

Український державний університет науки і технологій

Кафедра Транспортні вузли

«ДО ЗАХИСТУ»

Завідувач кафедри

 /Микола БЕРЕЗОВИЙ/

« 14 » 12 2021 р.

ДИПЛОМНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня «магістр»

Галузь знань **27 Транспорт**

Спеціальність **275 Транспортні технології (за видами)**

Спеціалізація **275.02 Логістика та ризик-кризове управління на транспорті**

Тема **Оцінка надійності та ризиків процесу експлуатації об'єктів інфраструктури залізничного транспорту**

Theme **Evaluation of reliability and risks of the operation process of railway transport infrastructure objects**


Керівник дипломної роботи

доц.  Вячеслав МАЛАШКІН

Нормоконтролер

доц.  Вячеслав МАЛАШКІН

Студентка групи УЛ 2026

 Олена ВАСЮРА

Student

Vasiura Olena

Український державний університет науки і технологій
Навчально-науковий інститут «Дніпровський інститут
інфраструктури і транспорту»

Факультет Управління процесами перевезень **Кафедра** «Транспортні вузли»

Спеціальність 275 «Транспортні технології (за видами)»

Освітня програма 275.02 «Логістика та ризик-кризове управління на транспорті»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Завідувач кафедри

_____ / М. І. Березовий /
(підпис)

2021 р. _____ «___»

ЗАВДАННЯ

до дипломної роботи на здобуття освітнього ступеня «магістр»
(рівень вищої освіти)

отримав студент групи УЛ2026 _____ Васюра Олена Вікторівна
(номер групи) (ПІБ)

1. Тема дипломного проекту (роботи): Оцінка надійності та ризику процесу експлуатації об'єктів інфраструктури залізничного транспорту

затверджена наказом по університету від «18» червня 2021 року № 324ст

2. Термін подання студентом закінченого проекту (роботи): «10» грудня 2021 року

3. Вихідні дані до дипломного проекту (роботи): статистичні дані про кількість та інтенсивність скоєння інцидентів, відмов та зауважень

4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань до розробки):
(див. календарний план)

5 Перелік креслень (демонстраційного матеріалу)

креслення відсутні

Перелік мультимедійного демонстраційного матеріалу (слайдів)

титульний слайд; мета, об'єкт, предмет дослідження; основні складові елементи інфраструктури транспорту; структура колій АТ «Укрзалізниця»; характеристика витрат АТ «Укрзалізниця»; показники зносу пристроїв регулювання руху поїздів; методологія RAMS; моніторинг технічних і економічних ризиків; статистичні характеристики випадкових величин процесу функціонування пристроїв ЗАТ; алгоритми імітаційної моделі; оцінка ризику процесу функціонування об'єкту інфраструктури; кінцевий слайд

6 Розділи та консультанти

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва розділу дипломного проекту	Термін виконання	Кількість аркушів	Обсяг розділу, %
1. Управління рівнем надійності і безпеки об'єктів транспортної інфраструктури при реалізації виробничого процесу технічної експлуатації	строк 1	–	15
2. Моніторинг технічних і економічних ризиків, пов'язаних з функціонуванням об'єктів залізничної транспортної інфраструктури	строк 1	–	10
3. Моделювання процесу експлуатації об'єктів інфраструктури залізничного транспорту в умовах ризиків	строк 2	–	30
4. Оцінка надійності перевізного процесу на основі аналізу функціонального ресурсу об'єктів інфраструктури залізничного транспорту	строк 2	–	20
5. Дослідження процесу експлуатації та оцінка ризику функціонування об'єкту інфраструктури	строк 3	–	25
Всього		–	100

Дата видачі завдання: « 12 » жовтня 2021 р.

Керівник дипломної роботи

(підпис)

Малашкін В. В.

(ПІБ)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Васюра О. В.

(ПІБ)

РЕФЕРАТ

Дипломна робота складається з вступу, 5 розділів, висновків та 4 додатків. Загальний обсяг роботи складає 104 сторінки, з них основний текст викладено на 77 сторінках, який містить 24 таблиці і 15 рисунків. Список використаних джерел складається з 41 найменування.

Метою роботи є дослідження взаємозв'язку між показниками надійності функціонування об'єктів транспортної інфраструктури та рівнем технічних і економічних ризиків, пов'язаних із процесом експлуатації даних об'єктів.

Об'єктом дослідження є виробничий процес експлуатації об'єктів залізничної транспортної інфраструктури.

Предметом дослідження є взаємозв'язок між рівнем надійності функціонування об'єктів залізничної транспортної інфраструктури та відповідними технічними та економічними ризиками, що виникають під час реалізації виробничого процесу технічної експлуатації, а також організаційно-технологічної надійності перевізного процесу з урахуванням стану об'єктів транспортної інфраструктури.

В дипломній роботі обґрунтована актуальність наукової проблеми щодо оцінки ризиків та безпеки експлуатації транспортної інфраструктури.

Проаналізовані основні фактори, що впливають на надійність процесу експлуатації транспортної інфраструктури. Розглянуто математичні моделі, що описують кількісні характеристики процесів виникнення та усунення різних інцидентів, пов'язаних з експлуатацією об'єктів залізничної транспортної інфраструктури.

