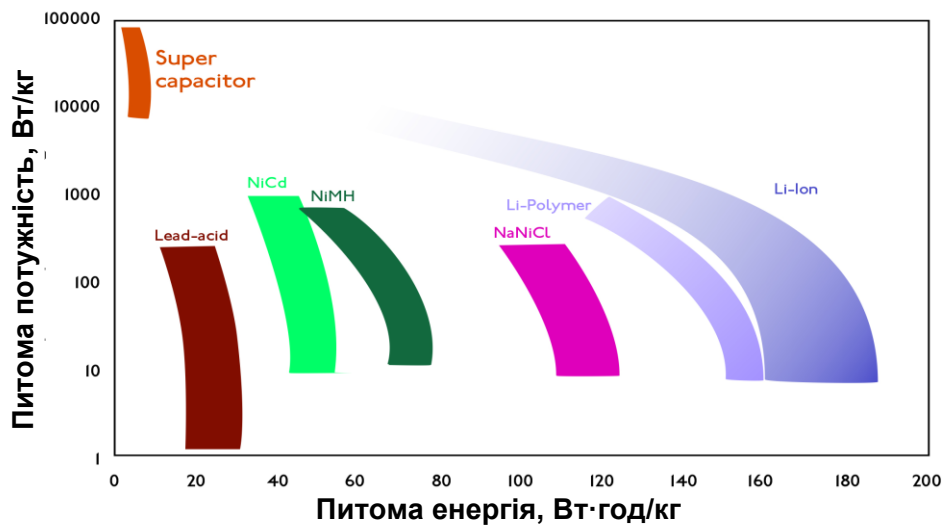


Рис. 1.46. Порівняння ефективності різних типів накопичувачів енергії

Таблиця 1.10

**Енергетичні та розрядні показники різних типів НЕ**

Тип НЕ		Питома енергія, Дж/г	Час виводу енергії, с
Зі статичною активною зоною	Хімічний	$10^2 \dots 10^5$	$1 \dots 10^5$
	Індуктивний	$1 \dots 10$	$10^{-3} \dots 10$
	Ємнісний	$0,1 \dots 0,5$	$10^{-6} \dots 10^{-2}$
З динамічною активною зоною	Механічний	$10 \dots 10^3$	$1 \dots 10^3$
	Електромеханічний	$1 \dots 10$	$10^{-2} \dots 10$
	Електродинамічний	$0,05 \dots 1$	$10^{-3} \dots 10^{-2}$

Імпульсний характер струму, що споживається ЕРС може бути скомпенсований батарейною системою до отримання бажаного режиму напруги. Крім того, застосування електрохімічних накопичувачів енергії дозволяє вирішити цілий ряд завдань: поліпшити якість електричної енергії і знизити витрати на виробництво електроенергії, згладити профіль завантаження генеруючих потужностей, збільшити ресурс електромережевого устаткування, знижуючи пікове навантаження на підстанції, дозволяє інтегрувати в існуючу систему електропостачання сонячні і вітрові генератори електричної енергії, збільшити надійність енергосистем в цілому [107].

Незважаючи на наявність великої кількості типів електрохімічних накопичувачів електричної енергії, вибір конкретного типу акумулятора для енергетичних задач обмежується певними вимогами [108]. При виборі конкретного типу накопичувача необхідно

враховувати як технічні, так і економічні характеристики. До технічних характеристик можна віднести: ККД, кількість зарядно-розрядних циклів, час заряду, здатність до перевантажень (можливість віддачі імпульсних струмів), частотні характеристики (здатність швидко віддавати енергію). До факторів, що впливають на економічні показники, варто віднести загальну вартість батареї, її час життя. На залізниці БСНЕ може бути розміщено як на ТП так і, бажано, між ними на ПП. Оскільки застосування БСНЕ на залізниці забезпечує якість електричної енергії, визначальними факторами є перевантажувальна здатність, частотні характеристики і час заряду.

На підставі проведеного аналізу можливості застосування різних типів акумуляторних накопичувачів у складі БСНЕ (табл. 1.11), перевагу слід віддати LiFePO<sub>4</sub> батареям: вони мають найкращі енергетичні характеристики при задовільних частотних характеристиках.

Однак, їх використання накладає серйозні вимоги до системи керування батареєю. Для забезпечення нормальної роботи акумуляторної батареї, в процесі її експлуатації потрібно постійно відслідковувати рівень заряду кожного з елементів батареї, запобігаючи його виходу за допустимі межі. Крім того, необхідно вирівнювати значення напруги кожного з послідовно включених елементів між собою (балансувати рівень заряду).

Таблиця 1.11

**Характеристики найбільш поширених типів АКБ**

Тип батареї	Lead-acid	NiCad	NiMH	LiCoO <sub>2</sub>	LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	LiFePO <sub>4</sub>
Номінальна напруга, В	2	1,2	1,2	3,7	3,7	3,3
Відносна вартість	1	2	2,4	4	6	>10
Безпечність використання	Висока	Висока	Висока	Низька	Середня	Висока
Екологічність використання	Низька	Низька	Висока	Висока	Висока	Висока
Ефект пам'яті	–	+	+	–	–	–
Енергоефективність	60%	75%	70%	90%	90%	95%
Час життя (год.)	400	500	500	>500	>500	>2000
Час зарядження, год	12	1.5	4	2-4	2-4	<2
Саморозрядження, % / міс.	20	30	35	10	10	8

Отже, аналіз сучасних тенденцій свідчить, що підвищення енергоефективності транспортної інфраструктури є комплексним завданням, яке вирішується шляхом синергетичної інтеграції трьох ключових напрямів: впровадження накопичувачів енергії,

вдосконалення систем стабілізації напруги та залучення розподілених джерел генерації. При цьому саме накопичувачі, зокрема перспективні літій-залізо-фосфатні батареї, відіграють центральну роль, оскільки вони не лише дозволяють ефективно використовувати енергію рекуперативного гальмування та згладжувати пікові навантаження, але й є обов'язковою ланкою для стабільної роботи систем з відновлюваними джерелами енергії. Такий комплексний підхід формує основу для переходу до інтелектуальних, гнучких та енергооптимальних транспортних систем майбутнього.

## Список використаних джерел до розділу 1

1. Kurhan D., Kovalchuk V., Markul R., Kovalskyi D. Development of Devices for Long-Term Railway Track Condition Monitoring: Review of Sensor Varieties. *Acta Polytechnica Hungarica*. 2025. Vol. 22(4). P. 65–82. <https://doi.org/10.12700/APH.22.4.2025.4.5>
2. Курган Д. М., Ковальчук В. В., Маркуль Р. В., Ковальський Д. Л. Застосування датчиків для довгострокового моніторингу стану залізничної колії. *10-та Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті»*, 20–22 листопада 2024 р., м. Харків, Україна. С. 32–34.
3. Fischer S., Liegner N., Bocz P., Vinkó Á., Terdik G. Investigation of Track Gauge and Alignment Parameters of Ballasted Railway Tracks Based on Real Measurements Using Signal Processing Techniques. *Infrastructures*. 2023. Vol. 8(2). 26. <https://doi.org/10.3390/infrastructures8020026>
4. Kurhan D. Determination of Load for Quasi-static Calculations of Railway Track Stress-strain State. *Acta Technica Jaurinensis*. 2016. Vol. 9(1). P. 83–96. <https://doi.org/10.14513/actatechjaur.v9.n1.400>
5. Major Z. Longitudinal Behaviour of Embedded Rails. *Acta Technica Jaurinensis*. 2015. Vol. 8(2). P. 179–187. <https://doi.org/10.14513/actatechjaur.v8.n2.367>
6. Potapov D., Vitolberg V., Shumyk D., Boyko V., Kulik S. Study into Stresses in Rail Track Elements from High-Speed Rolling Stock in Ukrainian Main Lines. *AIP Conference Proceedings*. 2023. Vol. 2684. 020010. <https://doi.org/10.1063/5.0120022>
7. Kurhan D., Kurhan M., Horváth B., Fischer S. Determining the Deformation Characteristics of Railway Ballast by Mathematical Modeling of Elastic Wave Propagation. *Applied Mechanics*. 2023. Vol. 4(2). P. 803–815. <https://doi.org/10.3390/applmech4020041>
8. Sysyn M., Kovalchuk V., Gerber U., Nabochenko O., Pentsak A. Experimental Study of Railway Ballast Consolidation Inhomogeneity under Vibration Loading. *Pollack Periodica – An International Journal for Engineering and Information Sciences*. 2020. Vol. 15(1). P. 27–36. <https://doi.org/10.1556/606.2020.15.1.3>
9. Sysyn M., Gerber U., Kluge F., Nabochenko O., Kovalchuk V. Turnout Remaining Useful Life Prognosis by Means of On-board Inertial Measurements on Operational

- Trains. *International Journal of Rail Transportation*. 2020. Vol. 8(4). P. 347–369. <https://doi.org/10.1080/23248378.2019.1685918>
10. Kovalchuk V., Koval M., Onyshchenko A., Kravets I., Bal O., Markul R., Vikhot S., Petrenko O., Rybak R., Milyanych A. Determining the Strained State of Prefabricated Metal Corrugated Structures of a Tunnel Overpass Exposed to the Dynamic Loading from Railroad Rolling Stock. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 3/7(117). P. 50–58. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.259439>
  11. Kurhan D., Leibuk Y. Research of the Reduced Mass of the Railway Track. *Acta Technica Jaurinensis*. 2020. Vol. 13(4). P. 324–341. <https://doi.org/10.14513/actatechjaur.v13.n4.563>
  12. Song Z., Wang F., Hu X., Cheng D., Li Q. Influences of Wheel Polygon Amplitude on Wheel-Rail Vibration and Sound Radiation. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*. 2023. Vol. 42(2). P. 477–495. <https://doi.org/10.1177/14613484231152850>
  13. Zhou Q., He Y., Li M., Liu Z., He Y., Sheng X. A Parametric Study on the Structural Noise Radiation Characteristics of a Steel Spring Floating Slab Track. *Advances in Mechanical Engineering*. 2022. Vol. 14(9). <https://doi.org/10.1177/16878132221119921>
  14. Leibuk Y., Scoryk A. et al. Experimental Determination of the Arrayed Mass of the Track. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice*. 2019. Vol. 15. P. 41–46. <https://doi.org/10.15802/bttrp2019/172384>
  15. Zhangabylova A., Bikhzhayeva G., Kvashnin M., Kurbenova A., Joldassova K. Experimental Determination of Dynamic Characteristics of a Railway Track. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2023. Vol. 1. P. 102–111. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2023.002748>
  16. Janostik D., Nohal V., Seelmann H., Smutny J. The Continuous Monitoring of Selected Railway Structures Using the Autonomous Data Logger. *Communications – Scientific Letters of the University of Zilina*. 2020. Vol. 22(2). P. 88–96. <https://doi.org/10.26552/com.C.2020.2.88-96>
  17. Guedes A., Silva R., Ribeiro D., Vale C., Mosleh A., Montenegro P., Meixedo A. Detection of Wheel Polygonization Based on Wayside Monitoring and Artificial Intelligence. *Sensors*. 2023. Vol. 23(4). 2188. <https://doi.org/10.3390/s23042188>
  18. Park C.B., Miller R.D., Ryden N. Roadside seismic survey utilizing traffic noise. *Proceeding of the NDE Conference on Civil Engineering* (14–18 August 2006). – St. Louis, MO, USA, 2006. – P. 323–334.
  19. Sussmann T.R., Thompson H.B., Stark T.D., Wilk S.T., Ho C.L. Use of seismic surface wave testing to assess track substructure condition. *Construction and Building Materials*. 2017. 155, pp. 1250-1255
  20. Izvolt L., Harusinec J., Smalo M. Optimisation of transition areas between ballastless track and ballasted track in the area of the tunnel turecky vrch. *COMMUNICATIONS Scientific Letters of the University of Zilina*. 2018. 20(3):6776.
  21. Wang H., Markine V. Modelling of the long-term behaviour of transition zones: prediction of track settlement. *Engineering Structures*. 2018. 156, pp. 294–304.

22. Fischer S. Breakage Test of Railway Ballast Materials with New Laboratory Method. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2017. 61 (4), pp. 794–802.
23. Plášek O., Hruzíková M., Svoboda R., Vendel J. Influence of under sleeper pads on track quality. *Akustika*. 2015. 23(1), pp. 28–33.
24. Nagy R. Description of rail track geometry deterioration process in hungarian rail lines no. 1 and no. 140. *Pollack periodica* (12). 2017. 3, pp. 141–156.
25. Kovalchuk V., Kovalchuk Y., Sysyn M., Stankevych V., Petrenko O. Estimation of carrying capacity of metallic corrugated structures of the type Multiplate MP 150 during interaction with backfill soil. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. 1(1–91), pp. 18–26. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.123002
26. Izvolt L., Sestakova J., Smalo M. Analysis of results of monitoring and prediction of quality development of ballasted and ballastless track superstructure and its transition areas. *COMMUNICATIONS Scientific Letters of the University of Zilina*. 2016. 18(4):1929.
27. Gerber U. and Fengler, W. Setzungsverhalten des Schotters. *Eisenbahntechnische Rundschau*. 2010. 4, pp. 170–175.
28. Sysyn M., Gerber U., Kovalchuk V., Nabochenko O. The complex phenomenological model for prediction of inhomogeneous deformations of railway ballast layer after tamping works. *Archives of Transport*. 2018. 46(3), pp. 91–107. DOI: 10.5604/01.3001.0012.6512
29. Holtzendorff K. Untersuchung des Setzungsverhaltens von Bahnschotter und der Hohllagenentwicklung auf Schotterfahrbahnen. Ph.D. thesis, Technische Universität Berlin. 2003.
30. Smutný J., Nohál V. Vibration analysis in the gravel ballast by measuring stone method. *Akustika*. 2016. 25(1), pp. 22–28.
31. Sadeghi J. Field investigation on dynamics of railway track pre-stressed concrete sleepers. *Advances in Structural Engineering*. 2010. 13(1):139–151.
32. Lam H., Wong M. Railway ballast diagnose through impact hammer test. *Procedia Engineering. The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*. 2011. 14:185194, doi:doi:10.1016/j.proeng.2011.07.022.
33. Bold R. D.. Non-Destructive Evaluation of Railway Trackbed Ballast. PhD Thesis:. Institute for Infrastructure and Environment, School of Engineering, University of Edinburgh, 2011.
34. Sysyn M., Gruen D., Gerber U., et al. Turnout monitoring with vehicle based inertial measurements of operational trains: a machine learning approach. *COMMUNICATIONS Scientific Letters of the University of Zilina*. 2018. 20(4):3544.
35. Sysyn M., Gerber U., Nabochenko O., Kovalchuk V. Common crossing fault prediction with track based inertial measurements: Statistical vs Mechanical approach. *Pollack Periodica. An International Journal for Engineering and Information Sciences*. 2019. Vol. 14(2), pp. 15–26. DOI: 10.1556/606.2019.14.
36. Sysyn M. P., Kovalchuk V. V., Jiang D. Performance study of the inertial monitoring method for railway turnouts. *International Journal of Rail Transportation*. 2019. 7(2), pp. 103–116.
37. Sysyn Mykola, Nabochenko Olga, Kovalchuk Vitalii, Gruen Dimitri and Pentsak Andriy. Improvement of inspection system for common crossings by track side

- monitoring and prognostics. *Structural Monitoring and Maintenance*. 2019. Vol. 6, No. 3, pp. 219–235.
38. Bianchi G, Fanelli C. and La Placa A. «Systematic review railway infrastructure monitoring: From classic techniques to predictive maintenance», *Advances in Mechanical Engineering, Advances in Mechanical Engineering*. 2025, Vol. 17(1). pp. 1–26. <https://doi.org/10.1177/16878132241285631>
  39. Kovalchuk V., Kravets I., Sobolevska Y., Laushnyk I., Nobochenko O., Pentsak A., Petrenko O. Experimental study of the influence of a defective ground surface, on increasing the acceleration and movement of sleepers during the action of railway rolling stock. *Acta Polytechnica Hungarica*. 2025. Vol. 22, iss. 4. P. 102–122. <https://doi.org/10.12700/APH.22.4.2025.4.7>
  40. Distributed Acoustic Sensing for railway technology. Электронний ресурс. Режим доступу: <https://www.itk-engineering.de/en/story/innovation-distributed-acoustic-sensing/>
  41. Директива 2016/796 Європейського Парламенту та Ради.
  42. Gerber U., Zoll A., Fengler W. Verschleiß und Fahrflächenermüdung an Weichen mit starrer Herzstückspitze. Wear and Rolling Contact Fatigue on common crossings of railway turnouts. *ETR – Eisenbahntechnische Rundschau* (1). 2015. P.36–41.
  43. Zoll A., Gerber U., Fengler W. The measuring system ESAH-M (in German). *Eisenbahningenieur Kalender*. 2016. P. 49–62.
  44. Scholz S., Lommock R. Models for Onboard Train Diagnostics Data to Improve Condition-Based Maintenance. Automated People Movers and Automated Transit Systems 2018: Moving to the Future, Building on the Past. *Proceedings of the 16th International Conference on Automated People Movers and Automated Transit Systems*. 2018, April. P. 85–93.
  45. Chudzikiewicz A., Bogacz R., Kostrzewski M., Konowrocki R. Condition monitoring of railway track systems by using acceleration signals on wheelset axle-boxes. *Transport*. 2018. 33(2). P. 555–566. doi: 10.2478/v10174-010-0030-1.
  46. Gerber U., Zoll A., Fengler W. Vehicle-based assessment of wear on common crossings, (in German). *EI-Eisenbahningenieur*. 2013. Vol. 5. P. 26–30.
  47. Witt-solutions.de[Internet]. Berlin: Witt IndustrieElektronik; [cited 2018 Feb 23]. Available from: [http://witt-solutions.de/assets/ESAH-M-V2-Flyer\\_de.pdf/](http://witt-solutions.de/assets/ESAH-M-V2-Flyer_de.pdf/).
  48. Sysyn Mykola, Gruen Dimitri, Gerber Ulf, Nabochenko Olga, Kovalchuk Vitalii. Turnout monitoring with vehicle based inertial measurements of operational trains: a machine learning approach. *Communications-Scientific Letters of the University of Zilina*. 1/2019 №21. P. 42–48p. <https://doi.org/10.26552/com.C.2019.1.42-48>.
  49. Sysyn Mykola, Gerber Ulf, Nabochenko Olga, Lia Yangyang, Kovalchuk Vitalii. Indicators for common crossing structural health monitoring with track-side inertial measurement. *Acta Polytechnica. Journal of Advanced Engineering*. – Czech Technical University in Prague, 2019. Vol 59, no 2. P. 170–181. <https://doi.org/10.14311/AP.2019.59.0170>
  50. Sysyn Mykola, Nabochenko Olga, Kluge Franziska, Kovalchuk Vitalii, Pentsak Andriy. Common Crossing Structural Health Analysis with Track-Side Monitoring. *Communications-Scientific Letters of the University of Zilina*, 2019. 21(3). P. 77–84. <https://doi.org/10.26552/com.C.2019.3.77-84>.

51. Kovalchuk Vitalii, Bal Olena, Sysyn Mykola. Development of railway switch frog diagnostics system. *6th International Scientific Conference organized by Railway Research Institute and Faculty of Transport of Warsaw University of Technology. Advanced rail technologies*. Warsaw, 2017. P. 61.
52. Заявка №u2018 09933. Пристрій діагностики технічного стану металевих гофрованих конструкцій / Ковальчук В. В., Лучко Й. Й., Возняк О. М. – заявник Ковальчук В. В. – № u2018 09933; заяв. 10. 10. 2018 р., опублік. 10. 05. 2018. – Бюл. №9, 2018. – 7 с.
53. Патент №118124 МПК В61К 9/00, H02К 35/00. Пристрій для живлення системи діагностики технічного стану хрестовин стрілочних переводів / Ковальчук В. В., Сисин М. П., Возняк О. М., Самець В. М.; заявник Ковальчук В. В. – № u2017 00768; заяв. 27.01.2017 р., опублік. 25. 07. 2017. – Бюл. №14.
54. Патент №119692 МПК G01С 21/10; E01В 7/10. Пристрій діагностики технічного стану хрестовин стрілочних переводів / Ковальчук В. В., Сисин М. П., Самець В. М. – заявник Ковальчук В. В. – № u2017 00762; заяв. 27. 01. 2017 р., опублік. 10. 10. 2017. – Бюл. №19.
55. Ковальчук В.В. Інтелектуальна система діагностики та прогнозування стану хрестовин стрілочних переводів України та країн Європейського Союзу. *1-ша Міжнародна науково-практична конференція «Енергооптимальні технології, логістика та безпека на транспорті»*. – Львів, 2018. – С. 117–121.
56. Мостович А. В. Удосконалення методів і засобів експериментальної оцінки показників безпеки руху та плавності ходу залізничного рухомого складу: Дисер. на здобуття наукового ступеню канд. техн. наук. – Київ, 2016. – 276 с.
57. Дьомін Р. Ю., Мостович А. В., Коломієць О. П. Засоби інструментальної оцінки технічного стану рухомого складу. *Международный информационный научно-технический журнал «Вагонный парк»*. 2013. № 6. С. 10–15.
58. Дьомін Р. Ю., Мостович А. В., Коломієць О. П. Імплементация сучасних підходів щодо оцінки показників безпеки руху. *Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем в умовах реформування залізничного транспорту: управління, економіка і технології»*. Серія «Техніка, технології». – К.: ДЕДУТ, 2013. С. 45–47.
59. Domin R., Mostovych A., Kolomiets A. Improving the means of experimental determination of dynamic loading of the rolling stock. *An International Quarterly Journal on Motorization, Vehicle operation, Energy Efficiency and Mechanical Engineering «ТЕКА»*. Lublin, 2014. Vol. 14, № 1. p. 37–49.
60. Attoh-Okine N. O. Big Data and Differential Privacy: Analysis Strategies for Railway Track Engineering. *John Wiley & Sons, Inc.*, 2017. <https://doi.org/10.1002/9781119229070>
61. Sysyn M., Gruen D., Gerber U., et al. Turnout monitoring with vehicle based inertial measurements of operational trains: a machine learning approach. *Communications Scientific Letters of the University of Zilina*. 2018. 20(4). P. 21–27. <https://doi.org/10.26552/com.C.2019.1.42-48>.
62. Jamshidi A., Hajizadeh S., Z. Su, M. Naeimi, A. Nunez, R. Dollevoet, B. Schutter, Li Z. A decision support approach for condition-based maintenance of rails based on

- big data analysis [online]. *Transportation Research Part C*. 2018. 95. P. 185–206. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.07.007>.
63. Sysyn M., Gerber U., Nabochenko O., Kovalchuk V. Common crossing fault prediction with track based inertial measurements: statistical vs mechanical approach. *Pollack Periodica An International Journal for Engineering and Information Sciences*, 2019. – Vol. 14, no. 1. <https://doi.org/10.1556/606.2019.14.2.2>.
  64. Liu X., Markiene V., Shevtsov I., Dollevoet R. Experiment study of key parameters in turnout crossing degradation process. *Proceedings of the 10th International Conference on Contact Mechanics*, Colorado, USA, 1–3 September 2015. P. 122–127.
  65. Martey E. N., Ahmed L., Attoh-Okine N. Track geometry big data analysis: A machine learning approach. *Proceedings – 2017 IEEE International Conference on Big Data, Big Data 2017*, 2018 January. P. 3800–3809. <https://doi.org/10.1109/BigData.2017.8258381>.
  66. Ali Jaouher Ben, et al. Online automatic diagnosis of wind turbine bearings progressive degradations under real experimental conditions based on unsupervised machine learning. *Applied Acoustics*. 2018. 132. P. 167–181. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.11.021>.
  67. Si X., Zhang Z., Hu C. Data-Driven Remaining Useful Life Prognosis Techniques: Stochastic Models, Methods and Applications. *Springer Series in Reliability Engineering, Springer-Verlag GmbH Germany*, 2017. – 448 p.
  68. Gebraeel N., Lawley M. A., Li R, Ryan JK. Residual-life distributions from component degradation signals: a Bayesian approach. *IIE Trans.* – 2005. – 37(6). – P. 543–557. <https://doi.org/10.1080/07408170590929018>.
  69. Kovalchuk, V., Koval, M., Onyshchenko, A., Kravets, I., Bal, O., Markul, R., Vikhot, S., Petrenko, O., Rybak, R., & Milyanych, A. (2022). Determining the strained state of prefabricated metal corrugated structures of a tunnel overpass exposed to the dynamic loading from railroad rolling stock . *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(7(117)), 50–58. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.259439>.
  70. Посібник до ВБН В.2.3-218-198:2007. Споруди транспорту. Проектування та будівництво споруд із металевих гофрованих конструкцій на автомобільних дорогах загального користування. – К., 2007. – 122 с.
  71. Steele C., Roberts J. Railway smart grids: Drivers, benefits and challenges // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409712462858>
  72. N. Kulkarni, S. V. N. L. Lalitha, and S. A. Deokar, “Real time control and monitoring of grid power systems using cloud computing”, *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, Vol. 9, No. 2, April 2019, pp. 941–949.
  73. J. Varela-Aldás, S. Silva, and G. Palacios-Navarro, “IoT-Based Alternating Current Electrical Parameters Monitoring System”, *Energies*, 2022, 15, 6637. <https://doi.org/10.3390/en15186637>

74. S.D. Grigorescu, O.M. Ghita, C. Cepisca, and A.S. Vintea, “Power Quality Monitoring Systems for Smart Grid Networks”, The 8th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering, 2013, May 23-25, Bucharest, Romania.
75. S. Surma, and J. Lukasik, “Contact network monitoring”, Electrification of Transport, vol. 5, 2013, pp. 113–118.
76. M. Mizan, K. Karwowski, and D. Karkosiński “Monitoring Odbieraków Prądu w Warunkach Eksploatacyjnych na Linii Kolejowej”, Przegląd Elektrotechniczny, 2013, R89, nr 12, pp. 154- 160.
77. Sicat CMS. Catenary monitoring system for overhead contact line systems, Siemens Mobility GmbH Brochure, 2018, Retrieved from [siemens.com/rail-electrification](https://www.siemens.com/rail-electrification).
78. D. O. Bosyi, O. I. Sablin, I. Yu. Khomenko, Y. M. Kosariev, I. Yu. Kebal, and S. S. Myamlin, “Intelligent Technologies for Efficient Power Supply in Transport Systems”, Transport Problems, 2017, 12 (SE), p. 57–71. DOI: 10.20858/tp.2017.12.se.5.
79. O. Sablin, D. Bosyi, V. Kuznetsov, K. Lewczuk, I. Kebal, and S. S. Myamlin, “Efficiency of Energy Storage Control in the Electric Transport Systems”, Archives of Transport, 2022, vol. 62, iss. 2, p. 105–122. DOI: 10.5604/01.3001.0015.9569.
80. X. Zhang, and K. Kusriani, “Autonomous long-range drone detection system for critical infrastructure safety”, Multimedia Tools and Applications, vol. 80, 2021, 23723–23743.
81. S. Al-Emadi, A. Al-Ali, and A. Al-Ali, “Audio-Based Drone Detection and Identification Using Deep Learning Techniques with Dataset Enhancement through Generative Adversarial Networks”, Sensors, 2021, 21, 4953. <https://doi.org/10.3390/s21154953>
82. S. Load cell”, Wikipedia. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Load\\_cell](https://en.wikipedia.org/wiki/Load_cell)
83. W. Yaran, “Electrical interface of MEMS microphone introduction”, Infineon Knowledge Base Articles, Jul 11, 2023.
84. “What is ZigBee and how it works?”. [Online]. Available: <https://www.tech-sparks.com/zigbee/>
85. “LoRa and LoRaWAN: A Technical Overview,” Semtech Corporation, 26 p., December 2019.
86. Bosyi, D., Sablin, O., & Kosariev, Y. (2020). Computing and Optimization for DC Power Systems of Electric Transport, World Scientific Publishing Europe Ltd., <https://doi.org/10.1142/q0229>
87. ДСТУ EN 50163:2016 Залізниця. Напруга живлення тягових систем (EN 50163:2004, IDT).
88. Кузнецов В. Г. Визначення потенціалу енергозбереження в системах електротранспорту в задачах підвищення ефективності споживання енергії рекуперації / В. Г. Кузнецов, О. І. Саблін // Електрифікація транспорту. – 2016. – № 12. – С. 107-114.
89. Гетьман, Г. К. Теорія електричної тяги : підручник у 2 т. / Г. К. Гетьман. – Дніпропетровськ : Акцент ПП, 2015. – 492 с. – ISBN 978-966-921-030-2.

90. Енергетика тягових мереж : монографія / В. Г. Сиченко, В. Г. Кузнецов, Д. О. Босий, О. І. Саблін ; за заг. ред. д-ра техн. наук, проф. В. Г. Сиченка. – Дніпро : Вид-во ПФ «Стандарт-Сервіс», 2017. – 210 с.
91. Саблін О. І. Дослідження ефективності процесу рекуперації електроенергії в умовах метрополітену / О. І. Саблін // Східноєвропейський журн. передових технологій. – 2014. – № 6/8 (72). – С. 9-13.
92. Саблін О. І. Оптимізація режимів тягового електроспоживання та рекуперації енергії в системах електричного транспорту / О. І. Саблін // Електрифікація транспорту. – 2016. – № 11. – С. 53-61.
93. Саблін О. І. Аналіз якості електроенергії, що рекуперується, в системі електричного транспорту / О. І. Саблін // Вісник НТУ «ХПІ». - 2013. - Вип. 38. - С. 186-189.
94. Саблін О. І. Дослідження впливу режимів систем зовнішнього електропостачання на ефективність рекуперації енергії електрифікованого транспорту / О. І. Саблін // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2016. – № 12. – С. 42-48.
95. Саблін О. І. Дослідження впливу режимів систем зовнішнього електропостачання на ефективність рекуперації енергії електрифікованого транспорту / О. І. Саблін // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2016. – № 12. – С. 42-48.
96. Скільки електромобілів зареєстровано в Україні: дані МВС // Delo.ua, 09.06.2025, URL: <https://delo.ua/news/stalo-vidomo-skilki-elektromobiliv-zarejestrovano-v-ukrayini-447559>
97. Електробус Vitovt Max Electro став сюрпризом для Європи [Електронний ресурс] / АBW.BY, URL: <https://www.abw.by/novosti/commercial/192528/> - 15.01.2018 р.
98. Hedgehog to capture regenerative braking energy to power buses / Railway Gazette, 22.02.2017, URL: <http://www.railwaygazette.com/news/news/europe/single-view/view/hedgehog-to-capture-regenerative-braking-energy-to-power-buses.html>
99. Залізничний вагон для перевезення електромобілів з можливістю підзарядки: Пат.119315 Україна; МПК В61D 3/18 / Кебал І. Ю., Мямлін С. С., Босий Д. О., Саблін О. І., Хоменко І. Ю.; заявник та власник патенту Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. ак. В.Лазаряна. – № U201701809; заявл. 27.02.17; опубл. 25.09.17, Бюл. № 18. – 4 с.
100. Півняк Г. Г. Альтернативна енергетика в Україні: монографія / Г.Г. Півняк, Ф.П. Шкрабець; Дніпропетровськ: Нац. гірн. ун-т. Д.: НГУ, 2013. – 109 с.
101. Сиченко, В. Г. Інтеграція сонячної енергетики у систему тягового електропостачання постійного струму / В. Г. Сиченко // Вісник Нац. техніч. ун-ту «ХПІ». Серія: Автоматика та приладобудування: зб. наук. пр. — 2015. — № 12 (1121). — С. 364—368.
102. Energy Characteristics of the DC Distributed Power Supply Systems / V. Sychenko, V. Kuznetsov, A. Rojek, P. Hubskeyi and Ye. Kosariev - Communications-Scientific letters of the University of Zilina, 2021, 23 (2). – P. 37-43.

103. Розробка керованого підсилюючого пункту для розподіленої системи тягового електропостачання: / Є. М. Косарєв, В. Г. Сиченко, А. М. Муха, К. О. Хань // Електротехніка і електромеханіка. — 2016. — № 4 (1). — С. 89 – 94.
104. GBT модуль FZ3600R17HP4 – Режим доступу: [www.infineon.com](http://www.infineon.com) – Перевірено: 03.07.2016.
105. Забарило, Д. О. Визначення частоти високочастотної ланки для перспективної схеми електрорухомого складу // Наука та прогрес транспорту. – 2014. – № 5 (53). – С. 65–73.
106. Ise, T.; Kita, M.; Taguchi, A.: “A Hybrid Energy Storage with a SMES and Secondary Battery,” IEEE Transaction on Applied Superconductivity, Vol. 15, No. 2, pp. 1915-1918, June 2005.
107. Suzuki, S.; Baba, J.; Shutoh, K.; Masada, E.: “Effective Application of Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) to Load Leveling for High Speed Transportation System,” IEEE Transaction on Applied Superconductivity, Vol. 14, No. 2, pp. 713-716, June 2004.
108. Battistelli L. & Ciccarelli F. & Lauria D. & Proto D. Optimal design of DC electrified railway stationary storage system. In: International Conference “Clean Electrical Power 2009” Capri, Italy, 2009.

## Розділ 2

# Дослідження змін технічного стану та енергоефективності об'єктів критичної інфраструктури транспорту

## 2.1 Розлад елементів залізничної колії

### 2.1.1. Основні положення. Порівняння математичних моделей з погляду можливостей врахування технічного стану залізничної колії

Залізнична колія – це багатоелементна система, яка у встановлених експлуатаційних межах повинна мати здатність виконувати необхідні функції (пропуск поїздів з встановленими швидкостями руху) у відповідних умовах технічного обслуговування [1]. Несправність залізничної колії (її елементів) – це небажана зміна стану, що виникає в ході експлуатації, у результаті чого вона частково або повністю втрачається здатність виконувати задані функції. За рівнем впливу на функціональність системи несправності можна поділити на ушкодження, часткову та повну відмову, а за часом виникнення – на поступові та раптові.

Ушкодження колії – подія, що полягає в порушенні справного стану (за умови збереження працездатності) колії, за якого забезпечується безпечний пропуск поїздів з установленою швидкістю.

Часткова відмова колії – подія, що полягає в місцевому частковому порушенні працездатного стану колії до частково працездатного, в результаті якого потрібно місцеве обмеження швидкості.

Повна відмова колії – подія, що полягає в місцевому повному порушенні працездатного стану колії (перехід в непрацездатний стан), у результаті якого потрібно тимчасове (до відновлення працездатного стану) припинення руху поїздів по ділянці.

Поступова відмова колії – відмова, що виникла в результаті поступової зміни значення одного чи кількох заданих параметрів колії до величини, що перевищує допустиме значення (знос рейки, забруднення баласту тощо).

Раптова відмова колії – відмова, що характеризується стрибкоподібною зміною одного чи кількох заданих параметрів колії до величин, що перевищує допустиме значення (злам рейки, викид безстикової колії, руйнування в результаті бойових дій тощо).

Таким чином життєвий цикл залізничної колії визначається як проміжок між капітальними ремонтами (реконструкціями) протягом встановленого ресурсу (для залізничної колії ресурс, як правило, виражається через пропущений тоннаж) за умови дотримання встановлених експлуатаційних параметрів, виконання планових ремонтів та поточного утримання, зокрема з метою оперативного відновлення після раптових відмов.

Безумовно, стан залізничної колії є одним із ключових факторів, що визначають безпеку, комфорт і ефективність руху залізничного транспорту. У реальних умовах елементи верхньої будови колії – рейки, шпали, баласт і скріплення – зазнають поступового зносу та деформацій під дією динамічних навантажень від рухомого складу. Ігнорування цих змін у математичних моделях призводить до суттєвого зниження точності розрахунків навантажень, прогнозування технічного ресурсу конструкцій та ефективного планування ремонтно-діагностичних заходів.

Традиційні моделі взаємодії «колія – рухомий склад» часто базуються на припущенні про ідеальний (новий або номінальний) стан залізничної колії. Проте в умовах інтенсивної експлуатації, особливо при змішаному русі вантажних і пасажирських поїздів, відбувається поступова деградація геометричних та фізико-механічних характеристик колійних елементів. Це змінює динамічну картину взаємодії з рухомим складом, впливає на стабільність руху, спричиняє зростання сил удару, збільшення вібрацій і нерівномірний розподіл навантажень.

Врахування реального технічного стану колії у математичних моделях дозволяє підвищити достовірність прогнозів зносу та

залишкового ресурсу конструктивних елементів, реалізувати концепцію прогнозного технічного обслуговування, оптимізувати планування і обсяги ремонтів, зменшуючи експлуатаційні витрати, адаптувати параметри рухомого складу (наприклад, обмеження швидкості) до фактичного стану інфраструктури, оцінювати вплив нових типів рухомого складу, елементів залізничної колії або підвищення швидкості на ресурс системи «залізнична колія».

Таблиця 2.1

**Порівняння математичних моделей з погляду можливостей врахування технічного стану залізничної колії**

Клас моделей	Математичні підходи	Можливості врахування технічного стану	Особливості застосування
Квазістатичні моделі	Модель Вінклера, аналітичні балкові моделі	Локальні зміни жорсткості, зниження пружності основи	Обмежена точність; підходить для попередніх оцінок
Моделі багатотільної динаміки	Візок на пружній колії, 2D/3D системи Лагранжа	Параметричні зміни жорсткості, демпфування; геометричні дефекти	Добрий баланс точності та складності
Багатотільна динаміка з нескінченною колією	Періодичні структури, хвилясті рейки	Порушення періодичності, модельні дефекти	Підходить для аналізу поширення динаміки, менш ефективна для локальних пошкоджень
FEM (статична постановка)	Моделі перерізів колії під навантаженням	Зміни матеріалів, тріщини, деформації, реальна геометрія	Придатна для аналізу залишкової міцності, без часової компоненти
FEM (динамічна постановка)	Повна модель «рейки–баласт–рухомий склад»	Повноцінне врахування матеріального та геометричного стану, контактних умов	Найточніший але ресурсомісткий підхід
Хвильові моделі	Моделі поширення пружних хвиль на основі динамічної задачі теорії пружності, спектральні	Висока чутливість до дефектів і змін структури; діагностика за сигналами	Дуже перспективна для моніторингу, але потребує комбінації з іншими

Сучасні математичні моделі для вирішення задач взаємодії колії і рухомого складу, зокрема визначення напружено-деформованого стану залізничної колії, можна поділити на кілька основних класів [2]:

квазістатичні моделі (переважно спрощені аналітичні розрахунки), моделі багатотільної динаміки (як правило реалізовані на основі систем рівнянь Лагранжа-Д'Аламбера), моделі багатотільної динаміки з нескінченно довгою залізничною колією, метод скінченних елементів в статичній постановці (FEM), метод скінченних елементів в динамічній постановці, моделі на основі поширення пружних хвиль, інші моделі (як правило вузько направлені для вирішення спеціальних задач). Для порівняння можливостей різних класів математичних моделей щодо врахування технічного стану елементів залізничної колії було виконано узагальнення їхніх характеристик. У табл. 2.1 наведено основні підходи, приклади реалізацій та оцінено здатність кожного класу моделей відобразити ушкодження (зношування) та відмови (дефекти й деградацію матеріалів).

### **2.1.2. Введення в моделі «рухомий склад – колія» зміни стану підрейкової основи**

Як видно з табл. 2.1, значну частину математичних моделей, особливо для задач, пов'язаних з рухомим складом, мають моделі багатотільної динаміки. В більшості випадків це системи руху (коливань) системи твердих тіл пов'язаних між собою. Зазвичай для математичного опису таких моделей використовують системи диференціальних рівнянь другого роду, складених за принципом Лагранжа-д'Аламбера.

Як правило приймається постійна маса тіл, що взаємодіють, лінійність зв'язків між ними, постійна швидкість руху, незмінність геометрії самих тіл (деформації системи визначаються зміною сумісного положення тіл, а не їх власною деформацією), незмінність фізичних (перш за все пружних) характеристик тіл тощо. Спроби усунення таких припущень значно ускладнює розв'язання системи рівнянь, а в більшості випадків, взагалі унеможлиблює отримання рішення з потрібною точністю.

Окремо слід звернути увагу, що система тіл, яка описана рівняннями Лагранжа другого роду, може мати локальну або глобальну систему координат. З точки зору математичних інструментів це не має принципової різниці, але несе суттєві від'ємності для практичного застосування. Локальна система координат передбачає, що її центр рухається разом з системою, як правило його розташовують в центрі ваги найкрупнішого тіла, наприклад, кузова вагону. Тоді координати

всіх тіл на кожному кроці розрахунку є переміщеннями відносно цієї точки. На кожному кроці розрахунку вони мають значення приблизно одного порядку, як між собою, так і між значеннями на інших кроках. Такий підхід забезпечує певну точність результатів розв'язання системи рівнянь на кожному кроці в кожному напрямку. Однак, при такому підході екіпаж, що розглядається, не рухається по колії, а тільки здійснює коливання на одному місці. Локальні нерівності колії задаються у тій самій локальній системі координат, а глобальна зміна траєкторії руху враховується прикладанням відповідних зовнішніх сил. Так, наприклад, рух по кривій задається прикладанням до тіл відповідної відцентрової сили.

Глобальна система координат встановлює постійну точку її початку, положення якої не змінюється під час усієї послідовності розрахунків. Це спрощує механізм опису положення колії і дає можливість задавати її просторове положення як масив координат. Перевагами такого підходу є, по-перше, можливість задавати будь-який обрис колії, в тому числі за результатами натурної зйомки; по-друге, сили, що виникають від зміни траєкторії руху, будуть розраховуватися, як наслідок, а не задаватися, як вихідні дані. Однак всі переміщення окремих тіл вагону також будуть визначатися відносно первинно заданого центру координат, що збільшить похибку розрахунків.

Отже, для задач, в яких досліджується саме динаміка рухомого складу, переважно використовують локальну систему координат. В окремих випадках, коли важливо дослідити динаміку руху в залежності саме від геометрії колії, використовують глобальну систему координат.

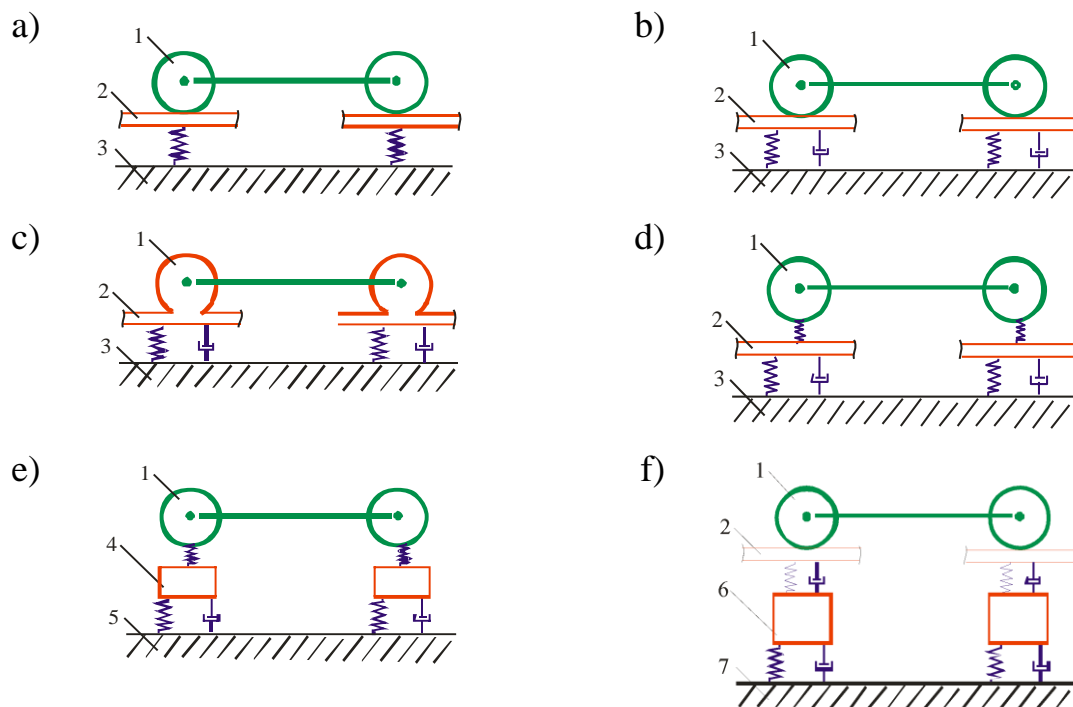
Складання моделі за принципом Лагранжа-д'Аламбера знайшло дуже широке застосування для вирішення задач динаміки рухомого складу. У відповідності до принципів механіки твердого тіла приймається, що об'єкт має постійну масу, сила, прикладена до точки об'єкта, миттєво приводить до переміщення всі інші його точки і тіло рухається як одне ціле відносно центра мас. Використання такого підходу для моделювання роботи конструкції залізничної колії може мати місце, але все ж таки для більшості задач його слід вважати неприйнятним. Розділяти залізничну колію на цілісні об'єкти з постійною масою можна тільки умовно. Причому ці маси будуть мати невеликі за значенням переміщення, які будуть відбуватися за короткий проміжок часу [3].

Представлення залізничної колії в моделі руху екіпажів може здійснюватися декількома способами, які, насамперед, будуть відрізнятися різною деталізацією.

Один з варіантів передбачає опис залізничної колії як нескінченної балки, що лежить на пружній безінерційній основі – модель Вінклера. Така модель є основою багатьох статичних розрахункових схем і для багатьох задач є адекватною. Але така система буде мати нескінченну кількість ступенів вільності, що є незручним для включення до моделей рухомого складу. Альтернативою є модель Власова, яка дозволяє виразити переміщення точок балки (рейки) і підрейкової основи через переміщення точок контакту коліс і рейок. В такому разі зберігається загальний підхід: складання системи з окремих абсолютно твердих тіл з масою та зв'язками між ними. В найпростішому вигляді це може бути жорсткий зв'язок колеса з залізничною колією, рис. 2.1а. Тоді жорсткість такої опори, віднесеної до одного колеса, можна визначити за формулою

$$k_k = \frac{2U}{k}, \quad (2.1)$$

де  $U$  – модуль пружності підрейкової основи;  $k$  – коефіцієнт відносної жорсткості.



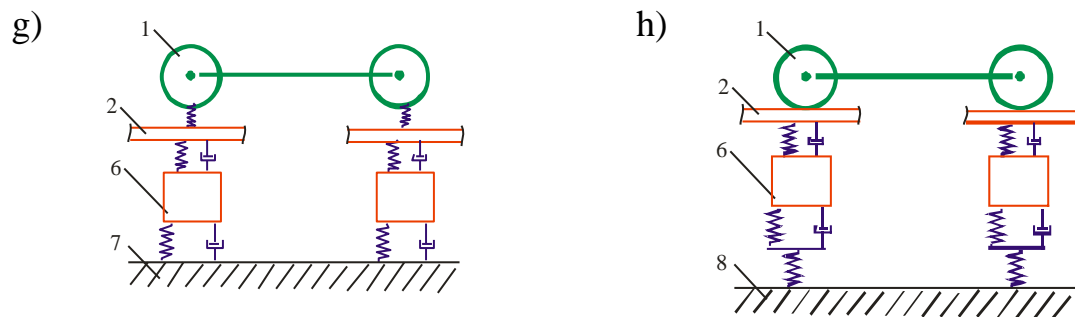


Рис. 2.1. Варіанти представлення залізничної колії в моделях багатотільної динаміки: 1 – колесо; 2 – рейка; 3 – підрейкова основа; 4 – умовний об’єкт з масою колії, приведеною до одного колеса; 5 – нерухома основа; 6 – шпала; 7 – підшпальна основа; 8 – підбаластна основа

Такий варіант застосовується нечасто. Відсутність дисипативного зв’язку робить систему надто чутливою до розгойдування: накопичення похибок розв’язок рівнянь може привести до виникнення незатухаючих коливань.

У більшості випадків застосовується варіант, коли кожне колесо має жорстко-дисипативний зв’язок з приведеною частиною залізничної колії – рис. 2.1b.

В залежності від ступеня деталізації підсистеми «залізнична колія» можливі наступні варіанти [4]:

- враховується приведена маса рейки; приймається, що рейка і колесо, як об’єкт з їх сумарною масою, має жорстко-дисипативний зв’язок з підрейковою основою, рис. 1c;

- враховується приведена маса рейки, яка має жорстко-дисипативний зв’язок з підрейковою основою; для відокремлення маси колеса від рейки між ними встановлюється жорсткий зв’язок (з великим числовим значенням), рис. 1d;

- враховується приведена маса колії, яка має жорстко-дисипативний зв’язок з основою, рис. 1e;

- враховується маса шпали (що взаємодіє з колесом), яка має жорстко-дисипативний зв’язок з підшпальною основою з одного боку і з рейкою з іншого (як правило невагомою (рис. 1f), хоча можуть бути варіанти відокремлення й маси рейки (рис. 1g);

- враховується маса шпали (що взаємодіє з колесом), яка має жорстко-дисипативний зв’язок з рейкою з одного боку і з баластом з іншого, який має жорсткий зв’язок з підбаластною основою, рис. 1h.

З точки зору моделювання руху екіпажу варіанти від «f» (рис. 2.1) і далі не стільки уточнюють результати розрахунків, скільки

ускладнюють загальну систему рівнянь і можуть бути тотожно приведені до варіанту «е» або, навіть, ще простіших. Така деталізація має місце при спробі моделювати саме роботу залізничної колії.

Таким чином, задача представлення залізничної колії в моделях рухомого складу зводиться до визначення характеристик зв'язків її елементів з колесом, а саме приведеної маси, коефіцієнта жорсткості, коефіцієнт дисипації.

Робота колії, приведеної до одного колеса, розглядається як система з однією ступеню вільності, що складається з маси, яка має жорсткий ( $k_k$ ) і дисипативний ( $\beta_k$ ) зв'язок з основою, рис. 2.2. До системи прикладена зовнішня сила, змінна у часі. Така розрахункова схема тотожна представленню залізничної колії в моделях Лагранжа-д'Аламбера, показаному на рис. 2.1е, але, за необхідністю, може бути приведена і до інших варіантів.

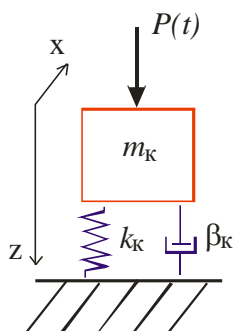


Рис. 2.2. Розрахункова схема роботи колії, приведеної до одного колеса

Диференційне рівняння для опису коливань такої системи буде мати вигляд

$$m_k \frac{d^2 z}{dt^2} + \beta_k \frac{dz}{dt} + k_k z = P(t), \quad (2.2)$$

Якщо інтегрувати по довжині пройденого шляху, то

$$m_k V^2 \frac{d^2 z}{dt^2} + \beta_k V \frac{dz}{dt} + k_k z = P(x), \quad (2.3)$$

де  $V$  – швидкість руху.

Рівняння (2.3) приводиться до класичного виду

$$\frac{d^2 z}{dx^2} + 2r \frac{dz}{dx} + \omega^2 z = \frac{P(x)}{H}, \quad (2.4)$$

де  $r = \frac{\beta_k}{2m_k V}$ ;  $\omega = \sqrt{\frac{k_k}{m_k V^2}}$ ;  $H = m_k V^2$ .

Силу вводиться виразом

$$P(x) = A e^{-kx} (\cos kx + \sin kx), \quad (2.5)$$

де  $A$  – параметр, що визначає амплітуду сили.  
Тоді розв’язок рівняння (2.4) буде наступним:

$$z(x) = C e^{-rx} (\cos \omega x + \sin \omega x) + \frac{A}{m_k V^2} \frac{[(\omega^2 + 2k_k^2 - 4rk_k) \cos k_k x + (\omega^2 - 2k_k^2) \sin k_k x] e^{-k_k x}}{\omega^4 - 4rk_k \omega^2 + 4k_k^4 + 8r^2 k_k^2 - 8rk_k^3}, \quad (2.6)$$

$$\text{де } C = \frac{A}{m_k V^2} \left( \frac{k}{2U} - \frac{\omega^2 + 2k_k^2 - 4rk_k}{\omega^4 - 4rk_k \omega^2 + 4k_k^4 + 8r^2 k_k^2 - 8rk_k^3} \right).$$

Прийmemo, що колесо проходить шлях від одної міжшпальної осі до іншої, рис. 2.3, а потім процес циклічно повторюється. Такий підхід відповідає як моделям, в яких рух екіпажу (колеса) по колії є умовним (положення колеса відносно колії не змінюється в локальній системі координат, а рух відносно колії враховується прикладанням відповідних зовнішніх сил (прискорень, обмежень), так і моделям, в яких рух по колії задається в явному вигляді з урахуванням зміни положення колеса по довжині колії.

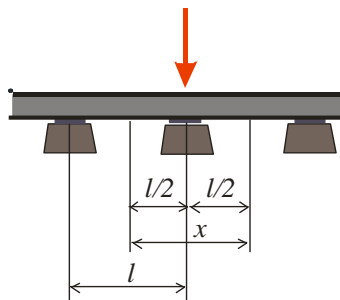


Рис. 2.3. Межі вибірки для залежності прогину від сили

За результатами моделювання динамічного прогину рейки можна встановити його залежність від прикладеної сили. Як зазначено раніше, така залежність буде визначатися на ділянці  $x \in \left[0 \pm \frac{l}{2}\right]$ , де  $l$  – відстань між осями шпал. Приклад отриманих прогинів при навантаженні-розвантаженні опори колесом для ділянки з варіантом модуля пружності підрейкової основи 32 МПа наведено на рис. 2.4.

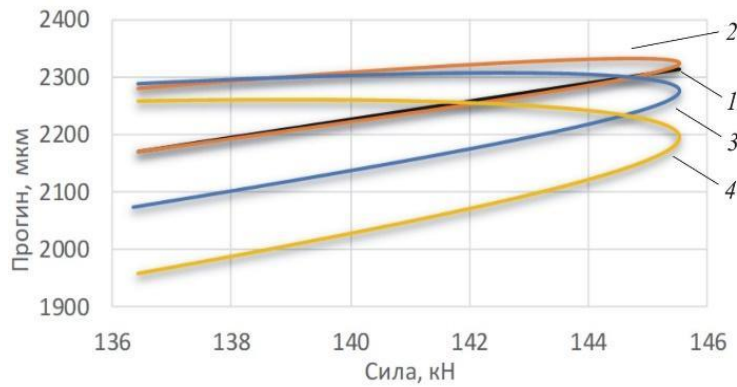


Рис. 2.4. Прогин рейкової колії за моделюванням: 1 – статика; 2 – 80 км/год; 3 – 160 км/год; 4 – 240 км/год

Формула (2.6) показує аналітичну залежність прогину від сили. Таким чином, характеристики колії можуть бути визначені в результаті апроксимації масиву даних прогинів, отриманих моделюванням ( $Z_M$ ), функцією (2.6) за критерієм найменших квадратів:

$$\left. \begin{aligned}
 & z = f(k_\kappa, \beta_\kappa, m_\kappa, P); \\
 & Z_M = \{z_{M(i)} = f(P)\}; \\
 & R = \sum_i (z_{M(i)} - z)^2; \\
 & \left[ \begin{array}{l}
 \exists k_\kappa \in (k_{\kappa(\min)}; k_{\kappa(\max)}), \\
 \exists \beta_\kappa \in (0; \beta_{\kappa(\max)}), \\
 \exists m_\kappa \in (0; m_{\kappa(\max)})
 \end{array} \right] : R \rightarrow \min; \\
 & k_\kappa \neq k_{\kappa(\min)}; k_\kappa \neq k_{\kappa(\max)}; \beta_\kappa \neq \beta_{\kappa(\max)}; m_\kappa \neq m_{\kappa(\max)}
 \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

Результати варіантних розрахунків зведені у табл. 2.2.

Таблиця 2.2

**Характеристики залізничної колії, як опори при взаємодії з колесом**

Модуль пружності підрейкової основи	Показник	Швидкість руху, км/год		
		80	120	160
20...25 (задовільний стан)	$k_\kappa$ , МН/м	47.4	48.2	49.5
	$\beta_\kappa$ , кН·с/м	100	70	60
30...35 (добрий стан)	$k_\kappa$ , МН/м	62.6	63.1	63.9
	$\beta_\kappa$ , кН·с/м	130	80	70
50...60 (відмінний стан)	$k_\kappa$ , МН/м	97.2	97.9	98.6
	$\beta_\kappa$ , кН·с/м	210	160	110

Отримані результати дають можливість обґрунтовано вибрати характеристики залізничної колії для моделювання рухомого складу за принципом Лагранжа-д'Аламбера. Аналіз отриманих результатів показав, що застосування в таких моделях приведеної маси об'єктів колії доцільне для випадків, в яких не встигає відбутися повний прогин рейки, що має місце при достатньо великій швидкості руху [5], або для випадків моделювання напружено-деформованого стану безпосередньо окремих елементів залізничної колії.

### 2.1.3. Моделювання розвитку локальної нерівності залізничної колії

Відокремлення залишкових деформацій від загальних є складною науковою задачею, особливо для таких багат шарових систем як залізнична колія. Встановлення прямої лінійної залежності значення залишкових деформацій від загальних порушує адекватність моделі особливо в умовах навантажень, які значно менші за рівні міцності (що більш характерно для пасажирського руху). В такому випадку причиною виникнення залишкових деформацій будуть виступати не самі прогини колії, а їх нерівномірність по довжині. Має місце гіпотеза, що збільшення залишкових деформацій для наступного кроку ітерації ( $\Delta z_{\text{зал}}(x)$ ), визначених за пропущеним тоннажем ( $T$ ), розподіляється по довжині ділянки ( $x$ ) пропорційно похідній динамічного прогину  $z_{\text{дин}}(x)$  [6]:

$$\Delta z_{\text{зал}}(x) \sim \frac{dz_{\text{дин}}(x)}{dx}, \Delta z_{\text{зал}}(x) \leq f(T), \exists x, \Delta z_{\text{зал}}(x) = f(T) \}. \quad (2.8)$$

Такий підхід надає змогу дослідити процес появи нерівності від наявності нерівнопружності колії та її наступного розвитку в процесі експлуатації.

Розглянемо хід розрахунків на прикладі з дійсними чисельними вихідними даними. Приймемо ділянку залізничної колії з місцем локальної нерівнопружності, яка описана лінійною зміною модуля пружності підрейкової основи від 40 до 30 МПа посередині ділянки на довжині 5 м. Це відповідає наступній послідовності в приведенні до опор (шпал):

$$U = \{40, \dots, 40, 37, 33, 30, 33, 37, 40, \dots, 40\}. \quad (2.9)$$

Перший розрахунок виконується для колії без нерівностей. На рис. 2.5 показано результати моделювання у вигляді динамічного

прогину по довжині ділянки від проходження рухомого складу. Прогин в зоні із сталим модулем пружності підрейкової основи відповідає аналітичним розрахункам за відомою формулою [7, 8]

$$z(x) = \frac{Pk}{2U}. \quad (2.10)$$

де  $P$  – вертикальна сила, діюча від колеса на рейку;  $k$  – коефіцієнт відносної жорсткості (див. рівняння (1.2)).

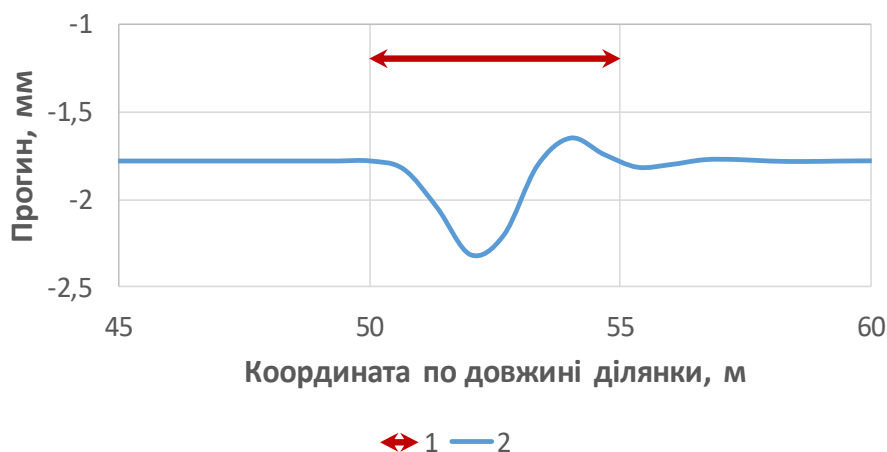


Рис. 2.5. Динамічний прогин колії для ділянки без нерівності з локальною нерівнопружністю: 1 – зона нерівнопружності; 2 – прогин колії

Відповідно до алгоритму (2.8) визначені залишкові деформації і передані до моделі в якості вихідної геометричної нерівності колії для наступної ітерації. Таким чином моделюється процес поступового розвитку нерівності – рис. 2.6. Для візуального відокремлення результатів послідовності ітерацій на рис. 2.6 показана з попусценням проміжних кроків.

Аналогічно до розглянутого чисельного прикладу було здійснено варіантні розрахунки для різних вихідних даних. Дослідження результатів дозволяють встановити певні тенденції. Обрис нерівності, яка утворена залишковими деформаціями, не повторює ні обрис динамічного прогину рейки, ні обрис первинної нерівнопружності. Залишкові деформації набувають максимуму при вході й виході з динамічної нерівності (спочатку це зона нерівнопружності, проходження по якій порушує траєкторію руху колеса, а згодом – поєднання її із геометричною (статичною) нерівністю). З часом експлуатації ділянки вертикальна нерівність поширюється не тільки в глибину, а й вздовж колії, причому збільшення довжини

супроводжується зміщенням положення локальних максимумів та утворенням нових.

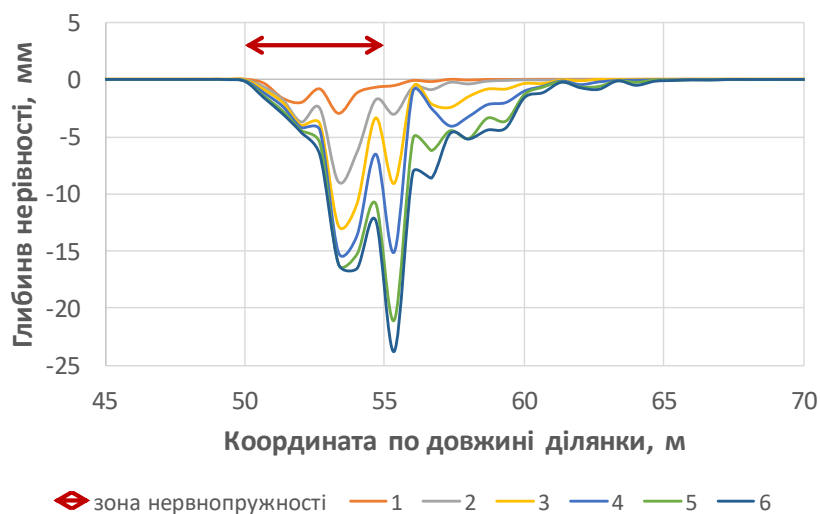


Рис. 2.6. Моделювання розвитку нерівності колії в зоні локальної нерівнопружності: 1-6 – послідовність ітерацій розрахунку

Розвиток нерівності із поступовим зміщенням піків приводить до того, що вона сама по собі стає більш суттєвим фактором додаткової силової взаємодії у порівнянні з первинним – локальною нерівнопружністю, що спричиняє подальший розширення і зміщення нерівності. Наслідком цього є те, що геометрична нерівність не завжди чітко співпадає з місцем розташування причини її утворення.

В розглянутому прикладі (рис. 2.6) причиною утворення нерівності була зона локальної нерівнопружності. Але після того, як нерівність набуває певних розмірів, вже саме вона визначає динаміку взаємодії колії і рухомого складу і, як наслідок, подальший розвиток процесу. Для демонстрації цього спостереження ітерації в попередньому прикладі було зупинено, при утворенні просадки II ступеня [9] – лінія «3» на рис. 2.6. Для подальших розрахунків був заданий постійний модуль пружності підрейкової основи по всій довжині ділянки. Обрис нерівності, яка була отримана в результаті, показано на рис. 2.7.

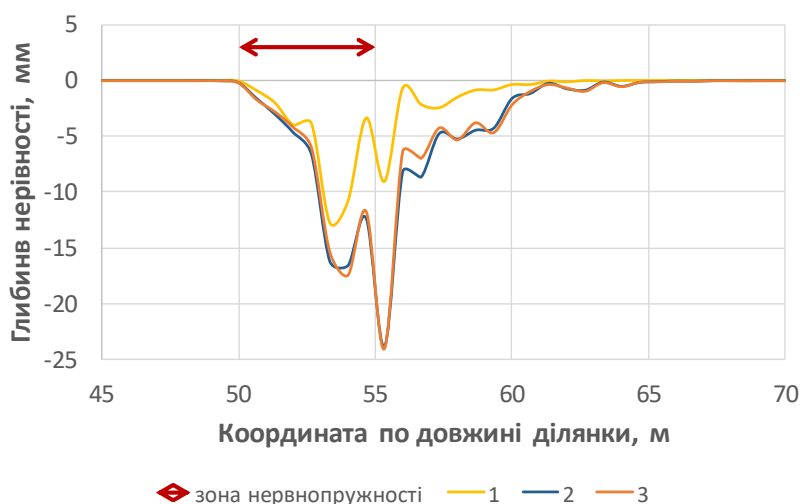


Рис. 2.7. Моделювання розвитку нерівності колії для різних варіантів стану ділянки: 1 – вихідна нерівність; 2 – нерівність, утворена з врахуванням впливу первинної зони нервнопружності; 3 – нерівність, утворена з вихідної з умов поновлення рівнопружності ділянки

Для порівняння на цей рисунок також було накладено нерівність з попереднього прикладу (лінія «б» рис. 2.6). За рис. 2.7 видно, що зона локальної нерівності вже не мала суттєвого впливу на процес розвитку деформацій.

#### 2.1.4. Моделювання пошарового забруднення баласту

Баласт є складним елементом залізничної колії. Фізико-механічні параметри баласту залежать від багатьох чинників і можуть суттєво змінюватися з часом у процесі експлуатації. Серед основних факторів – накопичення залишкових деформацій, проникнення забруднюючих речовин, змішування з ґрунтом і виконання ремонтних робіт на колії.

Різноманіття та складність питань, пов'язаних із використанням баласту в залізничній колії, пояснюють велику кількість наукових досліджень, присвячених цій темі. У низці сучасних публікацій наведено детальні огляди літературних джерел з цього питання, зокрема в роботах [10, 11]. Ці дослідження мають на меті пояснити механізми забруднення баласту та виявити основні чинники, що впливають на цей процес, на основі аналізу існуючих джерел. За даними авторів [11], 76% забруднення спричиняється руйнуванням частинок баласту, 13% – міграцією підбаластових матеріалів (піску),

7% – інфільтрацією вивітрених частинок з поверхні, 3% – міграцією частинок із земляного полотна, і 1% – зношуванням шпал.

В експериментальних дослідженнях вивчався вплив руйнування частинок, проникнення глинистих і дизельних забруднювачів, а також вплив руху поїздів на стан баласту – у роботах [11–18]. Вплив руху поїздів стає особливо актуальним під час перевезення насипних вантажів, таких як вугілля та зерно [18], а також за високих значень осьових навантажень [19, 20].

У [13] ефект деградації баласту досліджувався шляхом поступової зміни гранулометричного складу в моделі дискретних елементів. Цей підхід ґрунтується на припущенні, що домішки, які потрапляють у баласт, змінюють кут тертя між його частинками та жорсткість контакту під час їх взаємодії.

За такого детального просторового дискретизування шару баласту важливими стають не лише фізичні характеристики частинок, а й їхня геометрична форма. Так, у роботі [14] понад 500 баластових частинок було оцифровано методом 3D-сканування залізничної колії.

У публікаціях [15, 16] узагальнено сучасні результати лабораторних досліджень руйнування частинок баласту. У роботі [15] зроблено висновок, що навіть найкращий баластовий матеріал за фізичними показниками руйнується не повільніше за менш якісні аналоги.

Деградація баласту порушує дренаж води, що ще більше підсилює інтенсивність накопичення забруднень [17]. Це включає забруднення баласту частинками ґрунту, які перешкоджають руху води (рис. 2.8).

Погіршення жорсткісних характеристик баласту насамперед впливає на роботу шпал. Утворення порожнин під шпалами є однією з головних причин порушення геометрії колії загалом [21, 22].

У роботі [23] показано, що ігнорування або недостатньо адекватний облік неоднорідності шару баласту підвищує похибки при математичному моделюванні процесів експлуатації залізничної колії. Тому в цій роботі запропоновано математичні підходи до врахування неоднорідності баласту вздовж довжини шпал.

Також для оцінки стану залізничного баласту застосовуються сучасні підходи з використанням методів оцінки ентропії системи, які ґрунтуються на ідеях теорії інформації та термодинаміки і використовуються для кількісного аналізу структурного безладу, неоднорідності та зниження функціональної якості баластного шару

[24-26]. Основна ідея – використати ентропію як показник ступеня деградації або хаотичності структури баласту.

Для дослідження еволюції стану баластного шару та його деградації з'являються математичні моделі з високим рівнем деталізації структури баласту – в окремих завданнях аж до індивідуальних щебених частинок. Слід розуміти, що в умовах наддеталізованих моделей принципово змінюється сам підхід до математичного опису деградації баласту. Наприклад, якщо в моделях із мінімальною деталізацією баласт розглядається як однорідний ізотропний шар, що працює на стиск і має пружні вертикальні деформації, то у варіантах із високою деталізацією він подається як сукупність (масив) абсолютно твердих (некомпресійних) тіл нечіткої форми, що взаємодіють через взаємне переміщення з урахуванням сил тертя, контактних напружень тощо (рис. 2.8).

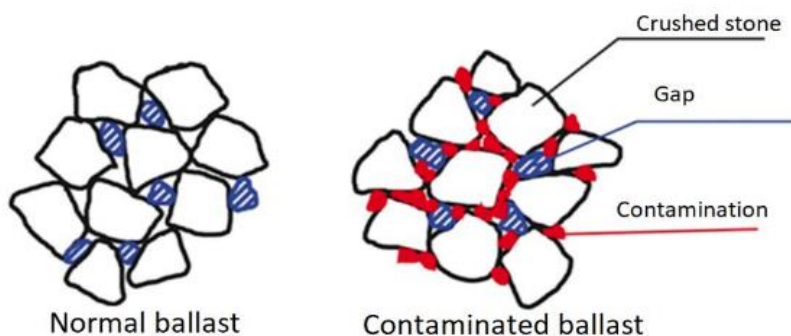


Рис. 2.8. Візуалізація забруднення баласту [17]

Аналіз напружено-деформованого стану залізничної колії може здійснюватися за різними показниками. Зміна жорсткості баласту найчіткіше відображається у зміні вертикальної пружної деформації колії під дією зовнішніх навантажень. Як основний числовий показник розглядатимемо загальний модуль деформації підрейкової основи. Цей термін описує сумарну роботу пружної деформації елементів залізничної колії, що забезпечують прогин рейки: скріплення, шпал, баласту та ґрунту. Навіть локальна зміна жорсткості в баластному шарі впливає на жорсткість усієї конструкції колії, спричиняючи перерозподіл напружень і деформацій у шарах, розташованих як глибше, так і вище.

Загальний модуль деформації підрейкової основи є основною й у більшості випадків єдиною достатньою характеристикою колії в математичних моделях рухомого складу, де залізнична колія

представляється лише як пружна поверхня, по якій відбувається рух. Такий підхід також широко застосовується в квазістатичних розрахунках залізничної колії, які описують рейку як балку, що лежить на рівномірно пружній основі.

Модуль деформації баласту зазвичай коливається в межах від 100 до 200 МПа, хоча конкретне значення залежить від багатьох чинників. Наприклад, розмір каменів, що входять до складу баласту, їх геометричні параметри, рівень забруднення тощо можуть впливати на цей модуль. У разі забруднення баласту модуль деформації може знижуватись до 80% від початкового значення. При значному забрудненні це значення може зменшитися до 60%.

Для базової конструкції колії розрахунки виконувалися за умов використання рейок типу Р65, залізобетонних шпал, шару баласту товщиною 60 см із модулем деформації 100 МПа та земляного полотна з ґрунтом із модулем деформації 35 МПа. Навантаження від колеса на рейку приймалося рівним 125 кН. Погіршення стану баласту моделювалося шляхом зменшення модуля деформації на 20%.

Для подальших досліджень було виконано серію розрахунків для різних значень модуля деформації шару баласту та його часткових змін у різних місцях. Результати залежать від багатьох чинників, але зберігаються певні якісні закономірності. Основні з них наведено нижче як розв'язання досліджуваної задачі. Було розглянуто кілька варіантів баласту з модулем деформації в межах від 100 до 200 МПа як у чистому, так і в забрудненому стані, а також кілька варіантів ґрунтів із модулем деформації від 20 до 50 МПа. Використання баласту з вищим модулем деформації дозволяє забезпечити більшу загальну жорсткість колії.

Слід зазначити, що жорсткість баласту залежить не лише від фізичних властивостей матеріалу, а й від якості його укладання та ущільнення. Тому в деяких випадках цей показник може використовуватись як індикатор якості обслуговування залізничної колії. Показано, що для слабких ґрунтів втрачається не лише абсолютне значення модуля деформації залізничної колії, але й можливість його підвищення шляхом покращення якості баластного шару. Для більш твердих ґрунтів (з модулем деформації 35 МПа і більше) загальний модуль деформації підоснови на рівні 50 МПа (що вважається достатнім для нормальної роботи колії в більшості випадків) досягається вже при баласті з модулем деформації 100–140

МПа. У разі ж слабких ґрунтів (з модулем деформації 20 МПа) досягти такої жорсткості колії не вдається.

Урахування наявності забрудненого баласту призводить до зниження модуля деформації підрейкового шару на 6–11%. Числові результати для більшості розглянутих варіантів наведено в табл. 2.3 [27].

Таблиця 2.3

**Модуль деформації залізничної колії від характеристик баласту та ґрунту**

Вихідні характеристики			Результати моделювання		
Модуль деформації шару баласту, МПа			Модуль деформації ґрунту, МПа	Модуль деформації об'єкту «баласт», МПа	Модуль деформації об'єкту «підрейкова основа» ( $U$ ), МПа
0-20 см	20-40 см	40-60 см			
100			20	100	26.0
100				100	41.2
80	100			87	38.7
80		100		80	37.1
80				80	37.1
60				60	31.9
90				90	39.2
120				120	44.4
150				150	48.5
120	150			118	44.1
200				200	53.7
160	200			161	49.6
80			25	80	31.4
100				100	34.4
80	100			105	31.1
150				150	39.8
120	150			148	36.6
200				200	43.4
160	200			195	40.6
80				80	43.4
100				100	48.9
80	100			81	43.4
120				120	53.3
150				150	59.1
120	150		117	52.9	
200			200	66.5	
160	200		159	60.6	
80			50	80	43.4
100				100	48.9
80	100			81	43.4
120				120	53.3
150				150	59.1
120	150			117	52.9
200				200	66.5
160	200			159	60.6

Окрім загального модуля деформації підрейкової основи, подано також дані про модуль деформації баласту як окремого об'єкта залізничної колії, що можуть бути використані в математичних

моделях, де підрейкова основа поділяється на шпали, баласт і ґрунт. Ці дані отримані в результаті моделювання прогину, яке охоплює всю конструкцію залізничної колії та дозволяє враховувати загальний перерозподіл напружень.

### 2.1.5. Прогнозування розладнання хрестовин стрілочних переводів залізниць на основі експериментальних даних моніторингу

Неперервну онлайн діагностику технічного стану хрестовин пропонується виконувати із застосуванням сучасних інформаційних технологій Internet of Things (IoT), яка все більше використовується для управління інфраструктурою. За допомогою даної системи виконується вимірювання прискорень та напружень у хрестовинах. Одна розроблена система дасть змогу в радіусі 450 м отримувати дані із багатьох хрестовин стрілочних переводів одночасно (рис. 2.9).

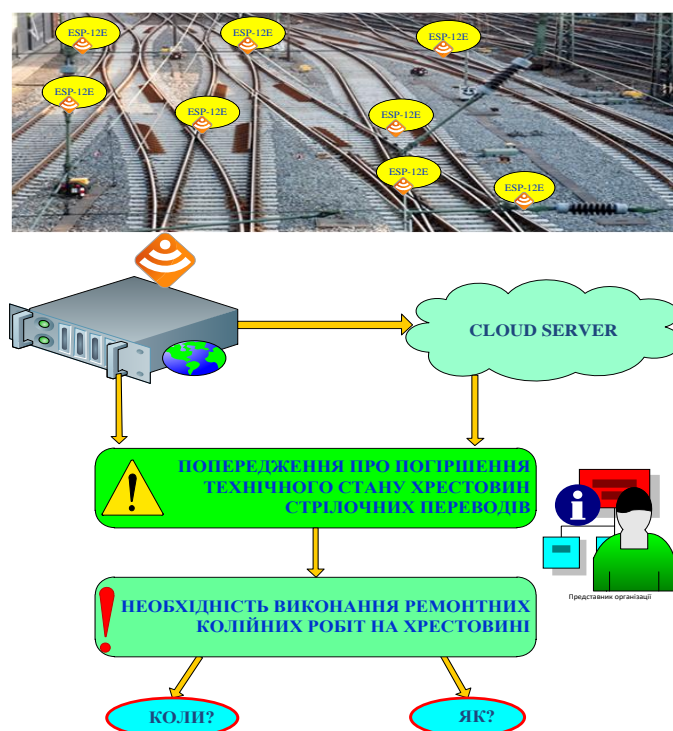


Рис. 2.9. Структурна схема моніторингу технічного стану хрестовин стрілочних переводів залізничної колії

Дана система складається із пристроїв на кожній хрестовині (Nodes), які безпосередньо виконують запис параметрів динамічної взаємодії та системи яка збирає та обробляє інформацію із багатьох

хрестовин (веб сервер). Вимір параметрів динамічної взаємодії, їх аналогово-цифрове перетворення здійснюватиметься на основі програмованих Wi-Fi мікроконтролерів типу ESP-12E (рис. 2.10).

Далі відбувається відправка даних веб сервер по протоколу MQTT. Збір інформації веб сервером виконується на основі мікрокомпютерної системи типу RASBERRI Pi2 з операційною системою DEBIAN Linuxs. Даною системою виконується попередня обробка зібраних даних та підготовка у зручний для користувача вигляд із відправкою основних даних на Claut Server для забезпечення довготривалого моніторингу хрестовин стрілочних переводів. При цьому користувач має можливість отримувати дані вимірів із хрестовин, як безпосередньо із Веб сервера так і даних за весь період вимірів із Claut Server.

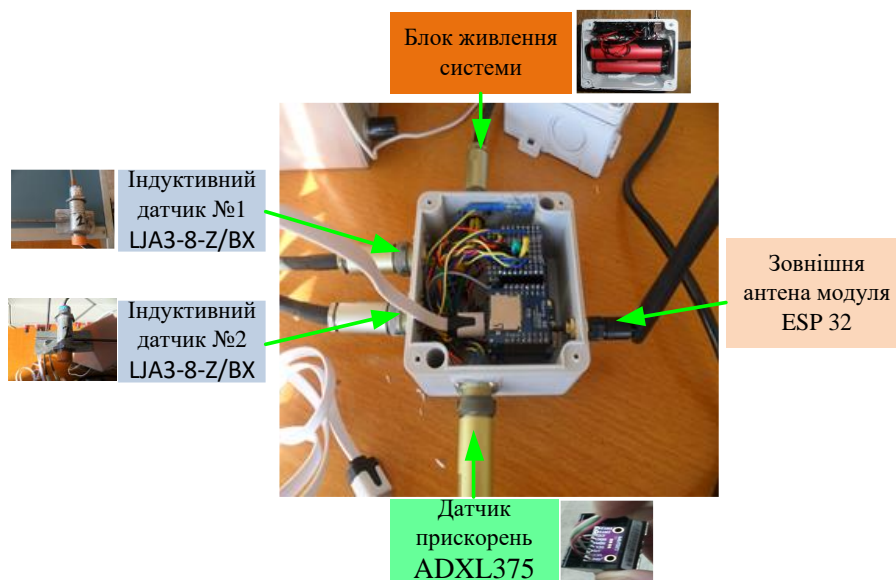


Рис. 2.10. Система моніторингу технічного стану хрестовин стрілочних переводів

Оптимальні моменти виконання та виду робіт встановлюватимуться на основі зібраних статистичних даних за тривалий період часу експлуатації хрестовин та розробленої статистичної моделі. Модель дозволяє виконувати аналіз зміни технічного стану хрестовин та прогнозувати подальше розладнання хрестовини. Із використанням статистичних та економічних методів встановлюється оптимальний момент, який забезпечує з однієї сторони мінімальну кількість вартісних робіт із поточного утримання, а з іншої – своєчасність їх проведення, що забезпечить продовження життєвого циклу хрестовин стрілочних переводів.

Окрім встановлення оптимальних моментів виконання робіт по утриманню хрестовин стрілочних переводів, актуальним є встановлення оптимальної геометрії поверхні кочення хрестовини після проведення відновлювальних робіт [28]. Відновлена поверхня кочення повинна забезпечувати найбільш тривалий подальший життєвий цикл хрестовини, для даних умов експлуатації (розподіл швидкостей руху і навантажень рухомого складу різного типу, марки і конструкції хрестовини та стан ходових частин рухомого складу і їх статистичний розподіл). Розв'язок даної задачі виконувати за допомогою методів математичного моделювання, а саме:

- математичної моделі просторової динамічної взаємодії хрестовини із рухомим складом, як дискретно континуальної динамічної системи;

- моделі контактної взаємодії при довільній формі контактної зони на основі методів теорії пружності, лінійної теорії Калкера та швидких методів розрахунку контактної взаємодії Fast Sim A та Fast Sim 2.

Із використанням даних моделей виконана оцінка нормальних і зсувних напружень у хрестовинах стрілочних переводів, встановлено інтегральний критерій втомної роботи металу осердя у зоні контактної взаємодії і встановлено інтегральний критерій зносу хрестовин внаслідок зносу металу.

Таким чином запропонована система дозволить перейти на новий рівень у еволюції традиційної технології залізничної колії, а саме стрілочних переводів: стрілочні переводи із автоматизованою технологією утримання при мінімальній участі людського фактору.

Додаткові характерні ознаки зміни технічного стану хрестовини отримуємо із записів сигналів вертикальних прискорень. Просторові прискорення вимірювали з частотою дискретизації 20 кГц. Запис прискорень проводився протягом 90 днів. Проте вимірювання даних здійснювалося із великими перервами – існують періоди з відсутніми даними. Доступні для аналізу вимірювання, що проводилися 8–9 раз на день разом з 528 записами прискорень. Для аналізу приймалися тільки записи прискорень на перших двох осях рухомого складу.

Для кількісної оцінки форми сигналу і отримання додаткової інформації із вимірюваних значень прискорень при аналізі застосовуємо спектральні та часові характеристики [29–30]. Насамперед проаналізуємо розподіл спектральних характеристик щільності вейвлетів, які наведено на рис. 2.11.

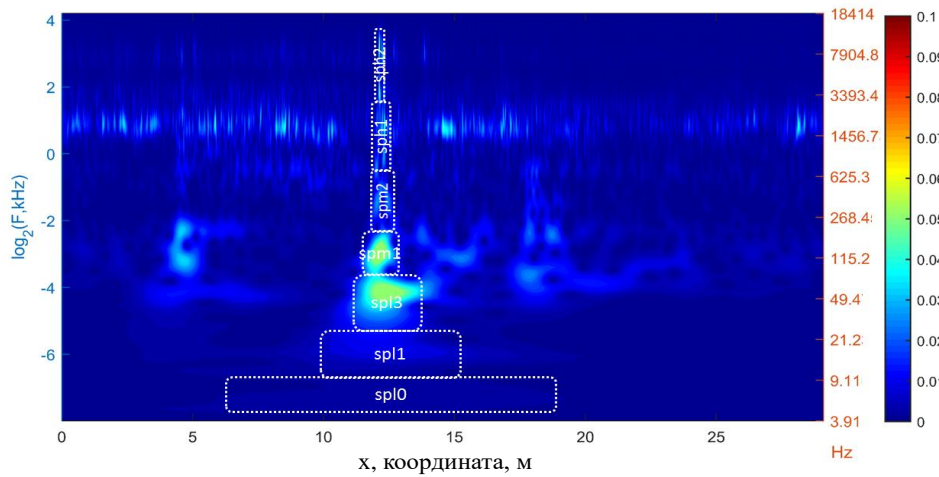


Рис. 2.11. Розподіл спектральних характеристик сигналу із вейвлет-перетворень

Із рис. 2.11 видно, що спостерігаються локальні зони максимумів та мінімумів частотних сигналів. Далі проведемо порівняння зміни спектральних характеристик вейвлет-перетворень залежно від терміну експлуатації хрестовини (рис. 2.12).

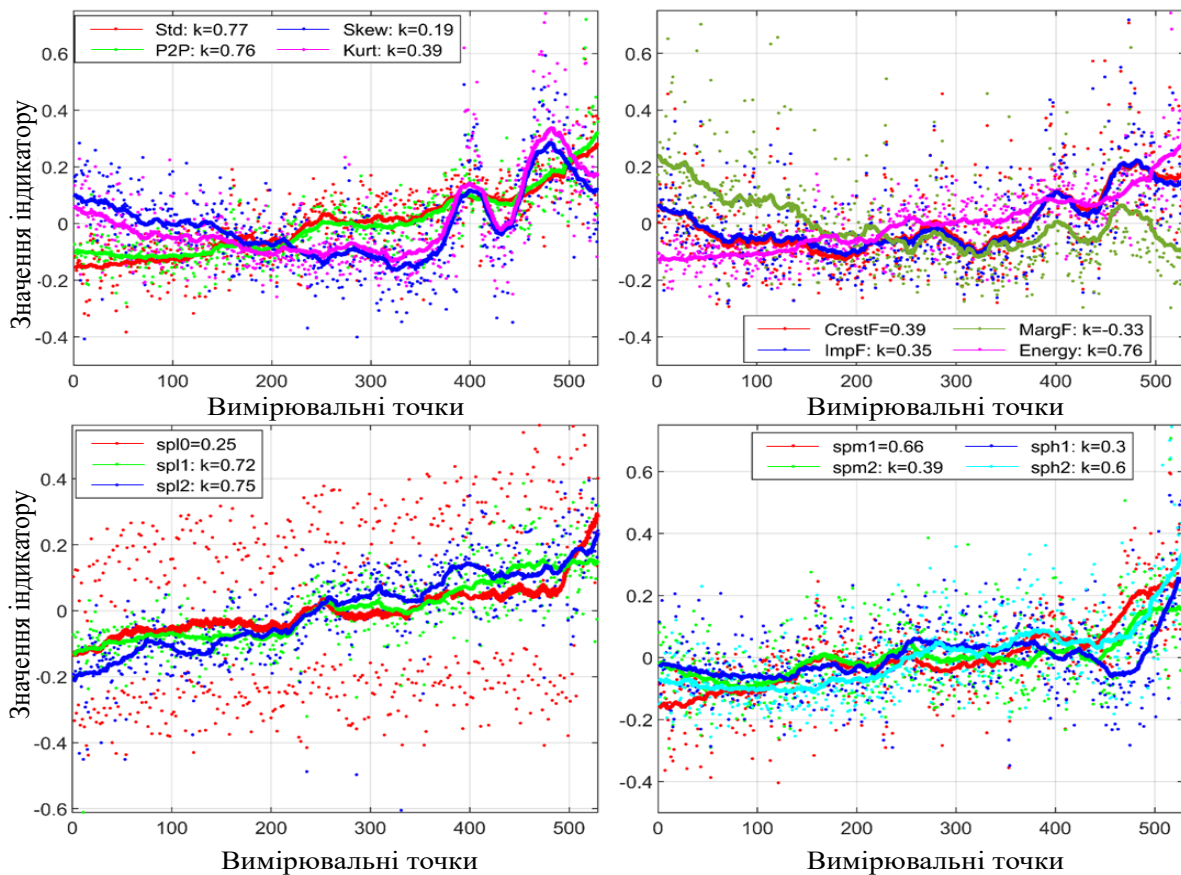


Рис. 2.12. Залежність розподілу спектральних статистичних характеристик від терміну експлуатації хрестовини

Для простоти координатна вісь на рис. 2.12 наведена як ряд вимірювання прискорень протягом 90 днів із 528 записами прискорень. Із аналізу рис. 2.12 бачимо, що характеристики часового домену P2P, Energy та Std мають найвищі лінійні співвідношення із терміном експлуатації. Статистичні характеристики Kurt, CrestF, MargF і ImpF мають помірну кореляцію із терміном експлуатації до 300 точок вимірювань, а далі мають нелінійну поведінку, що ускладнює прогноз зміни технічного стану хрестовини. Найкращу кореляцію із зміною технічного стану хрестовини мають спектральні характеристики spl1, spl2, spm1, які відповідають низькому і середньому діапазону частот 10...200 Гц. Практично можна говорити, що вони мають лінійну кореляцію із терміном служби. Високочастотна характеристика sph1, sph2 має високу кореляцію, проте в кінці терміну реальної експлуатації мають нелінійну поведінку.

Для прогнозування змін технічного стану хрестовини рекомендується використати стохастичну експоненціальну модель погіршення стану [31], яка базується на моделі Вінера і має вигляд:

$$CI(t) = \phi + \theta(t) \exp\left(\beta(t) \cdot t + \varepsilon(t) - \frac{\sigma^2}{2} t\right), \quad (2.11)$$

де  $CI(t)$  – індикатор стану як функція часу;  $\phi$  – термін доповнення новими значеннями даних вимірюного сигналу, що вважається відомою величиною;  $\sigma$  – дисперсія шуму, що розглядається як детермінований параметр;  $\theta$  – випадкові параметри, які визначають нахил кривої моделі, моделюється як логарифмічний нормальний розподіл з середнім значенням  $\mu_\theta$  і дисперсією  $\sigma_\theta$ ;  $\beta$  – випадковий параметр, моделюється за розподілом Гауса  $\mu_\beta$  та дисперсії  $\sigma_\beta$ ;  $t$  – часовий крок,  $\varepsilon(t) = \sigma B(t)$  – модельний адитивний шум, який моделюється як нормальний розподіл з нульовим значенням і дисперсією  $N(0, \sigma^2)$ .

На кожному етапі часу, коли надходять нові виміряні дані, розподіл параметрів моделі  $\theta$ ,  $\beta$  оновлюється до пізнішого на основі останнього спостереження показника стану. Експоненціальна модель погіршення технічного стану базується на впливі кута нахилу кривої. Після виявлення значного нахилу кривої, модель забуває про попередні спостереження та доповнюється новими значеннями вимірюного сигналу прискорень. Результати прогнозування зміни технічного стану хрестовини наведено на рис. 2.13.

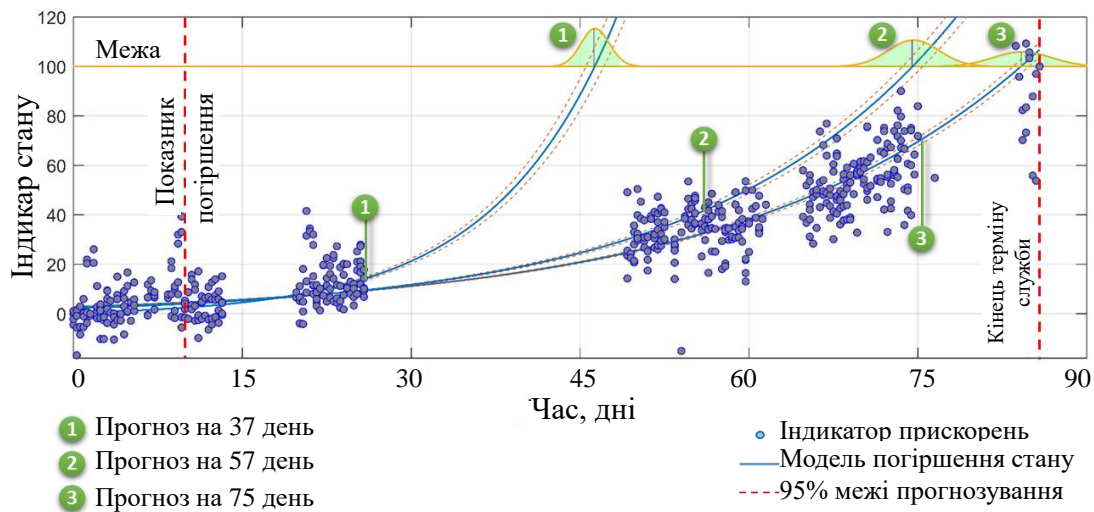


Рис. 2.13. Крива прогнозування зміни технічного стану хрестовини стрілочного переводу

Точки вимірювання прискорень на діаграмі розсіювання представляють собою розроблений індикатор стану. Вони змінюються у діапазоні від 0 до 100 точок. Значного нахилу крива досягає на 15-й день після початку вимірювання, тому прогноз зміни технічного стану хрестовини починається з цього моменту часу.

Погіршення стану хрестовини проводиться для трьох випадків прогнозування зміни технічного стану, а саме: 27-й, 57-й і 75-й день. Прогноз на 57-й день свідчить про очікуваний 63-й день для досягнення межі допустимого стану, що становить майже половину від реального терміну. Проте можна очікувати помилку, беручи до уваги, що середній показник стану в момент прогнозування становить 17 балів, що менше, ніж їх випадкова варіація. Набагато кращі результати можна спостерігати на 57-й день, де середній показник стану сягає 40 балів. Очікуваний прогноз на 75-й день дуже близький до реального критичного стану хрестовини. Тому висновок про зміну технічного стану хрестовини з точністю до 80 % можна прийняти на 75-й день після її експлуатації.

## **2.2. Дослідження режимів систем електропостачання залізниць в задачах підвищення надійності енергозабезпечення тяги поїздів**

### **2.2.1. Моделювання струморозподілу в тягових мережах з урахуванням інтелектуально-керованих елементів систем тягового електропостачання**

Будь-яке перетворення електричної енергії в системах тягового електропостачання зумовлене процесами випрямлення чи трансформації електроенергії на тягових підстанціях та безпосередньо на електрорухомому складі. Для більшості підстанцій системи постійного струму характерна двоступенева трансформація через ускладнення у виготовленні трифазних випрямлячів на напругу вище 35 кВ та масового їх впровадження, проте саме за цієї системи виконується більш ефективно перетворення енергії, ніж в системі змінного струму. Для порівняння в системі змінного струму коефіцієнт потужності однофазного випрямляча електровозу за даними експлуатації змінюється в межах  $\lambda = 0,8..0,7$  і навіть нижче, в системі постійного струму коефіцієнт потужності випрямлячів тягових підстанцій значно вище  $\lambda = 0,9..0,94$  [32]. На змінному струмі тягові підстанції виконують одинарну трансформацію отриманої з первинної мережі електроенергії, а подальше її перетворення до напруги, придатної для живлення електроприводу виконується з енергії однофазного змінного струму перетворювачами електрорухомого складу.

Крім того, на електрифікованих залізницях однофазного змінного струму унаслідок низького коефіцієнту потужності на електрорухомому складі та активно-індуктивного характеру опору тягової мережі мають місце більші втрати напруги у абсолютному вираженні ніж в системі постійного струму. Так, номінальне проектне відхилення напруги на струмоприймачеві електрорухомого складу від напруги на шинах тягової підстанції для змінного струму складає  $\delta U_{\sim} = 27,5 - 25 = 2,5$  кВ, а для постійного  $\delta U_{=} = 3,3 - 3,0 = 0,3$  кВ. У відношенні до номінальної напруги на шинах підстанції відхилення напруги для обох систем становить 9,1 %

Нестаціонарний характер електричних навантажень, який створюється електрорухомим складом в системі електропостачання, та їх здатність переміщуватись у просторі відносно тягових підстанцій

призводять до залежності напруги і споживання струму від характеру руху поїздів та особливостей електрифікованої ділянки. Напруга безпосередньо на струмоприймачах електровозів коливається в досить широких межах, що примушує враховувати зміни режиму напруги через дві основні причини.

По-перше, швидкість електровозів з тяговими двигунами послідовного збудження при фіксованій силі тяги і позиції регулювання змінюється практично пропорційно, що в результаті впливає на виконання графіку руху поїздів.

По-друге, розрахунок режимів системи тягового електропостачання, який базується на даних тягових розрахунків, вимагає тісного ув'язування процесів розподілу та споживання електричної енергії.

Взаємодія електрорухомого складу з системою тягового електропостачання є досить складним процесом, який проявляється в тому, що в системі рівнянь змінюється як координата, так і швидкість руху поїзда. В свою чергу, струми залежать від швидкості руху і отриману таким чином миттєву схему можна розрахувати, але застосувати результати розрахунку до процесу руху поїзда не можна через неможливість зарані передбачити зміни швидкості, координати та профілю, що входять до цієї ж системи диференціальних рівнянь руху поїздів.

Розрахунки систем тягового електропостачання в якості складних систем в залежності від поставленої задачі повинні враховувати багато різноманітних факторів, від яких залежать обрані методи і способи розрахунку та які, в свою чергу, будуть впливати на об'єми та швидкість розрахунку. Зазвичай моделі системи тягового електропостачання застосовуються або для отримання числових характеристик електричних величин при проектуванні ділянки електрифікованої залізниці або для оптимізації режимів роботи існуючих ділянок, чи при впровадженні нових пристроїв електропостачання чи для аналізу ефективності, а в окремих випадках, і при виникненні ненормальних режимів експлуатації.

Таким чином, на етапі проектування ділянок моделі необхідні для розрахунку проектних показників систем тягового електропостачання стосовно режимів напруги, втрат потужності, ККД, пропускної спроможності ділянки, тощо. За наявності резервів чи невизначеностей на цьому етапі можливе використання оптимізаційних розрахунків

стосовно вибору чи коригування параметрів системи тягового електропостачання з метою покращення показників роботи.

На етапі експлуатації моделі можуть застосовуватись для оптимізації режимів напруги з врахуванням особливостей систем зовнішнього електропостачання, розрахунку наявних показників систем тягового електропостачання з подальшим вибором варіантів підсилення чи коригування обраних на етапі проектування параметрів, аналізу ефективності роботи ділянок електрифікованих залізниць на підставі обробки великих масивів експериментальних даних, проведення повнофакторних експериментів та узагальнення результатів.

Проблемною частиною розрахунку режимів систем тягового електропостачання є особливості розрахунку миттєвих схем, методи розрахунку яких недостатньо узагальнені та складно підлягають автоматизації при розробці засобів моделювання, оскільки застосовують громіздкі апарати теорії графів і матриць, багатополюсників чи фазних координат.

Висунемо припущення, що недостатньо проаналізовані та узагальнені методика розрахунку миттєвих схем в системах тягового електропостачання створюють складність через необхідність враховувати зміну параметрів тягового навантаження в часі і просторі. Такий підхід умовно можна назвати методикою від загального до окремого. Якщо ж виконувати дослідження навпаки – від окремого до загального, тобто визначити концепцію розрахунку систем тягового електропостачання таким чином, що в залежності від просторово-часового стану тягового навантаження змінюються і параметри системи тягового електропостачання, отримаємо нові аналітичні функції, які дозволять розвинути методи розрахунку систем тягового електропостачання з послідуочим впровадженням у сучасні засоби моделювання.

Таким чином, необхідно розробити методика розрахунку миттєвих схем, яка дозволить виконувати електричні розрахунки системи тягового електропостачання на підставі вихідної потужності електрорухомого складу, враховуючи можливість її постійного споживання при переміщенні тягового навантаження у просторі.

Впровадження методики у програмний продукт повинно дозволити виконувати розрахунки на підставі вихідних даних у вигляді графіку руху, тягових розрахунків або режимних карт, схеми живлення та секціонування ділянки, даних режимів напруги системи

зовнішнього електропостачання. Виконання електричних розрахунків системи тягового електропостачання в просторово-часових координатах повинно включати в себе функції розподілу струму, спаду напруги та втрат потужності в контактній мережі. Оптимізаційні розрахунки повинні включати пошук оптимального рівня напруги на тягових підстанціях, пошук кількості та місця встановлення підсилюючих пунктів, визначення законів управління керованими підсилюючими пунктами, пристроями компенсації реактивної потужності на змінному струмі, розрахунки параметрів режиму системи електропостачання, а саме показники якості електричної енергії, величини напруги, струму, кутів зсуву фаз, втрати в елементах системи електропостачання.

Розроблена модель повинна реалізовуватись у вигляді програмного комплексу, який виконуватиме розрахунок режимних показників системи тягового електропостачання для залізниць постійного та змінного струму, а саме значень фідерних і первинних струмів, розподілу струмів в контактній мережі, втрат напруги, потужності, витрат електричної енергії та основних показників якості електроенергії в системі тягового електропостачання з врахуванням технічних засобів поліпшення якості електричної енергії; виконання оптимізаційних розрахунків оптимальних параметрів системи тягового електропостачання та визначення законів управління технічними засобами з метою підвищення ефективності режиму роботи системи тягового електропостачання.

Далі приводяться результати узагальнення та перегляду наукових аспектів, що детальніше аналізують та узагальнюють методики розрахунку протікаючих в системах тягового електропостачання процесів. Узагальнення стосуються застосуванню просторово-часового уявлення електричних величин в системах тягового електропостачання, більш точному врахуванню режиму напруги при споживанні електрорухомим складом постійної потужності, врахуванню в системі електропостачання силових елементів з керованими параметрами та особливостей розрахунку систем тягового електропостачання в якості розподілених.

### 2.2.2. Розрахунки систем тягового електропостачання в просторово-часових координатах

Найбільш узагальнюючим розрахунком є отримання результатів струмозподілу в просторово-часових координатах, без яких неможлива оптимізація режимів системи тягового електропостачання в аналітичному виді [33]. Саме просторово-часове уявлення всіх електричних величин, які необхідні для розрахунків систем тягового електропостачання, дозволить побудувати інтелектуальні системи керування режимами систем тягового електропостачання з метою зниження втрат електроенергії та підвищення енергоефективності.

Просторово-часова модель системи тягового електропостачання ґрунтується на аналітичному описі основних електричних процесів функціями двох змінних, взаємозв'язок між якими визначається графіком руху поїздів  $x_T(n, t)$  (рис. 2.14), що визначає графікову координату кожного окремого поїзду з номер  $n$  у будь-який момент часу  $t$ . Використовуючи інші вихідні у вигляді профілю потужності електровозу, параметрів системи зовнішнього та тягового електропостачання визначаються кусочно-задані функції двох змінних, які являють собою залежності розподілу струмів та втрат напруги в контактній мережі у часі та просторі.

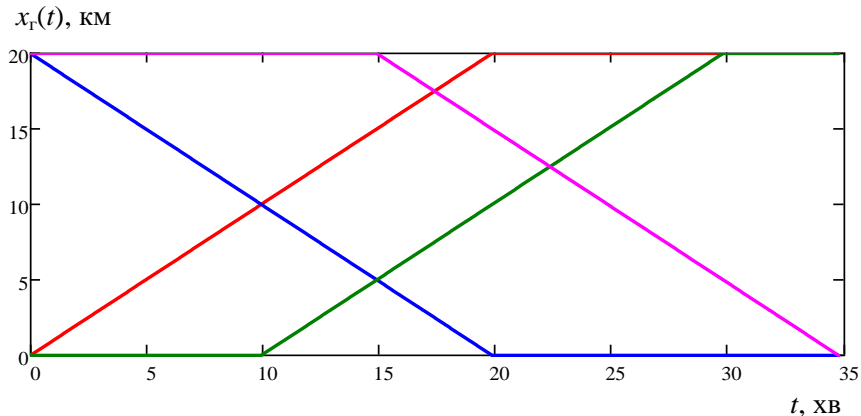


Рис. 2.14. Приклад розрахункового графіку руху поїздів

Для можливості аналітичного розрахунку миттєвих схем використовуємо метод функцій струмозподілу, який полягає у визначенні значень функції струмозподілу  $\varphi(x)$  в кожній точці з координатою  $x$  тягової мережі, значення якої в свою чергу показує частку струму електровозу  $I_e$ , що споживається фідером контактної мережі  $I_f$  тягової підстанції

$$\varphi_x = I_f / I_e. \quad (2.12)$$

Іншими словами, помноживши значення функції струморозподілу в координаті місцезнаходження електровозу на струм, що споживає електровоз, отримуємо струм фідера тягової підстанції. При знаходженні декількох електровозів на фідерній зоні можна застосувати метод суперпозиції, оскільки отримані результати будуть використані лише в лінійній частині системи тягового електропостачання, а в інших – в якості першого наближення при знаходженні точки режиму роботи.

Отримання значень функцій струморозподілу для класичних схем живлення (консольна, двостороння, вузлова, повного паралельного з'єднання, петлева) значних труднощів не викликає. Струм фідера без врахування вирівнювального струму, в такому випадку, визначається як добуток відповідної функції струморозподілу на струм поїзду в поточній координаті  $x$ . Для двосторонньої схеми матимемо [34]

$$I_{\Phi 1}(x) = I \frac{L-x}{L}; \quad I_{\Phi 2}(x) = I \frac{x}{L}.$$

де  $L$  – довжина ділянки, км.

Струми фідерів у часі визначаються суперпозицією окремих часток від кожного поїзду відповідно до графіку руху з врахуванням вирівнювального струму. Для скорочення в подальшому приводяться викладки для непарного фідера першої підстанції та для парного наступної, тобто

$$I_{\Phi 1}(t) = \sum_{i=1}^{n_1} \varphi_1(x_{\Gamma}(2i-1, t)) I_{\Pi}(2i-1, t) + \sum_{i=1}^{n_2} \varphi_2(x_{\Gamma}(2i, t)) I_{\Pi}(2i, t) + I_{\text{вир}}(t); \quad (2.13)$$

$$I_{\Phi 4}(t) = \sum_{i=1}^{n_1} \varphi_4(x_{\Gamma}(2i-1, t)) I_{\Pi}(2i-1, t) + \sum_{i=1}^{n_2} \varphi_3(x_{\Gamma}(2i, t)) I_{\Pi}(2i, t) - I_{\text{вир}}(t),$$

де  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$  – функції струморозподілу відповідно до номеру фідера першої (1, 2) та наступної (3, 4) тягової підстанції;  $I_{\Pi}(n, t)$  – функція результатів тягових розрахунків для поїзду з номером  $n$  у момент часу  $t$ ;  $2i-1, 2i$  – визначають номери напарного та парного поїзду;  $n_1, n_2$  – кількість поїздів відповідно на першій та другій колії.

Струми фідерів та графік руху поїздів визначають функцію розподілу струмів в контактній мережі. Для цього виконують

розрахунок струморозподілу у заданій схемі живлення від одного навантаження, наприклад для першої колії вузлової схеми живлення:

$$I_{K1}(n,t,x) = \begin{cases} \left\{ \begin{array}{l} I_{\Phi 1}(n,t), x \in [0; x_{\Gamma}(n,t)]; \\ -[I_{\Phi 2}(n,t) + I_{\Phi 3}(n,t) + I_{\Phi 4}(n,t)], x \in (x_{\Gamma}(n,t); l_C]; \\ -I_{\Phi 3}(n,t), x \in (l_C; L]; \\ x_{\Gamma}(n,t) \in [0; l_C]; \end{array} \right. , \\ \left\{ \begin{array}{l} I_{\Phi 1}(n,t), x \in [0; l_C]; \\ I_{\Phi 1}(n,t) + I_{\Phi 2}(n,t) + I_{\Phi 4}(n,t), x \in (l_C; x_{\Gamma}(n,t)]; \\ -I_{\Phi 3}(n,t), x \in (x_{\Gamma}(n,t); L]; \\ x_{\Gamma}(n,t) \in (l_C; L]; \end{array} \right. , \\ n = 2i - 1; \\ \left\{ \begin{array}{l} I_{\Phi 1}(n,t), x \in [0; l_C]; \\ -I_{\Phi 3}(n,t), x \in (l_C; L]; \end{array} \right. , \\ n = 2i. \end{cases} \quad (2.14)$$

де  $I_{\Phi 1}(n,t)..I_{\Phi 4}(n,t)$  – струм кожного фідера (1..4) від поїзда з номером  $n$  у момент часу  $t$ .

Далі за допомогою принципу суперпозиції визначається розподіл струмів в контактній мережі від усіх поїздів та з врахуванням вирівнювальних струмів. Наприклад, для контактної мережі першої колії

$$I_{K1}(t,x) = \sum_{i=1}^{n_1} I_{K1}(2i-1,t,x) + \sum_{i=1}^{n_2} I_{K1}(2i,t,x) + I_{\text{вир}}(t). \quad (2.15)$$

На рис. 2.15 приведені графічні інтерпретації отриманої функції струморозподілу (2.15) для фіксованого моменту часу та для конкретної координати відповідно.

Визначення функції розподілу втрат напруги передбачає використання функції розподілу струмів в контактній мережі з накопичуючим домноженням на відповідну відстань та питомий опір мережі. При накопиченні використовується рекурсивний підхід, тобто визначення розподілу втрат напруги наступного інтервалу використовує втрату напруги попереднього.

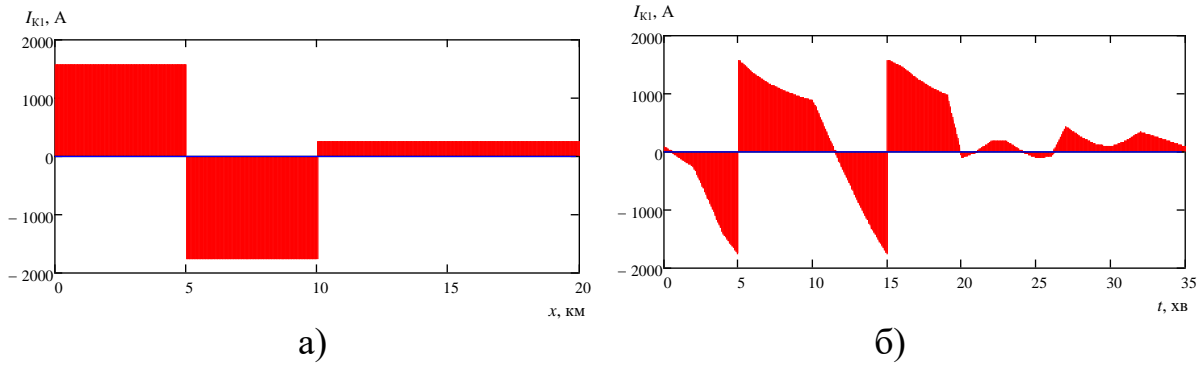


Рис. 2.15. Розподіл струмів в контактній мережі в момент часу  $t = 5$  хв (а) та діаграма струму в контактній мережі для координати  $x = 5$  км (б)

Формалізований запис функції розподілу втрат напруги в контактній мережі першої колії матиме вигляд

$$\Delta U_{K1}(n, t, x) =$$

$$= r_0 \times \left\{ \begin{array}{l} \left\{ \begin{array}{l} I_{K1}(n, t, x) \cdot x, x \in [0; x_{\Gamma}(n, t)]; \\ \Delta U_{K1}(n, t, x_{\Gamma}(n, t)) / r_0 + I_{K1}(n, t, x)(x - x_{\Gamma}(n, t)), x \in (x_{\Gamma}(n, t); l_C]; \\ \Delta U_{K1}(n, t, l_C) / r_0 + I_{K1}(n, t, x)(x - l_C), x \in (l_C; L]; \\ x_{\Gamma}(n, t) \in [0; l_C]; \end{array} \right. \\ \left\{ \begin{array}{l} I_{K1}(n, t, x) \cdot x, x \in [0; l_C]; \\ \Delta U_{K1}(n, t, l_C) / r_0 + I_{K1}(n, t, x)(x - l_C), x \in (l_C; x_{\Gamma}(n, t)]; \\ \Delta U_{K1}(n, t, x_{\Gamma}(n, t)) / r_0 + I_{K1}(n, t, x)(x - x_{\Gamma}(n, t)), x \in (x_{\Gamma}(n, t); L]; \\ x_{\Gamma}(n, t) \in (l_C; L]; \\ n = 2i - 1; \end{array} \right. \\ \left\{ \begin{array}{l} I_{K1}(n, t, x) \cdot x, x \in [0; l_C]; \\ \Delta U_{K1}(n, t, l_C) / r_0 + I_{K1}(n, t, x)(x - l_C), x \in (l_C; L]; \\ n = 2i. \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (2.16)$$

За аналогією з функцією розподілу струмів в контактній мережі визначається розподіл втрат напруги в контактній мережі від усіх поїздів та з врахуванням впливу вирівнювальних струмів, а саме

$$\Delta U_{K1}(t, x) = \sum_{i=1}^{n_1} \Delta U_{K1}(2i-1, t, x) + \sum_{i=1}^{n_2} \Delta U_{K1}(2i, t, x) + I_{\text{вир}}(t) \cdot r_0 \cdot x. \quad (2.17)$$

Графічний вигляд функції  $\Delta U_{K1}(t, x)$  приведений на рис. 2.16 також для фіксованого моменту часу та певної координати.

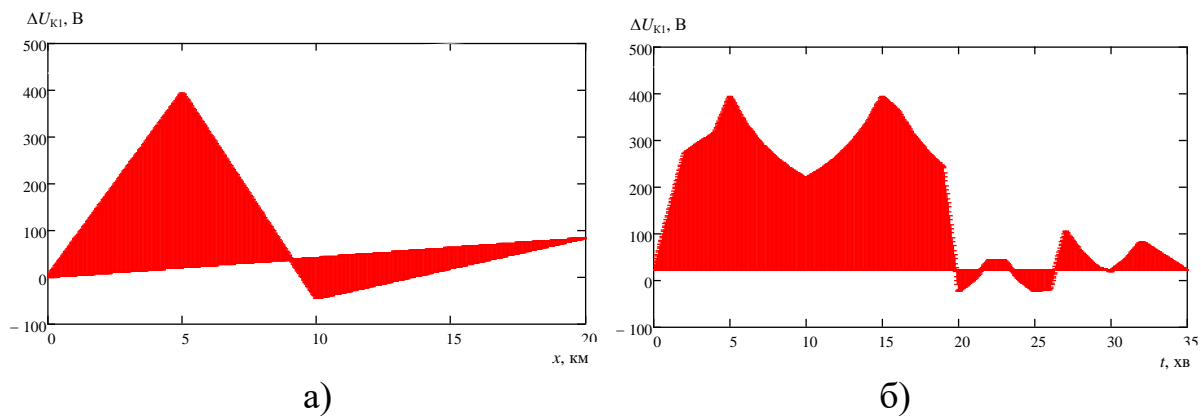


Рис. 2.16. Розподіл втрат напруги в контактній мережі для часу  $t = 5$  хв (а) та часова діаграма втрати напруги в контактній мережі для координати  $x = 5$  км (б)

Добуток за модулем просторово-часових функцій розподілу втрат напруги та струмів в контактній мережі визначає розподіл втрат потужності

$$\Delta P_K(t, x) = |I_{K1}(t, x) \cdot \Delta U_{K1}(t, x)| + |I_{K2}(t, x) \cdot \Delta U_{K2}(t, x)|. \quad (2.18)$$

Інтегрування функції розподілу втрат потужності за координатою простору визначає миттєве значення втрат потужностей в системі електропостачання, а за координатою часу – розподіл втрат електроенергії уздовж розрахункової ділянки.

Подвійне інтегрування функції розподілу втрат потужності (2.18) визначає втрати електроенергії (2.19) на розрахунковий ділянці за період розрахунку. Графіки втрат потужності та електроенергії в часі наведено на рис. 2.17.

$$\Delta P_K(t) = \frac{1}{L} \int_0^L \Delta P_K(t, x) dx; \quad \Delta P_K(x) = \frac{1}{T} \int_0^T \Delta P_K(t, x) dt; \quad (2.19)$$

$$\Delta W = \frac{1}{L \cdot T} \int_0^T \int_0^L \Delta P_K(t, x) dx dt. \quad (2.20)$$

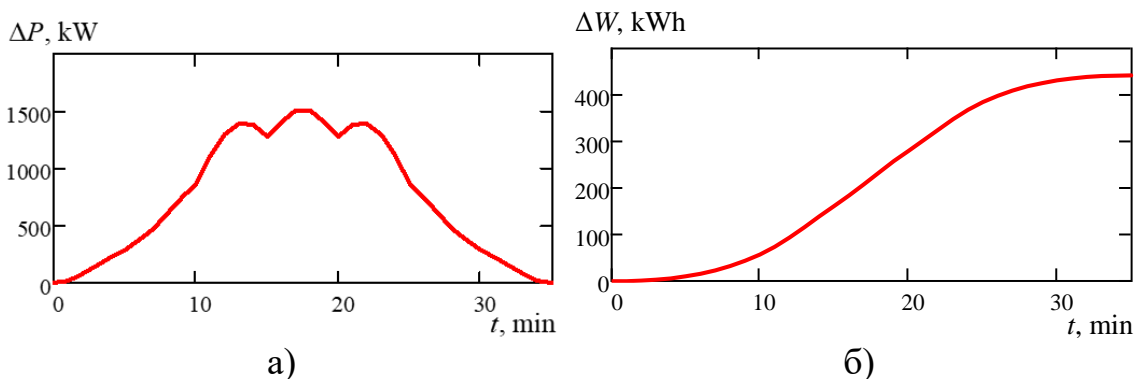


Рис. 2.17. Часові залежності втрат потужності (а) та втрат електроенергії (б)

Всі приведені розрахункові величини можуть бути представлені також у вигляді тривимірних просторів стану досліджуваної системи. Так на рис. 2.18 показані двопараметричні залежності розподілу струмів, втрат напруги та втрат потужності в контактній мережі.

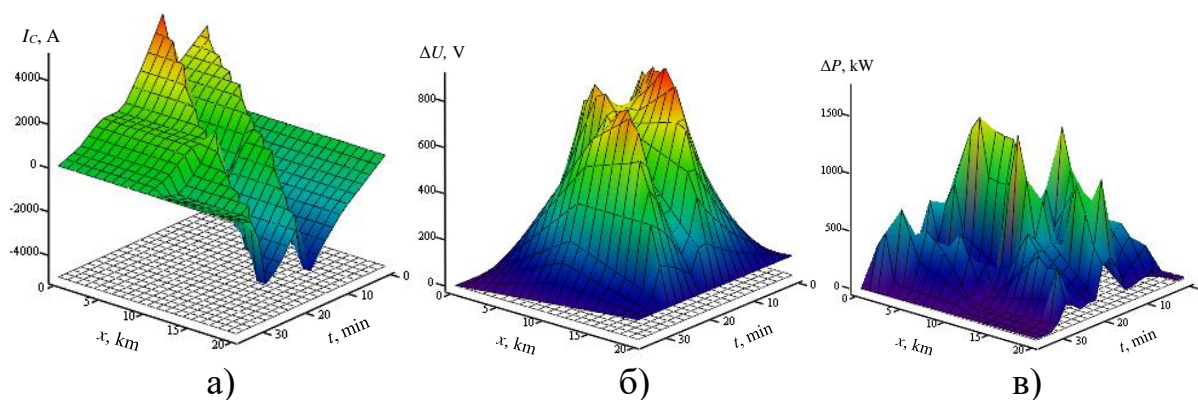


Рис. 2.18. Тривимірні функції розподілу струмів в контактній мережі (а), втрат напруги (б) та втрат потужності (в) в контактній мережі

Приведені математичні викладки реалізовані у вигляді алгоритму в середовищі MathCAD та в окремому програмному продукті *iSET* [35], написаному в середовищі Delphi. Функціонування програмного продукту базується на узагальненій структурі просторово-часової моделі системи тягового електропостачання (рис. 2.19).

Результати розрахунків отримуються у вигляді графіків струмів фідерів тягових підстанцій, напруги на струмоприймачах електровозів та втрат потужності в тяговій мережі, епюр струму, втрат напруги та потужності в тяговій мережі.

Напруга на струмоприймачі електровозу в найпростішому випадку дорівнює напрузі на шинах тягової підстанції за умови його розташування поблизу підстанції, та знижується параболічною по мірі віддаленні від підстанції. Для подальшого спрощення в узагальненні приймемо, що тягове навантаження рухається з постійною швидкістю, з постійним споживаним струмом прямолінійною ділянкою електрифікованої залізниці.

В такому випадку, закон зміни приведенного відносно рухомого навантаження опору, що було раніше позначено як  $f(x)$ , визначатиме функціональну залежність зміни напруги на струмоприймачі.

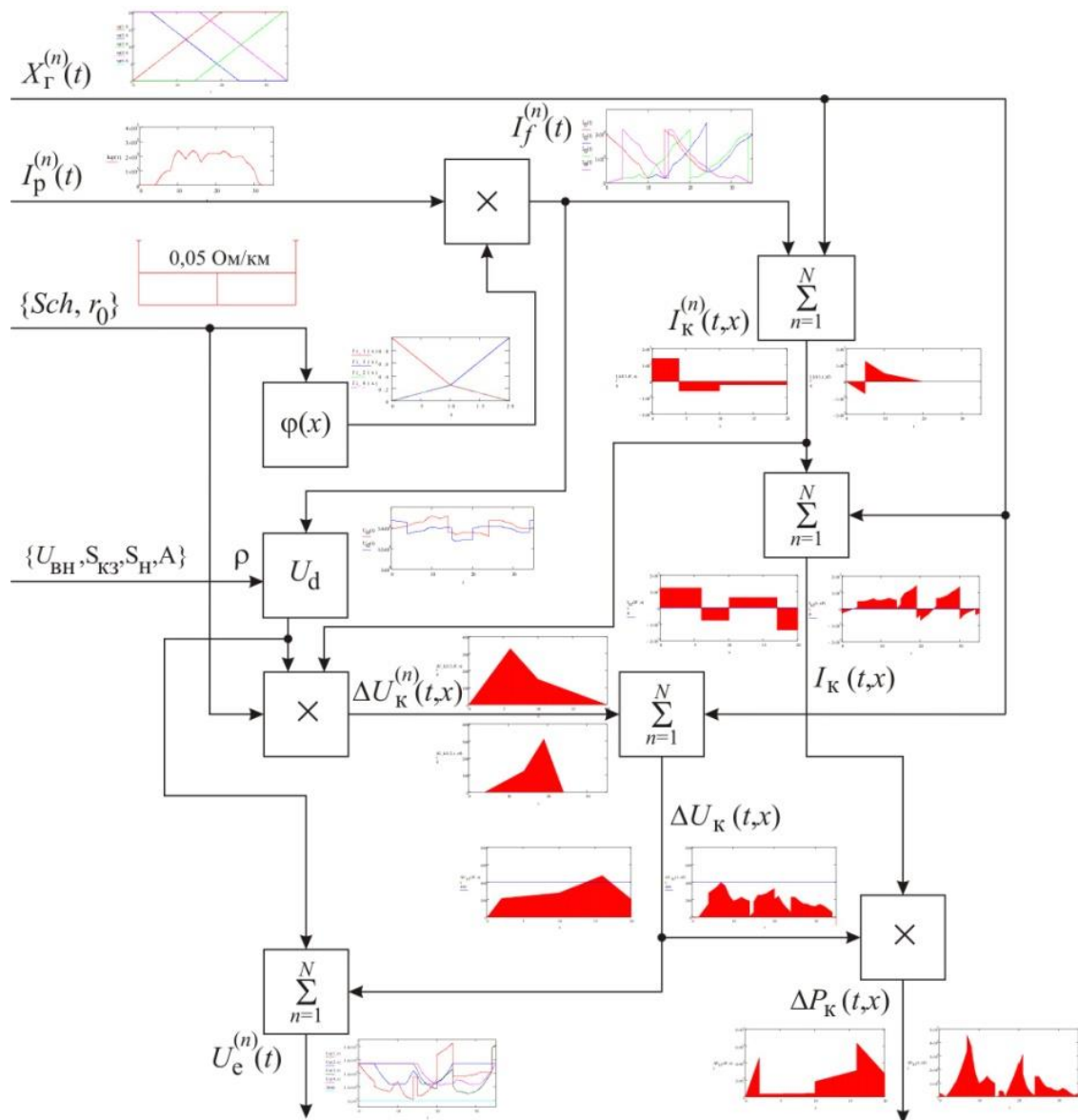


Рис. 2.19. Просторово-часова модель системи тягового електропостачання

Для двосторонньої роздільної схеми живлення (рис. 2.20, усі вузли розірвано) функціональний закон зміни опору дійсно буде параболічним, а саме

$$f(x) = \frac{r_0 x \cdot r_0 (L-x)}{r_0 x + r_0 (L-x)} = r_0 \left( x - \frac{x^2}{L} \right), \quad (2.21)$$

де  $r_0$  – опір 1 км тягової мережі, Ом/км;  $L$  – довжина міжпідстанційної зони, км;  $x$  – координата розташування навантаження, км.

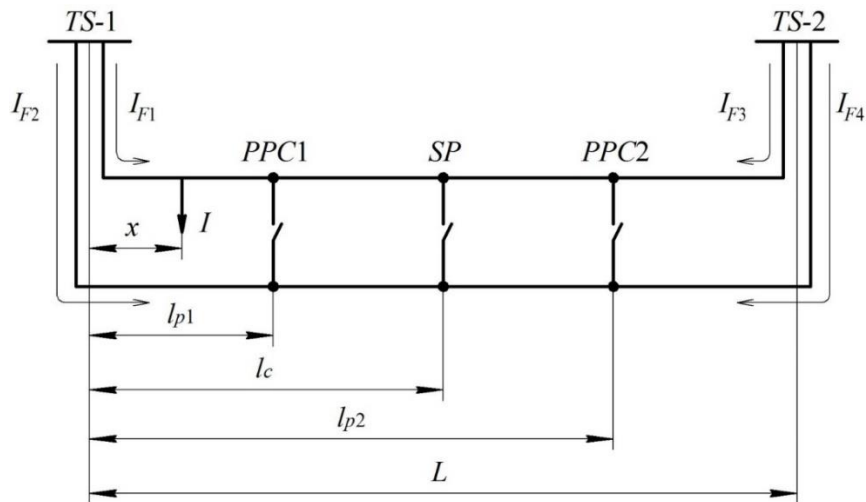


Рис. 2.20. Узагальнена розрахункова схема міжпідстанційної зони

Графічно отримані функції опорів являють собою складні кусочно-параболічні залежності (рис. 2.21), які за допомогою корекції вихідних даних можуть бути адаптовані до будь-яких реальних умов. Зокрема, до розрахунку несиметричних схем живлення, у яких відстані між вузлами паралельного з'єднання підвісок неоднакові.

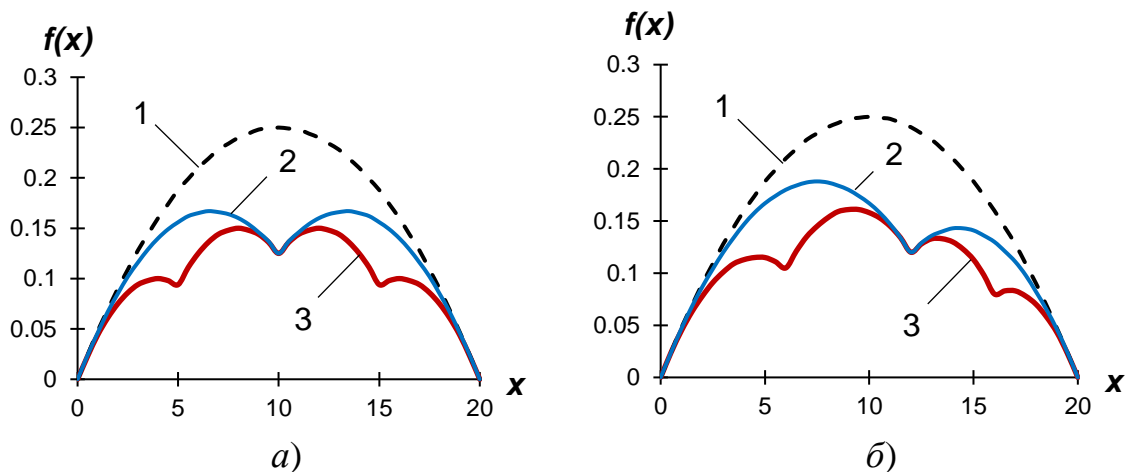


Рис. 2.21. Функції опору для симетричних (а) та несиметричних (б) схем живлення: 1 – двостороння; 2 – вузлова; 3 – паралельна

В теорії розрахунку миттєвих схем систем тягового електропостачання відоме застосування функцій струморозподілу, яке було описане вище. Фізичний зміст цих функцій полягає у вираженні часток струму фідера відносно струму навантаження в залежності від його розташування. Загально прийнято застосовувати цей підхід до розрахунку лише вузлової схеми живлення, проте можливо розповсюдити його й на інші схеми.

Нижче дослідимо аналітичні вирази для узагальненої схеми на рис. 2.20. Двостороння схема з роздільним живленням колій матиме наступні функції для кожного фідера (рис.2.22)

$$\varphi_1(x) = 1 - \frac{x}{L}; \quad \varphi_2(x) = 0; \quad \varphi_3(x) = \frac{x}{L}; \quad \varphi_4(x) = 0.$$

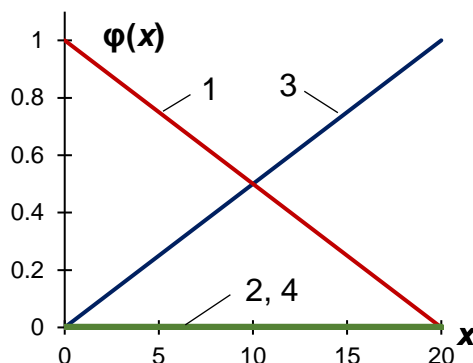


Рис. 2.22. Функції струморозподілу для фідерів тягових підстанцій двосторонньої схеми

Для схеми вузлового живлення справедливі наступні функції

$$\varphi_1(x) = \begin{cases} 1 - \frac{L+l_c}{2Ll_c} \cdot x, & 0 \leq x \leq l_c; \\ \frac{1}{2} \left(1 - \frac{x}{L}\right), & l_c < x \leq L; \end{cases} \quad \varphi_2(x) = \begin{cases} \frac{L-l_c}{2Ll_c} \cdot x, & 0 \leq x \leq l_c; \\ \frac{1}{2} \left(1 - \frac{x}{L}\right), & l_c < x \leq L; \end{cases}$$

$$\varphi_3(x) = \begin{cases} \frac{x}{2L}, & 0 \leq x \leq l_c; \\ 1 - \frac{(2L-l_c)(L-x)}{2L(L-l_c)}, & l_c < x \leq L; \end{cases} \quad \varphi_4(x) = \begin{cases} \frac{x}{2L}, & 0 \leq x \leq l_c; \\ \frac{l_c(L-x)}{2L(L-l_c)}, & l_c < x \leq L. \end{cases}$$

Графічна інтерпретація приведена на рис. 2.23, з якого також видно можливість їх застосування для несиметричних схем живлення тягової мережі.

Аналітичні вирази для паралельної схеми отримуються шляхом заміни координати поста секціонування на координати пунктів паралельного з'єднання підвісок [33, 34]. Примітним для цієї схеми є те, що наявність середнього вузла з'єднання і його розташування не впливає на розподіл струмів між фідерами тягових підстанцій. Середній вузол впливатиме на розподіл струмів всередині самої схеми живлення і, відповідно, на розподіл втрат напруги.

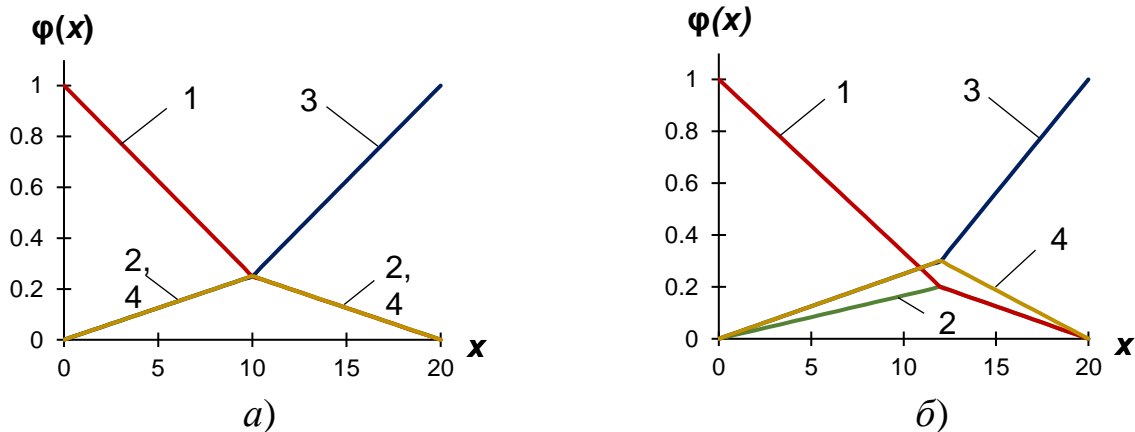


Рис. 2.23. Функції струморозподілу для фідерів вузлової схеми:  
*a* – схема симетрична; *б* – схема несиметрична

Описані вище підходи застосування аналітичних функцій до розрахунку миттєвих схем не в повній мірі відтворюють узагальнений процес електропостачання тягових навантажень, оскільки не формалізують визначення напруги в розрахунковій схемі. Для повноти теорії розрахунку необхідно увести поняття функцій опорів фідерів. Фізично ця функція являє собою опір, на якому створюється спад напруги до будь-якої точки розрахункової схеми від струму даного фідера. Таким чином, у загальному випадку матимемо

$$f_F(x) = \frac{\Delta U^{(F)}(x)}{I_F(x)}, \quad (2.22)$$

де  $\Delta U^{(F)}(x)$  – спад напруги від шин тягової підстанції до координати  $x$ , викликаний струмом даного фідера.

У випадку, якщо на ділянці протікатиме лише один струм розглядуваного фідера, функція опору фідера може бути вираженою в окремому випадку через загальну функцію опору і функцію струморозподілу, а саме

$$f_{Fi}(x) = \frac{f(x)}{\varphi_i(x)}. \quad (2.23)$$

Функції опору фідерів, аналогічно до функцій струморозподілу, є кусочно-лінійними та можуть бути виражені аналітично, враховуючи особливості реальних схем живлення [33, 34].

Основними величинами, які вимагаються в якості результатів розрахунку систем тягового електропостачання, є струми фідерів тягових підстанцій, втрати потужності в системі електропостачання і рівень напруги на струмоприймачах електровозів.

Приведемо основні співвідношення, які дозволяють отримати чисельний розрахунок вказаних величин, на підставі розробленого методу розрахунку. Для спрощення викладок не будемо враховувати внутрішній опір тягових підстанцій, оскільки його характеристики не змінюються в часі і просторі, і розрахунки типових пристроїв електроенергетики значних складнощів не викликають.

Струми фідерів тягових підстанцій при русі навантаження однією колією визначаються шляхом добутку струму тягового навантаження на відповідну функцію струморозподілу, що впливає з її визначення, тобто

$$I_{Fi}(x) = I(x) \cdot \varphi_i(x).$$

Для декількох навантажень на міжпідстанційній зоні застосовується суперпозиція складових струмів фідерів від кожного навантаження, а саме

$$I_{Fi}(x) = \sum_{j=1}^n I_j(x) \cdot \varphi_{ij}(x), \quad (2.24)$$

де  $j$  – номер навантаження в межах міжпідстанційної зони;  $n$  – кількість навантажень у схемі живлення.

Напруга на струмоприймачі електровозу може бути визначена через загальну функцію опору

$$U(x) = U_{III} - I(x) \cdot f(x).$$

Вищенаведена формула справедлива для одного навантаження. При наявності декількох навантажень необхідно врахувати взаємний їх вплив на попутній та, в залежності від схеми живлення, на суміжній колії. В загальному випадку, матимемо

$$U_j(x) = U_{III} - I_j(x) \cdot f(x) - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^{n_1} \Delta U'_k(x, x_k) - \sum_{k=n_1}^{n_1+n_2} \Delta U''_k(x, x_k), \quad (2.25)$$

де  $U_{III}$  – напруга на шинах тягової підстанції;  $k$  – номер навантаження на даній колії;  $\Delta U'_k(x, x_k)$  – функція розподілу спаду напруги від  $k$ -го навантаження на попутній колії;  $\Delta U''_k(x, x_k)$  – теж на суміжній колії.

Функція розподілу спаду напруги достатньо легко формалізується за допомогою функції опору фідера. Наприклад, для вузлової схеми живлення при русі навантаження першою колією справедливим співвідношенням

$$\Delta U'_k(x, x_k) = \begin{cases} I_{F1}(x_k) \cdot f_{F1}(x), & 0 \leq x \leq x_k; \\ I_{F3}(x_k) \cdot f_{F3}(x), & x_k < x \leq L; \end{cases} \quad (2.26)$$

$$\Delta U''_k(x, x_k) = \begin{cases} I_{F2}(x_k) \cdot f_{F1}(x), & 0 \leq x \leq l_c; \\ I_{F4}(x_k) \cdot f_{F3}(x), & l_c < x \leq L. \end{cases} \quad (2.27)$$

На рис. 2.24 приведені графічні інтерпретації функцій, що описуються рівняннями (2.26)-(2.27), які являють собою кусочно-лінійні залежності. При зміні розташування тягового навантаження максимальна точка цих функцій описуватиме траєкторію, що визначається функцією опору даної схеми живлення (штрихова лінія).

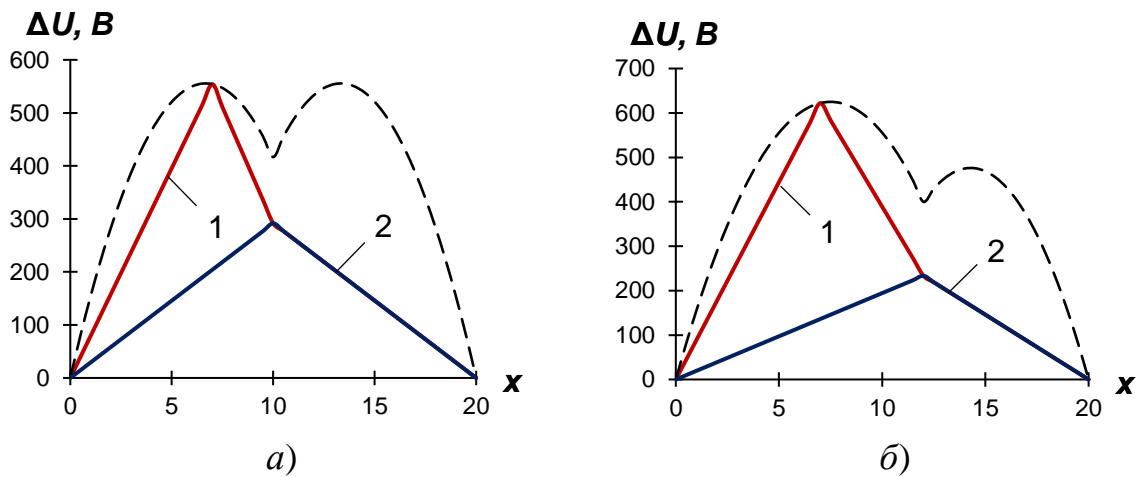


Рис. 2.24. Функції розподілу спаду напруги для симетричної (а) та несиметричної (б) вузлової схеми живлення: 1 – на попутній колії; 2 – на суміжній колії

Втрати потужності в тяговій мережі за допомогою представлених методів можна визначити двома способами. Використовуючи струми фідерів та функції опору фідерів можна визначити втрати потужності за складовими, а саме

$$\Delta P(x) = \sum_{i=1}^{N_F} I_{F_i}^2(x) \cdot f_{F_i}(x), \quad (2.28)$$

де  $N_F$  – кількість фідерів, для розглядуваної схеми  $N_F = 4$ .

Формула (2.28) буде корисна, якщо необхідно розділити загальні втрати потужності в мережі між тяговими підстанціями або фідерами. Аналогічний результат, тільки загалом, може бути отриманий і загальною формулою, що використовує струм навантаження і загальну функцію опору, тобто

$$\Delta P(x) = I^2(x) \cdot f(x). \quad (2.29)$$

Графічні інтерпретації функціональних залежностей, що отримані в результаті розрахунків за формулами (2.28), (2.29) приведені на рис. 2.25 на прикладі симетричної та несиметричної вузлової схеми живлення.

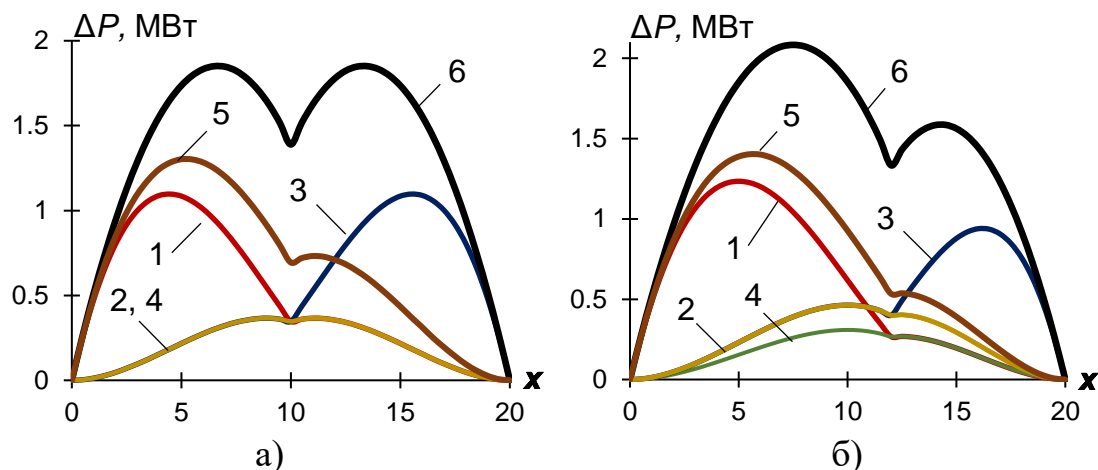


Рис. 2.25. Розподіл втрат потужності для симетричної (а) та несиметричної (б) вузлової схеми живлення: 1-4 – складові, що відповідають фідерам тягових підстанцій; 5 – втрати, що припадають на одну підстанцію; 6 – загальні втрати в тяговій мережі

Отримані співвідношення, що приведені вище, в цілому стосуються системи тягового електропостачання постійного струму. Проте, використовуючи комплексну форму уявлення електричних величин, можна замінити геометричні операції над векторами алгебраїчними операціями над комплексними числами, в результаті чого до системи змінного струму можуть бути застосовані всі отримані формули. Окрім застосування комплексних величин, слід також врахувати наявність взаємоіндукції між коліями електрифікованих ділянок змінного струму, які виражатимуться у впливі опору взаємної індукції на розподіл струмів і напруг уздовж ділянки. При цьому для врахування явища взаємоіндукції можна використовувати відомі методи, наприклад, метод багатополісників при розрахунку впливів багатопровідних тягових мереж змінного струму [33, 34].

Розглянутий вище метод розрахунку на основі функцій струморозподілу з використанням запропонованих загальних функцій опору та функцій опору фідерів дозволяє формалізувати розрахунок миттєвих схем для відомих схем живлення однієї міжпідстанційної зони.

Розглянемо особливості визначення функцій струморозподілу для декількох міжпідстанційних зон на прикладі електрифікованої ділянки, із довжиною міжпідстанційної зони  $L$  з кількістю підстанцій  $N$  (рис. 2.26), при цьому як і раніше розташування навантаження враховується змінною  $x$ . Методика розрахунку передбачає побудову схеми заміщення з врахуванням опорів основних ланок (рис. 2.27).

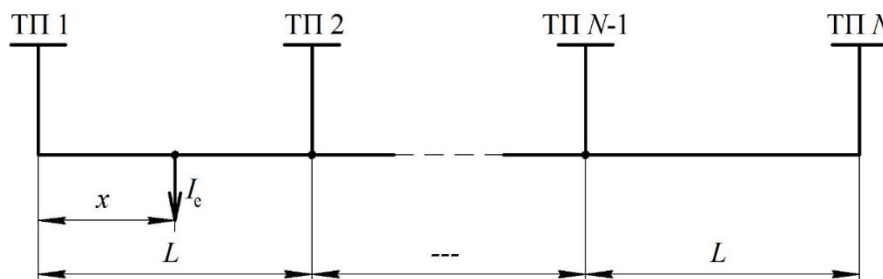


Рис. 2.26. Розрахункова схема ділянки

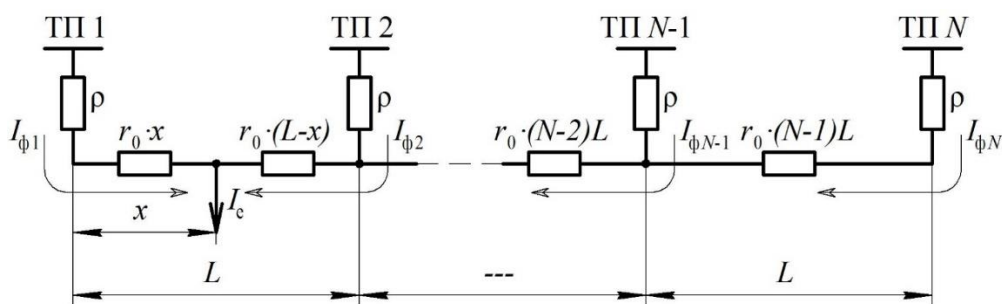


Рис. 2.27. Схема заміщення розрахункової ділянки

Струми фідерів тягових підстанцій відносно координати місцезнаходження навантаження  $x$  визначаються відношенням спаду напруги на загальному опорі системи до опору ділянки, якою проходить струм фідера кожної підстанції, а саме

$$I_{\phi i} = \frac{\Delta U}{R_{\phi i}}, \quad (2.30)$$

де  $\Delta U$  – спад напруги на загальному опорі системи, В;  $R_{\phi i}$  – опір ланки еквівалентної схеми заміщення, Ом, в загальному виді може бути представлений як

$$R_{\phi i} = \rho + r_0 \cdot x,$$

де  $\rho$  – еквівалентний внутрішній опір тягової підстанції, Ом;  $r_0$  – питомий опір тягової мережі, Ом/км.

Стосовно до прийнятої схеми заміщення розрахункової ділянки, опір кожної ланки може бути виражений універсальною формулою

$$R_{\phi_i}(x) = \begin{cases} \rho + r_0 \cdot ((i-1)L - x), & 0 \leq x \leq (i-1)L; \\ \rho + r_0 \cdot (x - (i-1)L), & (i-1)L \leq x \leq (N-1)L. \end{cases} \quad (2.31)$$

У формулі (2.30) спад напруги за законом Ома

$$\Delta U = I_e \cdot R_{\Sigma}, \quad (2.32)$$

де  $I_e$  – струм, що споживається навантаженням, А;  $R_{\Sigma}$  – сумарний опір еквівалентної схеми заміщення (загальний опір системи).

Після підстановок і перетворень виразу, що визначає  $R_{\Sigma}$  та скорочень, отримаємо шуканий вираз для функцій струморозподілу кожного фідера

$$\phi_i = \frac{1}{\sum_{j=1}^N \frac{R_i}{R_j}}, \text{ або } \phi_i = \frac{1}{R_i \sum_{j=1}^N \frac{1}{R_j}}. \quad (2.33)$$

В якості прикладів розрахунку за даною методикою на рис. 2.28-2.32 показані функції струморозподілу, струми фідерів тягових підстанцій, напруга на струмоприймачі електровозу та втрати потужності в тяговій мережі для ділянки з 5-ма тяговими підстанціями.

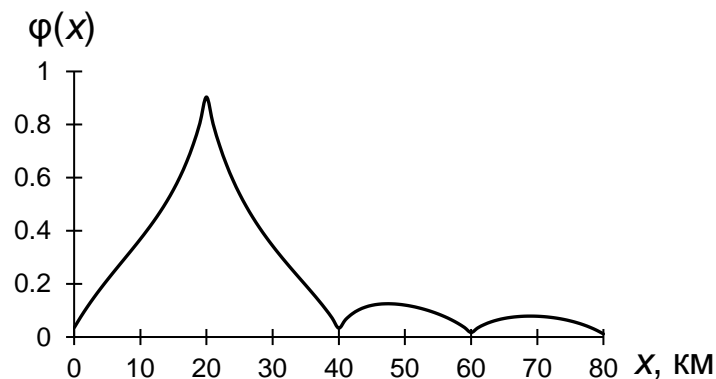


Рис. 2.28. Функція струморозподілу фідера другої тягової підстанції

Для спрощень на графічних ілюстраціях прийнято, що всі підстанції є однотипними, мають однаковий внутрішній опір та однаковий рівень напруги, тип контактної мережі ділянок і відстані між суміжними підстанціями однакові. Розрахунки виконані для двох варіантів – випадку, коли тягове навантаження визначається значенням струму, і для випадку стабілізації електрорухомим складом споживаної потужності.

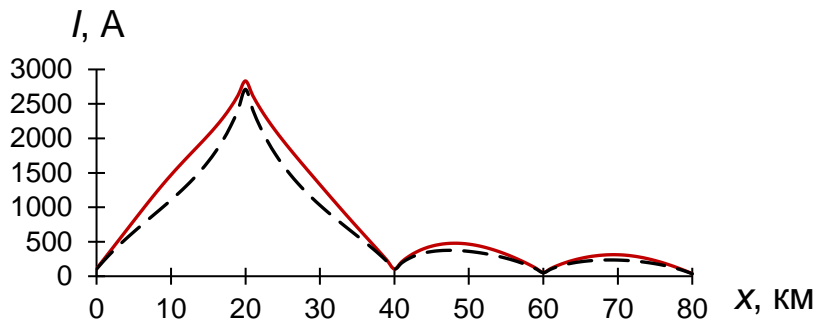


Рис. 2.29 – Струм фідера другої тягової підстанції для випадку стабілізації потужності (а) (суцільна) та без неї (пунктирна)

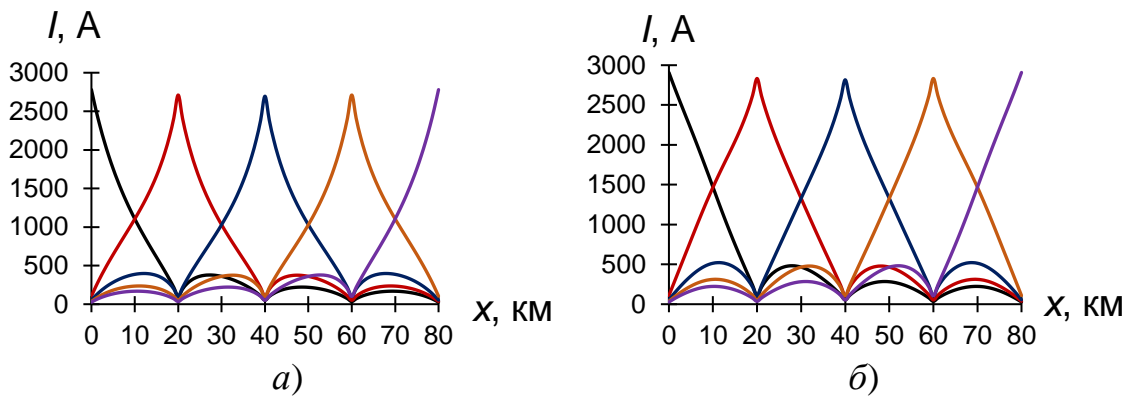


Рис. 2.30 – Струми фідерів усіх тягових підстанцій без стабілізації (а) та при стабілізації потужності (б)

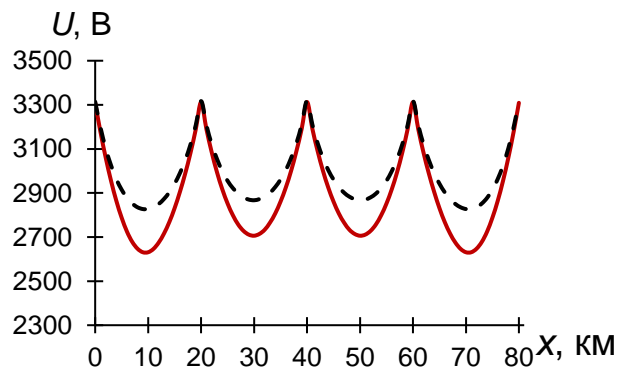


Рис. 2.31. Напряга на струмоприймачі електровозу для випадку стабілізації потужності (пунктирна) та без неї (суцільна)

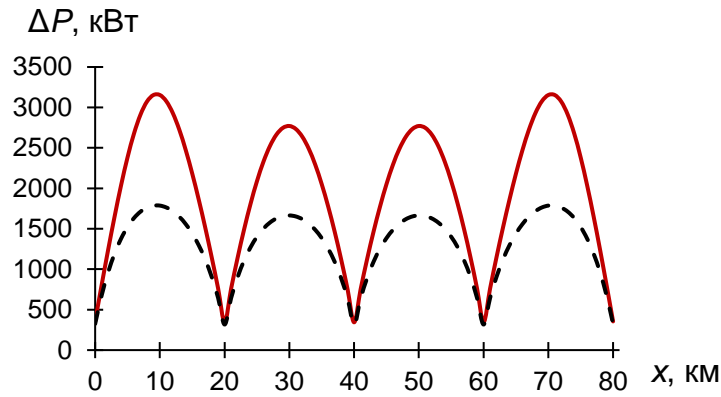


Рис. 2.32. Втрати потужності в тяговій мережі для випадку стабілізації потужності (пунктирна) та без неї (суцільна)

У випадку стабілізації електрорухомим складом споживаної потужності використана методика, яка описана в [34] і полягає у перерахунку струму електровоза за формулою

$$I(x) = \frac{U_{\text{III}} - \sqrt{U_{\text{III}}^2 - 4f(x)P(x)}}{2f(x)}. \quad (2.34)$$

де  $U_{\text{III}}$  – напруга на шинах тягової підстанції.

Для двоколієних ділянок розрахунок функції опору ускладнюється необхідністю врахування схем роздільного, вузлового, паралельного, а в деяких випадках, і неповного паралельного з'єднання. Узагальнена схема заміщення для визначення функції опору двоколієних ділянок приведена на рис. 2.33, яка враховує усі варіанти розташування навантаження відносно вузлів паралельного з'єднання контактних підвісок.

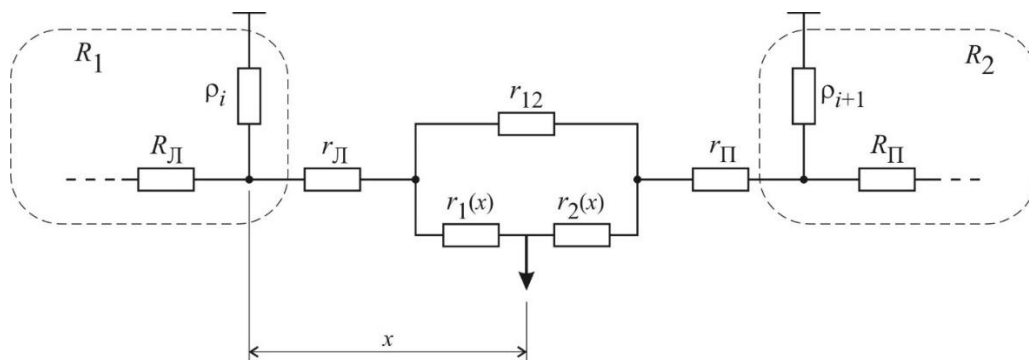


Рис. 2.33. Узагальнена схема заміщення двоколієної ділянки тягової мережі

Слід відзначити, що при визначенні функції опору, врахуванню підлягають лише вузли лівіше та правіше відносно навантаження, оскільки інші не мають впливу для даної координати місцезнаходження. Згортання узагальненої схеми заміщення виконується через перетворення «трикутник – зірка» [34].

Окрім розрахунку функції опору за наявності на ділянці декількох тягових підстанцій, необхідно врахувати можливість протікання вирівнювальних струмів. Для цього методом суперпозиції розраховується струморозподіл в загальній схемі при наявності лише однієї е.р.с. від кожної із загальної кількості тягових підстанцій. Потім результати розрахунків накладаються та визначається результуючий струморозподіл, який визначає закон зміни напруги холостого ходу уздовж ділянки. Такий підхід застосовується для випадку інверторних тягових підстанцій. У випадку некерованих перетворювачів необхідно враховувати можливість їх запирання іншими підстанціями з більшим значенням е.р.с. Отриманий таким чином розподіл напруги холостого ходу уздовж ділянки може бути використаний у формулі (2.34) замість  $U_{ш}$ , але з врахуванням його зміни відносно координати.

Врахування фактичного внутрішнього опору тягових підстанцій ( $\sim 0,1$  Ом) призводить до того, що функція опору  $f(x)$  приймає значення до 30 % менше в точках їх приєднання, чим враховується паралельна робота кожної підстанції на загальне навантаження.

Складності в розрахунках систем тягового електропостачання обумовлені сформованим поглядом на складну систему і процеси, що в ній протікають, постфактум без аналізу та узагальнення причин. Для спрощення та формалізації розрахунків необхідно переглянути розуміння специфіки тягового навантаження та розглядати процеси відносно тягового навантаження в припущенні того, що параметри самої системи тягового електропостачання змінюються в залежності від місцезнаходження навантаження.

Заміна тягового навантаження джерелом ідеального струму для розрахунку миттєвих схем систем тягового електропостачання вносить суттєву похибку в розрахунки струмів фідерів, напруги на струмоприймачеві та втрати потужності. Похибка збільшується зі збільшенням потужності, що реалізується електрорухомим складом. Внаслідок того, що при проектуванні системи електропостачання це явище не враховувалось, погіршуються тягового-енергетичні характеристики існуючого електрорухомого складу при одночасній

експлуатації з сучасним, системи управління якого дозволяють стабілізувати значення тягової потужності.

На підставі балансу та розподілу потужностей для різних схем живлення контактної мережі в аналітичному виді отримані функції опору, які фізично визначають закономірність зміни опору тягової мережі відносно рухомого тягового навантаження. Запропонована методика розрахунку миттєвих схем з використанням аналітичних функцій опору дозволяє виконати електричні розрахунки системи тягового електропостачання при споживанні електрорухомим складом заданої потужності при фактичному значенні напруги на струмоприймачеві.

Розрахунки систем тягового електропостачання в якості складної системи з врахуванням багатьох різноманітних факторів доцільно виконувати за допомогою розробленої методики просторово-часового уявлення, яка ґрунтується на аналітичних кусочно-заданих функціях двох змінних. Запропонований метод розрахунку системи тягового електропостачання полягає в описі закономірності зміни опору тягової мережі аналітичними функціями, які в сукупності з функціями струморозподілу та опору фідерів, дозволяють формалізувати електротехнічні розрахунки електротягових систем та перейти від дискретного до неперервного уявлення.

Виконані розрахунки показали, що кількість тягових підстанцій на ділянці, які приймаються до розрахункової схеми, впливає на рівень напруги на струмоприймачі електровозу, струми фідерів підстанцій та втрати потужності в тяговій мережі. Струми фідерів, за такого випадку, описуються нелінійними залежностями, які можуть бути визначені за допомогою приведених аналітичних виразів. Характер нелінійності залежить також і від наявності систем стабілізації тягової потужності на електрорухомому складі.

Можливість застосування прямого розрахунку електричних величин за допомогою наведеної методики та аналітичні вирази отриманих для різних схем живлення контактної мережі функцій опору дозволяють значно спростити подальші оптимізаційні розрахунки режимів роботи систем тягового електропостачання.

Застосування розробленої методики в цілому можливе в науково-дослідних роботах, що направлені на оптимізацію режимів роботи шляхом виконання оптимізаційних розрахунків чи розрахунків керуючого впливу при посиленні систем тягового електропостачання або застосуванні підходів керованого електропостачання.

Отримані результати придатні для подальшого впровадження в сучасні засоби імітаційного моделювання, оскільки мають можливість аналітичної формалізації, що, в свою чергу, позначається на об'ємах та швидкості виконання розрахунків.

### **2.3.2. Дослідження впливу режимів роботи тягових мереж на ефективність і безпеку суміжних підсистем**

Розробка основних напрямів підвищення енергоефективності СТЕ пов'язана з визначенням причин нераціонального використання електроенергії і резервів енергозбереження, зокрема, його потенціалу. Впровадження заходів щодо енергозбереження в СТЕ, які мають значну кількість нелінійних і нестационарних споживачів, передбачає забезпечення заданих рівнів якості електроенергії (ЯЕ) в системах і ЕМС її елементів. Це пов'язане з тим, що зниження якості напруги і струму в СТЕ призводить до порушення технологічних режимів, зростання рівнів споживання активної і реактивної потужностей, додатковим втратам активної енергії, скороченню терміну служби і зниженню коефіцієнта потужності системи і, відповідно, продуктивності електричного устаткування. Основним фактором цих негативних явищ є, як відомо, розповсюдження кондуктивних перешкод через різноманітні гальванічні зв'язки [33].

Якість електроенергії є істотним чинником, що впливає на ефективність режимів енергосистеми і споживачів. Проблема забезпечення ЯЕ в електричних мережах загального і спеціального призначення набула в останнє десятиліття особливої актуальності. Це викликано широким впровадженням нових прогресивних технологічних процесів і систем і, як наслідок, безперервним зростанням числа і потужності нелінійних, несиметричних і швидкозмінних споживачів електроенергії, засобів цифрової техніки, а також відповідними режимними змінами потякорозподілу в електричних мережах. В Україні положення з ЯЕ погіршується через: недостатню пропускну здатність електричних мереж (особливо низької напруги, довжина ліній яких досягає 50% загальної довжини усіх ліній електропередачі); застарілі методи їх проектування і експлуатації, що не враховують повною мірою показники ЯЕ; відсутність сучасних засобів виміру ЯЕ і ефективних засобів його поліпшення. Численні дослідження режимних параметрів в електричних мережах України

свідчать про те, що основні показники ЯЕ не завжди відповідають існуючим вимогам [33].

Нестаціонарні енергообмінні процеси, які відбуваються в нелінійних колах СТЕ, викликають цілу низку негативних явищ (рис. 2.34) та призводять до погіршення якості електричної енергії. Якість електричної енергії залежить від характеру навантаження споживачів. Безперервна зміна навантаження, характерна для тягових мереж, викликає зміну рівня напруги, несиметрію і несинусоїдальність напруги. Отже, такий же змінний характер матимуть і показники якості електричної енергії. Це посилює складність оцінки їх впливу на роботу споживачів.

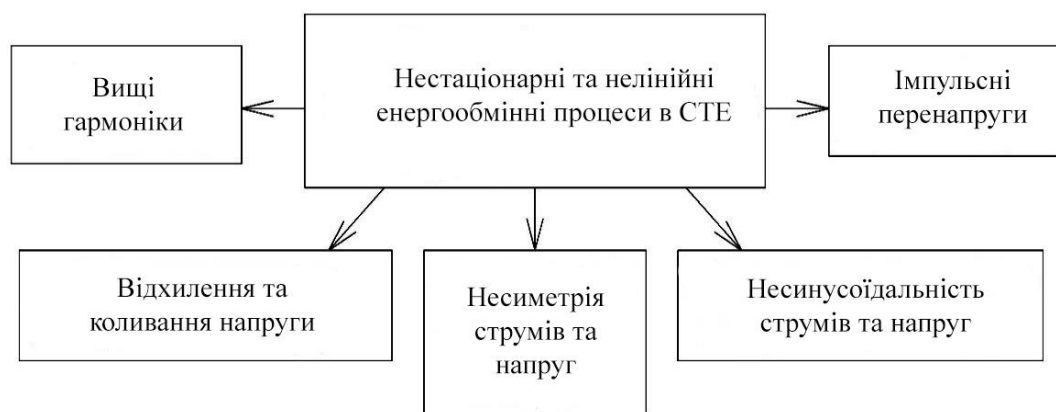


Рис. 2.34. Вплив електромагнітних процесів на якість електроенергії

Оскільки всі відхилення якості електроенергії викликаються падіннями напруги в елементах електропостачання, то вони залежать не тільки від значення навантаження, але і від параметрів системи. Тому параметри системи доводиться вибирати так, щоб не були порушені вимоги, що ставляться до якості електричної енергії.

Питання якості електроенергії та електромагнітної сумісності електрорухомого складу із суміжними підсистемами гостро виникають при передачі енергії рекуперації з систем тягового електропостачання до системи зовнішнього електропостачання. Для електричної тяги змінного струму технічні можливості цього є природними, коли виникає рекуперація і відсутня тягові навантаження поблизу, трансформатор найближчою підстанцією переходить з понижуючого в режим підвищення напруги, чим забезпечується реверсивний потік енергії. В системах тяги постійного струму для забезпечення реверсного потоку енергії напівпровідникові перетворювачі тягових підстанцій повинні виконувати функцію інвертування.

В Україні тягові підстанції постійного струму, що можуть повертати надлишкову енергію рекуперації до живлячих мереж на даний момент експлуатуються лише на деяких гірських ділянках з затяжними ухилами (до 30 %) на Львівській залізниці. Дані ТП постійного струму з інверторами забезпечують передачу надлишкової рекуперативної енергії поїздів з тягової мережі постійного струму (3,3 кВ) до живлячої мережі змінного струму (35, 110 кВ). Оскільки ці ділянки рекуперації є протяжними (10...12 км), то при існуючих швидкостях руху поїздів режими рекуперації є достатньо тривалими і робота інверторів на ТП може вважатись усталеною. Вмикання інверторів відбувається коли напруга на шинах ТП сягає відповідного значення уставки, що для ТП досліджуваних ділянок складає 3550...3600 В.

Для аналізу ефективності роботи інверторних перетворювачів ТП постійного струму на Львівській залізниці було проведено серію синхронізованих вимірювань параметрів енергії рекуперації одночасно на двох суміжних ТП і електровозі що рухався по ділянці між двома ТП у т.ч. в режимі рекуперації (інших споживачів на дослідній ділянці не було). Для дослідження була обрана двоколійна міжпідстанційна зона Скотарське – Воловець, оскільки в напрямку ст. Воловець на ділянці ухил (спуск) сягає 28,4 % і з метою обмеження швидкості поїздів є обов'язковим для використання електричного гальмування. При виконанні вимірювань на ТП застосовані аналізатори якості електроенергії EDL-175, PNA-296. Для вимірювань в силових колах електровозу постійного струму розроблені вимірювальні комплекти з оптичною та радіо-канальною розв'язками з використанням мікроконтролерів ATmega128A3, ATmega128RFA1 та оптичних прийомо-передавачів HFBR-2521 / HFBR-1521 [36]. Загальна схема проведення вимірювань приведена на рис. 1.

Схема приєднання розроблених вимірювальних пристроїв до силових кіл електровозу ВЛ11М приведена на рис. 2.35. Зовнішній вигляд дільника напруги з пристроєм узгодження та макетною платою радіопередавача ATmega128RFA1 зображено на рис. 2.36.

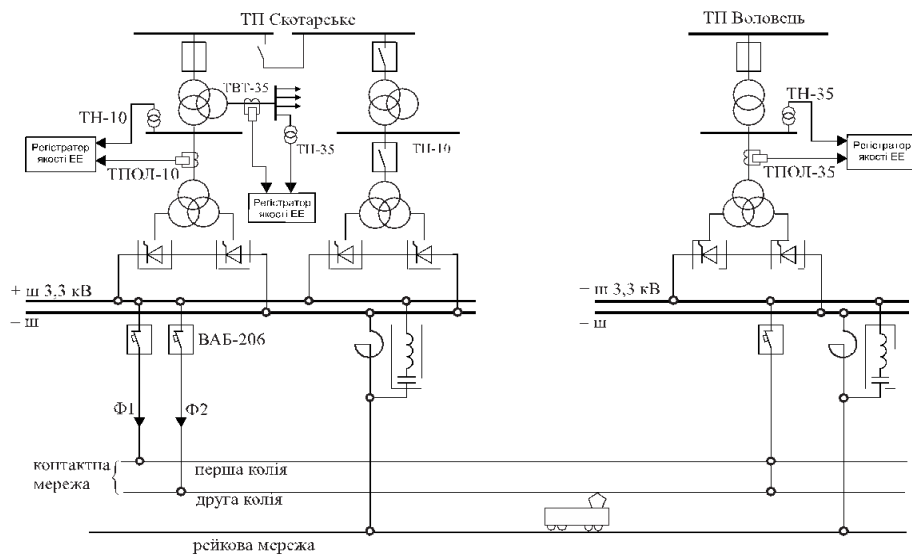


Рис. 2.35. Загальна схема проведення вимірювань

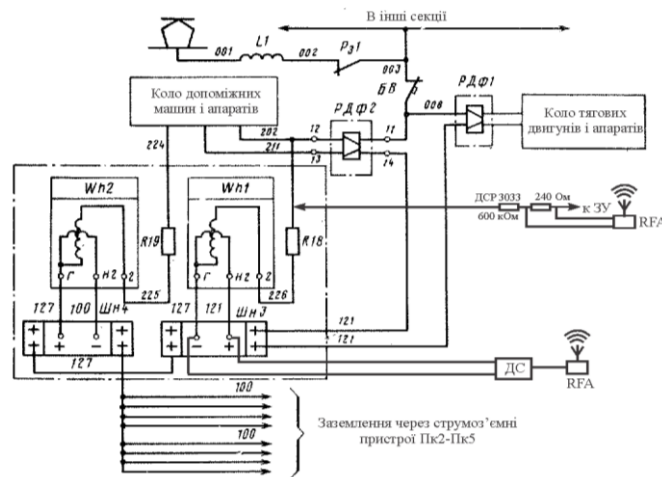


Рис. 2.36. Схема підключення вимірювальних пристроїв до силових кіл ЕРС

Також було виконано ряд вимірювань на ділянці Клепарів – Стрий – Ходорів, яка має консольне живленням тягової мережі у одноколійному напрямку ст. Ходорів, при русі якою спостерігались зниження напруги на струмоприймачі нижче 3,0 кВ. Для цього випадку зафіксоване значення напруги величиною 2727 В при загальному струмі електровозу 506 А. Результати вимірювань параметрів електроспоживання (напруги на струмоприймачі і струму в режимах тяги, вибігу і рекуперації) електровоза ВЛ11М на дослідних ділянках приведені на рис. 2.37-2.38.

Попередній аналіз отриманих результатів показав, що для нормально встановленої схеми живлення режим напруги в тяговій мережі відповідав встановленим вимогам. Мінімальне значення

напруги для двосторонньої схеми складало 2770 В у режимі тяги при загальному струмі електровозу 1220 А.

Найвище значення напруги на струмоприймачі зафіксоване в режимі рекуперації, яке складає 3947,7 при загальному струмі рекуперації електровозу 760 А.

Співставлення потужності дослідного електровозу з потужностями двох суміжних ТП по стороні змінного струму (на вводах 35 кВ понижуючих трансформаторів), які характерно відображають перехід перетворювачів ТП з випрямного в інверторний режим приведені на рис. 2.39.

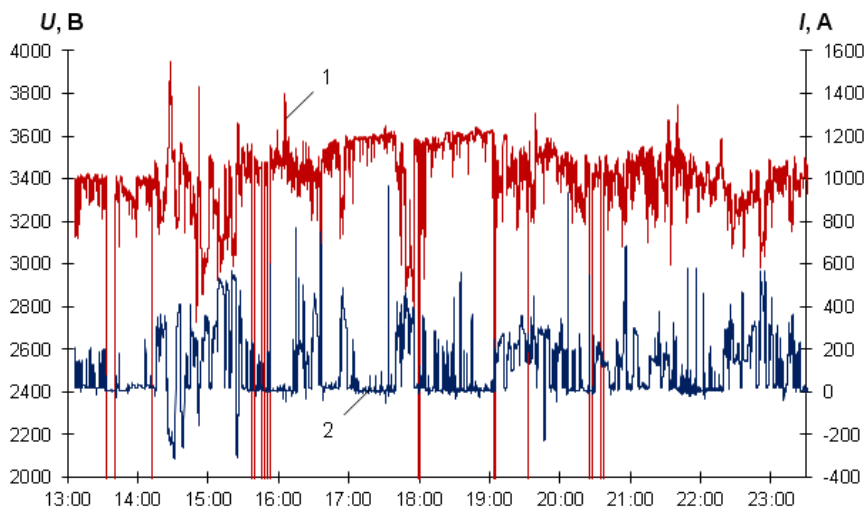


Рис. 2.37. Параметри електроспоживання електровоза ВЛ11М в напрямку Клепарів-Стрий-Ходорів: 1 – напруга на струмоприймачі; 2 – тяговий струм (рекуперація при струмі  $I < 0$ )

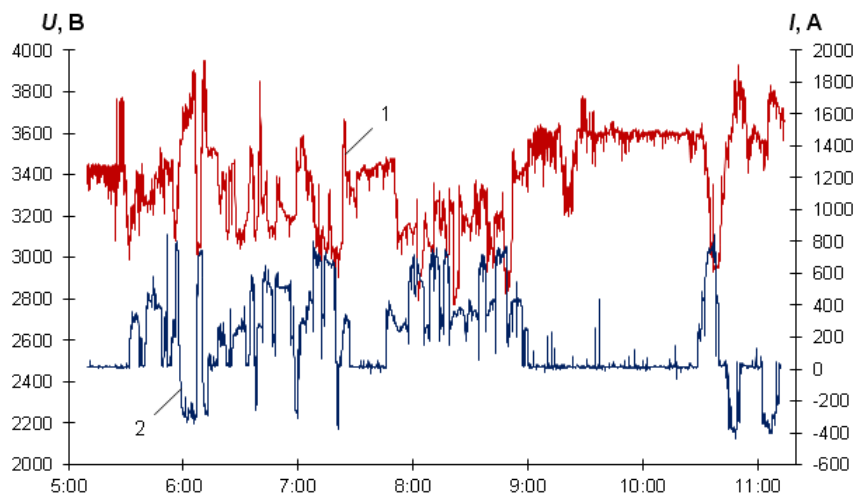


Рис. 2.38. Параметри електроспоживання електровоза ВЛ11М на ділянці Клепарів-Стрий-Воловець: 1 – напруга; 2 – струм (рекуперація при  $I < 0$ )

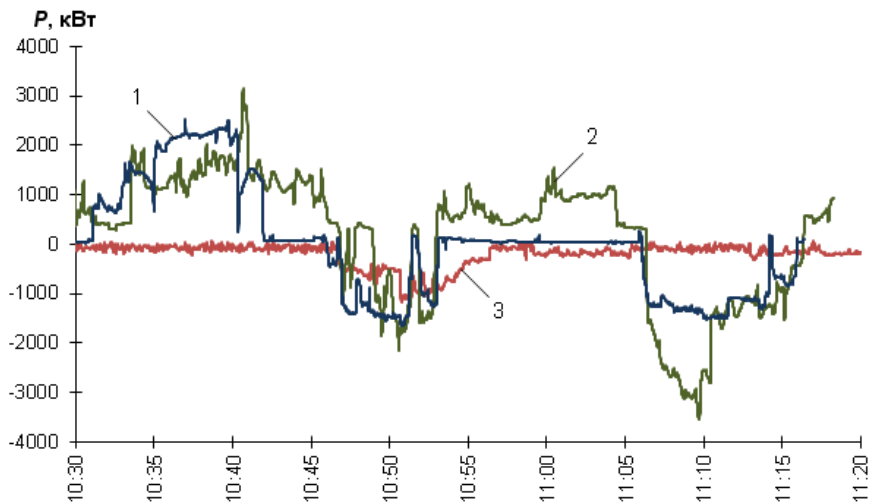


Рис. 2.39. Співставлення потужностей дослідного електровозу та тягових підстанцій: 1 – дослідний електровоз; 2 – ТП В; 3 – ТП С

Для приєднань на ТП не зафіксовано значних порушень вимог щодо рівня напруги. Максимальне значення потужності, яка генерувалась зі сторони тягового навантаження, зафіксована на рівні 1100 кВт для однієї підстанції і на рівні 3000 кВт для іншої. В інверторному режимі роботи тягової підстанції спостерігалось загальне підвищення коефіцієнта сумарних гармонійних спотворень, що є технологічною особливістю роботи тиристорного інвертора. В табл. 2.4 наведені значення основних показників якості енергії рекуперації, виміряні зі сторони живлячої мережі 35 кВ.

Таблиця 2.4

**Основні показники якості електроенергії в режимі рекуперації**

Показники по напрузі	Значення	Показники по струму	Значення
Відхилення, %	9,38	Гармонійні спотворення, %	20,8
Гармонійні спотворення, %	3,8	в т.ч. непарними, %	20,7
в т.ч. непарними, %	3,1	парними, %	1,8
парними, %	0,3	інтергармоніками, %	0,6
інтергармоніками, %	0,2	Коефіцієнт амплітуди	1,55
Несиметрія, %	0,5	Коефіцієнт форми	1,09
Частота, Гц	50,0	Несиметрія, %	1,39

Аналіз реєстрограмм потужності суміжних ТП (рис. 2.39) і положення рекуперативного поїзда між ними свідчить про

нерівномірний розподіл потужності рекуперації по відповідним ТП. Зокрема спостерігалася передача 75...80 % енергії рекуперації через віддалену ТП, що знаходилася на відстані до електровоза близько 90 % довжини міжпідстанційної зони (проміжок часу 10:45...10:55). В такому разі вплив на режими роботи інвертуючих ТП може здійснювати живляча мережа, тобто її режим напруги (завантаження). Також зафіксовано, що на даних ділянках при рекуперації на струмоприймачі електровоза напруга сягала значення (3,95 кВ), при якому можливе порушення режиму рекуперації. В даному випадку це приводило до вимикання однієї секції електровозу з режиму рекуперації.

Крім того, в деяких випадках було зафіксовано, що сумарна потужність рекуперації на вводах суміжних ТП перевищувала потужність рекуперації поїзда (рис. 6, проміжок часу 11:05...11:15). Оскільки за технічними умовами проведення вимірів на досліджуваній ділянці інших поїздів графіком руху не передбачалося і рекуперація застосовувалась лише на одному електровозі, дане явище може пояснюватися лише перетоками енергії по тяговій мережі від сусідніх ТП (працюючих у випрямному режимі), що знаходилися за межами дослідної ділянки.

На рис. 2.40-2.42 приведені осцилограми, які характеризують роботу ТП в інверторному режимі. Форми фазних напруг трифазної системи 35 кВ мають характерні спотворення, спричинені перехідними процесами при комутації тиристорів при переходах між фазами інвертора.

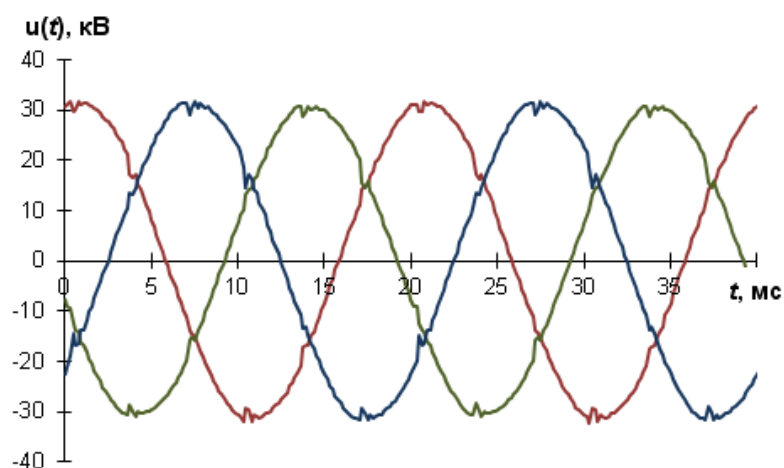


Рис. 2.40. Осцилограми фазних напруг в мережі 35 кВ

Первинні струми трифазного інвертора мають несиметричну форму, що наближається до ступінчастої 6-пульсного перетворювача. Симетрія між струмами різних фаз в цілому дотримується і не перевищує 1,4 %. Кут навантаження в інверторному режимі зафіксовано на рівні  $-131,9^\circ$ , що вказує на перетікання реактивної потужності через нестачу  $48,1^\circ$  до повного протифазного режиму між струмом і напругою.

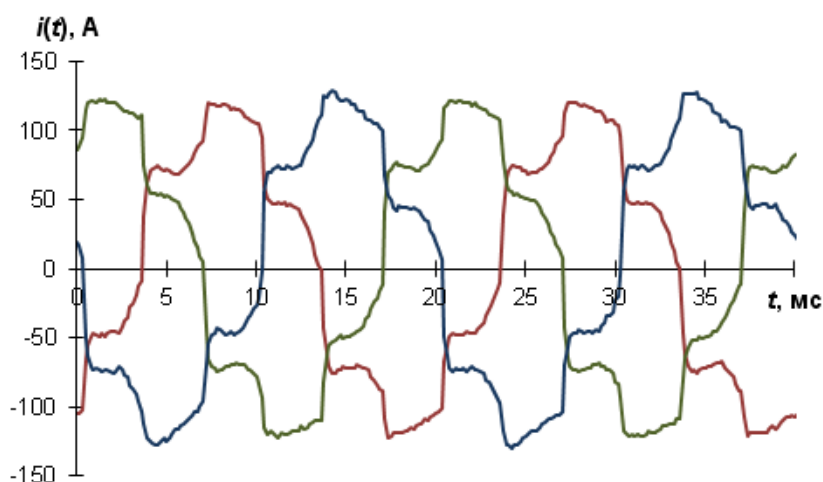


Рис. 2.41. Осцилограми фазних струмів в мережі 35 кВ

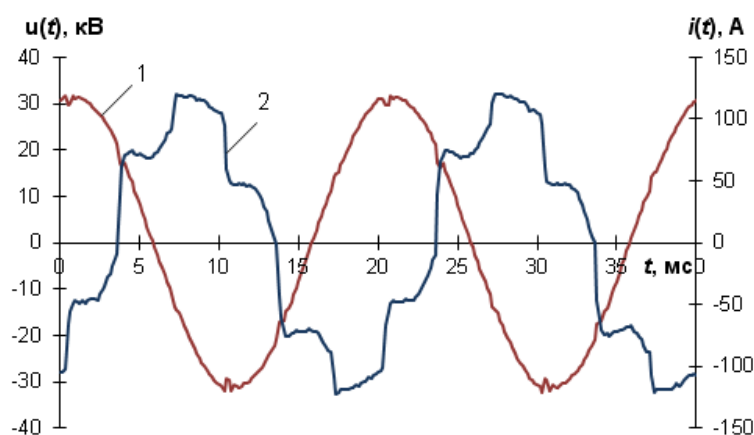


Рис. 2.42. Осцилограми напруги і струму в одній фазі мережі 35 кВ: 1 – напруга; 2 – струм

Отже ефект енергозбереження та енергоефективності на ділянках тягового електропостачання з інверторними тяговими підстанціями обмежений можливими порушеннями режимів рекуперації енергії за умовами граничнодопустимої напруги на струмоприймачах транспортних засобів. На ефективність перетоків надлишкової

рекуперативної енергії з тягової мережі 3,3 кВ до живлячої мережі середньої (високої) напруги змінного струму суттєвий вплив здійснює режим роботи живлячої енергосистеми, тобто при недостатньому її навантаженні у вузлах приєднання ТП існує обмеження допустимого рівня напруги на виході інвертора.

Розглянуті вище процеси потребують врахування при проектуванні і виборі енергетичного обладнання тягових підстанцій для ділянок з інтенсивною рекуперацією в частині розробки раціональних алгоритмів керування силовими пристроями.

## Список використаних джерел до розділу 2

1. Бондаренко І. О., Курган Д. М., Арбузов М. А. *Надійність залізничної колії*. Дніпро: Акцент ПП, 2015. 156 с.
2. Kurhan D., Fischer S., Khmelevskiy V. Mathematical Modeling of the Rail Track Superstructure–Subgrade System. *Geotechnics*. 2025. Vol. 5(1). P. 20. <https://doi.org/10.3390/geotechnics5010020>
3. Kurhan D., Leibuk Y. Research of the Reduced Mass of the Railway Track. *Acta Technica Jaurinensis*. 2020. Vol. 13(4). P. 324–341. <https://doi.org/10.14513/actatechjaur.v13.n4.563>
4. Kurhan M. B., Kurhan D. M. Railway Track Representation in Mathematical Model of Vehicles Movement. *Science and Transport Progress*. 2017. No. 6(72). P. 40–48. <https://doi.org/10.15802/stp2017/118380>
5. Kurhan D., Fischer S. Modeling of the Dynamic Rail Deflection Using Elastic Wave Propagation. *Journal of Applied and Computational Mechanics*. 2022. Vol. 8(1). P. 379–387. <https://doi.org/10.22055/jacm.2021.38826.3290>
6. Kurhan D. M. Modeling of Development Vertical Deformation of Railway Track. *Science and Transport Progress*. 2016. No. 1(61). P. 100–108. <https://doi.org/10.15802/stp2016/61003>
7. Даніленко Е. І. *Залізнична колія: підруч. для вищ. навч. закл.* Київ: Інпрес, 2010. Т. 2. 456 с.
8. Даніленко Е. І., Рибкін В. В. *Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість: ЦП-0117*. Київ: Транспорт України, 2004. 64 с.
9. Патласов О. М., Рибкін В. В., Палейчук Ю. В. [та ін.] *Технічні вказівки щодо оцінки стану рейкової колії за показниками колієвимірювальних вагонів...: ЦП-0267*. Київ: Транспорт України, 2012. 25 с.
10. Basse D., Ngene B., Akinwumi I., Akpan V., Bamigboye G. Ballast Contamination Mechanisms: A Criterial Review of Characterisation and Performance Indicators. *Infrastructures*. 2020. Vol. 5. 94. <https://doi.org/10.3390/infrastructures5110094>
11. Basse D., Olukanni D. O., Ngene B. U., Bamigboye G. Experimental Characterization of Track Ballast Under Triple-Fouling Condition: Evidence from Selected Nigerian Railways. *Cogent Engineering*. 2021. Vol. 8. 1932240. <https://doi.org/10.1080/23311916.2021.1932240>

12. Indraratna B., Armaghani D. J., Correia A. G., Hunt H., Ngo T. Prediction of Resilient Modulus of Ballast Under Cyclic Loading Using Machine Learning Techniques. *Transportation Geotechnics*. 2022. Vol. 38. 100895. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100895>
13. Wang L., Meguid M., Mitri H. Impact of Ballast Fouling on the Mechanical Properties of Railway Ballast: Insights from Discrete Element Analysis. *Processes*. 2021. Vol. 9. 1331. <https://doi.org/10.3390/pr9081331>
14. Xiao J., Zhang X., Zhang D., Xue L., Sun S., Stránský J., Wang Y. Morphological Reconstruction Method of Irregular Shaped Ballast Particles and Application in Numerical Simulation of Ballasted Track. *Transportation Geotechnics*. 2020. Vol. 24. 100374. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100374>
15. Juhász E., Fischer S. Investigation of Railroad Ballast Particle Breakage. *Pollack Periodica*. 2019. Vol. 14. P. 3–14. <https://doi.org/10.1556/606.2019.14.2.1>
16. Mohammed A., Amartey Y. D., Murana A. A., Lawan A. Comparative Evaluation of Railway Ballast Degradation. *FUOYE Journal of Engineering and Technology*. 2022. Vol. 7. P. 90–95. <https://doi.org/10.46792/fuoyejet.v7i1.751>
17. Eller B., Fischer S. Tutorial on the Emergence of Local Substructure Failures in the Railway Track Structure and Their Renewal with Existing and New Methodologies. *Acta Technica Jaurinensis*. 2021. Vol. 14. P. 80–103. <https://doi.org/10.14513/actatechjaur.00565>
18. Pittman R., Jandová M., Król M., Nekrasenko L., Paleta T. The Effectiveness of EC Policies to Move Freight from Road to Rail: Evidence from CEE Grain Markets. *Research in Transportation Business & Management*. 2020. Vol. 37. 100482. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2020.100482>
19. Pshinko O., Patlasov O., Andrieiev V., Arbuzov M., Hubar O., Hromova O., Markul R. Research of Railway Crushed Stone Use of 40–70 mm Fraction. *Proceedings of the 22nd International Scientific Conference Transport Means*, 3 October 2018, Trakai, Lithuania. P. 170–178.
20. Shvets A. O. Dynamic Interaction of a Freight Car Body and a Three-Piece Bogie During Axle Load Increase. *Vehicle System Dynamics*. 2022. Vol. 60. P. 3291–3313. <https://doi.org/10.1080/00423114.2021.1942930>
21. Sysyn M., Przybylowicz M., Nabochenko O., Liu J. Mechanism of Sleeper–Ballast Dynamic Impact and Residual Settlements Accumulation in Zones with Unsupported Sleepers. *Sustainability*. 2021. Vol. 13. 7740. <https://doi.org/10.3390/su13147740>
22. Havryliuk V. Fault Detecting of Turnouts Using DWT and ANN. *Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems*, 21–24 September 2021, Kremenchuk, Ukraine. <https://doi.org/10.1109/MEES52427.2021.9598734>
23. Hu Q., Lam H. F., Alabi S. A. Use of Measured Vibration of In-Situ Sleeper for Detecting Underlying Railway Ballast Damage. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*. 2015. Vol. 15. 1540026. <https://doi.org/10.1142/S021945541540026X>
24. Курган Д. М. Моделювання накопичення деформацій залізничної колії на основі ентропії системи. *Наука та прогрес транспорту*. 2015. No. 4(58). P. 99–109. <https://doi.org/10.15802/stp2015/49215>

25. Kurhan D. Entropy Application for Simulation the Ballast State as a Railway Element. *Acta Polytechnica Hungarica*. 2023. Vol. 20(1). <https://doi.org/10.12700/APH.20.1.2023.20.5>
26. Benedetto F., Tosti F., Alani A. M. An Entropy-Based Analysis of GPR Data for the Assessment of Railway Ballast Conditions. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2017. Vol. 55(7). P. 3900–3908. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2683507>
27. Kurhan D., Kurhan M., Horváth B., Fischer S. Determining the Deformation Characteristics of Railway Ballast by Mathematical Modeling of Elastic Wave Propagation. *Applied Mechanics*. 2023. Vol. 4(2). P. 803–815. <https://doi.org/10.3390/applmech4020041>
28. Gerber, U.; Zoll, A.; Fengler, W.: Fahrzeugbasierte Beurteilung des Herzstückverschleißes. In: Der Eisenbahningenieur, September 2013, Nr. 09, S.26 – 30.
29. Sysyn, M., Gerber, U., Kluge, F., Nabochenko, O., & Kovalchuk, V. (2019). Turnout remaining useful life prognosis by means of on-board inertial measurements on operational trains. *International Journal of Rail Transportation*, 8(4), 347–369. <https://doi.org/10.1080/23248378.2019.1685918>
30. N. Attoh-Okine, A. Lasisi. Principal components analysis and track quality index: A machine learning approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 91:230–248, 2018. doi:10.1016/j.trc.2018.04.001.
31. M. Kuhn, K. Johnson. *Applied Predictive Modeling*. Springer-Verlag New York, 2013, M. Trauth. *MATLAB recipes for earth sciences*. fourth edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-46244-7>
32. Системи електропостачання електричного рухомого складу залізниць і метрополітенів : підручник / С. В. Панченко, В. С. Блиндюк, М. М. Бабаєв та ін. – Харків : УкрДУЗТ, 2018. – 311 с.
33. Енергетика тягових мереж : монографія / В. Г. Сиченко, В. Г. Кузнецов, Д. О. Босий, О. І. Саблін ; за заг. ред. д-ра техн. наук, проф. В. Г. Сиченка. – Дніпро : Вид-во ПФ «Стандарт-Сервіс», 2017. – 210 с.
34. Bosyi, D., Sablin, O., & Kosariev, Y. (2020). *Computing and Optimization for DC Power Systems of Electric Transport*, World Scientific Publishing Europe Ltd., <https://doi.org/10.1142/q0229>
35. Комп'ютерна програма «Інтелектуальна система електропостачання транспорту» (Intelligence System of Electrified Transport): Свідectво про реєстрацію авторського права на твір № 60711 / Босий Д. О., Косарєв Є. М.; Україна / Зареєстровано 20.07.2015. – К.: ДСІВУ, 20-07-2015.
36. Ефективність рекуперації електроенергії в системі електротранспорту з інверторними тяговими підстанціями постійного струму / О. І. Саблін, Д. О. Босий, В. Г. Кузнецов та ін. // Вісн. Вінницького політехн. ін-ту. – 2016. – № 2. – С. 72-78.
37. Моделювання взаємодії електрорухомого складу в режимі рекуперації електроенергії з розосередженою системою тягового електропостачання / О. І. Саблін, В. Г. Кузнецов, О. І. Бондар та ін. // Електрифікація транспорту. – 2014. – № 7. – С. 46-54.

## Розділ 3

# **Технології підвищення безпеки транспортної інфраструктури на основі вдосконалення методів її діагностики, утримання та енергоефективності**

## **3.1. Підвищення надійності та ефективності електропостачання поїздів на основі вдосконалення режимів тягових мереж**

### **3.1.1. Розподілені системи онлайн-моніторингу та регулювання напруги в тяговій мережі**

Енергоефективність транспортної інфраструктури є невідомою складовою частиною її безпеки і надійного функціонування. Окрім необхідного рівня технічної надійності елементів та інфраструктурних об'єктів важливим фактором функціонування транспорту є енергетична безпека (гарантоване енергозабезпечення), яка у тому числі визначається станом економічності та енергоефективності інфраструктури. Цей стан характеризується здатністю стабільно працювати в умовах пошкодження окремих елементів, належного функціонування транспорту в умовах енергодефіциту, ступенем гнучкості і децентралізації енергосистеми, захищеності ключових енергетичних візлів, економічності та диверсифікації енергоресурсів.

Використання в системах енергозабезпечення транспорту відновлюваних джерел і накопичувачів енергії дозволяє покращити вище згадані властивості, однак потребує розробки відповідних алгоритмів управління режимами тягових мереж з метою забезпечення

надійного електропостачання та рекуперації поїздів, що є особливо важливим в умовах енергодефіциту.

Швидкість доставки вантажів залізницею визначається технічним станом колії, характеристиками рухомого складу та надійністю електропостачання. Залізничний транспорт є критичною інфраструктурою і споживачем електроенергії 1 категорії із резервуванням зовнішнього електропостачання. Можливі відхилення режимів систем зовнішнього електропостачання суттєво впливають на надійність тягового електропостачання та швидкість руху поїздів, що в умовах значної втрати генерованих потужностей та частковій втраті стійкості єдиної енергосистеми, переривами в електропостачанні тощо може негативно сказатися на ефективності транспортних процесів.

Рух поїзда відносно системи електропостачання складається з трьох складових – режим електроспоживання, режим рекуперації та режим холостого ходу. В такому разі важливого значення набуває питання оптимізації режимів тягового електропостачання, яке буде гарантувати необхідний рівень напруги в тяговій мережі при максимальних тягових навантаженнях та рекуперації електроенергії при гальмуванні поїздів, що є важливим елементом енергоефективності залізниць, особливо в умовах енергодефіциту.

Система енергозабезпечення тяги постійного струму представляє собою розподілену у просторі сукупність електротехнічних пристроїв для живлення електропоїздів [1]. Напруга в контактній мережі залежить від великої кількості взаємопов'язаних і взаємовпливаючих факторів – організації руху поїздів, режиму ведення кожного поїзду та режиму роботи пристроїв електропостачання. Значення швидкості руху поїзду в значній мірі залежить від напруги на струмоприймачі електропоїзду, яка визначається параметрами системи електропостачання та поїзною ситуацією. Збільшення об'єму перевезень та організація руху швидкісних та високошвидкісних поїздів призводить до того, що пристрої тягового електропостачання обмежують пропускну спроможність ділянки електрифікованої залізниці внаслідок зниження напруги на струмоприймачі електрорухомого складу нижче нормованих значень. Як показав досвід експлуатації, відомі способи регулювання напруги на шинах тягових підстанцій не вирішили цю проблему повною мірою, через збільшення втрат потужності на міжпідстанційній зоні та відповідних експлуатаційних витрат.

Тому, вирішується задача пошуку альтернативного способу забезпечення номінального рівня напруги за допомогою розширення інформативності режиму напруги в тяговій мережі.

В загальному випадку, на основі невизначеності розташування навантажень та їх значення на міжпідстанційній зоні, з врахуванням режиму роботи системи зовнішнього електропостачання, вимагається визначити потужність, якої не вистачає для забезпечення кожній одиниці електрорухомого складу номінального рівня напруги. Нехай маємо деяку міжпідстанційну зону, на якій може знаходитись різна кількість навантажень  $I_1, I_2, \dots, I_n$ . З врахуванням можливості різного рівня напруги на шинах суміжних тягових підстанцій, необхідно визначити залежність струму пункту підсилення  $I_{RP}$ , який при зміні поїзної ситуації дозволить забезпечити на струмоприймачі кожного поїзду номінальний рівень напруги.

Так в [2] приведено спосіб, який незалежно від кількості поїздів на міжпідстанційній зоні та їх електроспоживання, обмежує нижній рівень напруги на струмоприймачах ЕРС (рис. 3.1).

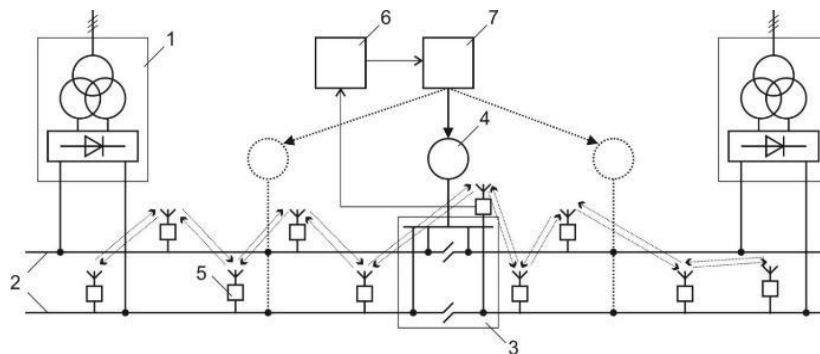


Рис. 3.1. Схема електропостачання ділянки електрифікованої залізниці зі стабілізацією напруги: 1 – тягова підстанція; 2 – контактна мережа; 3 – пост секціонування; 4 – підсилюючий пункт тягової мережі; 5 – пристрій вимірювання напруги з бездротовою передачею даних; 6 – блок декодування даних; 7 – система управління

Такий спосіб передбачає побудову розподіленої системи вимірювань для визначення розподілу напруги уздовж міжпідстанційної зони та встановлення підсилюючого пункту на посту секціонування для зменшення втрат напруги до струмоприймачів електровозів.

Для визначення необхідного струму підсилюючого пункту для забезпечення заданого рівня напруги запишемо рівняння балансу втрат напруги в контактній мережі. В загальному вигляді матимемо

$$\Delta U'_{\kappa}(I_{\text{вир}}) + \Delta U_{\text{пп}}(x_{\text{пп}}, x_{U_{\text{min}}}, I_{\text{вир}}, I_{\text{пп}}) = \Delta U_3 + \Delta U_{\text{пп}}(I_{\text{пп}}), \quad (3.1)$$

де  $\Delta U'_{\kappa}(I_{\text{вир}})$  – падіння напруги в контактній мережі з урахуванням вирівнювального струму  $I_{\text{вир}}$ ;  $\Delta U_{\text{пп}}(I_{\text{вир}}, I_{\text{пп}})$  – падіння напруги від струму підсилюючого пункту розташованого в координаті  $x_{\text{пп}}$ , зі струмом  $I_{\text{пп}}$  в точці  $x_{U_{\text{min}}}$  з урахуванням вирівнювального струму  $I_{\text{вир}}$ ;  $\Delta U_{\text{вир}}(I_{\text{вир}})$  – втрати напруги від вирівнювального струму  $I_{\text{вир}}$ ;  $\Delta U_3$  – втрата напруги до струмоприймача електровозу, при якій на останньому буде забезпечено заданий рівень напруги;

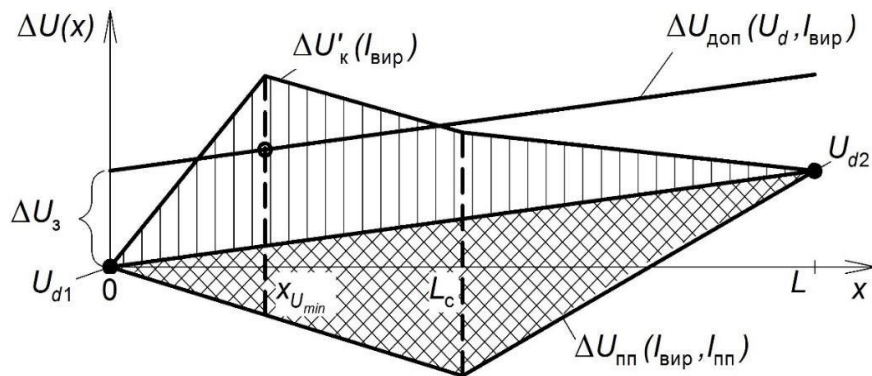


Рис. 3.2. Пояснення до рівняння балансу втрат потужності (3.1)

$$\Delta U_3 = U_{d1} - U_3, \quad (3.2)$$

де  $U_{d1}$  – значення випрямленої напруги на шинах першої тягової підстанції;  $U_3$  – заданий рівень напруги.

$$\Delta U'_{\kappa}(I_{\text{вир}}) = \sum_{i=1}^{n_1} \Delta U_{\kappa 1i} + \sum_{i=1}^{n_2} \Delta U_{\kappa 2i} + \Delta U_{\text{вир}}(I_{\text{вир}}), \quad (3.3)$$

де  $\Delta U_{\kappa 1i}, \Delta U_{\kappa 2i}$  – втрати напруги від одного поїзду на першій та другій колії відповідно;  $n_1, n_2$  – кількість поїздів на першій та другій колії відповідно

$$\Delta U_{\text{пп}}(x_{\text{пп}}, x_{U_{\text{min}}}, I_{\text{вир}}, I_{\text{пп}}) = I_{\text{ук}}(x_{\text{пп}}, I_{\text{пп}}) r_0 x_{\text{пп}} + I_{\text{ук}}(x_{\text{пп}}, I_{\text{пп}}) \cdot r_0 (L_c - x_{\text{пп}}) + I_{\text{ук}}(x_{\text{пп}}, I_{\text{пп}}) \cdot r_0 (x_{\text{пп}} - L_c) + \Delta U_{\text{вир}}(I_{\text{вир}}), \quad (3.4)$$

де  $I_{\text{ук}}(x_{\text{пп}}, I_{\text{пп}})$  – струм в контактній мережі від підсилюючого пункту, який знаходиться в точці  $x_{\text{пп}}$ ,

$$I_{\text{ук}}(x_{\text{пп}}, I_{\text{пп}}) = \varphi_1(x_{\text{пп}}) \cdot I_{\text{пп}} + \varphi_2(x_{\text{пп}}) \cdot I_{\text{пп}} + \varphi_4(x_{\text{пп}}) \cdot I_{\text{пп}}, \quad (3.5)$$

де  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_4$  – функції струморозподілу для даної схеми живлення,

$$\Delta U_{\text{пп}}(x_{\text{пп}}, x_{U_{\text{min}}}, I_{\text{вир}}, I_{\text{пп}}) = I_{\text{пп}} \cdot f(x) + \Delta U_{\text{вир}}(I_{\text{вир}}), \quad (3.6)$$

де  $f(x)$  – функція опору, яка визначається із співвідношення струму підсилюючого пункту та розподілу цього струму в контактній мережі.

Тепер рівняння заданого рівня напруги матиме вигляд:

$$I_{\text{пп}} \cdot f(x) + \Delta U_{\text{вир}}(I_{\text{вир}}) = \Delta U_{\text{з}} + \Delta U_{\text{вир}}(I_{\text{вир}}) - \Delta U'_{\text{к}}(I_{\text{вир}}), \quad (3.7)$$

З рівняння (3.7) знаходимо струм підсилюючого пункту:

$$I_{\text{пп}} = \frac{\Delta U_{\text{з}} - \Delta U'_{\text{к}}(I_{\text{вир}})}{f(x)}, \quad (3.8)$$

Як видно з виразу (3.8) струм  $I_{\text{пп}}$  при виконанні умови  $\Delta U_{\text{з}} < \Delta U'_{\text{к}}(I_{\text{вир}})$  має від'ємне значення, що вказує на необхідність генерації додаткової потужності. Перевірка даної умови виконується в кожен момент часу по обох коліях ділянки. До розрахунку автоматично приймається колія з більшою втратою напруги. У випадку невиконання поставленої умови підсилюючий пункт в роботу не вмикається. Детальний алгоритм роботи системи зображено на рис. 3.3

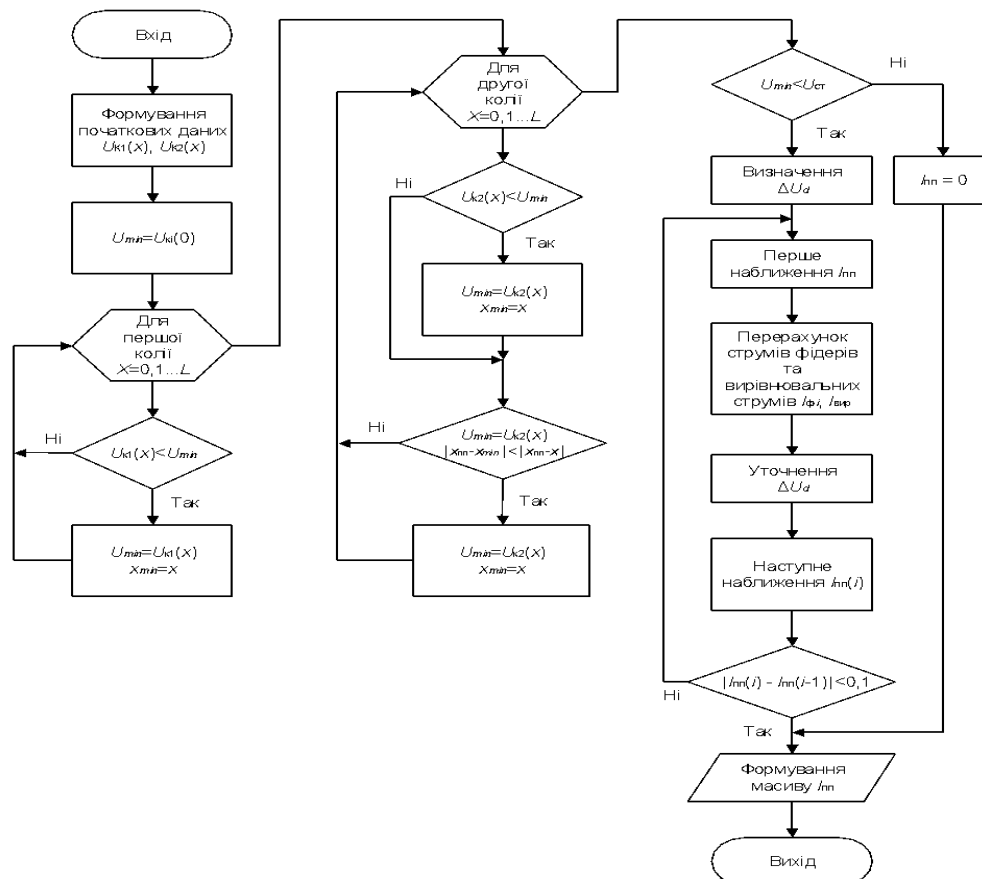


Рис. 3.3. Алгоритм роботи системи з обмеження нижнього рівня напруги на струмоприймачах ЕРС

Результат роботи системи при русі чотирьох поїздів розрахунковою ділянкою з напругою на шинах суміжних тягових підстанцій 3500 В та стабілізацією на рівні 3100 В зображено на рис. 3.4. При цьому необхідна потужність підсилюючого пункту становить близько 2 МВт, а втрати електроенергії в тяговій мережі за час виконання графіка руху зменшились на 32 %.

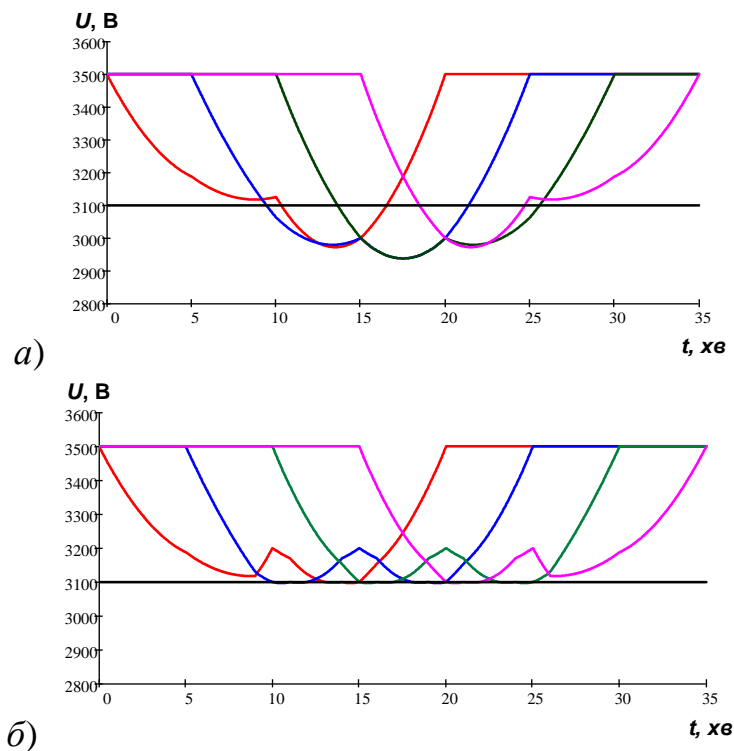


Рис. 3.4. Напруга на струмоприймачах електровозів без підсилюючого пункту (а) та при роботі підсилюючого пункту (б)

Як видно з рис. 3.4 за допомогою запропонованої системи стає можливим обмеження нижнього рівня напруги, але залишається не вирішеним питання про оптимальне значення напруги для забезпечення найбільш раціонального енергетичного режиму роботи СТЕ.

Для дослідження даного питання проводились розрахунки на математичній моделі при реалізації графіка руху чотирьох поїздів з мінімальним міжпоїзним інтервалом. Дослідна ділянка довжиною 20 км отримувала живлення за вузловою схемою, тип тягової мережі М120+2МФ100+А185+Р65 (рис. 3.5). Підсилюючий пункт встановлено на посту секціонування. Розрахунки проводились по чергово для різних рівнів напруг на шинах суміжних тягових підстанцій від 2700 до 4000 В. При цьому змінювалась задана межа мінімального значення

напруги на струмоприймачах ЕРС в діапазоні від 2700 В до значення напруги на шинах тягових підстанцій. Час реалізації графіка руху становив 35 хв. В розрахунках приймалися наступні спрощення: електровози споживали однаковий і незмінний струм  $I_e = 2000$  А, пост секціонування знаходився в середині міжпідстанційної зони, напруга на шинах суміжних тягових підстанціях приймалася рівною та незмінною в часі, внутрішні опори тягових підстанцій мали однакове значення.

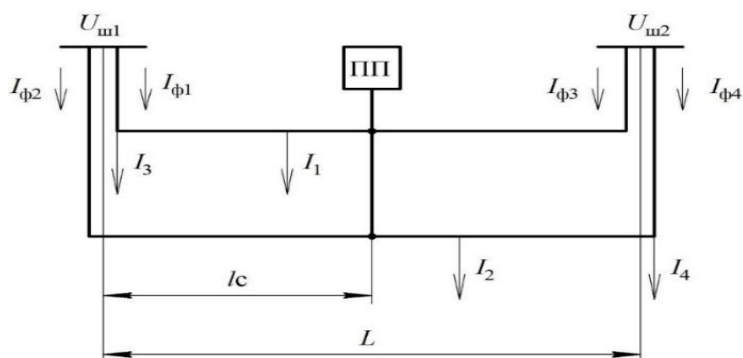


Рис. 3.5. Миттєва схема розрахункової ділянки

Для ряду напруг на шинах тягових підстанцій отримано зміну втрат електроенергії в тяговій мережі в залежності від рівня напруги стабілізації. Розраховано потужності підсилюючого пункту в залежності від напруги на шинах тягових підстанцій і рівня стабілізації та побудовані відповідні номограми (рис. 3.6).

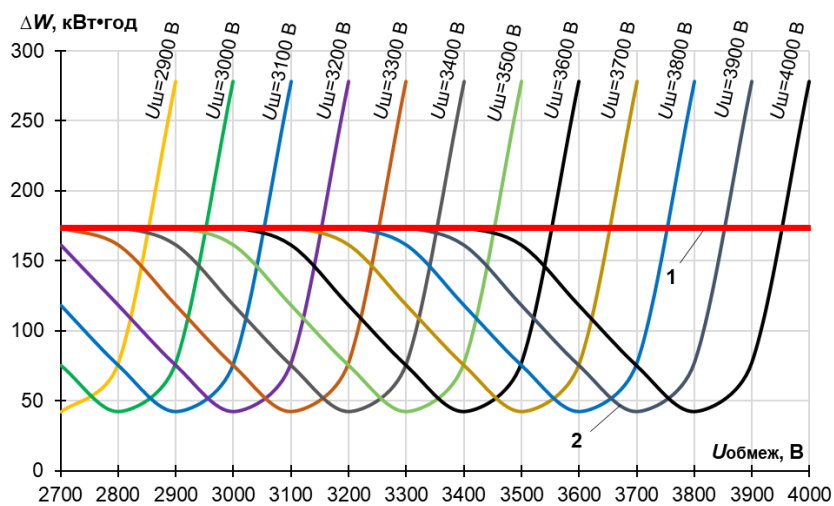


Рис. 3.6. Розрахункові криві втрат електричної енергії: 1 – базовий розрахунок без підсилення; 2 – підсилення тягової мережі підсилюючими пунктами

Для ділянки рис. 3.7 проведено варіантні розрахунки при реалізації графіка руху поїздів, наведеного на рис. 3.8.

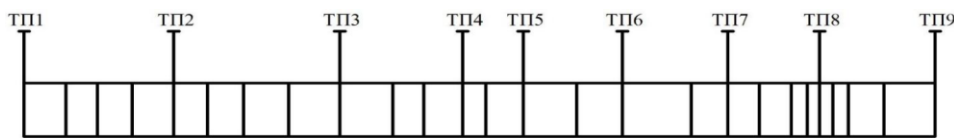


Рис. 3.7. Розрахункова ділянка

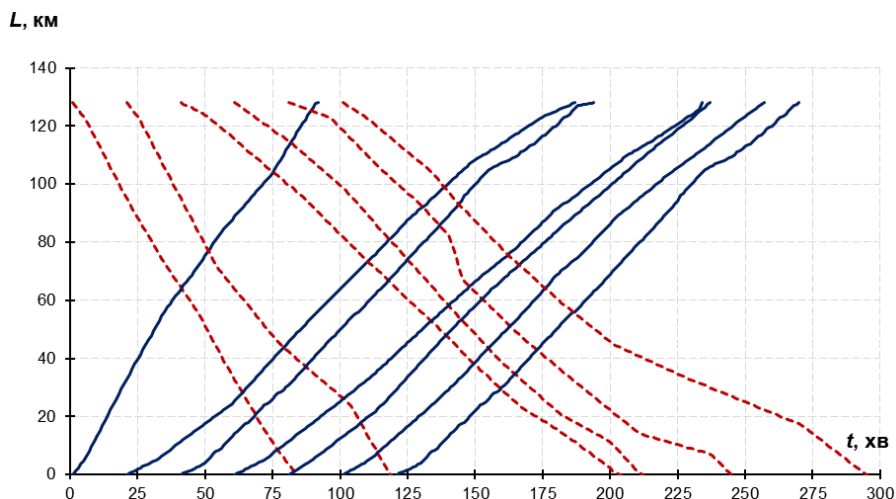


Рис. 3.8. Графік руху поїздів ділянкою на рис. 3.7

Для визначення оптимальних рівнів напруги проводились розрахунки на математичній моделі при поступовому підвищенні напруги одночасно на шинах всіх тягових підстанцій від 3300 до 3600 В. При цьому змінювалась задана межа мінімального значення напруги на струмоприймачах ЕРС в діапазоні від 2900 В до значення напруги на шинах тягових підстанцій. Час реалізації графіка руху становив 300 хв. В результаті виконаних досліджень, для ряду напруг на шинах тягових підстанцій отримано відсоток зміни втрат електроенергії в тяговій мережі в залежності від рівня обмеження напруги приведено на рис. 3.9.

На графіку, по осі абсцис відкладено рівень обмеження напруги в тяговій мережі у відсотках по відношенню до напруги на шинах тягових підстанцій, по осі ординат – відсоток зменшення втрат електроенергії по відношенню до базового розрахунку без підсилення системи (за 100 % прийнято рівень втрат електроенергії при базовому розрахунку без підсилення).

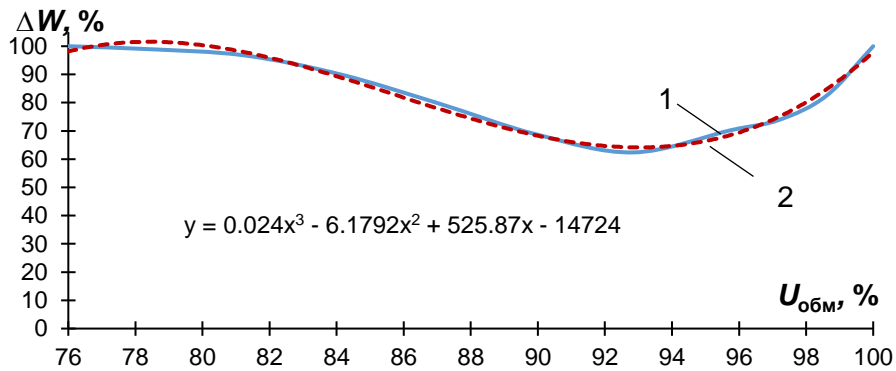


Рис. 3.9. Залежність рівня втрат потужності в тяговій мережі від рівня обмеження напруги: 1 – розрахункова, 2 – апроксимована криві

Для визначення раціонального рівня обмеження напруги, отриману залежність було апроксимовано поліномом третього ступеня та визначено точки екстремуму відсотка втрат електроенергії, як функції від рівня обмеження напруги.

$$\Delta W(U_{\text{обм}}) = -A \cdot U_{\text{обм}}^3 + B \cdot U_{\text{обм}}^2 - C \cdot U_{\text{обм}} + D \quad (3.4)$$

де поліноміальні коефіцієнти  $A = 0,024$ ;  $B = 6,1792$ ;  $C = 525,87$ ;  $D = 14724$ .

Максимальному зменшенню втрат електроенергії відповідає напруга обмеження на рівні 93 % від напруги на шинах тягових підстанцій. Таким чином, залежність раціонального рівня обмеження напруги в тяговій мережі від значення напруги холостого ходу тягових підстанцій має вигляд

$$U_{\text{обм}} = 0,93 \cdot U_{\text{хх}}, \quad (3.5)$$

де  $U_{\text{обм}}$  – рівень обмеження напруги в тяговій мережі;  $U_{\text{хх}}$  – значення напруги холостого ходу тягових підстанцій.

Отримані результати розрахунків показують, що при нарузі холостого ходу тягових підстанцій 3500 В та за інших рівних обставин, обмеження нижнього рівня напруги на значенні 3000 В дозволяє зекономити на втратах електроенергії до 4 % в порівнянні з базовим розрахунком без підсилення, а при обмеженні нижнього рівня напруги на значенні  $0,93U_{\text{хх}}$  (3255 В) економія на втратах електроенергії зростає до 33%.

Проаналізувавши отриману залежність на рис. 3.9 можна відзначити, що доцільно підтримувати напругу на струмоприймачах на рівні, що відповідає інтервалу спаду кривої втрат електроенергії від вихідного до мінімального значення. Забезпечення рівня напруги

близького до значення на шинах ТП недоцільне через зростання втрат енергії в результаті надлишкового регулювання та значного збільшення встановленої потужності підсилюючого пункту. Рациональний рівень напруги в контактній мережі можна визначити із співставлення величини втрат електроенергії та потужності підсилюючих пункту, необхідної для його забезпечення. Однак оптимальний рівень напруги в контактній мережі буде також залежати від строку окупності підсилюючого пункту, розрахованого на необхідну потужність. Остаточне визначення заданого рівня напруги повинно також враховувати потреби локомотивного господарства в неперервному та енергоефективному виконанні експлуатаційної роботи.

На рис. 3.10-3.14 показано результати розрахунку розробленої системи тягового електропостачання для реальної ділянки. Розглянута ділянка «НД Вузол-П'ятихатки» Придніпровської залізниці має вісім мжпідстанційних зон, та дев'ять тягових підстанцій.

При розрахунках враховано реальне струмоспоживання в залежності від профілю ділянки, внутрішнього опору тягових підстанцій та параметрів схем живлення. Напруга холостого ходу тягових підстанцій становить 3500 В, при цьому, відповідно до (3.5), напруга обмеження встановлена на рівні 3255 В.

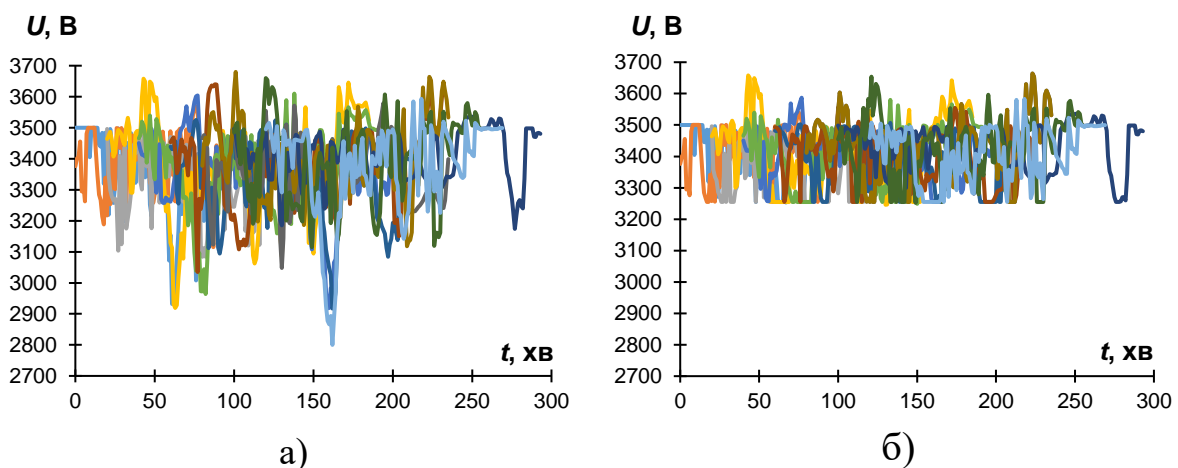


Рис. 3.10. Напруга на струмоприймачах ЕРС: а – базовий розрахунок без підсилення; б – підсилення тягової мережі підсилюючими пунктами

Оцінка напруги на струмоприймачах електрорухомого складу показала, що при підсиленні системи тягового електропостачання усереднене значення математичного очікування напруги 13 електровозів зросло на 47 В при цьому 95 % довірчий інтервал його

зміни звузився вдвічі (рис. 3.11). Значення математичного очікування напруги на струмоприймачі окремого ЕРС зросло на 25 – 90 В при звууженні 95 % довірчого інтервалу на 30 % (рис. 3.12).

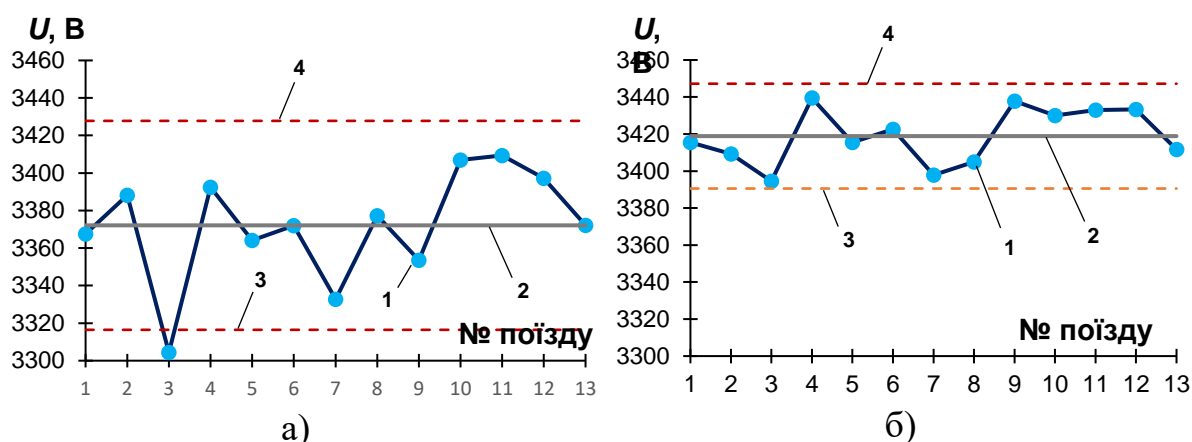


Рис. 3.11. Математичне очікування напруги на струмоприймачах ЕРС: а – базовий розрахунок без підсилення; б – підсилення тягової мережі підсилюючими пунктами; 1 – математичне очікування напруги на струмоприймачі окремого ЕРС; 2 – усереднене значення математичного очікування; 3 – нижня довірча межа; 4 – верхня довірча межа

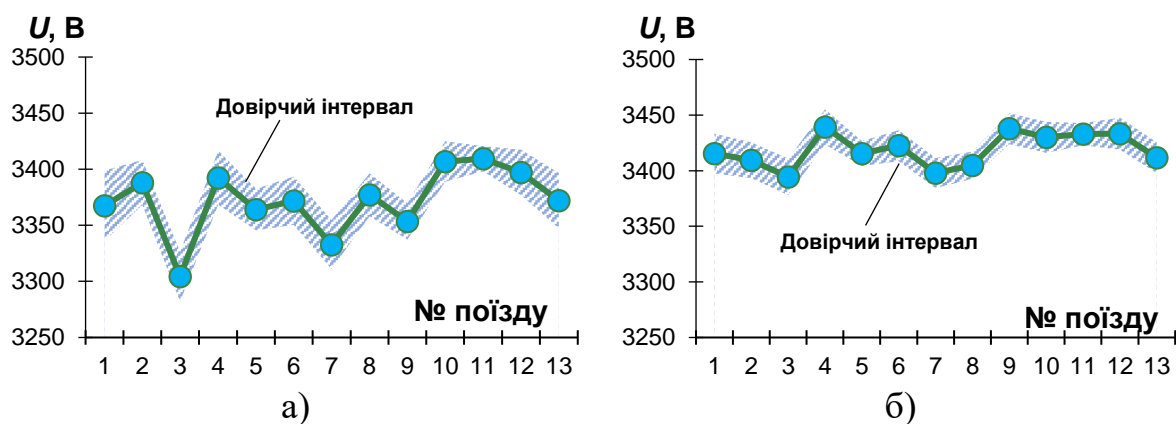


Рис. 3.12. Математичне очікування напруги та її довірчий інтервал зміни на струмоприймачах ЕРС: а – базовий розрахунок без підсилення; б – підсилення тягової мережі підсилюючими пунктами

Обмеження нижнього рівня напруги на струмоприймачах, підвищення її середнього значення та звууження діапазону зміни при децентралізованій системі живлення дозволило зменшити миттєві втрати потужності в тяговій мережі до 75 %. За час виконання заданого графіка руху поїздів (рис. 3.8) зменшення миттєвих втрат потужності

забезпечило економію електричної енергії в межах 33 % в порівнянні з розрахунком без підсилення (рис. 3.13).

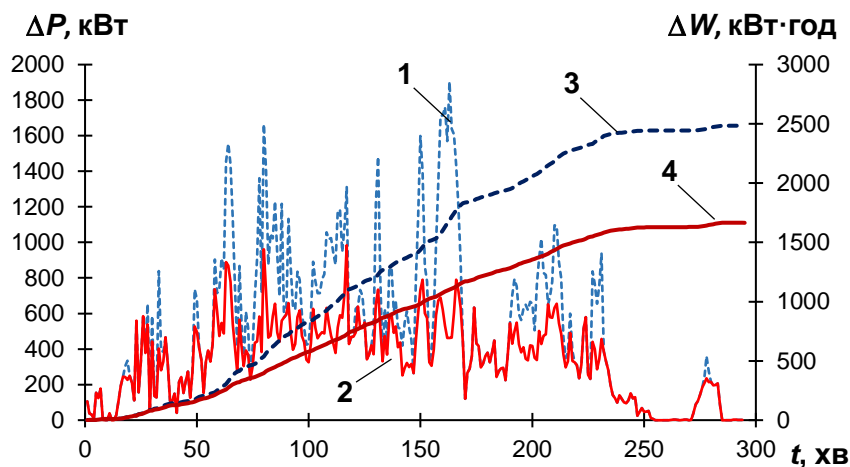


Рис. 3.13. Втрати в тяговій мережі: 1 – миттєві втрати потужності при розрахунку без підсилення; 2 – миттєві втрати потужності при підсиленні тягової мережі підсилюючими пунктами; 3 – втрати електроенергії при розрахунку без підсилення; 4 – втрати електроенергії при підсиленні тягової мережі підсилюючими пунктами

Для забезпечення заданого рівня обмеження напруги та максимального зменшення втрат електричної енергії в розрахунках були використані наступні параметри пунктів підсилення для кожної міжпідстанційної зони (табл. 3.1).

Таблиця 3.1

Параметри підсилюючих пунктів розподіленої системи								
№ ПП	ПП1	ПП2	ПП3	ПП4	ПП5	ПП6	ПП7	ПП8
Середній струм ПП, А	300.1	515.2	239.3	165.7	267.8	193.3	422.1	180.4
Установлена потужність, кВт	1000	1600	800	630	1000	630	1600	630
Струм обмеження, А	2000							

Підвищення рівня обмеження напруги на струмоприймачах ЕРС призвело до необхідності збільшення встановленої потужності підсилюючих пунктів, але, в свою чергу, це також сприяє зменшенню

споживання електричної енергії тяговими підстанціями з системи зовнішнього електропостачання (рис. 3.14).

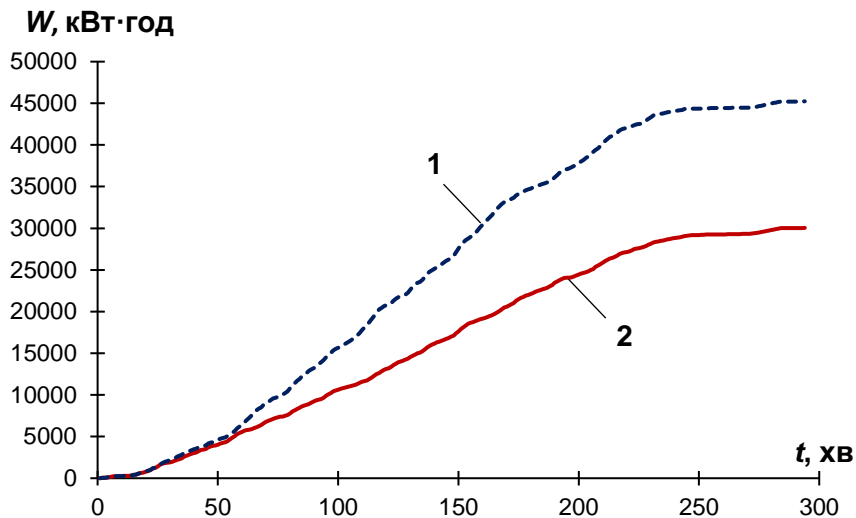


Рис. 3.14. Витрати електроенергії в тягових підстанціях на тягу поїздів: 1 – базовий розрахунок без підсилення; 2 – підсилення тягової мережі підсилюючими пунктами

В результаті виконання поставлених розрахунків на дослідній ділянці втрати електроенергії при виконанні заданого графіка руху поїздів склали 2,5 МВт·год. За допомогою розподіленого електропостачання можливо зменшити ці втрати до значення 1,66 МВт·год. Крім того, при децентралізованому електропостачанні забезпечується заданий рівень обмеження напруги на струмоприймачах ЕРС, підвищується її середнє значення та звужується діапазон зміни, що позитивно впливає на безпеку руху та експлуатацію електрорухомого складу.

Важливим заходом щодо покращення енергозабезпечення електричної тяги поїздів є децентралізація тягового електропостачання із використанням допоміжних міні-джерел електроенергії, одним із варіантів яких можуть виступати відновлювані джерела, наприклад сонячні міні-електростанції.

Переважає більшість сонячних панелей встановлюється на нерухомому опорі та орієнтується рівно на південь, кут нахилу обирається оптимальним для отримання максимальної потужності. Таке встановлення найбільш надійне, має мінімальну вартість та прискорює монтаж. Але значно збільшити виробництво електроенергії в порівнянні з нерухомо закріпленими сонячними панелями можливо

за рахунок використання сонячних трекерів. Встановлення фотопанелі на сонячний трекер дає змогу підвищити рівень генерації електроенергії на 30-40 %. Потужність сонячної електростанції для живлення підсилюючого пункту визначається за формулою:

$$P_{cn} = \frac{E_c \cdot k \cdot P_{inc}}{E_{inc}} \quad (3.5)$$

де  $P_{cn}$  – потужність сонячної електростанції, Вт;  $E_c$  – споживана енергія, Вт·год на добу;  $E_{inc}$  – середньомісячна інсоляція кВт·год/м<sup>2</sup>/день;  $P_{inc}$  – потужність інсоляції на земній поверхні на м<sup>2</sup>;  $k$  – коефіцієнт втрат на заряд-розряд акумулятора, перетворення напруги.

Для розрахунку сонячної станцій в роботі було створено програму для автоматичного підрахунку всіх необхідних даних. В залежності від вихідних даних таких як: напруга на виході однієї панелі, номінальний струм панелі, кількість панелей на одній опорі програма розраховує всі вихідні параметри сонячної станції. Необхідна потужність сонячної електростанції для живлення кожного підсилюючого пункту у відповідності до його потужності (табл. 3.1) наведено в табл. 3.2, алгоритм роботи представлено на рис. 3.15.

Таблиця 3.2

**Потужність сонячних електростанцій**

№ ПП	ПП1	ПП2	ПП3	ПП4	ПП5	ПП6	ПП7	ПП8
Потужність СЕС, МВт	1,22	1,95	0,97	0,77	1,22	0,77	1,95	0,77

На основі струмів підсилення (рис. 3.17) визначено ємності накопичувачів (табл. 3.3).

В системі розподіленого електропостачання необхідно контролювати рівні напруги у заданому діапазоні на струмоприймачах електрорухомого складу при русі міжпідстанційною зоною будь-якої кількості поїздів. Для цього розроблено спосіб контролю рівнів напруги в контактній мережі безпосередньо на струмоприймачах електрорухомого складу незалежно від кількості поїздів на міжпідстанційній зоні (рис. 3.1) [3].

Суть даного способу полягає в тому, що для визначення напруги в контактній мережі електрифікованої ділянки постійного струму вимірюють напругу на шинах суміжних тягових підстанціях та посту секціонування всередині міжпідстанційної зони. При цьому додатково вимірюють розподіл напруги уздовж міжпідстанційної зони за

допомогою пристроїв вимірювання напруги в мережі постійного струму з бездротовою передачею даних через оптимально встановлену відстань в межах 1–3 км, після чого обчислюють необхідну потужність та регулюють величину її генерації системою управління, враховуючи кількість підсилюючих пунктів, які розподілені уздовж електрифікованої залізниці постійного струму.

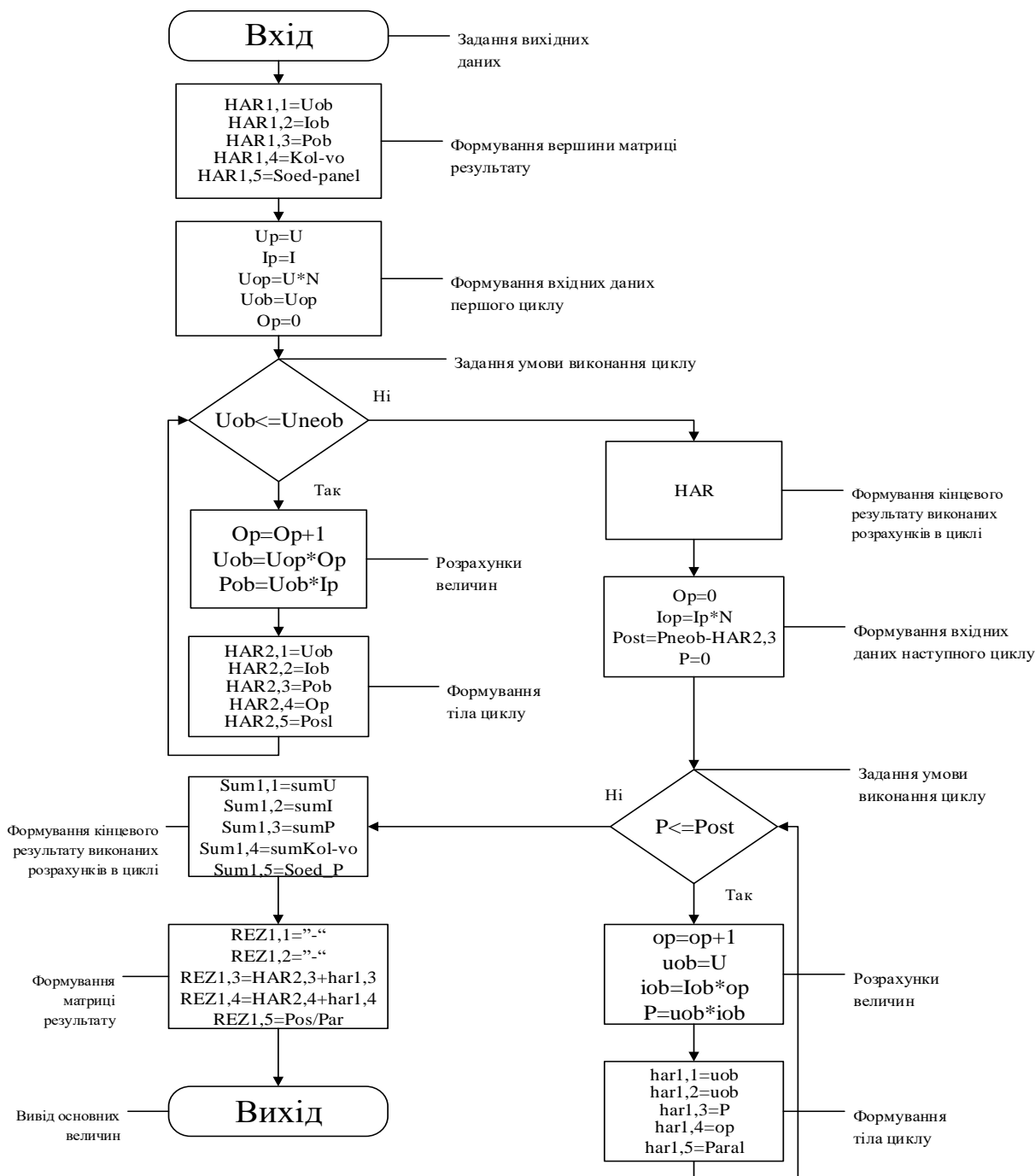


Рис. 3.16. Алгоритм визначення кількості панелей для живлення підсилюючого пункту

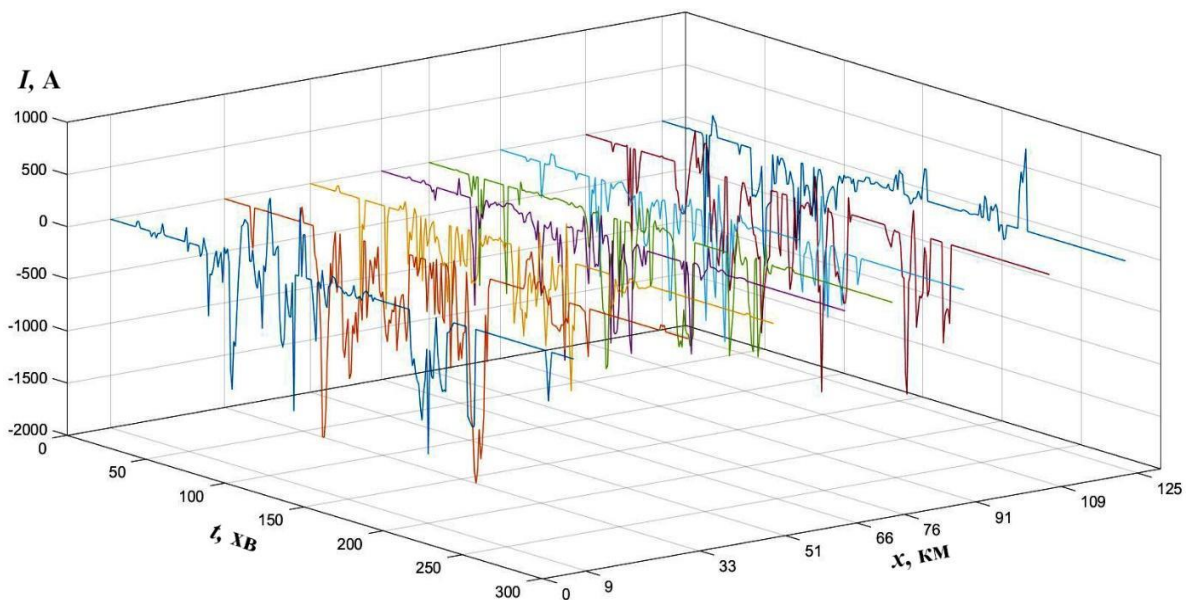


Рис. 3.17. Струми підсилюючих пунктів

Таблиця 3.3

**Ємності накопичувачів підсилюючих пунктів**

№ ПП	ПП1	ПП2	ПП3	ПП4	ПП5	ПП6	ПП7	ПП8
Ємність, А·год	705	1210	565	390	630	455	990	425

Запропонована система працює наступним чином: електрифіковану ділянку залізниці між двома суміжними тяговими підстанціями обладнано пристроями вимірювання напруги з бездротовою передачею даних та системою управління. В систему управління через блок декодування подається масив значень напруги, отриманий шляхом накопичення даних, які передаються мережею, що побудована за комірковою топологією пристроями вимірювання напруги, розподілених уздовж міжпідстанційної зони та підключених почергово до контактної мережі першої та другої колії. Далі, системою управління виконується аналіз отриманого масиву даних шляхом пошуку розрахункової точки контактної мережі, де вимагається забезпечення встановленого значення напруги. Після цього, на підставі масиву значень напруги, розраховується струморозподіл на міжпідстанційній зоні, а потім за допомогою аналітичного виразу визначається необхідна генерована потужність у місці розташування підсилюючого пункту тягової мережі. На підставі виміряного значення напруги у місці підключення підсилюючого пункту тягової мережі виконується регулювання струму генерації для досягнення розрахованої потужності. Завдяки регулюванню струму генерації

підсилюючого пункту не відбувається зниження напруги на струмоприймачі кожного електрорухомого складу нижче заданого значення.

Для вимірювання напруги в мережі постійного струму в якості прототипу запропоновано використовувати резистивний дільник напруги, до виходу якого підключений пристрій узгодження та мікроконтролер загального призначення типу Atmega128RFA1 (або аналогічний) з вбудованим багатоканальним аналогово-цифровим перетворювачем і високочастотним радіопередавачем. Для збільшення точності вимірювань в пристрої узгодження передбачено чотириканальне джерело опорної напруги та каскад операційних підсилювачів, кожен з яких включений за схемою диференційного підсилення з первинним вимірювальним сигналом, а виходи цих операційних підсилювачів підключені до чотирьох різних входів аналогово-цифрового перетворювача мікроконтролера.

### **3.1.2. Регулювання режимів тягового електропостачання для підвищення ефективності рекуперації енергії поїздів**

Режими рекуперації в системі електричної тяги, окрім важливого експлуатаційного та безпекового значення, є одним з потужних заходів щодо зниження енергоємності перевізного процесу, особливо у циклічних видах руху (з частими зупинками). В той же час стрімке впровадження накопичувачів і багатфункціональних перетворювачів енергії, інтелектуально керованих енергетичних елементів в системах тягового електропостачання значно розширює можливості рекуперації і енергоефективності систем в цілому.

Для реалізації рекуперативного гальмування в класичному випадку необхідна наявність в мережі гарантованого споживача згенерованої поїздом енергії співрозмірної потужності. У випадку його недостатності або повної відсутності має місце підвищення напруги на струмоприймачі рекуперативних електропоїздів і в тяговій мережі (рис. 3.18), що значно впливає на реалізацію потенціалу енергозбереження і надійність обладнання інших поїздів [4]. При досягненні верхньої границі напруги на струмоприймачі (рис. 3.19, а) відбувається "зрив" рекуперації і перехід електропоїзда на реостатне або механічне гальмування, за яких енергія рекуперації утилізується в гальмах.

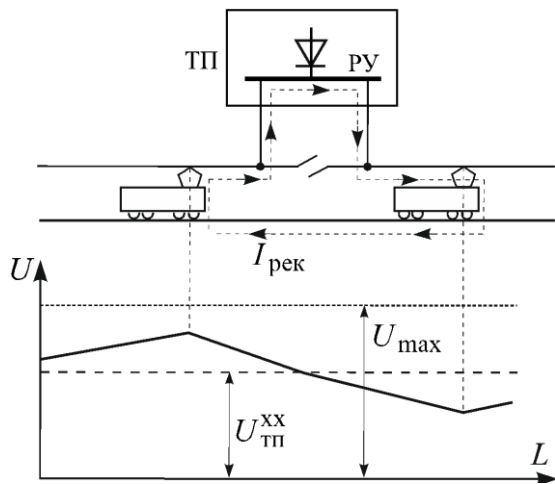


Рис. 3.18. Діаграма напруги в тяговій мережі вздовж ділянки рекуперації

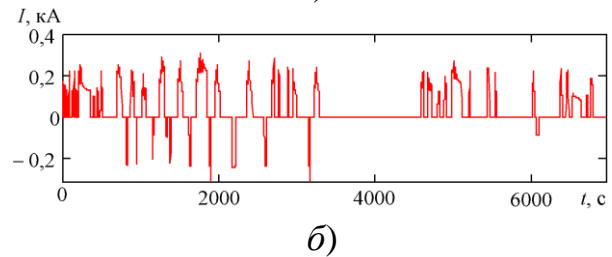
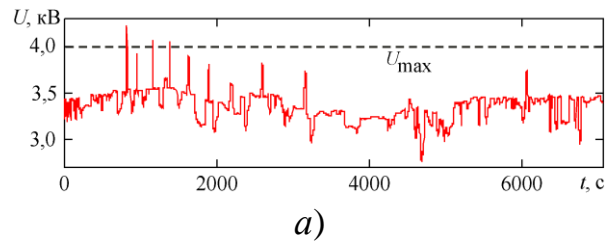


Рис. 3.19. Часові діаграми напруги (а) і струму (б) вагону електропоїзду

На вантажонапружених ділянках з підвищеним на 10...15 % рівнем напруги холостого ходу на шинах тягових підстанцій має місце погіршення умов, а в деяких випадках неможливість рекуперації енергії по верхній межі допустимої напруги. Данні обмеження напруги знижують діапазон застосування рекуперації і потенціал енергозбереження, але пов'язані із забезпеченням надійності і безпеки функціонування електрифікованого транспорту.

Енергія рекуперації в тяговій мережі розподіляється в залежності від просторово-часового розподілу тягового споживання в мережі – потужності та координати її споживачів (електропоїздів в режимі тяги). При цьому відбувається її часткове розсіювання в елементах тягової мережі, де втрати цієї енергії можуть бути виражені як

$$\Delta W_{\text{рек}} = r_{\text{ТМ}} \sum_{k=1}^n \int_{t_n}^{t_k} I_{\text{рек } k}^2 x_k dt = r_{\text{ТМ}} \sum_{k=1}^n \int_{t_n}^{t_k} \left( \frac{P_{\text{тяг } k}}{U_{\text{км } k}} - I_{\text{ТП } k} \right)^2 x_k dt, \quad (3.6)$$

де  $r_{\text{ТМ}}$  – питомий опір тягової мережі, Ом/км;  $I_{\text{рек } k}$  – частина струму рекуперації споживана  $k$ -тим споживачем;  $x_k$  – відстань до  $k$ -того споживача струму рекуперації;  $P_{\text{тяг } k}$ ,  $U_{\text{км } k}$  – відповідно споживана потужність (тягова) та напруга на струмоприймачі  $k$ -того споживача;  $I_{\text{ТП } k}$  – частина тягового струму транспортного засобу, споживаного від тягової підстанції;  $t_n, t_k$  – відповідно час початку і закінчення рекуперації енергії.

В елементах системи тягового електропостачання постійного струму (3,3 кВ) величина втрат  $\Delta W_{\text{рек}}$  може сягати значення 10...15 % від величини генерованої енергії  $W_{\text{рек}}$ , що близько до значення втрат

енергії при тяговому електроспоживанні. У тягових мережах метрополітенів (825 В) і міського електротранспорту (550 В) частка  $\Delta W_{\text{рек}}/W_{\text{рек}}$  зростає пропорційно зниженню величини номінального значення живлячої напруги.

Природний розподіл енергії рекуперації в системі електротранспорту з некерованою системою тягового електропостачання (навіть з урахуванням можливості її накопичення на тягових підстанціях та передачі в системи зовнішнього електропостачання) не завжди є раціональним за енергетичним критерієм

$$\Delta W_{\text{рек}}(x) \rightarrow \min, \quad (3.7)$$

що визначається можливим значним віддаленням від рекуперуючого електрорухомого складу поїзда із найбільшим тяговим споживанням або інвертуючих (накопичувальних) тягових підстанцій.

Оптимальний розподіл енергії  $W_{\text{рек}}$  в тяговій мережі може бути досягнуто при переході до концепції так званого керованого (гнучкого, інтелектуального) тягового електропостачання. При цьому керуючі органи систем тягового електропостачання будуть знаходити канали перерозподілу енергії  $W_{\text{рек}}$  за енергетичним критерієм (3.7) в залежності від дислокації тягових навантажень на фідерній зоні та їх потужності, а також накопичувачів і інверторів енергії, режимів напруги на вводах на тягових підстанціях. При цьому обмежувальним фактором оптимального управління є забезпечення надійності тягового електропостачання поїздів на ділянках. У такому випадку при наявності надлишкової енергії рекуперації залежно від рівня попереднього заряду накопичувачів і режимів зовнішньої мережі повинні прийматися рішення про підключення накопичувачів або інверторів енергії, або плавному зниженні напруга на шинах тягових підстанцій в діапазоні допустимих значень. Крім виконання цільової функції (3.7) принцип гнучкого розподілу енергії  $W_{\text{рек}}$  дозволить вирішити науково-практичну задачу визначення оптимальних місць розташування накопичувачів і інверторів енергії, а також пристроїв плавного регулювання напруги на шинах тягових підстанцій під навантаженням при мінімізації кількості і встановленої потужності додаткового енергозберігаючого електрообладнання в системі тягового електропостачання (накопичувачів, інверторів, регуляторів напруги на шинах тягових підстанцій, пунктів підживлення тощо).

Застосування рекуперативного гальмування на поїздах ускладнює режими роботи систем тягового електропостачання внаслідок значних генерованих потужностей при гальмуванні. У цьому випадку для здійснення рекуперативного гальмування необхідно виконати дві умови: мати низьку напругу на струмоприймачі рекуперативного поїзда і приймач енергії рекуперації. У якості приймачів надлишкової енергії рекуперації в системі тяги постійного струму можуть виступати інверторні агрегати або накопичувачі на тягових підстанціях.

Визначення оптимальної напруги в системі електропостачання при наявності рекуперативних поїздів є окремою прикладною задачею, яка повинна розв'язуватися з урахуванням впливу великої кількості факторів. При наявності на ділянках рекуперативних поїздів сумарні витрати в СТЕ будуть знижуватися за рахунок часткового відновлення спожитої енергії і створюваного підвищення напруги в тяговій мережі. Однак в СТЕ постійного струму при цьому можуть створюватися умови для живлення енергією рекуперації від електропоїздів, розташованих на інших міжпідстанційних зонах, внаслідок чого зростатимуть втрати енергії в системі електропостачання. Крім того, для забезпечення умов рекуперації необхідно знижувати напругу на шинах тих підстанцій, де будуть встановлені приймачі надлишкової енергії рекуперації, а отже, зменшувати напругу на струмоприймачах електровозів, які слідуєть на суміжних зонах у тяговому режимі.

Тому для оцінки напруги на шинах тягових підстанцій, що живлять ділянки, де одночасно можуть перебувати поїзда в тяговому і рекуперативному режимах, необхідно враховувати наступні умови: напруга на шинах підстанцій  $U_{ш}$  має бути не нижче напруги  $U_{м т}$ , необхідної для забезпечення заданих часів ходу, передбачених графіком руху, і не вище напруги  $U_{м р}$ , при якому енергія, вироблювана рекуперативними електропоїздами, буде дорівнює тій економії енергії, яку могли б дати електровози в тяговому режимі при цій нарузі на шинах підстанції.

Отже, умовою вибору  $U_{ш}$  буде  $U_{м т} < U_{ш} < U_{м р}$  причому  $U_{ш} = U_{м т} + \Delta U_{т}$ . Тут  $U_{м т}$  – найменша середня напруга на струмоприймачах електровозів за час ходу їх під струмом, що забезпечує задані часи ходу;  $\Delta U_{т}$  – середня втрата напруги в системі електропостачання за час ходу електровозів у тяговому режимі.

Необхідність забезпечення певної напруги при наявності рекуперативних поїздів стала актуальною не тільки для вантажних поїздів при експлуатації на ділянках з затяжними спусками, а і при

впровадженні швидкісного руху на ділянках тяги постійного струму. Особливість режиму роботи цих електропоїздів полягає в тому, що при русі з високими швидкостями і великою кількістю зупинок вони значну частину часу йдуть без струму (на вибігу), невеликий час йдуть в тяговому режимі і якусь частину часу гальмування використовують для рекуперації енергії.

При проходженні великовагових поїздів і швидкісних поїздів навіть на двоколієних ділянках СТЕ постійного струму з ТП, що не обладнані інверторами, при відсутності поїздів у режимі тяги або низькому тяговому електроспоживанні на ділянці виникає підвищення рівня напруги, що приводить до зриву режиму рекуперації поїздів [5]. При цьому потенційна енергія гальмування поїздів при даних умовах є надлишковою, не може бути реалізована і втрачається в гальмівних реостатах.

Підвищення ефективності рекуперації в умовах зниження або відсутності або значного віддалення тягового електроспоживання на ділянках може бути реалізовано шляхом оптимізації та регулювання рівня напруги холостого ходу на шинах ТП. В якості критерію оптимізації в розглядається максимум перетікання енергії рекуперації через шини тягової підстанції при наявних розмірах руху потягів. В цьому випадку цільова функція представлена як

$$W_{\text{рек}}^{\text{ТП}} = \sum_{i=1}^n W_{\text{рек } i}^{\text{ТП}}(U_{\text{хх } i}) \rightarrow \max, \quad (3.8)$$

де  $W_{\text{рек } i}^{\text{ТП}}$  – перетік енергії рекуперації через шини  $i$ -тої тягової підстанції;  $U_{\text{хх } i}$  – напруга холостого ходу  $i$ -тої ТП;  $n$  – кількість ТП.

Перетоки потужності рекуперації через шини тягової підстанції будуть збільшуватися із зменшенням напруги холостого ходу на її шинах, тому накладене на розрахунок обмеження може бути записано у вигляді

$$U_{\text{хх } i} - \Delta U_{\text{Т } i} \geq U_{\text{тяги}}^{\min}, \quad (3.9)$$

де  $U_{\text{тяги}}^{\min}$  – найменша допустима напруга на струмоприймачах електровозів за час ходу їх під струмом, що забезпечує заданий час ходу;  $\Delta U_{\text{Т } i}$  – середня втрата напруги в СТЕ від  $i$ -тої тягової підстанції до електровоза в тяговому режимі.

Таким чином, завдання підвищення ефективності рекуперації у цьому випадку полягає у визначенні таких значень напруги холостого ходу на шинах тягових підстанцій, які б забезпечили максимум цільової функції (3.8) за наявності обмеження (3.9).

Виходячи з вищевикладеного, стає очевидним, що ефективність застосування рекуперативного гальмування багато в чому залежить від рівня напруги в контактній мережі, і чим воно нижче, тим простіше і ефективніше рекуперація. Проте можливість пониження напруги в контактній мережі обмежена необхідністю забезпечення пропускної спроможності. Як правило відповідно до діючої методики її розрахунку по облаштуванню електропостачання на шинах підстанцій задається напруга, рівна 3600 В. Зниження напруги в контактній мережі дозволить збільшити дальність передачі енергії рекуперації від рекуперуючого локомотиву до потягів, що йдуть в режимі тяги.

На рис. 3.20 наведено залежності напруги на струмоприймачі поїздів в тяговому і рекуперативному режимах (при струмах  $I_{рек} = 1000\text{А}$ ,  $I_{тяг} = 1500\text{А}$ ), струмів тягових підстанцій ТП 2 і ТП 3 і відносних втрат потужності в тяговій мережі від віддалення поїздів для одноколіїної ділянки, одержані шляхом багатоваріантних розрахунків миттєвої схеми живленням двоколіїної ділянки при різних значеннях розташування поїздів в режимах споживання і рекуперації ( $x_1, x_2$ ) [5].

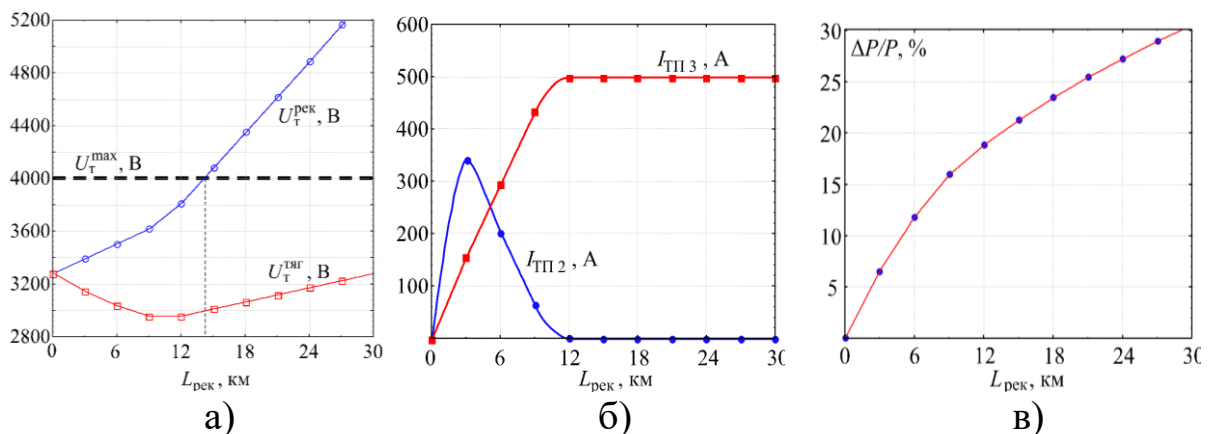


Рис. 3.20. Залежність напруги на струмоприймачах поїздів (а), струму тягових підстанцій (б) і відносних втрат потужності в тяговій мережі (в) від видалення поїздів в тяговому і рекуперативному режимах

Для спрощення прийнято, що поїзди ЕРС 1 і ЕРС 2 рухаються на суміжних фідерних зонах з однаковою швидкістю в напрямку ТП 1 і ТП 3 відповідно, тому в будь-який момент часу  $x_1 = x_2$ . Ділянка прийнята з двостороннім роздільним живленням, тягові підстанції мають однакові зовнішні характеристики з напругою холостого ходу 3500 В, що виключає протікання зрівняльних струмів в тяговій мережі.

З рис. 3.20, а випливає що при такому співвідношенні струмів тяги і рекуперації на суміжних фідерних зонах можливість здійснення рекуперації за умовами напруги на струмоприймачі при рекуперації в допустимому діапазоні визначається відстанню між поїздами  $L_{рек} \leq 14$  км.

Крім цього, з рис. 3.20, б видно, що навіть за умови рівності зовнішніх характеристик тягових підстанцій режим рекуперації призводить до утворення в системі тягового електропостачання зрівняльних струмів, що проявляється в непропорційному завантаженню суміжних тягових підстанцій залежно від віддалення поїзда. Розрахунками підтверджено, що плавне регулювання напруги на шинах тягових підстанцій з метою вирівнювання їх навантажень при наявності на ділянці рекуперації призведе лише до збільшення втрат потужності в тяговій мережі. Необхідно також зазначити, що при даному розташуванні поїздів і співвідношенні їх струмів тягова підстанція ТП1 працює в режимі холостого ходу (при відсутності тягової навантаження зліва), тому не впливає на струморозподіл в системі електропостачання.

В такому випадку для підвищення ефективності використання енергії рекуперації в умовах обмеженого тягового електроспоживання на ділянці при фіксованих значеннях ( $I_{рек} > I_{тяг}$ ), може бути використана залежність  $L_{рек} = L_{рек}(U_{xx}^{ТП1,2})$ , згідно з якою для розширення зони рекуперації та забезпечення перетікання надлишкової енергії  $W_{рек\ надл}$  до віддалених поїздів в тяговому режимі необхідно плавно знижувати напругу на шинах тягових підстанцій. Для забезпечення режиму рекуперації за умовами допустимого рівня напруги на струмоприймачі поїзда необхідно знизити напруги холостого ходу на шинах тієї з тягових підстанцій (або обох), яка більше живить поїзд в режимі тяги, тобто як би перекласти більше навантаження на рекуперуючий поїзд. Межею регулювання при цьому повинна виступати обмеження по мінімально допустимому рівню напруги на струмоприймачах поїздів в тягових режимах згідно стандарту EN 50163:2016, що вимагає умову  $U_T(t) \geq U_T^{min}$ .

На рис. 3.21 наведено характер зміни напруги на шинах тягових підстанцій ТП 2 і ТП 3, що забезпечує дотримання нормативного діапазону напруг. Як видно з рис. 3.21, а регулювання напруги на шинах тягових підстанцій теоретично дозволяє розширити зону рекуперації до 24 км, а далі обмежено умовою мінімально-допустимої

напруги на струмоприймачах, що крім того, супроводжується збільшенням втрат енергії в тяговій мережі (рис. 3.21, г).

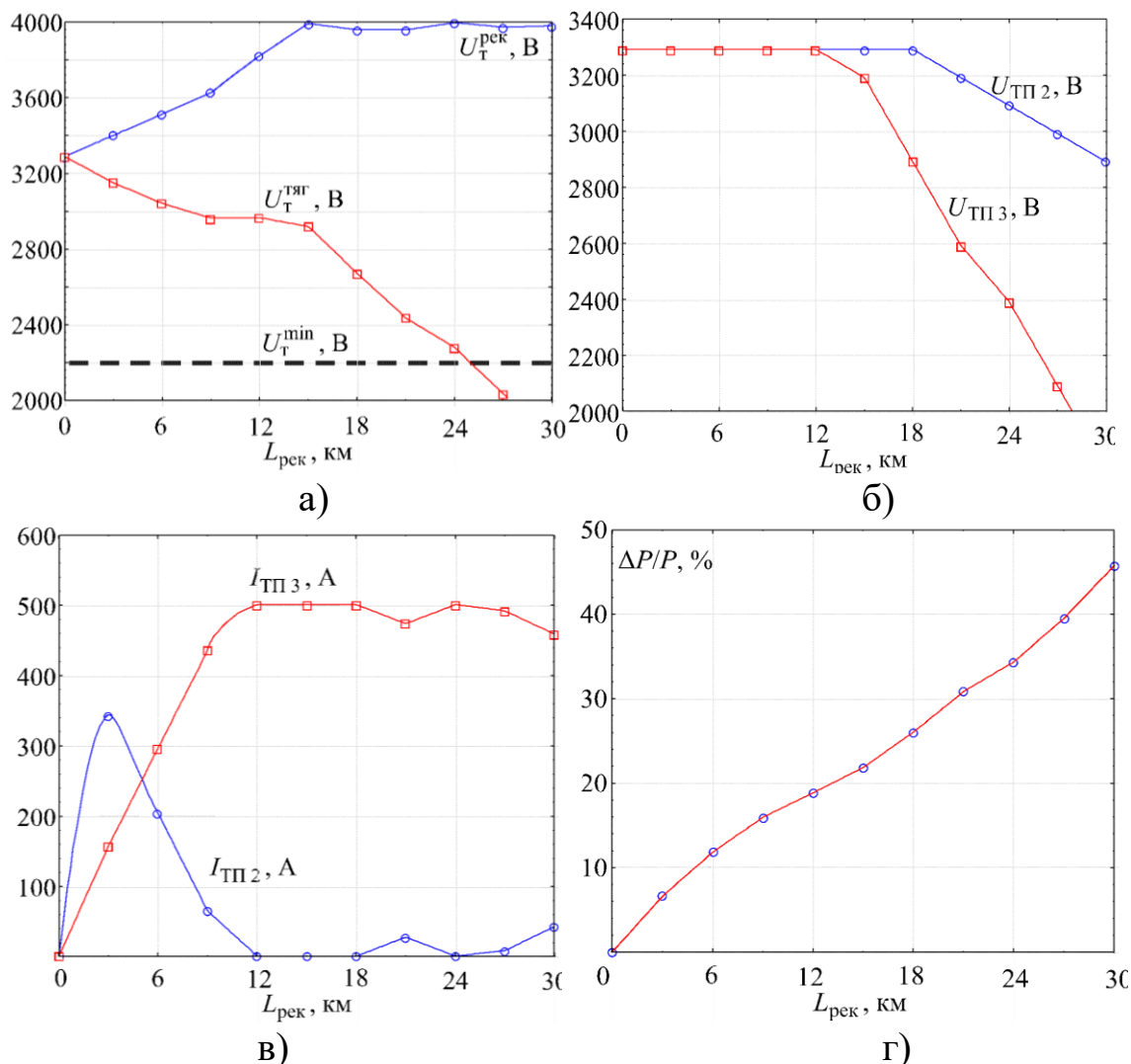


Рис. 3.21. Залежність напруги на струмоприймачах поїздів (а) і на шинах тягових підстанцій (б), струму тягових підстанцій (в) і відносних втрат потужності в тяговій мережі (г) від видалення поїздів при регулюванні напруги підстанцій

В реальності отримання напруги на струмоприймачі поїзда ЕРС 2 близького до мінімального рівня на ділянках зі складним профілем призведе до збільшення споживаного струму і, як наслідок, ще більшого зниження напруги на струмоприймачі, що особливо характерно для сучасного електрорухомого складу з плавним регулюванням потужності в режимі руху з постійною швидкістю (силою тяги). При цьому може погіршитися пропускна здатність

ділянки і ще більше зростуть втрати в тяговій мережі (рис. 3.21, г), що істотно позначиться на ефективності електричної тяги в цілому.

Таким чином за даним підходом для кожної конкретної ділянки може визначатися своя межа раціонального регулювання напруги, що забезпечує прийнятний баланс між втратами енергії в тяговій мережі і втратою потенційно можливої рекуперації енергії поїзда.

Поява сучасних енергетичних пристроїв та розвиток технологій SMART GRID дозволяє вирішувати проблему використання енергії рекуперації в системах електрифікованого транспорту на якісно новому рівні, реалізуючи інтелектуальні алгоритми керування накопичувачами енергії, інверторами та регуляторами напруги. При цьому можливим стає оптимальний за енергетичним критерієм розподіл енергії між елементами систем тягового і зовнішнього електропостачання з урахуванням комплексного підходу до енергоефективності процесу рекуперації. Це дозволить транспортним засобам здійснювати рекуперацію енергії незалежно від графіків руху на ділянках, наявності тягового електроспоживання в момент рекуперації і режимів систем зовнішнього електропостачання, що забезпечить допустимий рівень напруги на струмоприймачах при рекуперації, значно знизить використання реостатного гальмування на транспортних засобах та втрати енергії рекуперації.

У випадку відсутності строгої математичної моделі для вирішення завдання раціонального використання енергії рекуперації доцільно застосування нейро-нечітких моделей, які включають в себе штучні нейронні мережі, експертні системи і нечітку логіку [6, 7]. Такі моделі отримали широке поширення в різноманітних прикладних задачах розпізнавання і управління, в тому числі в електротехнічних системах.

Для розв'язання задачі раціонального розподілу енергії рекуперації в тяговій мережі зі стаціонарними керованими накопичувачами енергії (НЕ) і інвертуючими тяговими підстанціями (ТП) з плавним регулюванням вихідної напруги (рис. 3.22) представимо надлишковий струм рекуперації на основі першого закону Кірхгофа у вигляді доданків, відповідно до технічних можливості його розподілу і споживання

$$I_{\text{рек}}^{\text{надл}} = I_{\text{рек}} - I_{\text{рек1}} = \sum_{k=2}^5 I_{\text{рек } k}, \quad (3.10)$$

де  $I_{\text{рек}}$  повний струм рекуперації поїзда;  $I_{\text{рек1}}$  – струм тягового електроспоживання в зоні рекуперації;  $I_{\text{рек2}}$  – струм, що утилізується в

гальмівних пристроях;  $I_{рек3}$  – струм, що може перетікати на суміжні МПЗ до віддалених поїздів (у т.ч. при регулюванні напруги на шинах транзитної ТП);  $I_{рек4}$  – струм, що споживається НЕ;  $I_{рек5}$  – струм, що споживається системою зовнішнього електропостачання (через інвертори ТП).

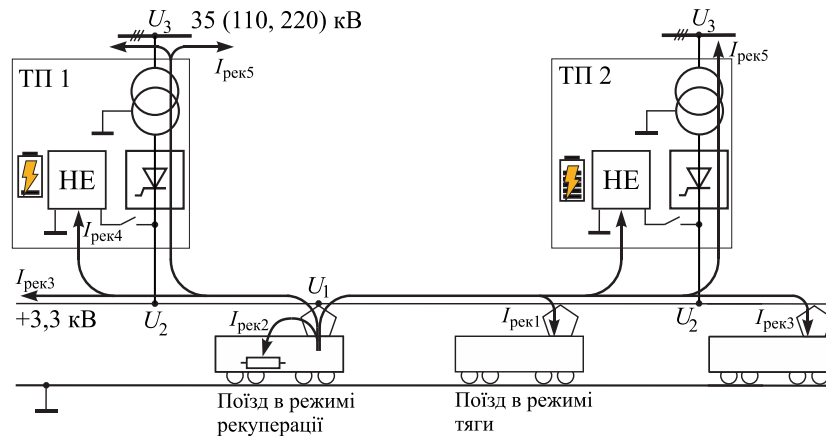


Рис. 3.22. Схема розподілу струму рекуперації в системах тягового і зовнішнього електропостачання

Згідно (3.7) втрати  $\Delta W_{рек}$  мінімальні при  $x \rightarrow \min$ , отже мінімізація втрат в елементах систем тягового і зовнішнього електропостачання при розподілі енергії струмами  $I_{рек3}$ ,  $I_{рек4}$ ,  $I_{рек5}$  між відповідними потенційно можливими споживачами (рис. 3.22) досягається при мінімізації їх відстані до джерела рекуперації з урахуванням їх ККД та поточного енергетичного стану (поточних заряду накопичувача, завантаження живлячої мережі в точках приєднання ТП, віддаленості та величини тягового навантаження). Завдання раціонального розподілу полягає у визначенні таких значень складових струму (3.10), що забезпечить виконання мінімуму цільової функції

$$\left( \begin{array}{l} I_{рек2}(t) \rightarrow \min, \\ \Delta W_{рек}(I_{рек3}(t), I_{рек4}(t), I_{рек5}(t)) \rightarrow \min \end{array} \right), \quad (3.11)$$

з урахуванням обмеження за допустимою напругою на струмоприймачі згідно ДСТУ EN 50163:2016

$$U_1(I_{рек3}(t), I_{рек4}(t), I_{рек5}(t)) \leq U_{1max}. \quad (3.12)$$

На основі схеми рис. 3.22 та (3.10)-(3.12) побудована нечітка модель розподілу енергії рекуперації в системі електротранспорту, що

для одноколійної ділянки з консольним живленням складається з п'яти блоків правил та має структуру, наведену на рис. 3.23.

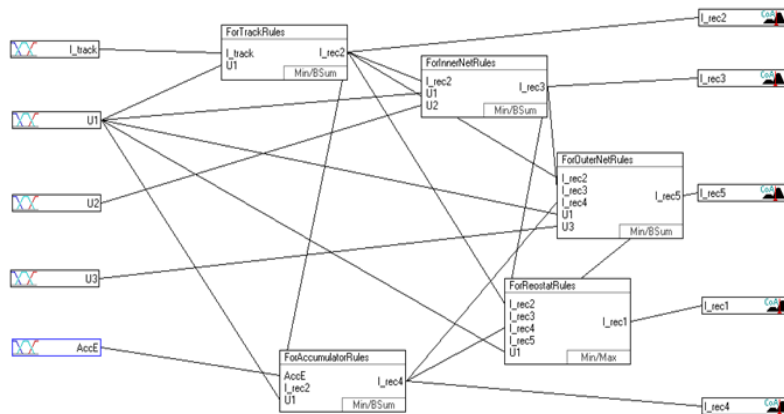


Рис. 3.22. Модель розподілу енергії рекуперації в межах однієї тягової підстанції на основі нечіткої логіки

Кожен блок правил використовує метод Мамдані для нечіткого виводу. Блоки зв'язані у вигляді послідовності для забезпечення покрокового прийняття рішення за заданими пріоритетами. Вихід першого блоку служить входом для наступного, що дозволяє визначати необхідність розподілу залишку енергії за менш пріоритетними напрямками. Для останнього блоку виводу, служать входами всі попередні рішення, це дозволить визначити ви-сненок тільки в тому випадку, якщо ще не було прийнято рішення. Для двоколійних ділянок і при дослідженні розподілу енергії між двома тяговими підстанціями модель приймає вигляд рис. 3.23, де наявним є збільшення багатоварантності розподілу, а отже і енергоефективності.

Вхідними даними моделі є набір змінних

$$X = \langle E(t), I_1(t), U_1(t), U_2(t), U_3(t) \rangle, \quad (3.13)$$

де  $E(t)$  – поточний рівень заряду накопичувача;  $I_1(t)$  – тягове електроспоживання в зоні рекуперації;  $U_1(t)$  – напруга на струмоприймачі рекуперируючого поїзда;  $U_2(t)$  – напруга на виході ТП;  $U_3(t)$  – напруга зовнішньої мережі (на вході ТП).

Вихідними даними моделі є значення відповідних струмів струмів

$$Y = \langle I_{рек2}(t), I_{рек3}(t), I_{рек4}(t), I_{рек5}(t) \rangle, \quad (3.14)$$

що є параметрами управління режимами зарядних пристроїв накопичувачів, інверторів і регуляторів напруги на шинах ТП.

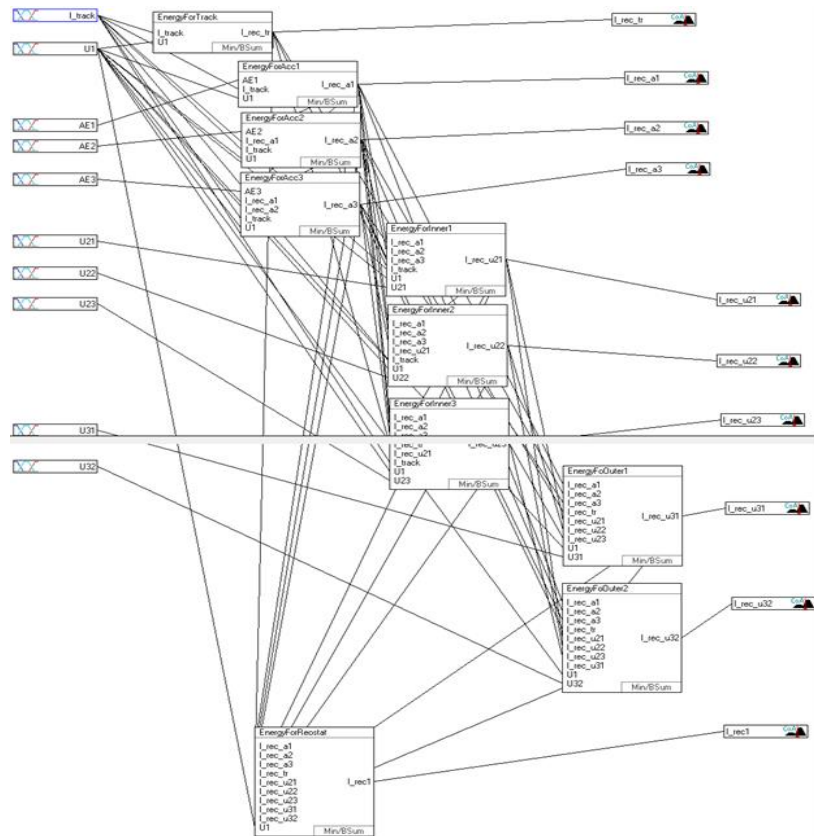


Рис. 3.23. Нечітка модель розподілу енергії рекуперації в межах двох ТП

Вхідні і вихідні змінні задаються нечіткими термами з трикутними функціями приналежності  $\mu(x)$  та мають відповідні області визначення, що розбиті переважно на п'ять нечітких термів: низький рівень величини; середньонизький; середній; середньовисокий; високий.

Кожен блок правил моделі використовує метод Мамдані для нечіткого виводу та побудований на логічних операціях. Блоки зв'язані у вигляді послідовності для забезпечення покрокового прийняття рішення за заданими пріоритетами. Вихід першого блоку служить входом для наступного, що дозволяє визначати необхідність розподілу залишку енергії за менш пріоритетними напрямками. Для останнього блоку виводу, служать входами всі попередні рішення, це дозволить визначити вивід тільки в тому випадку, якщо ще не було прийнято рішення.

Для прийняття рішення про кількість енергії рекуперації, що передається, наприклад, до накопичувача для тимчасового зберігання, вхідними параметрами є змінні  $U_1(t)$  і  $E(t)$ , а виходом  $I_{рек4}(t)$ . Знання експерта являють собою співвідношення виду:

$$R = (U_1, E) \rightarrow I_{\text{рек4}}, \quad (3.15)$$

де  $(U_1, E)$  – посилення;  $I_{\text{рек4}}$  – наслідок;  $\rightarrow$  – операція нечіткої імплікації.

Для кожного параметра відомі функції приналежності нечітких термів, відповідно  $\mu_{U_1 i}(x)$ ,  $\mu_{E i}(x)$  і  $\mu_{I_{\text{рек4}} i}(x)$ . Ступінь приналежності конкретних вхідних значень  $(U_1, E)$  до кожного правила з експертної бази визначається виразом:

$$\mu_{I_{\text{рек4}} j}(I_{\text{рек4}}) = \mu_{E j}(U_1) \wedge \mu_{I_{\text{рек4}} j}(E), \quad (3.16)$$

де  $j = 1..n$  – номер правила;  $\wedge$  – операція логічного мінімуму.

В результаті отримуємо наступну нечітку множину

$$I_{\text{рек4}} = \bigvee_{j=1..n} \mu_{I_{\text{рек4}} j}(I_{\text{рек4}} j), \quad (3.17)$$

де  $\bigvee$  – операція логічного максимуму.

Точне (чітке) значення параметрів змінної  $I_{\text{рек4}}$  визначається як середньозважена сума

$$I_{\text{рек4}} = \frac{\sum_{j=1..n} \mu_{I_{\text{рек4}} j}(I_{\text{рек4}} j) I_{\text{рек4}} j}{\sum_{j=1..n} \mu_{I_{\text{рек4}} j}(I_{\text{рек4}} j)}. \quad (3.18)$$

Для визначення чітких значень шуканих вихідних величин було використано метод дефазифікації «Центр площі». У результаті перебору множини варіантів різних вхідних станів моделі (рис. 3.22) згідно нечітких правил отримано простори прийняття рішень щодо розподілу струму рекуперації по всіх можливих каналах. На рис. 3.24 наведено приклади формування раціональних рішень про розподіл струму, геометричною інтерпретацією яких при фіксованих значеннях двох параметрів є поверхні.

Дані залежності відображають необхідні алгоритми управління силовим обладнанням ТП в реальному часі в залежності від поточного стану тягової і живлячої мереж (а саме рівня тягового навантаження в зоні рекуперації, заряду накопичувачів, напруги на вводах ТП). Інформація, що отримана на основі створеної моделі використовується для навчання багатошарової нейронної мережі з прямим поширенням сигналу. Навчання нейронної мережі дозволяє підвищити точність управління розподілом, ґрунтуючись на неповних даних отриманих системами вимірювань, що є основою інтелектуального управління режимами систем тягового електропостачання при рекуперації енергії.

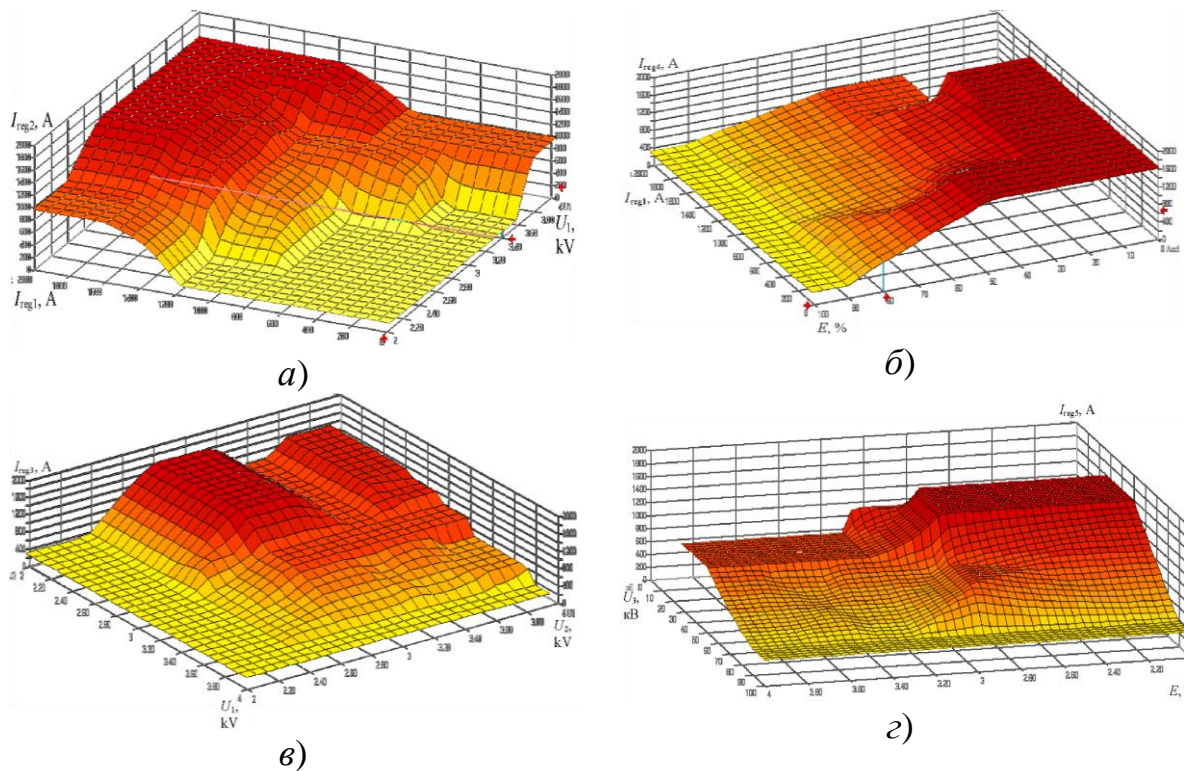


Рис. 3.24. Области визначення раціональних струмів рекуперації  $I_{рек2} = f(I_{рек1}, U_1)$  (а),  $I_{рек4} = f(I_{рек1}, E)$  (б),  $I_{рек3} = f(U_1, U_2)$  (в),  $I_{рек5} = f(E, U_3)$  (г)

Для розподілу надлишкової енергії рекуперації за всіма можливими каналами необхідно вимірювати напругу на шинах постійного струму тягової підстанції. При цьому необхідно додатково вимірювати напругу на стороні змінного струму і рівень заряду накопичувача, після чого на основі їх нечіткого порівняння обчислювати значення складових надлишкового струму рекуперації, якими є вхідний струм інвертора і зарядно-розрядного пристрою накопичувача та регулювати ці величини таким чином, щоб напруга на шинах постійного струму не перевищувала напругу холостого ходу, що забезпечує стійкий процес рекуперації транспортного засобу. Структурна схема даної системи представлена на рис. 3.25 [8-9].

Метод розподілу оснований на нечіткому виводі про розподіл і дозволяє реалізовувати режим стабілізації вихідної потужності інвертора шляхом регулювання зарядно-розрядного режиму накопичувача. Метод розподілу побудований на алгоритмі з паралельними процесами, представлено на рис. 3.26.

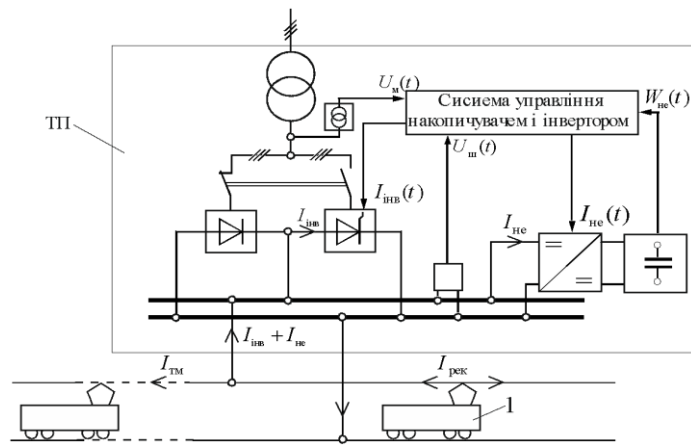


Рис. 3.25. Принципова схема управління процесом розподілу енергії рекуперації шляхом узгодженої роботи накопичувачів і інверторних перетворювачів

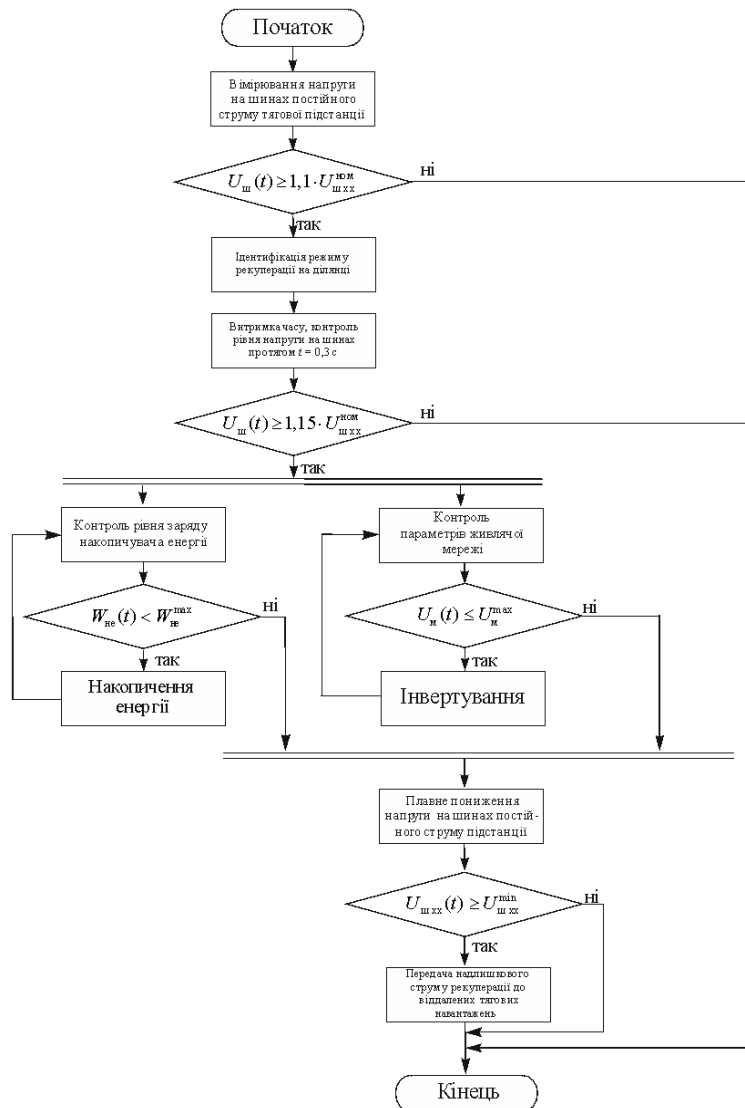


Рис. 3.26. Алгоритм роботи системи сумісного управління накопичувачем і інвертором в системі тягового електропостачання

Робота алгоритму полягає у тому, що до системи управління поступають вхідні контрольовані величини: напруга відповідно на шинах постійного струму тягової підстанції  $U_{ш}(t)$  і зовнішньої мережі  $U_{м}(t)$  та рівень заряду накопичувача  $W_{HE}(t)$ . Вихідними є сигнали на управління величинами вхідних струмів інвертора  $I_{інв}(t)$  та зарядно-розрядного пристрою накопичувача  $I_{HE}(t)$ . Напруга  $U_{ш}(t)$  вимірюється з частотою 10 Гц. При її зростанні над номінальним рівнем напруги холостого ходу на шинах ТП  $U_{ш\text{хх}}$  на 5 % попередньо фіксується режим рекуперативного гальмування на ділянці. Для уточнення режиму і виключення можливого зростання  $U_{ш}(t)$  в результаті комутаційних стрибків виконується подальший моніторинг напруги протягом наступних 0,3 с з частотою не менше 100 Гц, і якщо напруга продовжує зростати ідентифікується стійкий процес рекуперації енергії в умовах відсутності належного споживача на ділянці.

Якщо  $U_{ш}(t)$  продовжує зростати та сягає значення  $1,1 \cdot U_{ш\text{хх}}$  ідентифікується режим надлишкової рекуперації енергії на ділянці. Після цього тягова підстанція перемикається з випрямного режиму на інверторний, вмикається зарядно-розрядний пристрій накопичувача і виконується нечітке порівняння значень  $U_{м}(t)$  і  $W_{HE}(t)$  за системою нечітких правил, що наведені в табл. 3.4, на основі яких регулюються значення струмів  $I_{інв}$  та  $I_{HE}$  таким чином, щоб  $U_{ш}(t)$  знизити до значення напруги холостого ходу  $U_{ш\text{хх}}$ .

Таблиця 3.4

**Система нечітких правил прийняття рішень про розподіл**

Рівень вхідних величин, що порівнюються		Рівень вихідних величин, що регулюються в допустимих межах	
$W_{HE}(t)$	$U_{м}(t)$	$I_{HE}$	$I_{інв}$
низький	низький	високий	високий
середньо низький	середньо низький	середньо високий	середньо високий
середній	середній	середній	середній
середньо високий	середньо високий	середньо низький	середньо низький
високий	високий	низький	низький

Складова надлишкового струму рекуперації, що перетікає по тяговій мережі до віддалених навантажень (рис. 3.22) безпосередньо не регулюється і встановлюється природнім струморозподілом за залишковим принципом  $I_{TM} = I_{рек} - I_{інв} - I_{HE}$ , оскільки має місце у випадку коли прийом енергії зовнішньою мережею та накопичувачем

обмежені відповідно максимально допустимою напругою на виході інвертора та ступенем заряду накопичувача. При цьому система управління реалізує оптимальний розподіл надлишкового струму рекуперації  $I_{рек}$  в допустимих межах напруг, враховуючи ККД пристроїв розподілу та передачу в зовнішню мережу стабілізованої потужності, тобто забезпечується високий рівень енергоефективності.

## 3.2. Контроль напружено-деформованого стану в проміжних скріпленнях залізничної колії

### 3.2.1. Технологія контролю та утримання рейкової колії із пружними проміжним скріпленням

З метою аналізу напруженого стану в елементах вузла скріплення отримала подальший розвиток математична модель взаємодії рухомого складу та залізничної колії із скріпленням типу КПП-5. В основі теоретичного дослідження роботи залізничної колії із проміжним рейковим скріпленням типу КПП-5, з детальною оцінкою напруженого стану в його проміжних елементах від дії рухомого складу лежить методика, що базується на теорії методу скінчених елементів (Finite Element Method, FEM).

На рис. 3.27 представлена схема моделі для дослідження та детальної оцінки роботи всього вузла рейкового скріплення типу КПП-5 з метою отримання достовірних результатів напруженого елементів від зовнішньої дії сил, що передаються від коліс рухомого складу.

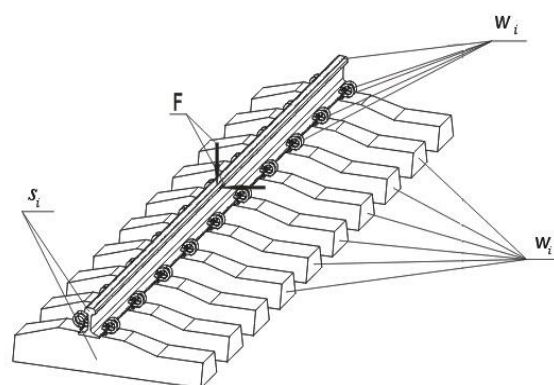


Рис. 3.27. Модель конструкції залізничної колії із скріпленням типу КПП -5:  $w_i$  – тверdotілий  $i$ -тий елемент (об'єкт) сукупності елементів колії;  $F$  – сукупність навантажень;  $S_i$  – множина (сукупність) зв'язків між об'єктами.

Враховуючи велике розсіювання характеристик залізничної колії та екіпажів, точність вимірювання вказаних величин під час проведення експериментів, знаходиться з допустимою похибкою на рівні  $E = 10\%$ . Міра змін цієї величини встановлюється коефіцієнтом варіації « $v$ ». При  $E = 10\% \rightarrow v = 10\%$ . Тому під час виконання дискретизації конструкції, кількість кроків (рівнів) розбивки області в подальших розрахунках визначалось не більше чим 5%.

На основі попередньо проведених досліджень отримав подальший розвиток наступний алгоритм [10, 11]:

$$R = f_{FEM}(\Omega, F, P, n/\Delta = 5\%), \quad (3.19)$$

де

$$\Omega = \{\{\omega_1, \omega_2, \omega_i \dots\}, \{S_1, S_2, S_i \dots\}\}, \quad (3.20)$$

$$\omega_i = \{\{g_{i1}, g_{i2}, g_{ij} \dots\}, \{\varphi_{i1}, \varphi_{i2}, \varphi_{ij} \dots\}\}. \quad (3.21)$$

Тоді

$$= \{\{\sigma_{11}, \sigma_{12}, \sigma_{1k} \dots \sigma_{ik} \dots\}, \{y_{11}, y_{12}, y_{1k} \dots y_{ik} \dots\}\}. \quad (3.22)$$

де  $\Omega$  – збірка елементів колії;  $\omega_i$  – тверdotілий  $i$ -ий елемент (об'єкт) сукупності елементів колії (клема, прокладка, рейка та ін.);  $g_{ij}$ ,  $\varphi_{ij}$  – відповідно  $j$ -ий елемент сукупності геометричних параметрів і множина фізико-механічних властивостей об'єкта  $\omega_i$ ;  $S = \{S_1, S_2, S_i \dots\}$  – множина (сукупність) зв'язків між об'єктами;  $F, P$  – сукупність навантажень та закріплень;  $n$  – кількість циклів розрахунку;  $\Delta$  – %-ва схожість суміжних результатів;  $\sigma_{ik}$ ,  $y_{ik}$  –  $k$ -ий елемент напружень та деформацій об'єкта  $\omega_i$ ;  $R$  – стан моделі відповідно розрахункам FEM.

На основі теоретичних розрахунків згідно вище представленого алгоритму, отримавши вихідні значення напружено-деформативних властивостей  $k$ -ого елемента конструкції, можливо проаналізувати найбільш імовірно-достовірні місця появи максимальних напружень в елементах вузла проміжного рейкового кріплення типу КПП-5, особливо в клемі. У місцях клеми, де напружений стан, що виникає від сумісної взаємодії колії та коліс рухомого складу, є максимальним, під час експлуатації будуть виникати напруження втоми, які в подальшому можуть призвести до послаблення силового ланцюжка – «рейка-клема-прокладка». Одночасно це призведе до

втрати стабільності роботи вузла проміжного рейкового скріплення типу КПП-5.

Підчас дослідження напруженого стану елементів у вузлі проміжного рейкового скріплення типу КПП-5 до моделі прикладалось система сил (рис. 3.28), яка виникає у складних умовах експлуатації а саме в кривих ділянках колії при різних діапазонах радіусів.

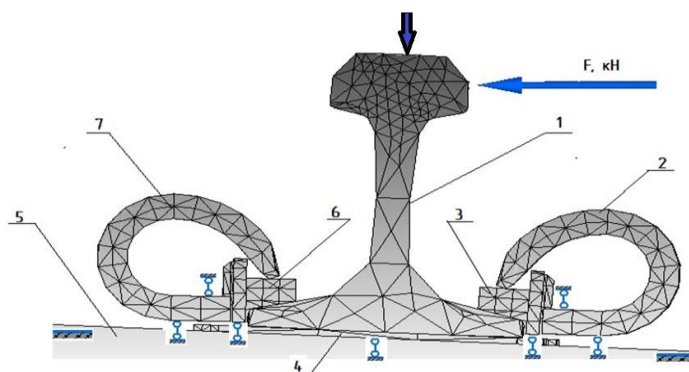


Рис. 3.28. Розрахункова схема вузла рейкового скріплення типу КПП-5: 1 – рейка; 2, 7 – клеми; 4 – підрейкова прокладка; 5 – залізобетонна шпала; 3, 6 – ізолюючий вкладиш

Підчас дослідження напруженого стану елементів у вузлі проміжного рейкового скріплення типу КПП-5 до моделі прикладалось значення зовнішніх сил ( $F$ ) (див. рис. 3.27), які виникають у складних умовах експлуатації а саме в кривих ділянках колії. На основі цього було детально проаналізовано значення бічних та горизонтальних сил, що виникають в кривих ділянках колії від дії рухомого складу по експериментальних звітах лабораторії ГНДЛ університету [12, 13]. При аналізі приймались до уваги різні види дослідного рухомого складу та параметри улаштування ділянок колії.

Оцінка зміни величини бічних та вертикальних сил, що виникають в колії від дії різних типів рухомого складу в залежності від діапазону радіусів зображено на рис. 3.29-3.31.

Характер зміни величини вертикальних сил як по внутрішній так і по зовнішній рейковій нитках в залежності від діапазону радіусів  $R$ , м за результатами апроксимації носить лінійний характер.

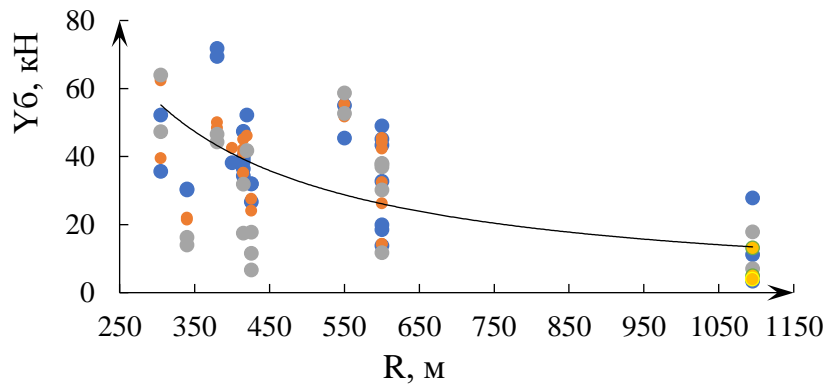


Рис. 3.29. Залежність бічних сил по зовнішній рейковій нитці від діапазону радіусів

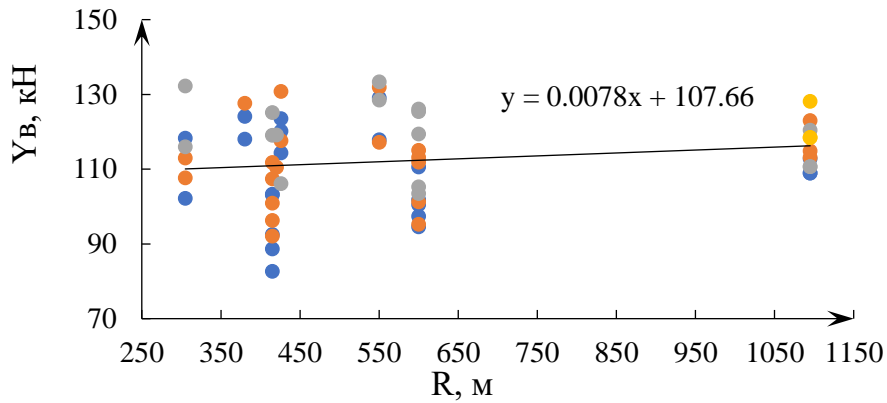


Рис. 3.30. Значення вертикальних сил по зовнішній нитці кривої від діапазону радіусів

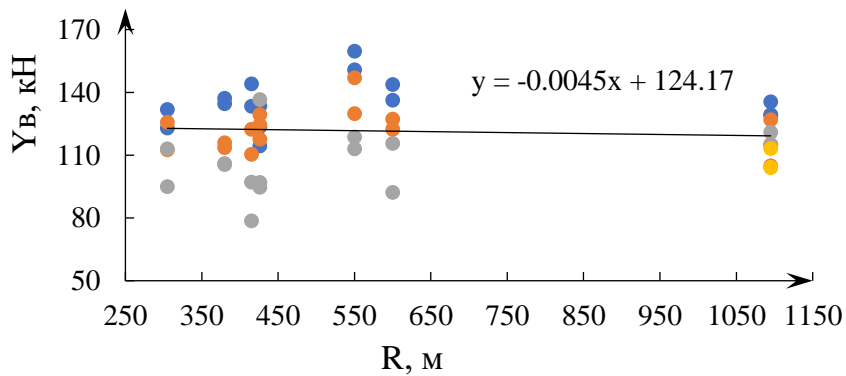


Рис. 3.31. Значення вертикальних сил по внутрішній нитці кривої від діапазону радіусів

За результатами апроксимації на наведених рисунках можна стверджувати, що:

- що величина бічних сил в кривих ділянках колії радіусом  $R = \infty$  до  $R = 600$  м стрімко збільшується і становить 60,5%, в діапазонах

- кривих від 501-600 м до 401-500 м – на 8,33%, від 401-500 м до 300-400 – на 20%;
- зовнішній рейковій нитці величина вертикальних сил змінюється в діапазонах радіусів від 601-1000 м до 501-600 – на 0,16%, від 501-600 м до 401-500 м – на 0,19 %, від 401-500 м до 300-400 м – на 1,2 %;
  - по внутрішній рейковій нитці величина вертикальних сил змінюється в діапазонах радіусів від 601-1000 м до 501-600 – на 1,68 %, від 501-600 м до 401-500 м – на 0,24 %, від 401-500 м до 300-400 м – на 6,6 %.

Проаналізувавши теоретично отримані дані встановлено, що середні значення напружень, які виникають в прутках клеми №1 (внутрішня сторона рейкової нитки) значно більші від величини напружень в прутках клеми № 2 (зовнішня сторона рейкової нитки). Порівняльні середні значення напружень в прутках клеми 1 та клеми 2 зображено на рисунку 3.32.

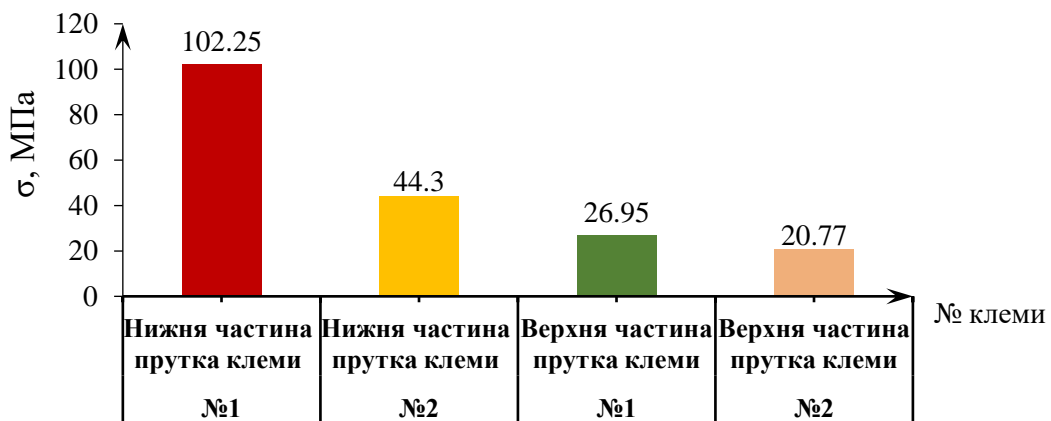


Рис. 3.32. Порівняльні середні значення напружень в прутках клеми 1 та клеми 2

Згідно з рис. 3.32 аналізуючи отримані дані встановлено, значення напружень у нижній частині прутка клеми по внутрішній стороні рейкової нитки на 56% більше ніж по зовнішній стороні рейкової нитки. Значення напружень у верхній частині прутка клеми на 53,1% більше ніж значення напружень у верхній частині прутка клеми, але не перевищують допустимих ( $[\sigma] = 150$  МПа), що підтверджено також [14]. На основі проведення теоретичних досліджень встановлено, напруження що виникають у прутках клеми не можуть бути основним

фактором зменшення сили притискання рейки до підрейкової основи за рахунок інтенсивної втрати пружних властивостей клеми.

Додатково, з метою перевірки адекватності математичної моделі реальним умовам експлуатації виникає необхідність у проведенні експериментальних досліджень роботи залізничної колії зі скріпленням типу КПП-5 для оцінки напруженого стану пружних клем типу КП-5.

### 3.2.2. Експериментальні дослідження роботи рейкової колії із проміжним скріпленням

З метою отримання експлуатаційних даних було проведено експериментальні дослідження взаємодії рухомого складу та залізничної колії із проміжним рейковим скріпленням типу КПП-5 [15]. Дослідження проводили під одним і тим же дослідним рухомим складом, схема якого наведена на рис. 3.33. Для проведення експерименту був попередньо сформований дослідний рухомий склад із двох електровозів типу ЧС7 та двох вагонів для зерна моделі 19-7053 та 19-7016 з осьовим навантаженням 25 та 23,5 т відповідно.

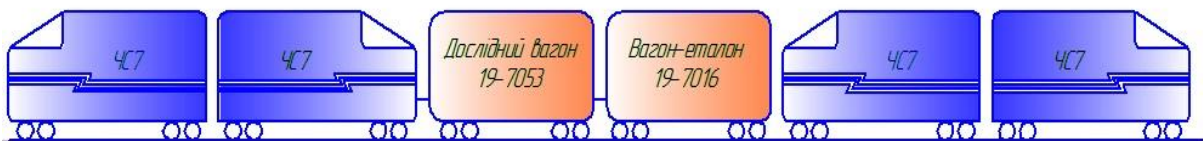


Рис. 3.33. Схема дослідного рухомого складу

В процесі виконання експерименту на дослідній ділянці колії вимірювали такі параметри як:

- згинальні напруження в кромці підшви рейки;
- згинальні напруження на зовнішній грані головки рейки;
- вертикальні сили (в шийці рейки);
- напруження у верхній частині прутка клеми першої гілки;
- напруження у нижній частині прутка клеми першої гілки;
- напруження у верхній частині прутка клеми другої гілки;
- напруження у нижній частині прутка клеми другої гілки.

Схема дослідної ділянки та рейки із встановленням вимірювальних пристроїв наведена на рис.3.34 і 3.35-3.36 відповідно.

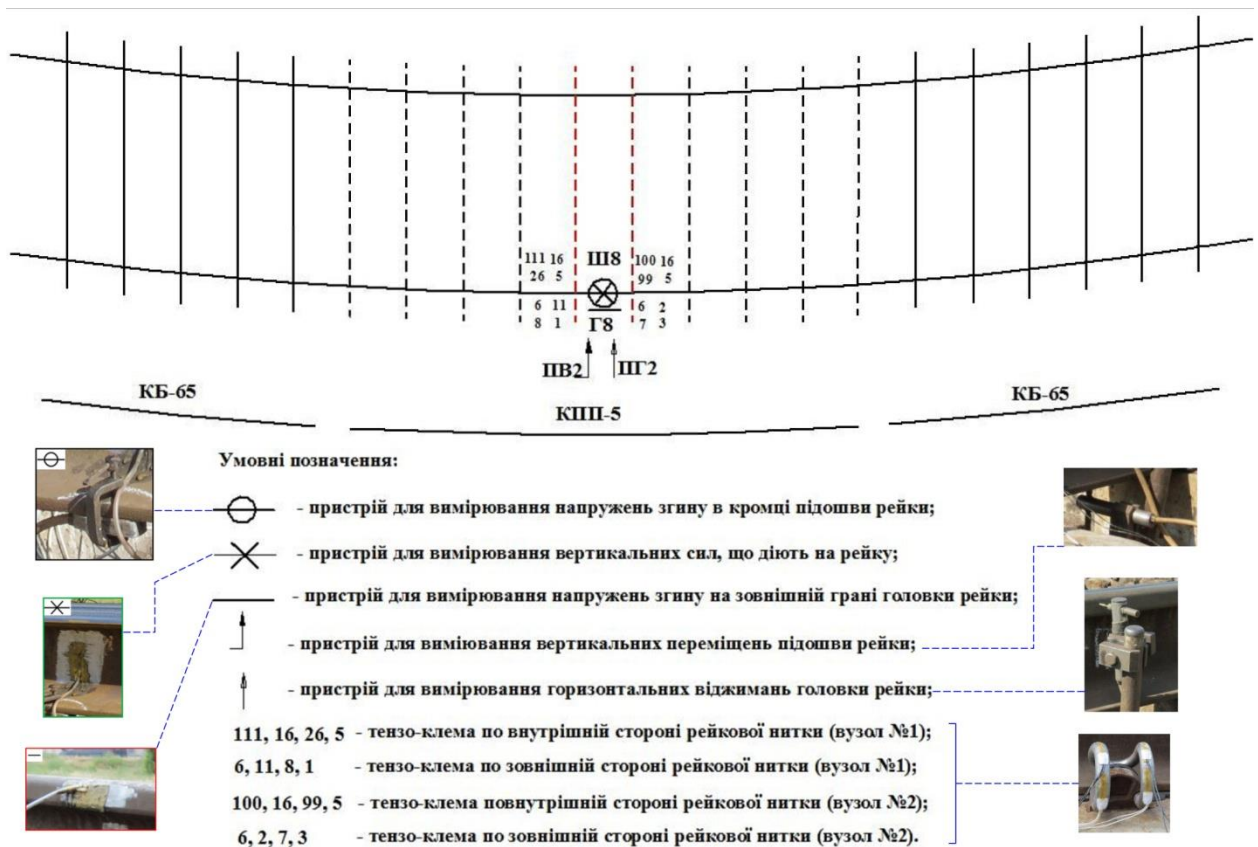


Рис. 3.34. Схема встановлення вимірювальних пристроїв на дослідній ділянці

На рис. 3.35 зображено: 1, 2, 3 – номери тензодатчиків;  $b_g$ ,  $b_n$ ,  $y_1$ ,  $y_2$ ,  $h_1$ ,  $h_2$  – геометричні характеристики рейки;  $H$  – бічна сила;  $F$  – вертикальна сила.

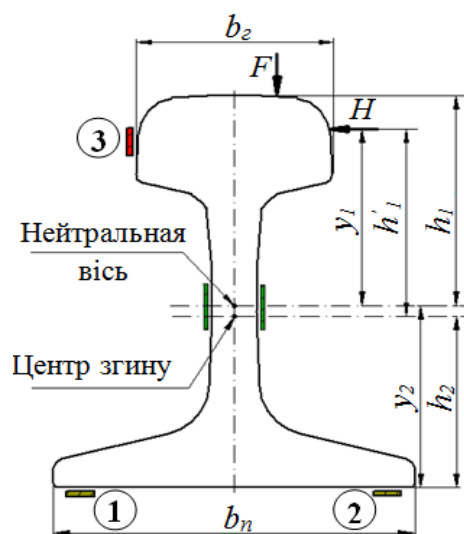


Рис. 3.35. Розрахункова схема розміщення датчиків на рейці

Для реєстрації омичного опору тензорезистора (тензодатчика) під час його живлення струмом застосовується мостові схеми Уїтстона. Схема електровимірної установки для вимірювання кромкових напружень в головці рейки показана на рис. 3.36. Величини кромкових напружень, що виникають у головці рейки при різних швидкостях руху дослідного рухомого складу показано на рис. 3.37.

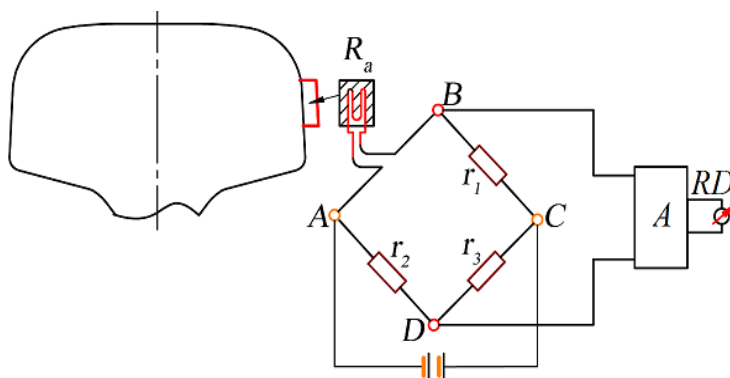


Рис. 3.36. Напівмостова схема електровимірної установки:  $R_a$  – активний (робочий) тензорезистор;  $r_1, r_2, r_3$  – опір;  $A$  – підсилювач;  $RD$  – реєструючий прилад

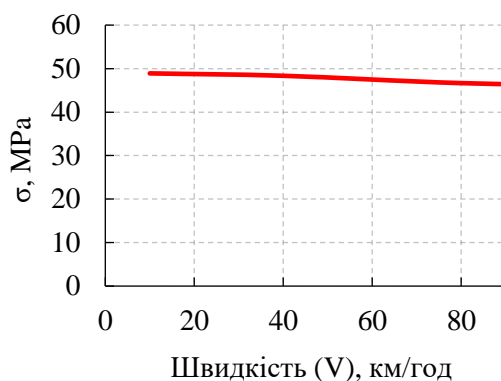


Рис. 3.37. Залежність напружень в кромці головки рейки від швидкості руху дослідного рухомого складу

Значення вертикальної сили « $F$ » (див. рис. 3.35) визначалися попереднім таруванням перерізів, де фіксувалися напруження в шийці рейки. Напруження фіксувалися за допомогою тензодатчиків ( $R_a, R_k$ ), що наклеювалися вертикально в зоні нейтральної осі з обох боків шийки рейки (рис. 3.38). Величини напружень, що виникають у шийці рейки при різних швидкостях руху дослідного рухомого складу показано на рис. 3.39.

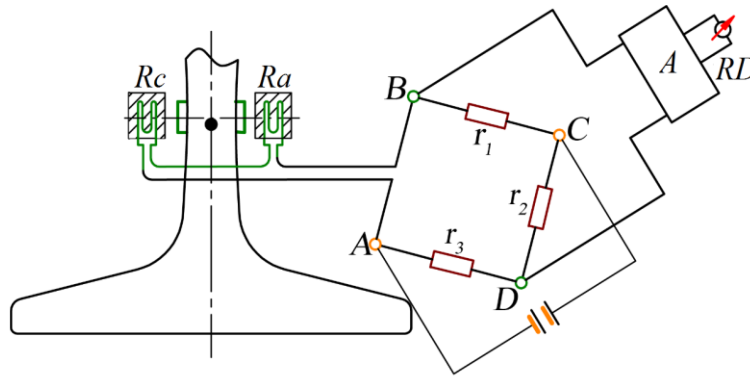


Рис. 3.38. Мостова схема електровимірювальної установки:  $Ra$  – активний (робочий) та  $Rk$  – компенсаційний тензорезистори;  $r_1, r_2, r_3$  – опір;  $A$  – підсилювач;  $RD$  - реєструючий прилад

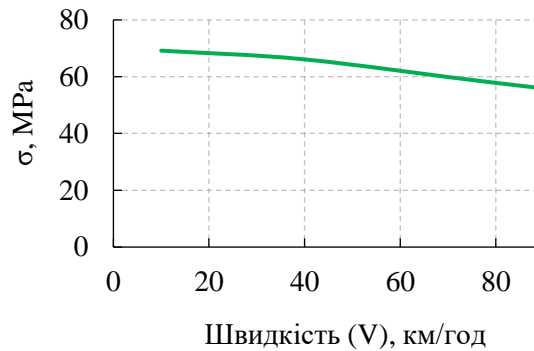


Рис. 3.39. Залежність напружень в шийці рейки від швидкості руху дослідного рухомого складу

Так як розсіювання діапазону даних вертикальних сил незначні, результати вимірів зводилися в одну вибірку. Результати вибірки представлені рис. 3.40.

З метою визначення горизонтальної сили, використовувалися значення напружень, отриманих експериментально в кромках підшви рейки, що показано на рис. 3.41. Напруження, що виникають по зовнішній кромці підшви рейок від дії бічних сил показані на рис. 3.42.

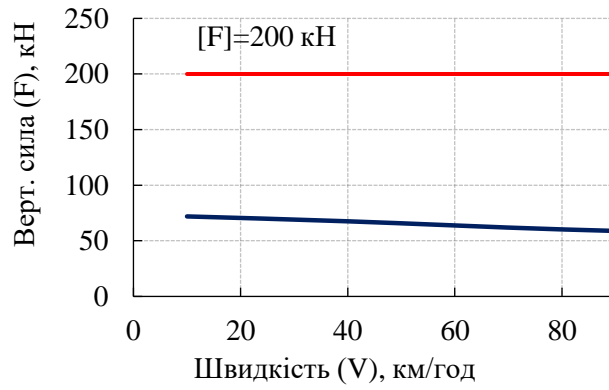


Рис. 3.40. Залежність напружень в шийці рейки від швидкості руху дослідного рухомого складу

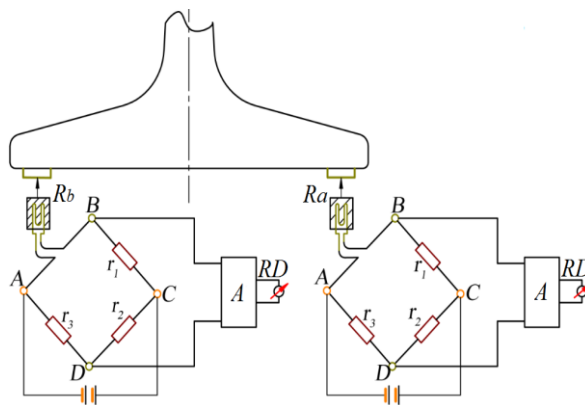


Рис. 3.41. Напівмостові схеми електровимірювальної установки:  $Ra$ ,  $Rb$  – активний (робочий) тензорезистор;  $r_1$ ,  $r_2$  та  $r_3$  – опір;  $A$  – підсилювач;  $RD$  – реєструючий прилад

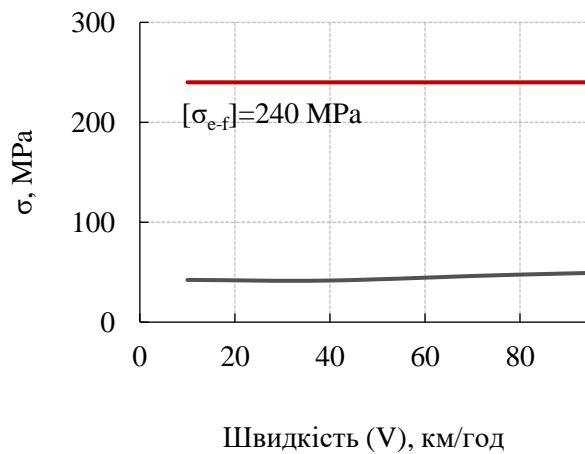


Рис. 3.42. Залежність напружень в кромці підшви рейки від швидкості руху дослідного рухомого складу

Спираючись на результати (див. рис. 3.42) можна зробити висновок, що напруження в кромці подошви рейки не перевищує допустимих і рекомендованих значень. Величини бічних сил розраховувалися за методикою проф. О. П. Єршкова з використанням експериментально отриманих величин кромкових напружень у подошві та у зовнішній грані головки рейки. Кінцевим виразом визначення бічних сил за даною методикою є:

$$H = B \cdot \sigma_{к-п}^H \quad (3.23)$$

де  $H$  – бічна сила (кН);  $B$  - коефіцієнт для визначення сили (см<sup>2</sup>);  $\sigma_{к-п}^H$  - напруження в кромці подошви рейок (МПа).

Результати значень горизонтальних сил наведено рис. 3.43.

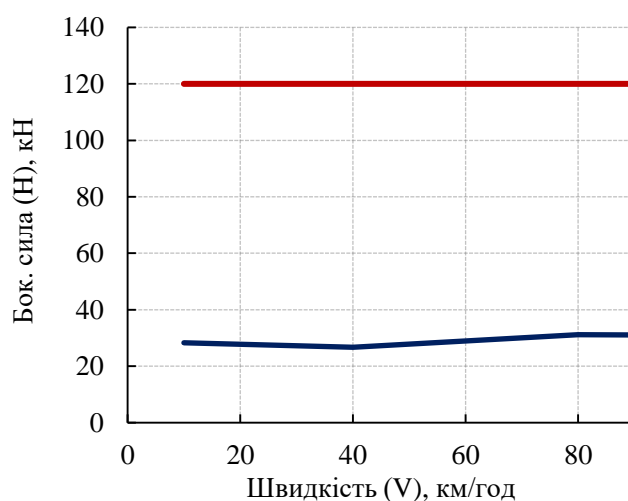


Рис. 3.43. Залежність горизонтальних сил в рейках від швидкості руху

В цілому в процесі виконання експерименту на дослідній ділянці колії отримані значення сил, та напружень в елементах верхньої будови колії не перевищували максимально допустимих значень.

Схема розташування тензометричних датчиків на клемі проміжного рейкового скріплення типу КПП-5 зображена на рис. 3.44. Для реєстрації напружень в елементах верхньої будови колії, що виникають в процесі взаємодії колії та рухомого складу, використовували тензометричні датчики базою 20 мм і опором 200 Ом. Вибір місць наклепки тензодатчиків було визначено теоретично через розрахунки в FEM за умови імовірної появи по всій довжині прутка клемі максимальних напружень, викликаних згинанням.

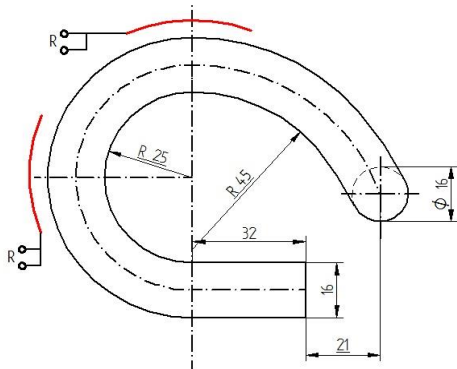


Рис. 3.44. Залежність горизонтальних сил в рейках від швидкості руху

Відповідно до затвердженої програми та методики випробувань нового рухомого складу по впливу на колію, отримані статистичні дані не перевищують рівня ймовірності  $p=0,994$  який прийнятий у розрахунках шляху на міцність.

Величини зміни напружень в прутках клеми по зовнішній стороні рейкової нитки в залежності від швидкості руху, представлені графічно на рисунку 3.45.

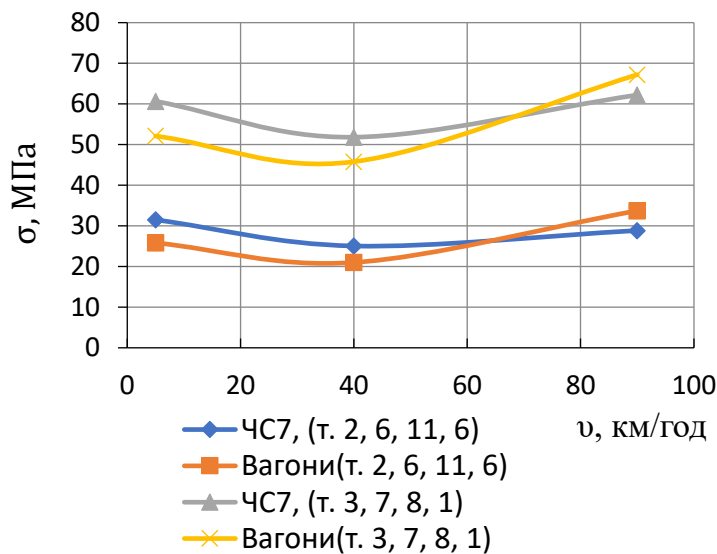


Рис. 3.45. Залежність напружень в прутках клеми від швидкості руху (зовнішня рейка)

Значення напружень в верхній частині прутка клеми по зовнішній стороні рейкової нитки (група точок 6, 11, 100, 31) розподіляються в діапазоні від 18 МПа до 32 МПа – під локомотивами, від 17 МПа до 39 МПа – під вагонами. Максимальні спостережувальні значення

напружень 45-104 МПа – під локомотивами, та 41-121 МПа під вагонами.

Значення напружень в нижній частині прутка клеми по зовнішній стороні рейкової нитки (група точок 8, 1, 99, 29) розподіляються в діапазоні від 38 МПа до 64 МПа – під локомотивами, від 41 МПа до 75 МПа – під вагонами. Максимальні спостережувальні значення 50-96 МПа – під локомотивами, та 49-108 МПа – під вагонами.

Досліджено, що експериментально-отримані напруження в прутках клеми по зовнішній стороні рейкової нитки у верхній частині прутка клеми на 50% менші ніж величина напружень у нижній частині прутка клеми – під локомотивами, та на 48% - під вагонами.

Величини зміни напружень в прутках клеми по зовнішній стороні рейкової нитки в залежності від швидкості руху, представлені графічно на рис. 3.46.

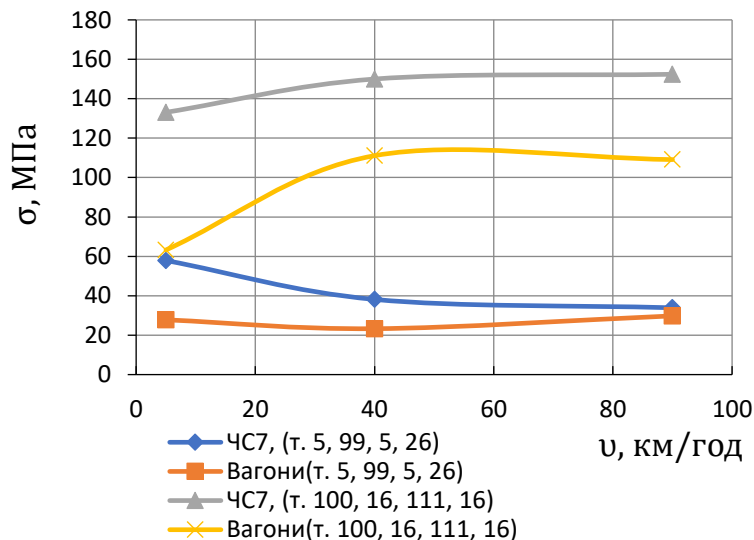


Рис. 3.46. Залежність напружень в прутках клеми від швидкості руху (внутрішня рейка)

Середні значення напружень у верхній частині прутка клеми по внутрішній стороні рейкової нитки в залежності від швидкості руху (група точок 2, 6, 111, 16) розподіляються в діапазоні від 28,02 МПа до 57,8 МПа – під локомотивами, від 21,36 МПа до 40,51 МПа – під вагонами. Максимальні спостережувальні значення 58-100 МПа – під локомотивами, 53-75 МПа – під вагонами.

Значення напружень в нижній частині прутка клеми по внутрішній стороні рейкової нитки (група точок 3, 7, 25, 5) розподіляються від 64,2 МПа до 152,4 МПа – під локомотивами та від 114 МПа до

144 МПа – під вагонами. Максимальні спостережувальні 135-426 МПа – під локомотивами, та 187-416 – під вагонами.

Встановлено, отримані значення напружень в прутках клеми по внутрішній стороні рейкової нитки у верхній частині прутка клеми на 62 % менші ніж напруження у нижній частині прутка клеми – під локомотивами, та на 72 % - під вагонами.

В загальному, аналізуючи опрацьовані дані, встановлено, що середні значення напружень у верхній частині прутка клеми по внутрішній стороні рейкової нитки на 45 % більше ніж по зовнішній частині рейкової нитки – під локомотивами, та на 4 % більше – під вагонами. Середні значення напружень у нижній частині прутка клеми по внутрішній стороні рейкової нитки на 58 % більше чим по зовнішній стороні – під локомотивами, та на 50 % більше – під вагонами.

Враховуючи до уваги результати експериментальних досліджень у прутках клеми проміжного рейкового скріплення типу КПП-5 встановлено, що напруження які виникають у прутках клеми не перевищують максимально-допустимих а отже не можуть бути основним фактором зменшення сили притискання рейки до підрейкової основи за рахунок інтенсивної втрати пружних властивостей клеми.

Виникає необхідність у проведенні досліджень з визначення впливу факторів на стан силової роботи вузла скріплення типу КПП-5 в цілому. Визначивши фактор який найбільше впливає на стан силової роботи вузла скріплення типу КПП-5, дасть можливість розробити та запропонувати заходи щодо подальшого удосконалення вузла скріплення.

### **3.2.3. Технологія контролю та утримання рейкової колії із проміжним скріпленням**

*Аналіз відстаней осей отворів та пазів анкера щодо підрейкової площадки залізобетонної шпали.* Значення пружної деформації клеми скріплення типу КПП -5 носить випадковий характер [16], що також залежить від паралельності, та відстані осі отворів та пазів анкера щодо підрейкової площадки залізобетонних шпал після його замонолічування. Схема вимірювань розташування отвору замоноліченого анкера щодо підрейкової площі шпали типу СБ3-0 показана на рис. 3.47.

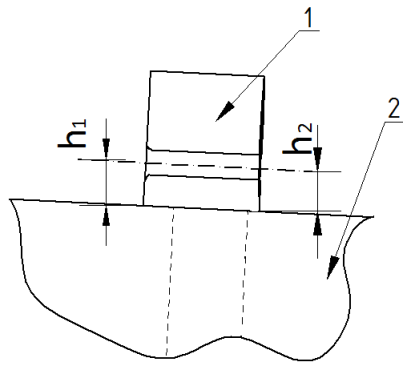


Рис. 3.47. Схема вимірів центрування осей отвору анкера відносно підрейкової площадки залізобетонної шпали: 1 – анкер; 2 – шпала типу СБЗ-0

Проаналізувавши отримані дані [16], було встановлено, що значення величини пружної деформації клеми при її монтажі в робоче положення коливається в межах 11...15 мм, середнє значення якого становить 13 мм. При цьому величина монтажно́ї сили притискання відповідно до діапазону значень (11...15 мм) складе  $P_0=13,58...19,54$  кН. Середнє значення монтажно́ї сили притискання нової клемою рейки до підрейкової основи складе  $P_0=16,56$ кН.

*Аналіз пружності клеми під час експлуатації відносно пропущеного тоннажу.* Згідно існуючої нормативно-технічної документації, елементи скріплення ремонту не підлягають, а замінюються на нові. В основному це пов'язано із відсутністю методики і практичних засобів контролю за станом силової роботи вузла скріплення типу КПП-5, а саме, контроль за роботою окремих його елементів, так як вони визначають надійність роботи вузла скріплення вцілому. Отже, існує проблема, пов'язана з відсутністю методики та технології контролю і утримання залізничної колії із скріпленням типу КПП-5.

Дослідження [16-18] проводилися за допомогою розробленої конструкції колійного приладу (рис. 3.48) для вимірювання сили притискання пружної клеми до рейки.

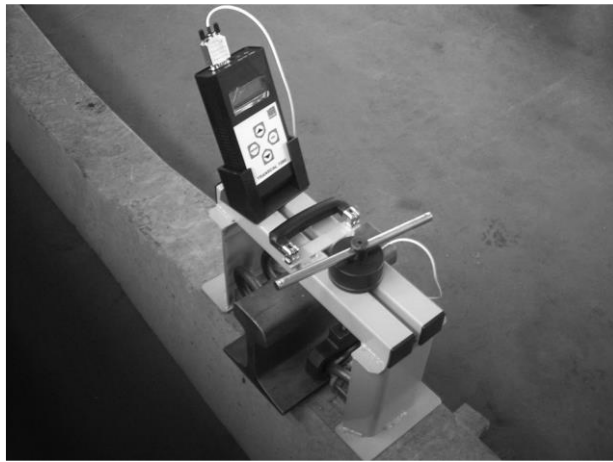


Рис. 3.48. Прилад для вимірювання пружних властивостей та сили притискання рейки до підрейкової основи із використанням пружних рейкових скріплень

Вимірювання включає підняття пружної клєми з одночасним вимірюванням необхідного зусилля, яке вимірюється кільцевим динамометром. Підйом пружної клєми перевіряється шляхом вимірювання зазору між основою рейки та затискним елементом (рис. 3.49). Проведені вимірювання свідчать про ефективність цього методу оцінки довговічності рейкових скріплень під час експлуатації в колії. Перевірка затискного зусилля дозволяє оцінити ступінь деградації системи рейкового скріплення протягом усього терміну експлуатації залізничної колії.



Рис. 3.49. Метод вимірювання сили притискання пружної клєми скріплення в колії

На 2015 р. максимальний пропущений тоннаж на ділянці колії, де експлуатується скріплення типу КПП-5 становить 447 млн. т. бр.

Відповідно, аналізуючи величини жорсткості ( $J_k$ , кН/мм), та сили притискання клеми до рейки ( $\Delta P_T$ , кН) починаючи від пропущеного тоннажу 447 млн. т. бр., було прогнозовано (штрихова лінія). Отримані результати протягом усього терміну експлуатації наочно зображені на рис. 3.50, 3.51.

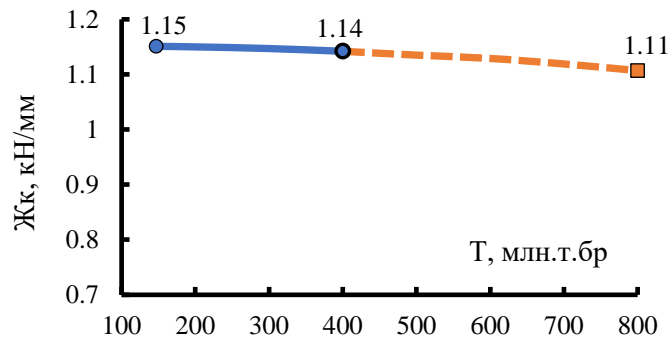


Рис. 3.50. Зміна жорсткості клеми ( $J_k$ , кН/мм), щодо пропущеного тоннажу ( $T$ , млн. т. бр.)

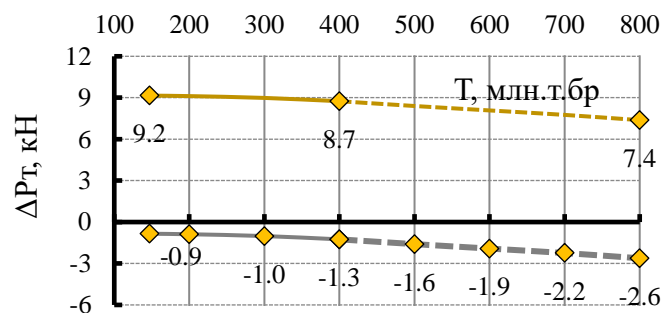


Рис. 3.51. Зменшення (-) та зміна сили притискання рейки до підрейкової основи залежно від релаксації клеми

Згідно з дослідженнями (рис. 3.51), на початкових стадіях експлуатації сила притискання рейки до підрейкової основи пружною клемою вже менша за нормативну мінімально допустиму [19]. Для більш детальної оцінки силової роботи пружних клем було виконано дослідження щодо визначення пружної деформації клеми залежно від технологічного процесу - «монтаж-демонтаж».

*Аналіз пружної деформації клеми в залежності від виконання технологічного процесу «монтаж-демонтаж».* Дослідження проводилися над пружними клемами при багато-циклового виконанні - «монтаж-демонтаж» клеми. Результати спостережень залежності

пружної деформації клеми від кількості виконання циклів «монтаж-демонаж» було апроксимовано (рис. 3.52).

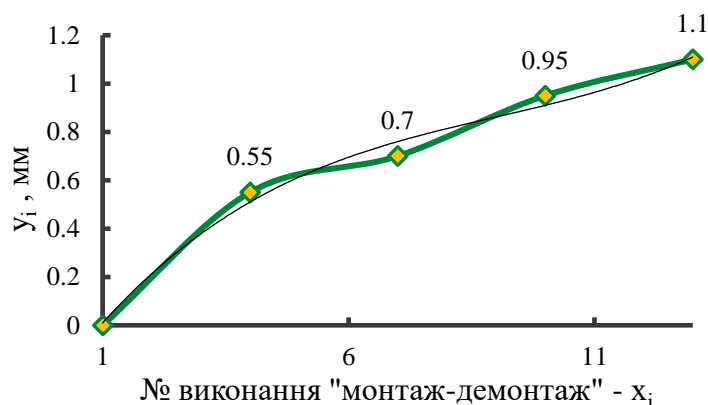


Рис. 3.52. Зміна пружної деформації клеми від кількості циклів «монтаж-демонаж»

Характер зміни пружної деформації клеми має нелінійний характер і описується функцією:

$$y_i = 0,0009x_i^3 - 0,025x_i^2 + 0,2722x_i - 0,2381. \quad (3.24)$$

де  $y_i$  – координати виміряної  $i$ -ї точки (пружна деформація клеми, мм);  $x_i$  – порядковий номер виконання «монтаж-демонаж» клеми.

Підставивши значення порядкового номера виконання - "монтаж-демонаж" у функцію (3.24), отримаємо значення координати  $y_i$  (зміна величини пружної деформації клеми). Результати зміни сили притискання в залежності від кількості виконання циклів «монтаж-демонаж» показано на рис. 3.53.

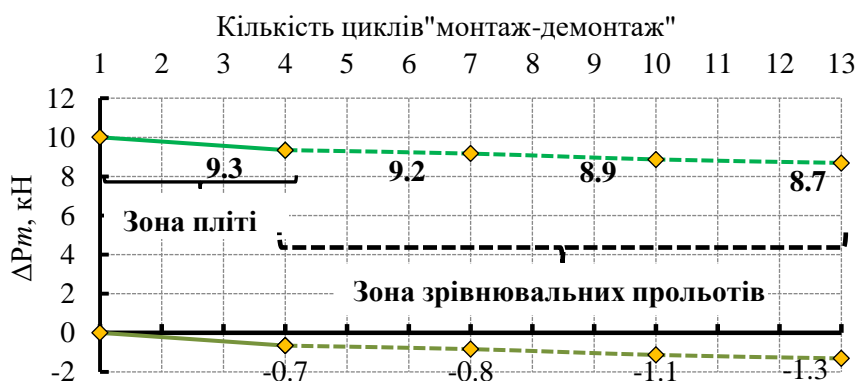


Рис. 3.53. Зменшення (-) та зміна сили притискання рейки до підрейкової основи

Відповідно до рисунка 3.53 можна спрогнозувати, кількість виконання циклів «монтаж-демонтаж» клеми в зоні зрівняльних прольотів істотно буде більшою, що впливає на зменшення сили притискання рейки до підрейкової основи.

*Аналіз досліджень залишкових деформацій підрейкових прокладок.* Дослідження залишкових деформацій проводилися над існуючими прокладками підрейкових типу ПРП-2.1 (Україна). Поперечний профіль нової прокладки типу ПРП-2.1 має вигляд синусоїдальної кривої, зі змінним розташуванням рифлів (опуклостей) по всій її площі, що показано на рис. 3.54.

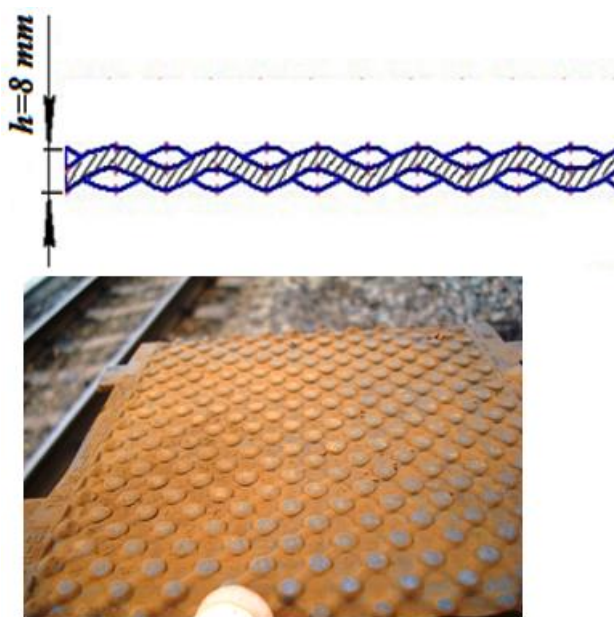


Рис. 3.54. Поперечний профіль та загальний вигляд прокладки типу ПРП-2.1

Встановлено, що при пропущеному тоннажі 440 млн. т. бр. товщина прокладки зменшується на 50%. Після  $T=440$  млн. т. бр. і до кінця міжремонтного терміну прокладка працює як жорсткий штамп. Експериментально отримані середні значення залишкової деформації підрейкових прокладок типу ПРП-2.1 показано рис. 3.55.

Товщина підрейкової прокладки типу ПРП-2.1 при експлуатації зменшується за рахунок зминання рифлів (опуклостей) на поверхні прокладки (див. рис. 3.54). Вплив залишкової деформації прокладки на зміну та зменшення сили притискання рейки до підрейкової основи протягом усього міжремонтного терміну експлуатації показано на рис. 3.56.

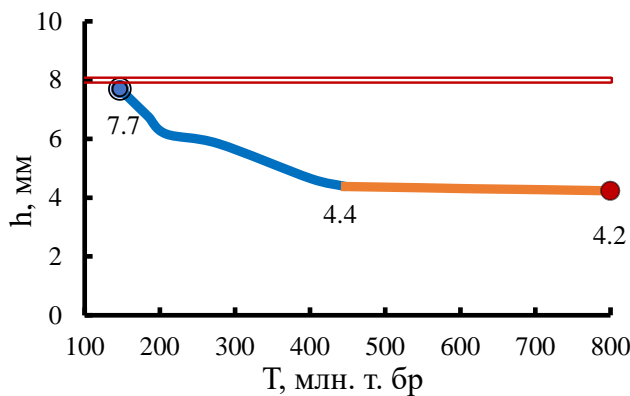


Рис. 3.55. Зміна товщини ( $h$ , мм) прокладки типу ПРП -2.1 залежно від пропущеного тоннажу ( $T$ , млн. т. брутто.)

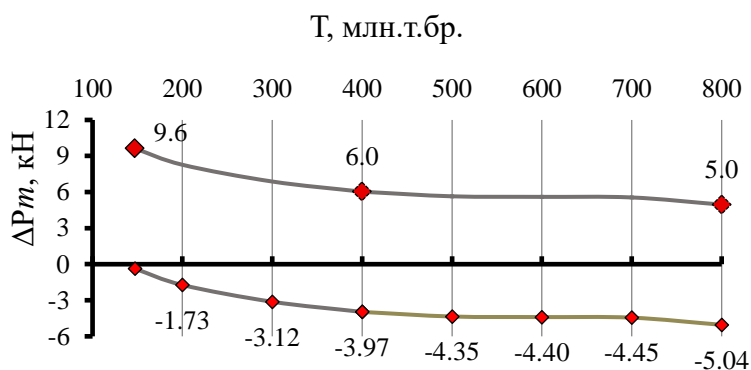


Рис. 3.56. Зменшення (-) та зміна сили притискання рейки в залежності від зношування прокладки типу ПРП-2.1 у тому числі з прогнозуванням

Надійність роботи підрейкової прокладки залежить не тільки від матеріалу, а й від конструкції. Враховуючи залежність сили притискання рейки до шпали при скріпленні типу КПП-5 від вище досліджених факторів, було встановлено їх вплив у відсотковому співвідношенні (рис. 3.57).

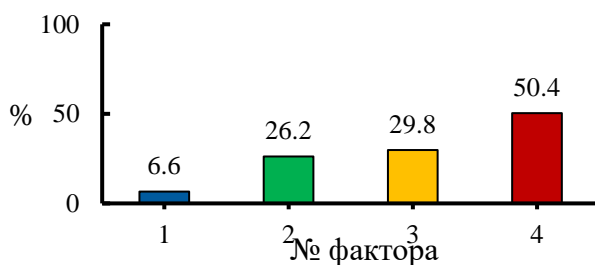


Рис. 3.57. Вплив факторів на силу притискання рейки до підрейкової опори при скріпленні типу КПП-5: 1 «монтаж-демонтаж клеми»; 2 релаксація клеми; 3 розташування осей паза та отвори анкера; 4 знос прокладки

Загальне передбачуване зменшення сили притискання рейки до підрейкової основи протягом  $T = 0-800$  млн. т. бр., зображено рис. 3.58.

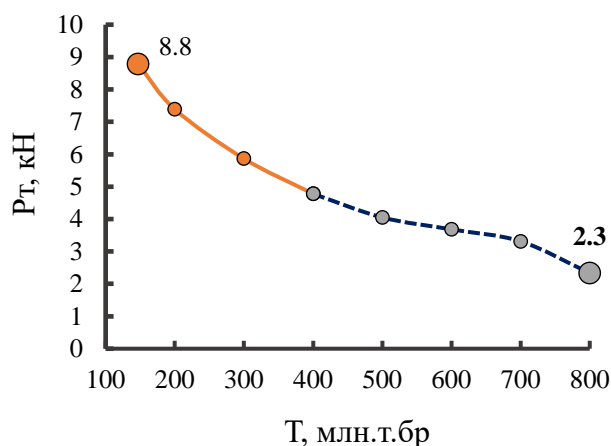


Рис. 3.58. Зміна сили притискання рейки до опорної підрейкової при скріпленні типу КПП-5

Обґрунтовуючи дослідження силової роботи вузла скріплення КПП-5, встановлено, що мінімальна сила притискання клеми має бути 11.5 кН. Відповідно до нормативної документації це більше мінімально-допустимої (10 кН). Відповідно до [19] рейки зрівняльних прольотів до залізобетонних шпал дозволяється прикріплювати скріпленнями з достатнім опором поздовжньому переміщенню рейкових батогів, що становить 25-30 кН/м. На підставі вище отриманих даних, емпірично було визначено можливе зменшення погонного опору рейкової нитки поздовжнього переміщення.

Результати зміни погонного опору рейкової нитки поздовжнього переміщення при скріпленні типу КПП-5 представлені рис. 3.59.

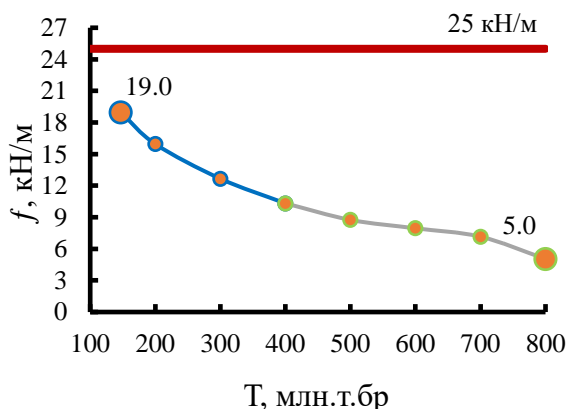


Рис. 3.59. Зміна сили опору поздовжнього переміщення рейкової нитки ( $f$ , кН/м) від пропущеного тоннажу ( $T$ , млн т бр.)

Відповідно до рис. 3.59 встановлено, величина опору поздовжнього переміщення рейкової нитки починаючи від  $T=100$  млн. т. бр. уже не забезпечується, в основному це пов'язано з інтенсивним зношуванням підрейкової прокладки (рис. 3.55).

### Список використаних джерел до розділу 3

1. Abrahamsson L. Railway Power Supply Models and Methods for Longterm Investment Analysis / PhD research project. Royal Institute of Technology. Stockholm. 2008. 154 p.
2. Спосіб стабілізації напруги в контактній мережі електрифікованої ділянки постійного струму. Пат. 98483 Україна, МПК H02J 1/00 H02J 13/00 / Д. О. Босий, В. Г. Сиченко, Є. М. Косарєв; заявник та власник патенту Дніпропетр. нац. ун-т заліз. трансп. ім. ак. В.Лазаряна. – и 201412905; за-явл. 02.12.14; опубл. 27.04.15, Бюл. № 8. – 3 с.
3. Пристрій вимірювання напруги в мережі постійного струму з бездротовою передачею даних: Пат. 95871 Україна, МПК G01R 19/257, H04W 4/20 / Босий Д. О.; заявник та власник патенту Дніпропетр. нац. ун-т заліз. трансп. ім. ак. В.Лазаряна. – № U201408019; заявл. 16.07.14; опубл. 12.01.15, Бюл. № 1. – 3 с.
4. Liu W. Hybrid electric vehicle system modelling and control. Wiley, 2017, p. 584.
5. Саблін О. І. Підвищення ефективності рекуперації електроенергії електротранспорту при обмеженому тяговому електроспоживанні / О. І. Саблін // Технологічний аудит та резерви виробництва. 2014. № 6/1 (20). - С. 21-26.
6. Rational distribution of excess regenerative energy in electric transport systems on the basis of fuzzy logic application / O. Sablin, V. Kuznetsov, V. Shinkarenko, A. Ivanov // The archives of transport. – 2017. – Vol. 42, Iss. 2. – P.7-17.
7. Конструктивно-синтезуюче моделювання розподілу енергії відновлення на основі нечіткої логіки / О. Іванов, А. Гуда, О. Саблін, В. Шинкаренко. - Системні технології, № 4 (159). – 2025. – С. 200-211.
8. Комп'ютерна програма «Автоматизована система прийняття рішень про розподіл надлишкової енергії рекуперації в системі електричного транспорту на основі нечіткої логіки»: Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 72577 / Саблін О. І., Половинко С. Г., Іванов О. П.; Україна / Зареєстровано 27.06.2017. – Київ : Мін-во економічного розвитку і торгівлі, 27-06-2017.
9. Спосіб розподілу надлишкової енергії рекуперації. Пат. 126450, Україна; МПК H02J 1/14/ Саблін О.І.; заявник та власник патенту Дніпропетр. нац. ун-т заліз. трансп. ім. ак. В.Лазаряна. – № U201812808; заявл. 22.12.2017; опубл. 25.06.2018, Бюл. № 12. – 4 с.
10. Настечик М. П. Дослідження напруженого стану в елементах вузла скріплення типу КПП-5 під дією рухомого складу / М. П. Настечик, І.О. Бондаренко, Р. В. Маркуль // Вісник ДНУЗТу, Д. – 2015 № 2. С. – 146-156. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/42174>
11. V. V. Kovalchuk, R. V. Markul, O. M. Bal, A. R. Milynych, A. Y. Pentsak, B. Z. Parneta, O. M. Gajda // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017.

- №/7 (86). – pp. 18-25. DOI 10.15587/1729 4061.2017.96549  
<http://journals.uran.ua/eejet/article/view/96549>
12. Експериментальне дослідження впливу на колію та стрілочні переводи дослідних піввагонів на візках моделі 18-4129 з навантаженням на вісь 25 тс у порівнянні з піввагоном на візках моделі 18-100 з навантаженням на вісь 23,5 тс. : Звіт про НДР / ДНУЗТ; кер. В. В. Рибкін; викон. Гнатенко В. П., Циганенко В. В., Мойсеєнко К. В. – Дніпропетровськ, 2008, – 56 с. – Бібліогр. : с. 10–56. – Інв. № 460.
  13. Умови дослідного зразка маневрового тепловоза ТЕМ103, розроблені на підставі результатів експериментальних та теоретичних досліджень його впливу на колію та стрілочні переводи / Звіт про НДР / ДНУЗТ; кер. В. В. Рибкін; викон. Гнатенко В. П., Циганенко В. В. – Дніпропетровськ, 2007. – 44 с. – Бібліогр.: с. 5–44. – Інв. № 457.
  14. М. Д. Костюк., В. В. Рибкін., І. О. Бондаренко., Н. М. Івченко. Оцінка параметрів пружної клеми марки КП.-5.2. Вісник ДНУЗТу. – Д.: 2003. № 2. – С. 11-17.
  15. Настечик М. П. Експериментальні дослідження взаємодії рухомого складу та залізничної колії із проміжним рейковим скріпленням типу КПП-5 /М. П. Настечик, Р. В. Маркуль, В. Є. Савлук // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті, Д - 2014. № 8. – С. 69-76. DOI: <https://doi.org/10.15802/ecstr2014/57938>
  16. Настечик М. П. Вплив пружних деформацій в елементах скріплення типу КПП-5 на величину сили притискання рейки до підрейкової основи / М. П. Настечик, Р. В. Маркуль, В. В. Савицький // Вісник Дніпропетровського національного ун-ту залізн. тр-ту. – Д, 2015. – № 4. – С. 110–120. DOI: DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/49217>
  17. Markul R.V., Nastechik N.P., Kovalchuk V.V., Hnativ Yu.M // International Journal of Automotive and Mechanical Engineering – 2018 15(4): pp. 5815 5825. <https://journal.ump.edu.my/ijame/article/view/145>
  18. Маркуль Р.В. Розробка технології контролю та утримання залізничної колії зі скріпленням типу КПП-5 / Р. В. Маркуль // Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Серія : Транспортні системи і технології. 2015. Вип. 26-27. - С. 58-68. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpdetut\\_tsit\\_2015\\_26-27\\_9](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpdetut_tsit_2015_26-27_9)
  19. Demchenko S.M., Piskunov V.L., Saienko O.V., Sestrynskyi V.O. Instructions for laying and maintenance of track with rails type P65, UIC60 and elastic intermediate fastening, type КПП-5 and high strength and insulating joints (ЦП-0104). Ed. Kyiv: Transport Ukraine, Inc; 2003.

## **Удосконалення безпеки та енергоефективності об'єктів транспортної інфраструктури в умовах дії різного роду загроз**

### **4.1. Використання ризик-орієнтованого підходу до аналізу енергетичної безпеки транспорту**

#### **4.1.1. Теоретичні передумови та ідентифікація ризиків**

Енергетична безпека транспорту є складовою національної безпеки, від якої залежить безперервність функціонування економіки країни. Транспортні вузли, зокрема залізничні станції, аеропорти, морські порти та автомобільні коридори, безпосередньо залежать від сталого енергозабезпечення. Будь-які порушення у цій сфері можуть призвести до значних економічних, соціальних і безпекових втрат. Отже енергетична безпека транспорту – це комплекс організаційно-технологічних заходів та дій, спрямованих на безперервну роботу транспорту, забезпечення доступності та надійності постачання енергетичних ресурсів, а також стану захищеності від потенційних загроз, таких як дефіцит палива, природні катаклізми, акти диверсій, кібератаки тощо.

Найсерйозніші виклики в сфері енергетичної безпеки постали перед Україною з початком повномасштабного вторгнення країни-агресора у лютому 2022 року. Український досвід показує наскільки складні процеси виникають в енергетичному і транспортному секторі країни у воєнний час, починаючи від впливу суспільних явищ, таких як міграція і нестача кваліфікованих кадрів, структурні зміни у

функціонуванні транспорту та логістики, перебої в ланцюгах постачання матеріалів та обладнання тощо. При цьому велике значення має наявний технічний стан енергооб'єктів, їх ресурс, ступінь зносу та ураженості (захищеності) до певних загроз. Вище перелічене потребує випрацювання ефективного захисту та алгоритмів підвищення енергетичної безпеки транспортного сектору при різноманітних потенційних ризиках.

Значна частина руйнувань в країні пов'язана з ворожими обстрілами інфраструктурних об'єктів, переважно електростанцій, що створює значний енергодефіцит в Україні, який частково покривається за рахунок імпорту електроенергії з сусідніх європейських країн. Разом з тим деякі країни-партнери з 2023 року почали надавати Україні різні системи і відповідні технології, а також ведеться розробка власних засобів протидії загрозам. Характеристики таких систем не розголошуються у відкритих джерелах, оскільки мають критичне безпекове значення, а в деяких випадках перевищують можливості відомих аналогів.

Для стабільного енергозабезпечення критично важливих об'єктів економіки в умовах ушкодження значної частини генеруючих потужностей України необхідний розвиток децентралізації та кластеризації енергетики, збільшення частки відновлюваних джерел в енергобалансі. Частково це стимулюється вдосконаленням відповідної нормативно-правової бази в сфері енергетики, а саме доповнення у 2022 році в Закону України «Про ринок електричної енергії» новим учасником ринку – оператором системи акумуляування енергії визначило його правовий статус, регламент діяльності та порядок ліцензування. Вже у 2023 році Національною комісією України з державного регулювання у сфері енергетики та комунальних послуг була надана перша ліцензія на право здійснення господарської діяльності у сфері зберігання енергії приватній компанії. Очікується що широке впровадження таких станцій зберігання повинно підвищити стійкість енергосистеми у періоди дефіциту і надлишку генеруючих потужностей, а в перспективі – підвищити ефективність децентралізації мереж та функціонування відновлюваних джерел, автономність мереж при пошкодженні окремих ділянок, безперебійність електропостачання важливих об'єктів інфраструктури.

Згідно стандарту ISO 31000:2018 "Менеджмент ризиків" ризик характеризується як "вплив невизначеності на цілі", а для його визначення встановлюється процес, який включає ідентифікацію,

аналіз (оцінку ймовірності та наслідків) та наступну обробку ризиків. Стандарт ІЕС/ISO 31010:2009 "Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику, аналіз ризиків" включає ідентифікацію джерел небезпеки, оцінку вразливостей системи та прогнозування наслідків.

Для транспортної інфраструктури можна виокремити наступні ключові групи ризиків:

- технічні (відмова обладнання, перебої енергопостачання, аварії);
- організаційні (недостатній рівень планування, відсутність резервних систем, помилки персоналу);
- зовнішні (кібератаки, терористичні дії, атаки дронів та ракет);
- природні (стихійні лиха, кліматичні фактори, надзвичайні погодні умови).

Комплексне врахування зазначених ризиків дозволяє отримати цілісне уявлення про рівень стійкості транспортної інфраструктури в контексті енергобезпеки та впливу та транспортні процеси (табл. 1).

*Таблиця 4.1.*

**Класифікація ризиків енергетичної безпеки транспорту**

Категорія ризику	Приклади факторів	Можливі наслідки
Технічні	Відмова обладнання, перебої в енергомережах	Зупинка руху, аварії
Організаційні	Відсутність резервних джерел, неякісне планування	Тривалі простої, збитки
Зовнішні	Кібератаки, атаки дронів, ракетні обстріли, диверсії	Руйнування об'єктів, жертви
Природні	Повені, буревії, спека, ожеледиця	Масові затримки, руйнування інфраструктури
Геополітичні	Війни, санкції, торговельні блокади	Перебої із постачанням палива, простої, збитки
Економічні	Різкі коливання цін на паливо, світові фінансові кризи	Збитки

На основі робіт [1, 2] представлена узагальнена класифікація потенційних загроз енергетичній безпеці, у т.ч. транспортній, які за природою походження поділені на внутрішні та зовнішні (рис. 4.1).

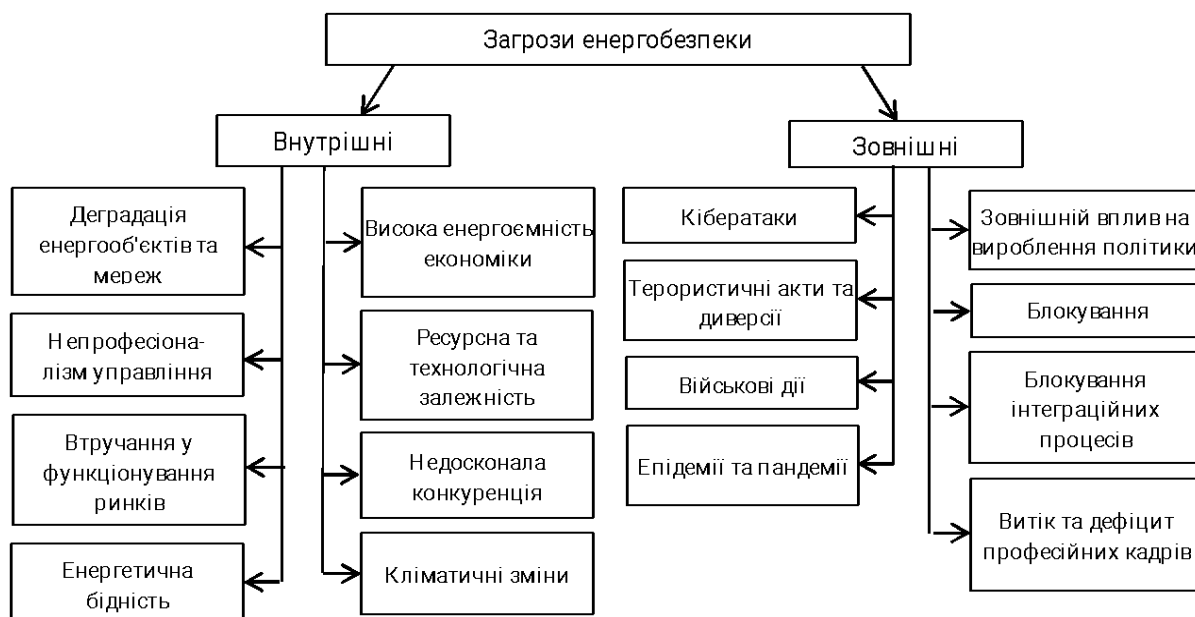


Рис. 4.1. Загальна класифікація загроз енергетичній безпеці

Для електрифікованих залізниць в умовах прямих військових загроз, ракетних і дронівих атак може бути використана наступна класифікація небезпек:

- удари по тягових підстанціях, виведення з ладу джерел живлення контактної мережі (може призвести до повного зупинення руху на великих ділянках);
- руйнування контактної мережі, пошкодження опор, проводів, що також зупиняє рух поїздів;
- атаки на розподільчі пристрої, удари по трансформаторам, розподільчим шафам, що створює каскадні відключення;
- ураження диспетчерських центрів, атаки на системи управління рухом та енергопостачанням.

До опосередкованих загроз відносяться:

- пошкодження генеруючих потужностей, удари по електростанціях, що призводять до дефіциту електроенергії в національній енергосистемі, від якої залежить робота залізниці;
- дефіцит резервного обладнання, проблеми з доступом до критично важливих компонентів (трансформатори, комутаційна апаратура) через логістичні та економічні обмеження.

#### 4.1.2. Методи оцінки та моделювання ризиків

Ризик, як кількісна міра небезпеки, у класичному варіанті визначається як добуток ймовірності настання небезпечної події на масштаби її наслідків (втрати, збитки)

$$R = P \cdot I, \quad (4.1)$$

де  $P$  – ймовірність виникнення конкретної загрози (характеризує ступень невизначеності ситуації);  $I$  – інтенсивність або масштаб наслідків (економічні збитки, соціальні проблеми, загроза обороноздатності тощо).

Для транспортної інфраструктури з урахуванням енергетичної залежності на основі розширення базової формули (4.1) для визначення сумарного ризику по  $n$  потенціальним загрозам можливе використання лінійної моделі виду

$$R = \sum_{k=1}^n \left( P_k I_k \frac{(1-E_k) \cdot C_k \cdot V_k}{E_k} \alpha_k \right), \quad (4.2)$$

де  $E_k$  – надійність енергопостачання  $k$ -того об'єкта системи, або коефіцієнт енергостійкості;  $C_k$  – коефіцієнт «критичності» об'єкта (вузлова чи невузлова залізнична станція, трансформаторна підстанція);  $V_k$  – коефіцієнт вразливості об'єкта до зовнішніх впливів (наскільки об'єкт інфраструктури чутливий до пошкоджень, слабкий кіберзахист тощо);  $\alpha_k$  – масштабний коефіцієнт, який обирається для адаптації до умов конкретної країни чи галузі.

Коефіцієнти ( $E, C, V$ ) впливають на збільшення чи зменшення рівня ризику, їх узагальнений відносний чисельний діапазон і інтерпретація наведено в табл. 4.2. Так, енергостійкість  $E$  визначає здатність системи протистояти загрозам і швидко відновлюватися, визначається ефективністю заходів реагування (здатність об'єкта системи протистояти загрозі та відновлюватися, зношеність, відсутність резервного живлення тощо). Чим вища стійкість, тим менший загальний ризик, що залежить від диверсифікації постачання, обсягів стратегічних резервів енергоносіїв, інвестицій в утримання і розвиток альтернативних транспортних технологій. Очевидно, що при малій ймовірності небезпеки, але низькій стійкості енергозабезпечення  $E$ , високому ступіні «критичності» об'єкту  $C$  та високій вразливості  $V$ , має місце високий рівень ризику.

Відносна шкала оцінки параметрів ризику

Параметр	Діапазон значень	Інтерпретація
Надійність $E$	0...1	0 – ненадійна система, 1 – повністю надійна
Критичність $C$		0 – незначний об'єкт, 1 – стратегічно важливий
Вразливість $V$		0 – захищений, 1 – повністю відкритий
Ймовірність $P$		0 – майже неможливо, 1 – майже гарантовано
Наслідки $I$		0 – мінімальні, 1 – катастрофічні

Використання додаткових коефіцієнтів в (4.2) за рахунок ускладнення базової формули (4.1) шляхом додавання відповідних множників є стандартною практикою для побудови більш реалістичних моделей. Модель (4.2) дозволяє врахувати як внутрішні параметри системи (технічний стан, організаційні процеси), так і зовнішні чинники (збройні загрози, терористичні дії, стихійні лиха).

В цілому, можна зауважити, що не існує єдиного універсального методу оцінки ризиків. Країни та великі корпорації активно розробляють і використовують складні індекси та моделі ризиків. Ці моделі допомагають визначити найслабші місця і пріоритезувати інвестиції в безпеку – наприклад, вирішити, що важливіше зараз: будувати новий LNG-термінал, або посилювати кіберзахист електромереж чи збільшувати стратегічні запаси пального.

Використання виразу (4.2) потребує кількісної оцінки вихідних даних, які залежать від безлічі факторів, що є досить складним завданням, тому у практичному застосуванні часто звертаються до використання експертних оцінок, аналізу сценаріїв та методів моделювання «що, якщо» для прогнозування розвитку кризових ситуацій. Наприклад оцінка імовірностей потенційних заргоз і їх наслідків повинні враховувати зовнішні події, які можуть завдати шкоди, де кожна загроза із табл. 4.1 має свою ймовірність та шкідливий вплив.

Якщо врахувати ризик потенційно можливих атак дронів чи ракет на об'єкти інфраструктури транспорту, то імовірність  $P_k$  успішної атаки в (4.2) може бути визначена як

$$P_{ат} = f(T, X, S) = T \cdot X \cdot (1 - S),$$

де  $T$  – експозиція об'єкта (відкритість/вразливість);  $X$  – наявність/інтенсивність загроз в регіоні;  $S$  – ефективність системи

протидії (детекція, перехоплення, фізичне укріплення), яка у свою чергу визначається як

$$S = 1 - (1 - D)(1 - P_{\text{пер}})(1 - H),$$

де  $D$  – ймовірність виявлення (детекція);  $P_{\text{пер}}$  – ймовірність перехоплення/знешкодження;  $H$  — фізична стійкість (зменшує ймовірність успішного ураження).

Якщо хоча б один із цих механізмів захисту спрацює, загалом ймовірність успіху атаки знижується, тобто наявність датчиків, радарних комплексів, ППО/систем С-UAS, патрулювання, інтеграції засобів перехоплення, укріплення будівель, броньованих контейнерів, безпечної відстані між ключовими елементами тощо – знижує ймовірність успішної атаки і потенційні наслідки.

Узагальнена методологія дослідження впливу потенційних загроз на рівень енергобезпеки різних галузей економіки та країни в цілому представлено у роботі [1]. Вибір конкретного методу аналізу визначається безпосередніми умовами експлуатації, технічними характеристиками та ступенем повноти вихідних даних про загрози. Складність оцінки ризиків в умовах неповної вихідної інформації та невизначеності полягає, перш за все, в труднощі формалізації математичної моделі, що враховує вплив сукупності факторів загроз, уразливостей, прогнозованих наслідків та причинно-наслідкових зв'язків між ними. Аналіз ризиків, окрім їх ідентифікації, вимагає ранжирування та прогнозування в різних умовах із застосуванням найбільш раціонального методу. Одним із них є вже згадуваний метод експертних оцінок, заснований на знаннях та досвіді фахівців у конкретних галузях.

Використовуючи описаний в [1] підхід, з урахуванням знань експертів можна прогнозувати сукупні негативні наслідки реалізації виявлених загроз у встановленій шкалі значимості, а також кластеризувати діапазон небезпеки в даній шкалі, виділивши три, або більше, при необхідності і повноті вихідних даних, рівнів ризику енергобезпеки – від мінімального до критичного. В табл. 4.3 наведено усереднені оцінки сукупних негативних наслідків реалізації загроз енергетичній безпеці в балах, де на відміну від шкали відносних ризиків (табл. 4.3) використовується шкала абсолютних значень.

Таблиця 4.3

**Інтегральна шкала оцінки індексів енергетичної безпеки для різних типів загроз [1]**

Загрози енергетичній безпеці	Середня оцінка за складовими інтегрованого індексу енергетичної безпеки						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
<b>Внутрішні загрози</b>							
Деградація енергетичних систем та мереж	3,5	3,8	4	3,89	3,33	3,89	3,37
Непрофесіоналізм у розробці політики	3	3,5	3,33	3	2,89	3,78	4,05
Втручання уряду у функціонування ринків	3	3,2	3,25	3,32	2,85	3,22	3,65
Висока енергоємність економіки	2,9	3,2	3,78	4,11	3,11	3	3,16
Ресурсо- та технологічна залежність	4	3,4	3,44	3,22	3	3,33	3,11
Недосконала конкуренція	3,1	3,6	3,89	3,11	2,89	3	3,42
Енергетична бідність	2,7	3,2	3,11	3,33	2,56	2,89	2,74
Зміна клімату	2,2	2,44	2,44	2,44	3,11	2,33	2
<b>Зовнішні загрози</b>							
Кібератаки	3,2	3,44	3,22	2,78	3	3,56	3,84
Відтік професійного персоналу	3,2	3	3,22	3,33	3,11	3,78	4,21
Військові дії	3,7	4,11	3,78	3,44	3,44	4,22	3,84
Зовнішній вплив на розробку політики	2,9	3,22	2,78	3,11	3	3,89	3,63
Терористичні акти	2,9	3,33	2,78	2,56	2,78	3,44	3,37
Блокування поставок	3,2	3,78	3,22	2,44	2,11	3,67	3,05
Блокування інтеграційних процесів	2,7	3	2,89	2,67	2,78	3,33	3,32
Епідемії та пандемії	2,4	2,33	2,44	2,33	2,11	2,67	2,89

Для кількісної оцінки рівня ризиків енергобезпеки проводяться експертні оцінки ймовірності розвитку різних сценаріїв реалізації кожної з потенційних загроз енергобезпеці. Для цього встановлюється шкала складових частин інтегрального індексу енергетичної безпеки за якою для даної загрози (в конкретних умовах з урахуванням максимально можливої кількості факторів) присвоюється відповідний бал у вибраному діапазоні значень, після чого проводиться градація та ранжування загроз за ступенем значущості.

На основі запропонованого алгоритму [1], показники, представлені в табл. 4.3, ранжовані за рівнем різних загроз для загальної оцінки сукупних негативних наслідків потенційних загроз у

вигляді значень ймовірності небезпечної події та рівня її ризику (табл. 4.4).

Таблиця 4.4

**Значення ризиків для різних загроз енергетичній безпеці [1]**

Загроза енергетичній безпеці	Сукупні негативні наслідки	Загальна ймовірність	Ризик
Внутрішні загрози			
Деградація енергетичних систем та мереж	3,68	3,9	14,36
Непрофесіоналізм у розробці політики	3,36	4	13,46
Втручання уряду у функціонування ринків	3,32	3,9	12,96
Висока енергоємність економіки	3,29	3,7	12,16
Ресурсо- та технологічна залежність	3,21	3,6	11,55
Недосконала конкуренція	3,36	3,3	10,08
Енергетична бідність	2,93	3,7	10,85
Зміна клімату	2,42	2,33	5,65
Зовнішні загрози			
Кібератаки	3,79	4,1	15,54
Відтік професійного персоналу	3,41	3,8	12,95
Військові дії	3,22	3,5	11,27
Зовнішній вплив на розробку політики	3,29	3,3	10,86
Терористичні акти	3,02	3	9,07
Блокування поставок	3,07	3,1	9,51
Блокування інтеграційних процесів	2,96	2,8	8,28
Епідемії та пандемії	2,45	2,8	6,87

Встановлені та ранжовані прогнозні значення ризиків лежать в основі розробки підходів та проектних рішень до планування заходів щодо забезпечення цільового рівня енергетичної безпеки на державному або об'єктному рівні шляхом зниження ризиків до прийнятних значень. Це забезпечується на основі удосконалення нормативно-правової бази, контролю та системного аналізу поточного стану безпеки, формування галузевої бази даних про динаміку зміни ризиків, їх відхилення від цільового рівня. Зрештою це дозволяє розробляти оптимальні (з погляду ефективності, вартості, часу впровадження) інженерно-технічні рішення у сфері підвищення енергобезпеки та враховувати появу нових факторів вразливостей.

### **4.1.3. Методи забезпечення енергетичної стійкості і безпеки транспортної інфраструктури**

Ризик-орієнтований підхід має ключове значення для ухвалення ефективних управлінських рішень у сфері забезпечення безпеки транспорту, у т.ч. енергетичної. По-перше, він дозволяє визначити пріоритетність заходів безпеки: від модернізації технічного обладнання до впровадження систем резервного енергопостачання та підвищення кіберзахисту тощо. По-друге, створення профілів ризику для окремих об'єктів дає можливість більш точно оцінити потенційні наслідки збоїв і своєчасно підготувати плани реагування.

Для мінімізації енергетичних ризиків у [1] розглянуто підходи до планування заходів щодо забезпечення цільового рівня енергетичної безпеки. Для гарантування ефективності та результативності державної політики у сфері енергетичної безпеки необхідно забезпечити систематичну оцінку її рівня, комплексності, послідовності та узгодженості дій органів влади та суб'єктів господарювання щодо нейтралізації загроз та/або зменшення їх сукупних негативних наслідків. Для цього необхідно запровадити періодичний аналіз стану енергетичної безпеки, зокрема, формування реєстру, ідентифікацію та аналіз загроз для встановлення цілей та завдань для суб'єктів гарантування енергетичної безпеки та визначення пріоритетних заходів реагування.

Систематична оцінка загроз та звітність про стан енергетичної безпеки надасть можливість [1]:

- розробити заходи, спрямовані на підвищення рівня національної/галузевої безпеки та/або нейтралізацію загроз;
- порівняти рівні загроз у різні періоди часу для визначення тенденцій та близькості поточного рівня енергетичної безпеки до цільового, оцінити вплив дестабілізуючих факторів, результати та наслідки вжитих заходів;
- вибрати найкращі рішення з точки зору гарантування енергетичної безпеки;
- прогнозувати стан енергетичної безпеки за різних сценаріїв розвитку паливно-енергетичного комплексу та національної економіки загалом;
- вибрати варіанти розвитку держави з урахуванням гарантування енергетичної безпеки.

Практичне застосування розглянутих заходів включає наступні кроки:

- оцінку стійкості енергозабезпечення залізничних вузлів, аеропортів і морських портів;
- моделювання сценаріїв впливу атак дронів або ракет на об'єкти енергетичної інфраструктури;
- аналіз каскадних ефектів у разі відмови однієї з ланок транспортної системи.

Технології підвищення захищеності транспортної інфраструктури традиційно поділяють на технічні, організаційні та управлінські, а також впровадження інноваційні та інтегровані рішення.

Одним із ключових напрямів забезпечення енергетичної безпеки транспортної інфраструктури є впровадження технічних рішень, спрямованих на зменшення залежності від основних джерел централізованого енергопостачання, а саме:

- використання резервних джерел енергії (дизель-генераторів, акумуляторних станцій, систем безперебійного живлення);
- інтеграція відновлюваних джерел енергії (сонячних панелей, вітрових турбін) для забезпечення критично важливих об'єктів;
- модернізація обладнання з урахуванням вимог енергоефективності;
- підвищення рівня фізичного захисту енергетичних систем (захищені кабельні мережі, броньовані трансформаторні пункти тощо).

Забезпечення енергетичної стійкості вимагає чіткої координації та системного підходу на рівні управління транспортною інфраструктурою. Серед основних організаційних кроків:

- розробка планів безперервності діяльності (Business Continuity Plans) для критичних об'єктів;
- створення системи моніторингу споживання та розподілу енергії з можливістю прогнозування навантажень;
- регулярне проведення навчань та тренувань персоналу щодо дій у кризових ситуаціях;
- формування резервних запасів палива для автономного забезпечення роботи вузлів транспорту;
- впровадження стандартів енергоефективного управління (ISO 50001).

Сучасні виклики, зокрема кібератаки та загрози застосування дронів і ракет, потребують комплексних інноваційних рішень:

- використання «розумних» систем управління енергетичними мережами (Smart Grid) для гнучкого реагування на збої;
- інтеграція цифрових платформ моніторингу ризиків і загроз у реальному часі;
- застосування засобів кіберзахисту та систем виявлення вторгнень;
- побудова багаторівневих систем протидії повітряним загрозам (C-UAS, ППО) для захисту енергетичних вузлів;
- міжгалузева координація між транспортними підприємствами, енергетичними компаніями та державними структурами для швидкого реагування.

Розглянуті заходи узагальнені і представлені в табл. 4.5.

*Таблиця 4.5*

**Класифікація заходів з підвищення енергетичної безпеки транспортної інфраструктури**

Напрямок	Приклади заходів	Очікуваний ефект
Технічні	Резервні джерела, інтеграція відновлюваних джерел, модернізація, підвищення фізичного захисту	Зменшення залежності від центрального енергопостачання
Організаційні	Плани безперервності, моніторинг, підготовка персоналу	Скорочення часу відновлення після інциденту
Інноваційні	Smart Grid, кіберзахист, протидія дронам і ракетам	Підвищення гнучкості та захищеності інфраструктури

Із вищенаведеного та табл. 4.5 очевидно, що методи забезпечення енергетичної стійкості транспорту охоплюють широкий спектр технічних, організаційних та інноваційних рішень. Їх комплексна реалізація дозволяє суттєво зменшити рівень ризиків, підвищити надійність функціонування транспортної системи та забезпечити її здатність ефективно протистояти як внутрішнім збоям, так і зовнішнім викликам.

Наостанок зазначимо, що важливою комплексною задачею підвищення енергобезпеки транспорту є інтеграція енергоефективності та безпеки в управління транспортною інфраструктурою. Впровадження енергоощадних технологій не лише знижує витрати та викиди парникових газів, але й сприяє підвищенню стійкості системи. Ефективне використання енергії зменшує

залежність від зовнішніх постачальників, що безпосередньо знижує рівень стратегічних ризиків.

Для інтеграції енергоефективності та безпеки необхідне комплексне управління, що передбачає:

- планування модернізації транспортних систем із застосуванням енергоефективних технологій;
- впровадження стандартів сталого розвитку та «зелених» транспортних рішень;
- поєднання систем енергоменеджменту та ризик-менеджменту на підприємствах;
- створення єдиних центрів моніторингу, які поєднують контроль за енергоспоживанням та безпековими загрозами;
- застосування принципів «розумної інфраструктури», де енергетичні та безпекові аспекти інтегровані у цифрові системи управління.

Попри значні переваги, інтеграція енергоефективності та безпеки стикається з низкою викликів: високі початкові інвестиції, потреба у кваліфікованих кадрах, складність міжгалузевої координації. Водночас перспективи розвитку включають розширення використання цифрових технологій, штучного інтелекту та автоматизації, що дозволяє створювати саморегульовані системи управління енергетичною безпекою транспорту.

Інтеграція енергоефективності та безпеки є стратегічним напрямом розвитку транспортної інфраструктури. Вона дозволяє одночасно скорочувати витрати ресурсів, підвищувати екологічність та забезпечувати стійкість до внутрішніх і зовнішніх загроз. У майбутньому цей підхід стане основою для створення «розумних» транспортних систем нового покоління.

Отримані результати аналізу є основою для формування стратегії розвитку та захисту транспортної інфраструктури. Зокрема, вони можуть використовуватися для обґрунтування інвестицій у системи резервування, створення регіональних центрів моніторингу загроз та впровадження нормативних вимог до об'єктів критичної інфраструктури.

Таким чином, ризик-орієнтований підхід забезпечує не лише оцінку поточного стану безпеки, а й надає інструменти для її стратегічного підвищення. Це створює основу для формування стійкої та енергоефективної транспортної системи, здатної функціонувати навіть у складних умовах внутрішніх та зовнішніх викликів.

## **4.2. Підвищення рівня безпеки і захищеності транспортної інфраструктури від повітряних загроз на основі їх акустичної ідентифікації**

### **4.2.1. Постановка завдань**

Залізнична інфраструктура, незалежно від того, чи вона електрифікована, чи працює на дизельній тязі, є ключовим елементом ефективного функціонування глобальних транспортних мереж. Особливо важливу роль відіграють електрифіковані залізниці, які забезпечують значні екологічні переваги: електропоїзди суттєво знижують викиди парникових газів, мінімізують забруднення повітря та сприяють досягненню цілей сталого розвитку. У порівнянні з дизельними системами, вони відрізняються вищою енергоефективністю та економічною доцільністю, дозволяють досягати більших швидкостей, забезпечують кращу динаміку руху й знижують рівень шуму. Сукупність цих переваг робить електрифікацію основою сталих транспортних рішень, підвищуючи водночас експлуатаційну надійність і якість життя населення, яке проживає поблизу залізничних коридорів. Тому у багатьох країнах світу електрифікація залізниць стала пріоритетним напрямом інвестицій, зокрема в Європі, Азії та Північній Америці, які сьогодні демонструють лідерство у впровадженні чистих, швидкісних і надійних транспортних систем.

Однак, як електрифіковані, так і неелектрифіковані залізничні системи стикаються зі значними проблемами, пов'язаними з технічним обслуговуванням, безпекою та експлуатаційною надійністю. Повітряні лінії в електрифікованих мережах, зокрема, схильні до зносу, пошкоджень, пов'язаних з погодними умовами, та потребують частого технічного обслуговування для забезпечення безпечної та ефективної роботи. Ці проблеми можуть призвести до перебоїв у обслуговуванні, високих витрат на технічне обслуговування та збільшення часу простою. Інтернет речей (IoT) пропонує перспективні рішення для моніторингу інфраструктури в режимі реального часу, що дозволяє проводити прогнозне технічне обслуговування, яке передбачає збої та оптимізує графіки технічного обслуговування. Наприклад, пристрої IoT можуть вимірювати критичні електричні параметри, такі як напруга та струм в пристроях електропостачання, допомагаючи

зменшити втрати енергії та забезпечити безпечну та ефективну роботу системи.

В останні роки з'явилася нова та нагальна загроза для залізничної інфраструктури – недорогі безпілотні літальні апарати, широко відомі як дрони. Триваючий конфлікт в Україні підкреслив вразливість критичної інфраструктури, оскільки дрони використовуються для націлювання та пошкодження цінних активів, таких як залізничні та енергетичні системи. Традиційні системи протиповітряної оборони мають труднощі з виявленням та перехопленням цих невеликих низьколітаючих пристроїв, які важко відстежувати за допомогою звичайних методів. Це створило нагальну потребу в інноваційних підходах до виявлення та ідентифікації дронів у системах моніторингу інфраструктури.

У цій роботі розглядаються ці проблеми, досліджуючи інтеграцію аудіосистем виявлення дронів з моніторингом залізничної інфраструктури в режимі реального часу. Зокрема, вона зосереджена на використанні можливостей систем моніторингу широкого спектру (WAMS) для моніторингу механічних параметрів пристроїв електропостачання, зокрема, таких як натяг та знос повітряних ліній. Крім того, вона досліджує, як ці системи можна покращити, включивши децентралізовані, автономні рішення на основі штучного інтелекту для виявлення БПЛА, використовуючи акустичний аналіз для ідентифікації унікальних звукових сигнатур дронів.

Метою цієї роботи є надання комплексного огляду сучасного стану технологій моніторингу залізниць, включаючи інтеграцію Інтернету речей для моніторингу стану інфраструктури та виявлення загроз від дронів. Це включає:

- аналіз поточного стану існуючих рішень для моніторингу залізничної інфраструктури;
- дослідження акустичних сигнатур повітряних загроз та їх ідентифікацію;
- вивчення методів інтеграції машинного навчання та нейронних мереж у виявлення дронів у режимі реального часу;
- розробку апаратного та програмного рішення для вбудованого аудіовиявлення дронів на основі штучного інтелекту, оптимізованого для використання на мікроконтролерних платформах, таких як STM32.

Вирішуючи ці цілі, дослідження має на меті сприяти розробці більш стійких та безпечних залізничних систем, здатних захищати

критично важливі активи від нових загроз, зберігаючи при цьому операційну ефективність.

Збільшення інтенсивності ворожих атак на об'єкти критичної інфраструктури, в т.ч. транспортної (залізничні станції, вузли, тягові підстанції, депо, мости тощо), де, здебільшого, після оголошення повітряної тривоги не припиняється робота і технологічні процеси, значно підвищує потенційні ризики для персоналу, тому потребує вдосконалення системи безпеки таких об'єктів.

Для завчасного попередження робітників про небезпеку використовується національна система оповіщення про повітряну тривогу по окремих областях країни, однак для об'єктів що не припиняють свою роботу важливим є визначення небезпек на більш локальному (об'єктовому) рівні, що може бути реалізовано на основі новітніх технічних засобів за різноманітних ознак. В кінцевому випадку завчасне попередження дозволить працівникам не зупиняючи технологічні процеси встигати вжити необхідних безпекових заходів, наприклад покинути вразливі ділянки і прослідувати в укриття або на більш безпечні майданчики.

У першу чергу підвищення безпеки полягає в ранньому виявленні та розпізнаванні повітряних небезпек (ПН), що наближаються, таких як ударні безпілотні літальні апарати (БПЛА) або крилаті ракети (КР), з метою використання цієї інформації для прийняття відповідних рішень і захисту.

Виявлення наближення потенційної повітряної загрози базується на основі різних фізичних принципів, зокрема оптичного, радіолокаційного та акустичного [1–3]. Система ідентифікації повинна забезпечувати не лише фіксацію факту потрапляння повітряної небезпеки в контрольований простір (виявлення), а й розпізнавання типу, визначення параметрів руху (напрям, висота, швидкість), та селекцію в умовах різного роду завад та можливість інтеграції даної інформації в систему безпеки більш високого рівня.

Ефективне вирішення даних завдань на сучасному технологічному рівні потребує первинних знань та баз даних про унікальні портрети БПЛА різної фізичної природи та їх можливі зміни, що дозволяє підвищувати якість ідентифікації і обмін інформацією на основі використання методів штучного інтелекту.

#### 4.2.2. Огляд методів ідентифікації повітряних небезпек

У табл. 4.6 наведено порівняння основних можливостей засобів виявлення повітряних цілей [3]. Треба зауважити, що універсальних засобів виявлення БПЛА за надійністю, всепогодною дією і точністю визначення координат не існує, також важливим фактором системи ідентифікації є її вартість, простота і можливість швидкого розгортання.

Таблиця 4.6

##### Порівняні характеристики засобів виявлення повітряних небезпек

Характеристики	Засоби виявлення повітряних небезпек		
	Оптичні	Радіолокаційні	Акустичні
Виявлення	обмежено	обмежено	обмежено
Розпізнавання	без обмежень	обмежено	обмежено
Селекція	без обмежень	обмежено	обмежено
Вимірювання дальності	обмежено	без обмежень	обмежено
Вимірювання кута місця	без обмежень	без обмежень	обмежено
Вимірювання швидкості	обмежено	обмежено	обмежено
Залежність від погодних умов	сильна	слабка	середня
Залежність від зовнішньої освітленості	сильна	не залежить	не залежить
Вартість	середня	висока	низька

Оптичні засоби (ОЗ) є досить надійними для виявлення малорозмірних, малошвидкісних і таких що мають малі значення теплової та радіолокаційної сигнатур БПЛА [4].

Важливим показником ефективності ОЗ є межа виявлення БПЛА різної розмірності для об'єктиву оптико-електронної системи (ОЕС) із заданим кутом поля зору та фокусною відстанню  $f$  за метеорологічної дальності видимості 100 км і коефіцієнті розсіювання у видимій області спектра 0,0392 [5]. Зменшення межі виявлення у конкретних умовах відносно до границі в ідеальних умовах приблизно оцінюють за зміною сили випромінювання на одиницю тілесного кута для приймача випромінювання (об'єктиву ОЕС). Якість оптичної ідентифікації суттєво залежить від зміни спектрального коефіцієнта пропускання атмосфери за довжинами хвиль, також залежить від метеорологічної дальності видимості і визначається погодними умовами (вологістю і температурою повітря, атмосферним тиском, швидкістю вітру, наявністю опадів тощо).

Так, наприклад, серпанок і вологість призводять до істотного зниження прозорості атмосфери в областях спектра, в яких працюють приймачі випромінювання ОЕС, що спричиняє проблеми у застосуванні методу. Особливо суттєвим є зниження помітності ПН в інфрачервоному (ІЧ) діапазоні довжин хвиль випромінювання 0,5...0,76 мкм, оскільки, за винятком польоту БПЛА з повітряно-реактивним двигуном і БПЛА з ракетним двигуном на твердому паливі, основним джерелом теплового випромінювання є елементи корпусу БПЛА [6]. Ці ділянки конструкції БПЛА відрізняються невисокими значеннями теплових потоків (25...50 Вт/м<sup>2</sup>), отже низька сила випромінювання з урахуванням зниження прозорості атмосфери не дозволяє використовувати ІЧ-техніку для підвищення ймовірності виявлення БПЛА, особливо тих, що мають електричний двигун, у яких мінімальний рівень ІЧ-помітності.

Радіолокаційний контроль повітряного простору є досить ефективним у тому випадку, коли помітність (відбивна здатність) БПЛА в діапазоні радіохвиль відповідає розпізнавальній здатності радіолокаційної станції (РЛС). Відбивні властивості БПЛА в РЛС оцінюються за ефективною площею розсіювання (ЕПР) повітряного об'єкта [7].

Незважаючи на те, що РЛС є достатньо надійним засобом контролю повітряного простору, завдання виявлення та ідентифікації малорозмірного малошвидкісного ударного БПЛА з малою ЕПР є проблемним [8]. БПЛА з масою менше 5,0 кг суттєво звужують межі їхнього виявлення, а за високої частки радіопрозорих матеріалів в конструкції майже унеможлиблює їхнє виявлення за допомогою РЛС [9]. Також варто зазначити, що РЛС є активними засобами сканування повітряного простору, а через їхнє випромінювання під час роботи стають вразливими до протирадарних БПЛА.

Важливою інформативною ознакою БПЛА під час польоту є акустичне випромінювання (АВ), яке дозволяє виявляти БПЛА в умовах коли оптичні та радіолокаційні засоби не забезпечують необхідної точності. Акустичні (звукові) хвилі, що генеруються БПЛА, поширюються у просторі і можуть фіксуватися акустичними приймачами сигналу (мікрофонами), які перетворюють акустичний тиск на електричний сигнал. Межі акустичного виявлення визначаються чутливістю мікрофонів.

Джерелами звукових хвиль БПЛА зазвичай є рухомі установки і лопаті повітряних гвинтів, де частота генерованого звуку кратна

частоті обертання колінчастого вала поршневого двигуна, кількості та частоті обертання лопатей повітряного гвинта, а інтенсивність звуку залежить від швидкості обтікання лопатей повітрям [10].

У реальному середовищі АВ згасає внаслідок в'язкості повітря та молекулярного тертя. Загасання звукових хвиль також відбувається при їхньому поширенні вздовж поглинаючої поверхні та визначається її коефіцієнтом поглинання. Однак істотношу роль у згасанні звукових хвиль відіграє турбулентність повітря. Неабияку вагу в цьому відіграє вітер і висхідні потоки повітря. На низьких частотах додаткове загасання залежить від відстані до джерела звуку, а на далеких (понад 4 км) відстанях високі частоти практично не чутні.

Застосування акустичних систем виявлення забезпечує визначення пеленгу літального апарату та його класу (типу). Акустичні системи, мають такі переваги [11]:

- забезпечують стійке автоматичне виявлення малошвидкісних маловисотних повітряних цілей в будь-яких погодних умовах та в умовах складних рельєфів місцевості;
- скритність роботи та збереження працездатності в умовах радіоелектронної протидії;
- малі габарити, низьке енергоспоживання та кращі показники «ефективність–вартість».

Завдання акустичної ідентифікації БПЛА і КР полягає у розробці моделі, яка дозволить адекватно описувати спектральні і кореляційні властивості акустичного сигналу на значних часових інтервалах, та забезпечить підвищення спектрального розрізнення в області низькочастотних складових спектра досліджуваного сигналу, а, отже, підвищення ефективності розв'язання задачі ідентифікації БПЛА за АВ на основі їхніх відомих акустичних портретів, для подальшого навчання нейронних мереж з метою підвищення точності визначення в умовах дії завад та у разі зміни в конструкції БПЛА, що призводить до модифікації його акустичного портрету [12].

#### **4.2.2. Існуючі рішення для моніторингу залізничної інфраструктури**

Численні дослідження [13–14] стосувалися моніторингу та діагностики залізничної інфраструктури з метою підвищення безпеки та ефективності експлуатації. В одній з таких робіт представлено систему PAMAR SMD – діагностичний пристрій для залізничних

контактних мереж, який збирає дані в режимі реального часу про напругу живлення, температуру, вологість та загальний стан системи. Ця система сприяє підвищенню безпеки, знижує витрати на відновлення та мінімізує компенсації, пов'язані із затримками. Інше дослідження зосереджено на моніторингу струмоприймачів під час фактичної експлуатації, представляючи підхід на основі станцій, який виявляє проблеми шляхом аналізу вертикального зміщення контактних проводів, спричиненого проїздом поїздів. Виявляючи надмірні або недостатні контактні сили, ця система забезпечує безпечну та надійну роботу пантографа.

Система моніторингу контактної мережі Siemens Sicat® CMS (Ceterary Monitoring System) [15] пропонує безперервний та безконтактний моніторинг сил натягу контактних проводів. Вона оцінює дані датчиків та передає відфільтровану інформацію до центрів управління для швидкого виявлення та локалізації несправностей. Серед помітних особливостей – неінвазивні вимірювання, які запобігають зносу механічних компонентів, надійне виявлення за допомогою відстеження нахилу поворотного важеля, легке модернізування існуючих систем та низькі вимоги до обслуговування. Сигналізація, керована подіями, та цільове повідомлення про несправності ще більше підвищують експлуатаційну ефективність без перевантаження даними.

Компанія Sensonic GmbH [16] розробила систему SonicTwin®, яка використовує волоконно-оптичне зондування вібрації для отримання прогнозованої інформації про цілісність колії та потенційні ризики для безпеки. Використовуючи існуючу волоконно-оптичну комунікаційну інфраструктуру, це рішення забезпечує економічно ефективний та масштабований моніторинг.

Додаткові досягнення в діагностиці залізниць включають інтеграцію сенсорних технологій та аналіз даних у режимі реального часу [17]. Підхід «закритої системи» [18], який поєднує передові датчики з централізованими архітектурами управління, дозволяє покращити оперативність реагування на обслуговування інфраструктури. Паралельні зусилля в галузі інтелектуальних систем тягового живлення [19] спрямовані на оптимізацію управління енергоспоживанням та зменшення капіталовкладень завдяки оптимальному управлінню перетворювачами, пристроями накопичення енергії та відновлюваними джерелами. Ці рішення базуються на синхронізованих вимірюваннях розподілу напруги, що

досягаються за допомогою малопотужних мікроконтролерів (наприклад, Atmega128RFA1) та бездротової передачі даних.

У контексті зростаючих загроз безпеці, використання безпілотних літальних апаратів створює нові вразливості для критичної інфраструктури, включаючи залізничні системи. Розробка технологій виявлення дронів є важливою для протидії зловмисним вторгненням БПЛА. В одному дослідженні [20] представлена автономна платформа виявлення дронів далекого радіусу дії, яка інтегрує апаратні та програмні компоненти для ефективною локалізації цілей. Вона оснащена адаптивною системою фокусування камери та регіональною нейронною мережею, що забезпечує точність виявлення 95,5% на відстанях до 250 метрів. Система, побудована на NVIDIA GeForce GTX 1080, обробляє двопотоковий медіа-вхід з низькою затримкою та записує події вторгнення з контекстними метаданими.

Ще один перспективний підхід [21] використовує алгоритми акустичного виявлення та глибокого навчання для ідентифікації БПЛА. Щоб подолати дефіцит маркованих аудіоданих дронів, пропонується гібридний набір даних, що поєднує реальні записи із синтетичним аудіо, згенерованим генеративно-змагальними мережами (GAN). Порівняльне тестування архітектур CNN, RNN та CRNN демонструє ефективність гібридного набору даних у розпізнаванні як відомих, так і нових БПЛА, підтверджуючи потенціал GAN для підвищення точності класифікації.

Зростаюча повсюдність дронів у таких галузях, як логістика, безпека та інженерія, підвищує актуальність автоматизованих систем виявлення. У [22] модель виявлення на основі YOLOv4 навчається на змішаних наборах даних про дрони та птахів. Оцінка продуктивності – з використанням таких показників, як середня точність (mAP), прецизійність, повнота, F1-оцінка та FPS – показує, що система досягає високої швидкості та точності виявлення, особливо при тестуванні на платформах DJI Phantom III та DJI Mavic Pro.

У сукупності ці дослідження підкреслюють швидкий розвиток та інтеграцію систем моніторингу широкої зони та технологій виявлення дронів у сучасний захист інфраструктури. Використання платформ Інтернету речей, хмарних обчислень та недорогих вбудованих систем дозволяє розгортати масштабовані, високопродуктивні рішення для моніторингу. Включення механічних та екологічних параметрів підвищує стійкість системи, тоді як глибоке навчання та генерація синтетичних наборів даних значно підвищують точність виявлення

дронів. Ці інновації забезпечують своєчасне виявлення несправностей, ефективне планування технічного обслуговування та стійкість до повітряних загроз, підтримуючи безпечну, надійну та сталу роботу критично важливої залізничної інфраструктури.

#### **4.2.3. Аналіз акустичних сигнатур повітряних загроз**

Ідентифікація та класифікація повітряних загроз на основі їхніх акустичних сигнатур є критично важливим компонентом розробки ефективних систем виявлення в реальному часі для захисту критичної інфраструктури. Особлива увага в цьому дослідженні приділяється низьколітаючим безпілотним літальним апаратам (БПЛА), які становлять значну небезпеку через свою здатність наблизитися до цілей на малих висотах, часто уникаючи звичайного радіолокаційного виявлення. Ці БПЛА зазвичай виробляються серійно з використанням економічно ефективних двигунів внутрішнього згоряння, таких як поршневий двигун MD-550, що широко використовується в імпровізованих або комерційно модифікованих ударних безпілотниках. Їхній політ створює характерний акустичний слід – поєднання циклічної роботи поршневого двигуна та взаємодії лопатей ротора з повітрям – який часто сприймається як глибоке, повторюване гудіння чи гул.

Для подальшого вдосконалення алгоритмів класифікації набір даних було розширено, включивши аудіо- та відеофрагменти прольотів крилатих ракет. Ці загрози демонструють чітко інший акустичний профіль, що характеризується більш стабільним і безперервним високочастотним спектром шуму, спричиненим стійким реактивним рухом. Однак кількість перевірених записів крилатих ракет була обмежена порівняно зі значним обсягом даних БПЛА типу Shahed.

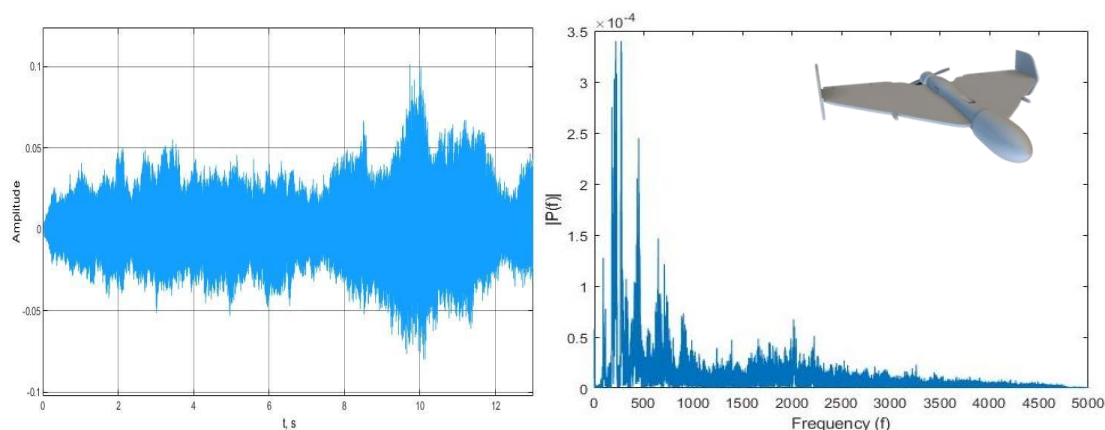
Важливим кроком у цьому дослідженні був збір та попередня обробка аудіосемплів із загальнодоступних джерел, включаючи відкриті канали соціальних мереж. Зібрані записи були відредаговані для вилучення чистих акустичних сегментів – видалення звуків вибухів, людської мови та інших нерелевантних шумових артефактів. Аудіодоріжки були відокремлені від відеозаписів та обрізані, щоб зосередитися на фазах прольоту. На цьому етапі використовувалися стандартні програмні засоби для обробки аудіо та відео (наприклад, Audacity, FFmpeg).

Оброблений набір даних потім був підданий спектральному аналізу для виділення стабільних частотних компонентів, які постійно з'являються в записах конкретних повітряних загроз. Аналіз було проведено в MatLab за допомогою Audio Toolbox та DSP System Toolbox, що дозволило генерувати спектрограми високої роздільної здатності та статистичне моделювання розподілу звукової енергії з плином часу та частоти.

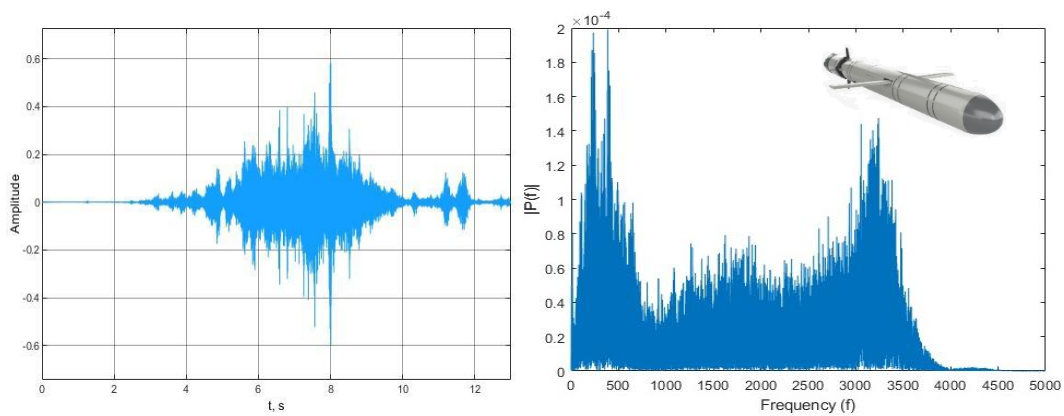
Процес вилучення акустичної сигнатури включав порівняння кількох випадків прольотів БПЛА та ракет, фільтрацію шуму навколишнього середовища та виявлення повторюваних спектральних шаблонів. Це дозволило отримати характерні акустичні «відбитки» для кожного типу повітряної загрози. Ці «відбитки» включали домінуючі частотні смуги, гармонійні структури та часову динаміку звукової енергії.

Отримані акустичні моделі враховують мінливість звуку через доплерівські зсуви, поширення в різних середовищах та обмеження записуючих пристроїв. Незважаючи на ці фактори, у кількох зразках були виявлені узгоджені характеристики спектральної щільності, що забезпечує надійну основу для класифікації сигналів.

Приклади необроблених акустичних сигналів та їхні відповідні частотні спектри для двох різних типів повітряних загроз – ударного безпілотної та крилатої ракети – показані на рис. 4.2. Ці сигнали ілюструють часову форму хвилі та спектральний розподіл при піковій інтенсивності. Отримані акустичні сигнатури, отримані за допомогою спектрального аналізу та фільтрації, представлені на рис. 4.3, де рис. 4.3 (а) відповідає типовому БПЛА з поршневим двигуном, а рис. 4.3 (б) ілюструє сигнатуру крилатої ракети з реактивним двигуном.

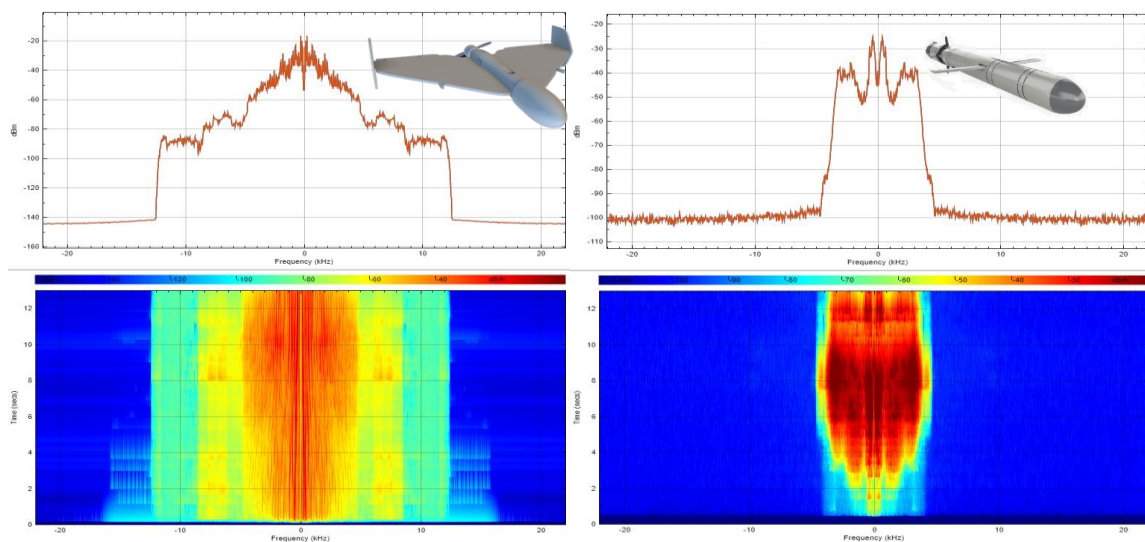


a)



б)

Рис. 4.2. Акустичний сигнал та його спектр від ударного безпілотної (а) та крилатої ракети (б)



а)

б)

Рис. 4.3. Акустичні сигнатури ударного безпілотної (а) та крилатої ракети (б)

Візуальні відмінності в гармонійній структурі та доміантних діапазонах частот між двома типами загроз формують основу для подальшої класифікації та виявлення.

Ці результати формують основу для алгоритмів акустичного розпізнавання, що обговорюються в наступному розділі, та демонструють можливість ідентифікації конкретної загрози за допомогою недорогих вбудованих мікрофонних систем.

Ключові спектральні та часові характеристики акустичних випромінювань від БПЛА та крилатих ракет наведено в табл. 4.7. Це порівняння підкреслює різні акустичні профілі дронів з поршневими двигунами, таких як ті, що базуються на двигунах MD-550, порівняно

з крилатими ракетами з реактивним двигуном. Помітні відмінності включають домінуючі діапазони частот, гармонійну структуру та моделі модуляції звуку, які є критично важливими для ефективної класифікації загроз. Ці параметри були отримані на основі статистичного аналізу кількох записів і служать основними ознаками для вилучення кепстрального коефіцієнта Mel-частоти (MFCC) та розпізнавання на основі машинного навчання.

Таблиця 4.7

**Порівняльні акустичні характеристики повітряних загроз**

Параметр	БПЛА (Шахед)	Крилата ракета (X-101, Калібр)
Домінантний діапазон частот	80–250 Гц	400–1000 Гц
Гармонічні складові	Явні, періодичні гармоніки до 2 кГц	Широкий спектр, менш структурований
Патерн модуляції	Амплітудна модуляція, зумовлена обертанням лопаті (3–8 Гц)	Відносно стабільний тон, незначні коливання амплітуди
Піки спектральної щільності	Дискретні піки кожні ~80–120 Гц	Безперервна підвищена спектральна смуга
Тип шуму	Пулсуючий шум двигуна + гармоніки від лопатей	Тривале ревіння реактивного літака
Змінність звукового тиску (вікно 5 секунд)	Коливання $\pm 6$ дБ (через модуляцію)	Коливання $\pm 2$ дБ
Тривалість виявленої сигнатури	5–15 секунд до прольоту	3–8 секунд до прольоту
Наявність доплерівського зсуву	Помірний (змінна геометрія шляху)	Чітка зміна тону при русі
Частота дискретизації запису	Рекомендовано $\geq 16$ кГц	$\geq 24$ кГц бажано (для вищої точності)
Ефективна кількість смуг MFCC	13–20	20–30

Домінантний діапазон частот стосується первинної енергетичної смуги, в якій зосереджені найгучніші компоненти звуку, що слугує ключовим індикатором типу акустичного джерела. Гармонічні компоненти відображають наявність періодичних сигналів, що часто виникають внаслідок циклів двигуна та взаємодії лопатей ротора – ознак, які особливо виражені в поршневих дронах. Піки спектральної щільності відображають різке збільшення акустичної енергії на певних

частотах і є цінними для розрізнення різних типів повітряних загроз. Мінливість звукового тиску описує ступінь, до якої амплітуда акустичного сигналу коливається з часом, фіксуючи ефекти модуляції, характерні для певних рухових систем. Нарешті, кількість смуг MFCC вказує на кількість кепстральних коефіцієнтів Mel-частоти, необхідних для адекватного представлення спектральних особливостей сигналу, що впливає на ефективність подальшої класифікації машинного навчання.

#### 4.2.4. Методи ідентифікації повітряних загроз

Класифікація повітряних загроз на основі акустичних даних є спеціалізованим випадком розпізнавання звуків навколишнього середовища, добре відомої галузі штучного інтелекту. Ця проблема включає визначення типу звукової події з аудіозапису, часто за наявності фонового шуму або мінливості навколишнього середовища. У нашому випадку метою є розрізнення БПЛА, таких як поршневі дрони, та інших повітряних загроз, таких як крилаті ракети, на основі їх унікального акустичного випромінювання, зафіксованого в реальних умовах.

Для досягнення надійного розпізнавання за такої мінливості автори пропонують використовувати моделі глибокого навчання, які довели свою ефективність для класифікації аудіо. Ці моделі автоматично вивчають відповідні шаблони з представлень ознак, таких як спектрограми або кепстральні коефіцієнти. Серед широко використовуваних моделей є штучні нейронні мережі (ШНМ) та згорткові нейронні мережі (ЗНМ), кожна з яких пропонує компроміс між складністю, часом навчання та ефективністю розгортання.

Це дослідження базується на загальнодоступній реалізації системи класифікації аудіо [23, 24], і автори висловлюють подяку творцю проекту за внесок у відкритий код, який дозволив адаптацію до завдань виявлення дронів. Згадана система пропонує практичне порівняння архітектур ANN, CNN1D та CNN2D на наборі даних UrbanSound8K та демонструє, як такі моделі можна навчати та розгортати з високою зручністю використання. На поточному етапі розробки було обрано модель ANN, оскільки вона пропонує найвищу ймовірність класифікації для цільових типів звуку та має передбачувану,

масштабовану архітектуру, добре пристосовану для вбудованої реалізації.

Для ефективного подання аудіоданих у моделі машинного навчання, необроблені сигнали хвиль повинні бути перетворені на компактні, змістовні представлення. У цьому дослідженні ми використовуємо Mel-Frequency Cepstral Coefficients (MFCC) – широко поширену функцію в розпізнаванні мови та звуку. MFCC розроблені для захоплення перцептивно релевантних аспектів звуку шляхом імітації частотної роздільної здатності людської слухової системи.

Однією з ключових переваг MFCC є їхня стійкість до різної тривалості вхідних звуків. На відміну від необроблених хвильових форм або простих спектральних ознак, MFCC обчислюються для коротких кадрів, що перекриваються (наприклад, 25 мс з кроком 10 мс), а потім усереднюються або об'єднуються з плином часу, що забезпечує послідовну розмірність ознак навіть для аудіосигналів різної тривалості. Це робить MFCC добре придатними для обробки аудіосегментів БПЛА та ракет, записаних у польових умовах, тривалість яких може змінюватися від 2 до 10 секунд залежно від умов запису.

Процес обчислення MFCC включає такі кроки:

1. Кадрування та віконування сигналу на перекриваючі сегменти.
2. Обчислення короткочасного перетворення Фур'є (STFT) для кожного кадру.
3. Застосування банку фільтрів масштабу Мела до спектру потужності.
4. Логарифмування відфільтрованих енергій.
5. Застосування дискретного косинусного перетворення (DCT) для декореляції ознак.

Загальна формула для  $k$ -того коефіцієнта MFCC з віконного сигнального кадру визначається формулою

$$C_k = \sum_{n=1}^N \log(S_n) \cdot \cos\left[\frac{\pi k}{N}(n - 0.5)\right], \quad k = 1, 2, \dots, K,$$

де  $S_n$  – енергетичний вихід  $n$ -го Мел-фільтра;  $N$  – кількість фільтрів Мела;  $K$  – кількість збережених кепстральних коефіцієнтів (зазвичай 13-20).

Як базовий приклад, розглянемо 1-секундний аудіосигнал, дискретизований з частотою 16 кГц. Розділивши його на вікна по 25 мс з перекриттям 10 мс, отримаємо приблизно 98 кадрів. Для кожного

кадру обчислюється вектор MFCC з 20 коефіцієнтів, що призводить до матриці ознак  $20 \times 98$ . Цю матрицю потім можна усереднити з часом або передати як часову послідовність до класифікатора на основі ШНМ.

Практична реалізація передбачає розподілену систему акустичного виявлення, що складається з автономних сенсорних блоків, розміщених у сітці вздовж критично важливих зон інфраструктури. Кожен блок включає:

- мікрофонний масив для всеспрямованого захоплення звуку;
- локальну попередню обробку та вилучення MFCC у режимі реального часу;
- вбудовану нейронну мережеву модель для класифікації вхідного аудіокадру;
- бездротовий зв'язок (наприклад, ZigBee, LoRa) для пересилання сповіщень.

Система працює наступним чином:

1. Акустичні дані безперервно фіксуються кожним вузлом.
2. Характеристики MFCC обчислюються та передаються в локально збережений класифікатор.
3. Після виявлення повітряної загрози метадані (тип, достовірність, позначка часу, можливо, напрямок) надсилаються до центрального вузла.
4. Дані датчиків з кількох вузлів можна об'єднати для оцінки траєкторії та швидкості БПЛА.

Вузли повинні бути малопотужними, самодостатніми та розробленими для інтеграції в більшу мультимодальну систему оповіщення. Така архітектура дозволяє масштабований та багаторівневий захист залізничних та енергетичних активів.

ШНМ – це найпростіша архітектура, що складається з повністю зв'язаних шарів. Вхідні ознаки, такі як усереднений вектор MFCC фіксованої довжини (наприклад, 20 коефіцієнтів), пропускаються через кілька щільних шарів з нелінійними активаціями (ReLU), що завершується вихідним шаром softmax, який дає ймовірності для кожного класу загрози (наприклад, БПЛА, крилата ракета, фон).

Для покращення узагальнення моделі та підвищення стійкості класифікації в реальних умовах набір даних було доповнено за допомогою кількох поширених перетворень аудіоданих:

- зсув висоти тону ( $\pm 1$ – $2$  півтони) – імітує зміну обертів двигуна.
- масштабування гучності ( $\pm 3$ – $5$  дБ) – компенсує підсилення або відстань до мікрофона.

- фонове змішування – додає навколишній шум (вітер, рух транспорту, людська мова).
- розтягування часу ( $\pm 10\%$ ) – моделює доплерівські часові спотворення.

Ці доповнення гарантують, що моделі нейронної мережі не переналаштовані на вузькі умови запису та можуть надійно працювати за наявності непередбачуваних фонових перешкод.

У табл. 4.8 представлено середні коефіцієнти MFCC для набору класифікованих аудіозразків. Кожен аудіоклас, включаючи повітряні загрози (наприклад, БПЛА, ракета) та звуки навколишнього середовища (наприклад, гавкіт собаки, холостий хід двигуна), демонструє чіткий спектральний профіль. Незважаючи на певну кореляцію між подібними класами, всі вектори-стовпці є унікальними, що підтверджує, що набір ознак MFCC ефективно фіксує розрізнявальні характеристики. Це підтверджує достовірність представлення на основі MFCC для надійної класифікації аудіо.

Таблиця 4.8

**Середні коефіцієнти MFCC для класифікованих аудіозразків**

MFCC № ( $C_k$ )	Шахед	Ракета	Гавкіт собаки	Шум двигуна	Відбійний молоток
1	-254.4	-163.6	-215.2	-125.8	-64.8
2	113.8	117.8	80.9	78.4	47.3
3	-28.5	-31.4	-24.5	-2.2	-2.4
4	15.0	22.6	-0.3	17.1	11.0
5	-8.3	-9.4	-9.9	0.4	-1.6
6	4.1	5.7	1.2	13.2	9.0
7	-8.5	-5.1	-7.2	0.7	-1.9
8	1.0	-0.5	3.2	8.2	4.5
9	-6.6	-3.1	-4.3	-1.4	-4.2
10	0.3	-1.2	4.2	6.6	4.5
11	-5.6	-3.0	-2.0	-1.2	-3.6
12	-0.1	-0.6	4.4	5.1	2.2
13	-5.4	-3.4	-1.8	-1.5	-3.3
14	-0.3	-0.7	4.2	3.7	2.0
15	-4.5	-2.8	-1.7	-2.1	-4.5
16	0.0	-0.9	3.4	3.2	1.5
17	-3.9	-2.0	-2.7	-3.1	-3.2
18	0.2	-1.0	2.5	1.9	2.7
19	-3.6	-1.8	-3.2	-2.7	-3.2
20	0.3	-0.7	2.3	2.3	2.2

На рис. 4.4 показано загальну архітектуру штучної нейронної мережі (ШНМ), що використовується для класифікації аудіо. Вхідний шар складається з 20 нейронів, що відповідає кількості вилучених ознак MFCC на аудіосегмент. Вихідний шар містить нейрони, що дорівнює кількості цільових аудіокласів, що дозволяє здійснювати багатокласову класифікацію.

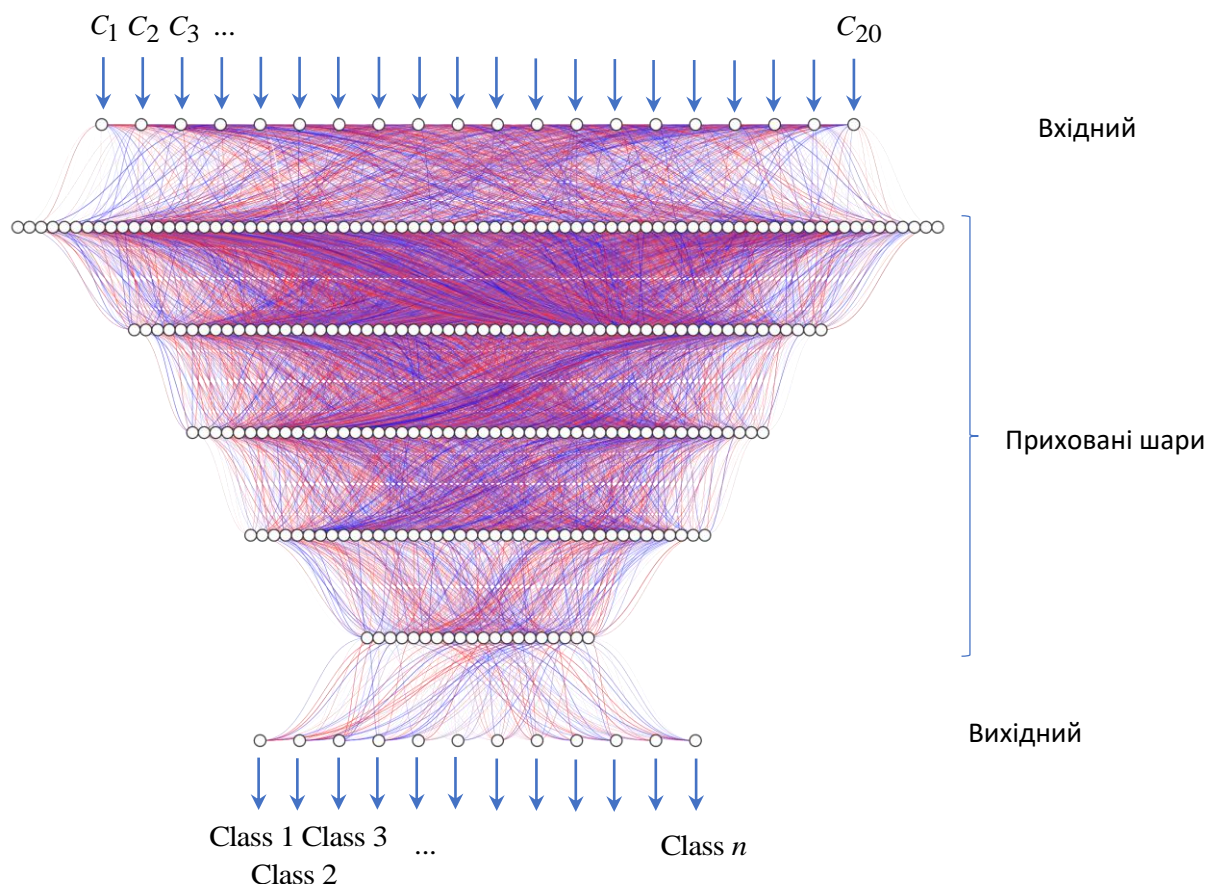


Рис. 4.4. Загальна архітектура штучної нейронної мережі, що використовується для класифікації на основі аудіо

Мережа включає кілька прихованих шарів, структура яких змінюється в різних конфігураціях для балансування продуктивності класифікації та обмежень пам'яті. Оскільки цільова апаратна платформа базується на мікроконтролері STM32 із загальним об'ємом флеш-пам'яті 512 КіБ, кількість та розмір прихованих шарів оптимізовані для забезпечення того, щоб вся мережа могла поміститися приблизно в 450 КіБ доступної пам'яті програм, що дозволяє розгорнути її на вбудованих системах без зовнішньої пам'яті.

У табл. 4.9 підсумовано характеристики продуктивності кількох конфігурацій штучних нейронних мереж (ШНМ), що використовуються для класифікації аудіо. Кожен рядок відповідає певній архітектурі прихованого шару, а кількість нейронів у кожному шарі вказана в першому стовпці.

Таблиця 4.9

**Розмір та точність цільової моделі штучної нейронної мережі залежно від архітектури прихованого шару**

Архітектура прихованих шарів ШНМ	Розмір моделі ШНМ	Точність при валідації
1000-750-500-250-100-50	4.98 МіБ	0.9046
512-256-128-64-32	737.5 КіБ	0.8850
416-208-104-52-26	497.9 КіБ	0.8931
400-200-100-50-25	462.7 КіБ	0.8899
392-196-98-49-24	445.4 КіБ	0.8959
384-192-96-48-24	428.7 КіБ	0.8909
368-184-92-46-23	396.1 КіБ	0.8822
352-176-88-44-22	364.8 КіБ	0.8746
320-160-80-40-20	306.2 КіБ	0.8866
256-128-64-32-16	204.9 КіБ	0.8479
128-64-32-16	65.3 КіБ	0.8026
32-16	16 КіБ	0.6963

У другому стовпці табл. 4.9 показано загальний розмір моделі в КіБ, розрахований на основі кількості параметрів, що навчаються, з використанням 32-бітної точності з плаваючою комою. У третьому стовпці представлено результуючу точність валідації, досягнуту в задачі класифікації.

Хоча дані загалом показують, що збільшення кількості нейронів призводить до покращення точності, ця тенденція не є суворо монотонною через стохастичний характер процедур навчання, включаючи ініціалізацію випадкових ваг та міні-пакетний вибір. Це підкреслює компроміс між продуктивністю класифікації та обмеженнями пам'яті, що особливо важливо для розгортання на вбудованих системах з обмеженим обсягом флеш-пам'яті, таких як мікроконтролери STM32.

На рис. 4.5 ілюструється динаміка навчання вибраної моделі ШНМ, що показує еволюцію точності класифікації протягом епох навчання як для навчальних, так і для валідаційних наборів даних.

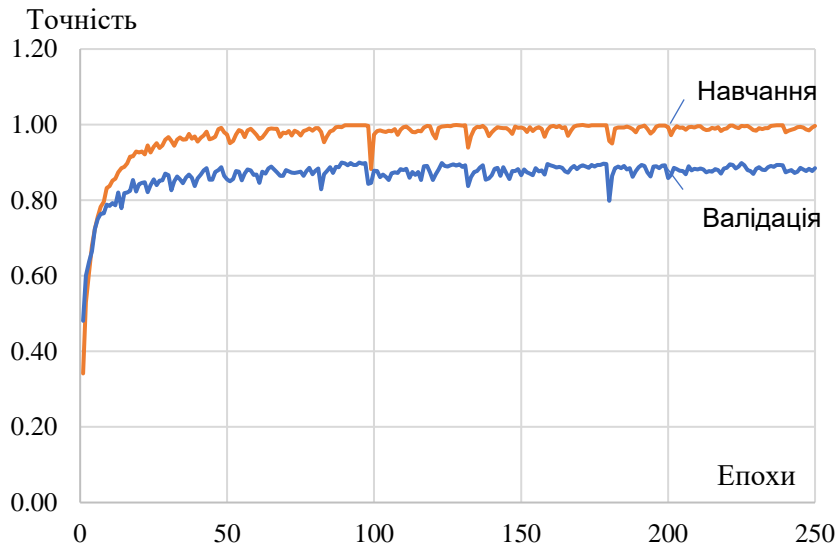


Рис. 4.5. Точність при навчанні та при валідації штучної нейронної мережі

Стабільна конвергенція та мінімальний розрив між точністю навчання та валідації свідчать про те, що модель добре узагальнюється без значного перенавчання. На рис. 4.6 представлено зв'язок між розміром моделі та точністю класифікації для різних архітектур ШНМ. Як показано, збільшення кількості нейронів прихованого шару покращує точність до певної точки, після якої приріст продуктивності зменшується.

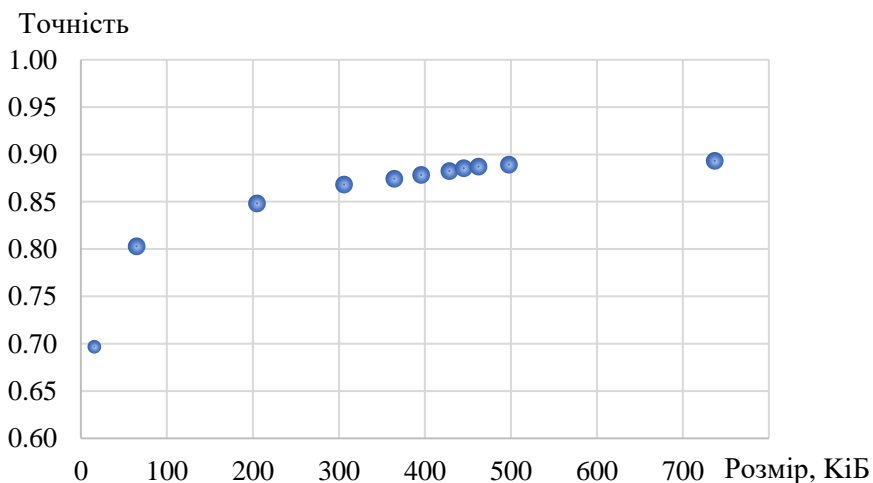


Рис. 4.6. Точність в залежності від розміру цільової моделі штучної нейронної мережі

У практичному діапазоні розмірів ШНМ від 300 до 500 КіБ спостережувана точність валідації залишається в межах 85–90%, що демонструє можливість розгортання надійної класифікації на основі

штучного інтелекту на мікроконтролерах, таких як STM32, без перевищення обмежень доступної пам'яті.

#### 4.2.5. Розробка апаратного та програмного забезпечення вбудованого ШІ-рішення

Впровадження вбудованого рішення на основі штучного інтелекту зосереджено навколо трьох основних компонентів: MEMS-мікрофона, мікроконтролера STM32 та модуля бездротового зв'язку ZigBee. MEMS-мікрофон пропонує високу чутливість, компактний розмір та низьке енергоспоживання, що робить його ідеальним для безперервного акустичного моніторингу в розподілених сенсорних мережах. Мікроконтролер STM32 служить центральним процесором, обраним завдяки балансу обчислювальних можливостей, низького енергоспоживання та підтримки нейронного мережевого виводу на пристрої через STM32Cube.AI. Модуль ZigBee забезпечує надійну бездротову передачу даних з низьким енергоспоживанням до систем вищого рівня або координаторів у конфігураціях меш-мереж. Разом ці компоненти утворюють компактне, економічно ефективне та енергоефективне вбудоване рішення, адаптоване для польового розгортання в критично важливих інфраструктурних середовищах.

На рис. 4.7 представлено схематичну діаграму апаратної архітектури, розробленої для вбудованої аудіосистеми виявлення дронів.

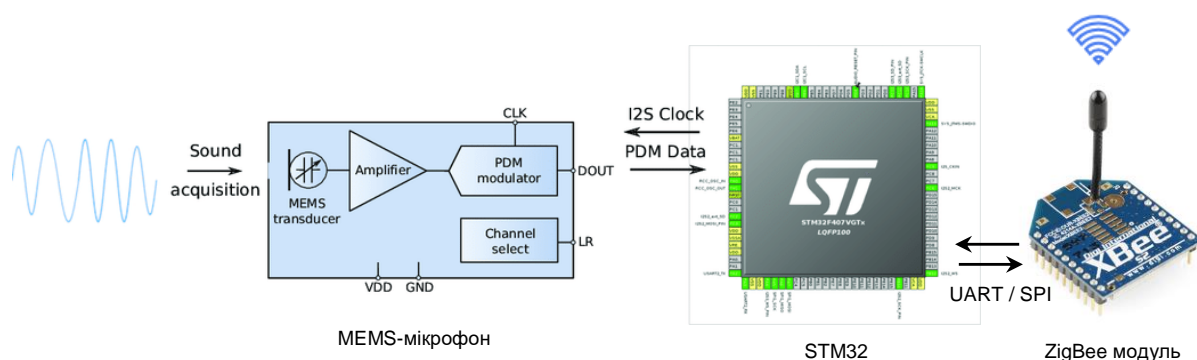


Рис. 4.7. Принципова схема датчика-аудіодетектора дронів

На рис. 4.8 показано процес інтеграції штучної нейронної мережі в прошивку мікроконтролера за допомогою середовища генерації коду STM32Cube.

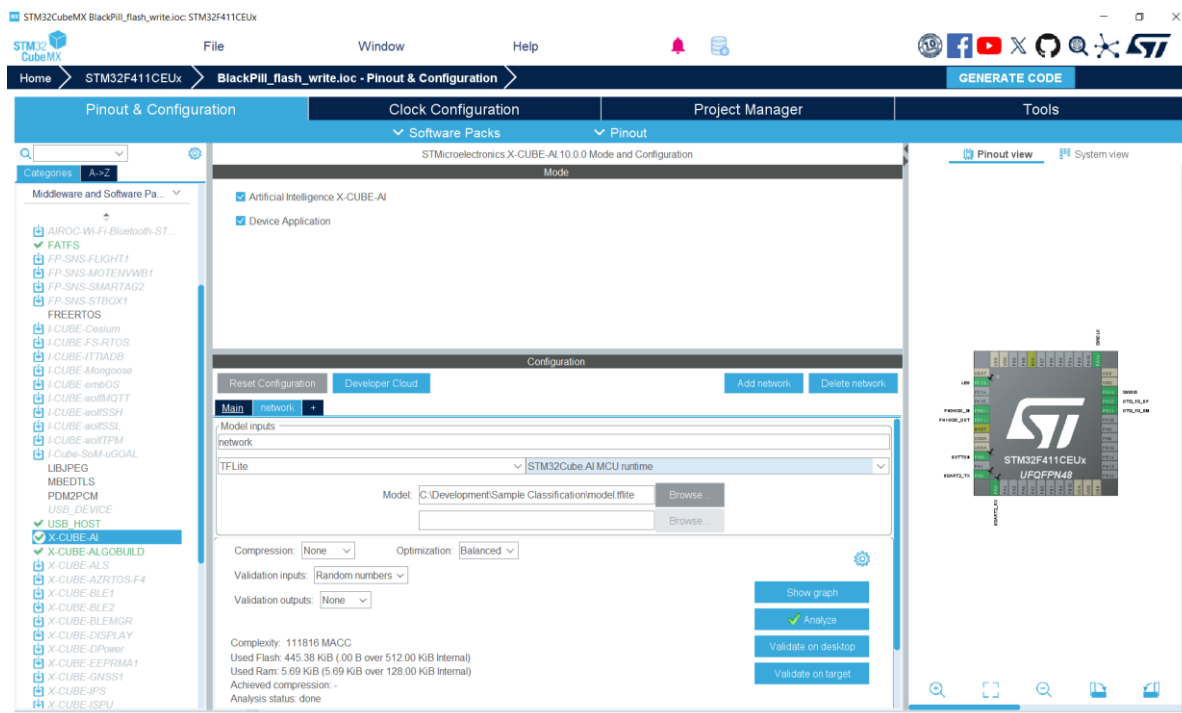


Рис. 4.8. Інтеграція штучної нейронної мережі у прошивку мікроконтролера за допомогою засобу ініціалізації коду STM32Cube

Платформа STM32 підтримує модульний підхід через існуючі програмні бібліотеки, що дозволяє ефективно розробляти вбудовані програми штучного інтелекту. Для цифрового захоплення звуку система використовує вбудовану підтримку мікрофонів MEMS, використовуючи перетворення PDM-PCM та цифрові інтерфейси (I2S). Вилучення ознак реалізовано за допомогою бібліотеки CMSIS-DSP, яка надає оптимізовані процедури для обчислення коефіцієнтів MFCC у режимі реального часу. Остаточний етап класифікації виконується вбудованою штучною нейронною мережею, яка перетворюється та розгортається за допомогою X-CUBE-AI, інструментарію STMicroelectronics для інтеграції навчених нейронних мереж у прошивку STM32. Цей програмний стек забезпечує повну обробку сигналів та конвеєр логічного висновку на пристрої з мінімальними накладними витратами ресурсів.

На основі досліджених технологій у цій роботі пропонується концепція моніторингу стану залізничної інфраструктури, інтегрована з виявленням повітряних загроз (рис. 4.9) [25-28]. Запропонована система використовує дві бездротові технології: ZigBee, що використовується для зв'язку на короткій відстані між сенсорними блоками в радіусі 75–100 метрів, та LoRa, що використовується для

передачі на великі відстані критичних, узагальнених даних, таких як аномальні події або підтвержені повітряні загрози, до центральної системи управління.

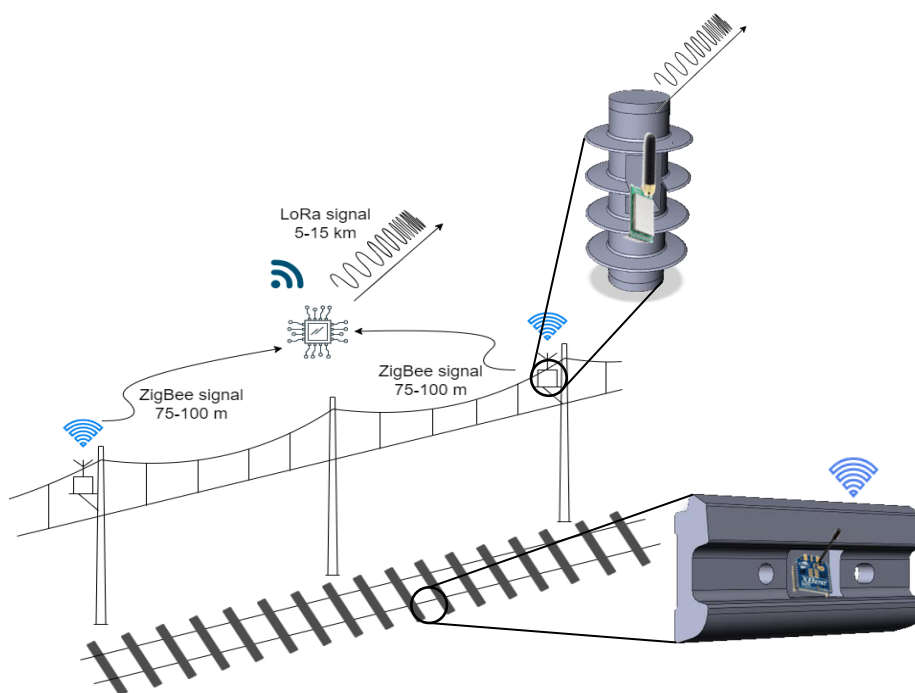


Рис. 4.9. Концепція моніторингу стану залізничної інфраструктури з інтегрованим виявленням повітряних загроз

В якості кожного сенсорного блоку лежить малопотужний мікроконтролер STM32, інтерфейсований з цифровим MEMS-мікрофоном, здатним постійно контролювати акустичні сигнали. Захоплення звуку ініціюється, коли навколишній шум перевищує заздалегідь визначений поріг амплітуди, що зменшує споживання енергії та мінімізує непотрібну обробку. Після захоплення сигналу він обробляється локально: мікроконтролер обчислює MFCC за допомогою оптимізованих процедур CMSIS-DSP, а потім виконує класифікацію загроз за допомогою вбудованої штучної нейронної мережі, розгорнутої через X-CUBE-AI.

Весь конвеєр обробки – від захоплення звуку та вилучення ознак до виведення – виконується на пристрої, без необхідності зовнішньої обробки або підключення. Ця вбудована архітектура штучного інтелекту забезпечує низьку затримку, енергоефективність та надійну роботу в польових умовах. Модульна конструкція дозволяє розширити ту саму платформу для моніторингу інших критичних параметрів

залізничної інфраструктури, таких як вібрація, електричний шум або структурні аномалії, що робить її масштабованим рішенням для інтелектуальних залізничних систем наступного покоління.

Отже у цьому дослідженні пропонується нова вбудована система на основі штучного інтелекту для виявлення повітряних загроз у реальному часі, інтегрована в ширшу систему моніторингу залізничної інфраструктури. Конструкція системи поєднує компактні MEMS-мікрофони, мікроконтролери STM32 та модулі бездротового зв'язку ZigBee для формування розподіленої мережі акустичних датчиків, здатних до локалізованого захоплення та обробки звуку. Акустичні сигнали аналізуються на пристрої з використанням Mel-частотних кепстральних коефіцієнтів (MFCC) як основного набору функцій, після чого проводиться класифікація за допомогою легких штучних нейронних мереж (ANN), розгорнутих за допомогою інструментарію STM32 X-CUBE-AI.

Апаратна та програмна архітектура була ретельно оптимізована для роботи в умовах обмеженої пам'яті та потужності мікроконтролерів на основі STM32. Оцінка кількох конфігурацій ANN показала, що моделі розміром 300–500 КіБ постійно досягали точності перевірки від 85% до 90%, демонструючи надійний баланс між продуктивністю та розгортанням. Весь конвеєр виводу працює незалежно від хмарних сервісів, забезпечуючи низьку затримку відгуку та вищу стійкість системи в критичних польових умовах.

Окрім виявлення дронів, модульна структура системи дозволяє розширити її для ширших завдань моніторингу стану залізниць, таких як відстеження електричних аномалій або механічного зносу обладнання повітряних ліній. Результати підтверджують можливість розгортання акустичних класифікаторів на основі нейронних мереж у вбудованих середовищах з обмеженими можливостями, що відкриває шлях для масштабованих, інтелектуальних та автономних сенсорних рішень для захисту критичної інфраструктури.

## Список використаних джерел до розділу 4

1. Енергетична безпека України: перспективна модель управління ризиками: монографія / [О. М. Суходоля, Ю. М. Харазішвілі, Г. Л. Рябцев] ; за редакцією О. М. Суходолі. – Київ: НІСД, 2023. – 152 с. – DOI: <https://doi.org/10.53679/NISS-book.2023.01>

2. The Power of Change: Innovation for Development and Deployment of Increasingly Clean Electric Power Technologies. Washington, DC : The National Academies Press, 2016. 340 p. DOI: <https://doi.org/10.17226/21712>
3. Ю. Г. Даник та М. В. Бугайов, «Аналіз ефективності виявлення тактичних безпілотних літальних апаратів пасивними та активними засобами спостереження», зб. наук. пр. "Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем", №10, с. 5 – 20, 2015.
4. Я. І. Лепіх та ін., Оптико-електронні системи ближньої локації: монографія. Одеса, Україна: Одес. нац. ун-т ім. І. І. Мечникова, 2019.
5. AUDES Anti-UAV Defence System. — URL: <https://www.blighter.com/products/audsanti-uav-defence-system.html>
6. C. G. Ribbing, «Controlling thermal radiation from surfaces», in Optical Thin Films and Coatings, A. Piegari and F. Flory, Sawston, UK: Woodhead Publishing Limited, 2013, pp. 811-835. doi:10.1533/9780857097316.2.357.
7. С. О. Сокольський та А. В. Мовчанюк, «Огляд методів виявлення та локалізації малих безпілотних літальних апаратів», Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування, №87, с. 46-55, Грудень. 2021. doi:10.20535/RADAP.2021.87.46-55.
8. В. М. Карташов, В. О. Посошенко, А. І. Капуста, М. В. Рибников, і Є. В. Першин, «Особливості задач виявлення і спостереження груп безпілотних літальних апаратів,» Радіотехніка, Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб., вип. 211, с. 84-92, 2022. <https://doi.org/10.30837/rt.2022.4.211.06> .
9. O. Sukharevsky, Electromagnetic Wave Scattering by Aerial and Ground Radar Objects, 2015, p. 334. <https://doi.org/10.1201/b17239>
10. В. А. Тихонов, та ін. «Виявлення-розпізнавання безпілотних літальних апаратів з використанням складової моделі авторегресії їх акустичного випромінювання,» Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування, 2020, № 81, pp. 38-46.
11. V. M. Kartashov, et all., “Information characteristics of sound radiation of small unmanned aerial vehicles,” Telecom-munications and Radio Engineering (English translation of Elektrosvyaz and Radiotekhnika), vol.77 (10), pp. 915-924, 2018.
12. Г. С. Ігнатенко, і А. Г. Ламчановський, «Класифікація аудіосигналів за допомогою нейронних мереж,» Молодий вчений, міжнар. журн., № 48(286), с. 23-25, 2019.
13. Surma, S. & Lukasik, J. at al. Contact network monitoring. *Electrification of Transport*. 2013. Vol. 5. P. 113–118.
14. Mizan, M. & Karwowski, K. & Karkosiński, D. at al. Monitoring Odbieraków Prądu w Warunkach Eksploatacyjnych na Linii Kolejowej. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2013. R89. Nr. 12. P. 154-160.
15. *Sicat CMS. Catenary monitoring system for overhead contact line systems*. Siemens Mobility GmbH. 2018. Available at: <https://siemens.com/rail-electrification>
16. *Revolutionising Railway Decisions*. Sensonic GmbH. Available at: <https://www.sensonic.com/>

17. Bondarenko, I. & Lukoševičius, V. & Keršys, R. & Neduzha, L. at al. Innovative trends in railway condition monitoring. *Transportation Research Procedia*. 2024. Vol. 77. P. 10–17. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2024.01.002>
18. Bondarenko, I. & Lukoševičius, V. & Neduzha, L. at al. Novel ‘Closed’-system approach for monitoring the technical condition of railway tracks. *Sustainability*. 2024. Vol. 16 (8). 3180. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16083180>
19. Bosyi, D. & Sablin, O. & Khomenko, I. & Kosariev, Ye. & Keбал, I. & Myamlin, S. at al. Intelligent Technologies for Efficient Power Supply in Transport Systems. *Transport Problems*. 2017. Vol. 12 (SE), P. 57–71. DOI: 10.20858/tp.2017.12.se.5.
20. Zhang, X. & Kusrini, K. at al. Autonomous long-range drone detection system for critical infrastructure safety. *Multimedia Tools and Applications*. 2021. Vol. 80. P. 23723–23743. DOI: 10.1007/s11042-020-10231-x
21. Al-Emadi, S. & Al-Ali, A. & Al-Ali, A. at al. Audio-Based Drone Detection and Identification Using Deep Learning Techniques with Dataset Enhancement through Generative Adversarial Networks. *Sensors*, 2021. Vol. 21(15). 4953. DOI: 10.3390/s21154953
22. Singha, S. & Aydin, B. at al. Automated Drone Detection Using YOLOv4. *Drones*. 2021, Vol. 5. 95. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones5030095>
23. Abishek, A. S. Audio Classification Deep Learning, Available at: <https://github.com/abishek-as/Audio-Classification-Deep-Learning>
24. Yaran, W. at al. Electrical interface of MEMS microphone introduction. Infineon Knowledge Base Articles. 2023. Jul 11.
25. Bosyi, D. & Sablin, O. & Potapchuk, I. Decentralized WAMS for Railway Overhead Lines with Audio-Based Drone Detection. In: *2024 IEEE 5th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. Kharkiv: KhPI. 2024. P. 1-6. DOI: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10877981>
26. Kurhan, D. & Kovalchuk, V. & Markul, R. & Kovalskyi, D. at al. Development of Devices for Long-Term Railway Track Condition Monitoring: Review of Sensor Varieties. *Acta Polytechnica Hungarica*. 2025. Vol. 22. Iss. 4. P. 65–82. DOI: 10.12700/APH.22.4.2025.4.5.
27. Босий Д. О., Саблін О.І., Потапчук І. Ю. Підвищення рівня безпеки об’єктів критичної інфраструктури транспорту на основі геопросторового аналізу акустичних портретів повітряних загроз // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2024. № 4. С. 147–156. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-175-4-147-156>, ISSN 1997-9274
28. Босий Д.О., Саблін О.І., Потапчук І.Ю. Система моніторингу технічних параметрів контактної мережі електрифікованих залізниць з ідентифікацією повітряних загроз / Пат. 159173, Україна; МПК H02J 1/14 (2006.01) H02J 13/00. Володілець Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, 49010, UA. – 2019 08812; заявл. 20.02.2025; опубл. 30.04.2025, Бюл. № 18 – 4 с.

Наукове видання

Босий Д. О.,  
Саблін О. І.,  
Курган Д. М.,  
Ковальчук В. В.,  
Маркуль Р. В.

# **БЕЗПЕКА ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ**

*Монографія*

Електронне видання

За загальною редакцією  
д-ра техн. наук, проф. О. І. Сабліна

Комп'ютерна верстка Д. О. Босий

Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Ум. друк. арк.14,4. Обл.-вид. арк.12,24.

Зам. № 125

Видавець: Український державний університет науки і технологій  
вул. Лазаряна, 2, ауд. 2216, м. Дніпро, 49010.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 7709 від 14.12.2022