Представлена імітаційна модель процесу експлуатації, що дозволяє провести статистичний аналіз взаємозв'язку між рівнем технічних ризиків у вигляді затримок у русі поїздів протягом часу усунення відмов об'єктів залізничної транспортної інфраструктури, характеристиками виробничого процесу експлуатації та рівнем надійності об'єктів залізничної транспортної інфраструктури.

Виконано обробку результатів статистичного моделювання та оцінки рівня технічних та економічних ризиків, пов'язаних із функціонуванням об'єктів залізничної транспортної інфраструктури. Вирішено практичну задачу оцінки ризику відмови елементу інфраструктури залізничного транспорту та оцінки рівня безпеки перевізного процесу на основі техніко-економічних показників.

Галузь застосування – інфраструктура залізничного транспорту України.

Ключові слова: ІНФРАСТРУКТУРА, ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ОЦІНКА РИЗИКУ, НАДІЙНІСТЬ, ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ ...	7
ВСТУП.....	8
1 УПРАВЛІННЯ РІВНЕМ НАДІЙНОСТІ І БЕЗПЕКИ ОБ’ЄКТІВ	
ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ПРИ РЕАЛІЗАЦІЇ ВИРОБНИЧОГО	
ПРОЦЕСУ ТЕХНІЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ	
1.1 Загальна постановка задачі дослідження	9
1.2 Аналіз відмов об’єктів залізничної інфраструктури та їх наслідків	15
1.3 Загальні відомості про методологію RAMS	17
1.4 Огляд наукових підходів оцінки рівня безпеки руху	19
1.5 Аналіз процесів функціонування залізничної інфраструктури та методів їх моделювання	24
2 МОНІТОРИНГ ТЕХНІЧНИХ І ЕКОНОМІЧНИХ РИЗИКІВ, ПОВ’ЯЗАНИХ З	
ФУНКЦІОНУВАННЯМ ОБ’ЄКТІВ ЗАЛІЗНИЧНОЇ ТРАНСПОРТНОЇ	
ІНФРАСТРУКТУРИ	
2.1 Загальні відомості	28
2.2 Визначення вихідних даних для оцінки економічних ризиків, пов’язаних з надійністю та безпекою об’єктів транспортної інфраструктури.....	30
2.3 Формалізація вихідних даних для оцінки економічних ризиків, пов’язаних з надійністю та безпекою об’єктів транспортної інфраструктури	32
3 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ОБ’ЄКТІВ	
ІНФРАСТРУКТУРИ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ В УМОВАХ РИЗИКІВ ..	
3.1 Загальні положення	42
3.2 Формалізація випадкових процесів та розробка алгоритмів імітаційної моделі.....	43

Зам. Інв. №		Підпис					0042.206415.ДР.2021.000			
Зм.	Лист	№док	Підпис	Дата	Оцінка надійності та ризиків процесу експлуатації об’єктів інфраструктури залізничного транспорту			Стадія	Лист	Листів
								ДР	5	104
								Кафедра «Транспортні вузли»		
Інв. № ор.		Виконав	Васюра							
		Осн. кер.	Малашкін							
		Консульт.								
		Н. контр	Малашкін							
		Зав. каф.	Березовий							

	6
3.3 Моделювання процесу функціонування залізничної інфраструктури.....	57
3.4 Оцінка економічних збитків	57
3.5 Оцінка результуючого економічного ризику	59
4 ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ ПЕРЕВІЗНОГО ПРОЦЕСУ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО РЕСУРСУ ОБ'ЄКТІВ ІНФРАСТРУКТУРИ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ	61
4.1 Поняття про функціональний ресурс інфраструктури залізничного транспорту	61
4.2 Система показників оцінки функціонального ресурсу	61
4.3 Кількісна оцінка функціонального ресурсу систем залізничної автоматики та телемеханіки	68
5 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА ОЦІНКА РИЗИКУ ФУНКЦІОНУВАННЯ ОБ'ЄКТУ ІНФРАСТРУКТУРИ	73
5.1 Постановка задачі.....	73
5.2 Методика визначення ризику безпеки об'єктів залізничної інфраструктури.....	74
5.3 Результати оцінки ризику функціонування об'єкту інфраструктури залізничного транспорту.....	78
ВИСНОВКИ	83
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	85
ДОДАТОК А СТАТИСТИЧНІ ВИБІРКИ ВИПАДКОВИХ ВЕЛИЧИН ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЇХ ОБРОБКИ.....	89
ДОДАТОК Б ПОКАЗНИКИ ОЦІНЮВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОСТІ СИСТЕМИ ЗАЛІЗНИЧНОЇ АВТОМАТИКИ І ТЕЛЕМЕХАНІКИ.....	96
ДОДАТОК В ПЕРЕЛІК МУЛЬТИМЕДІЙНОГО ДЕМОНСТРАЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ ДО ДИПЛОМНОЇ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ.....	98
ДОДАТОК Г ВІДОМІСТЬ МАТЕРІАЛІВ ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ.....	104

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

АГВР – автоматизована система для ведення і аналізу показників графіків виконаного руху поїздів

АРМ – автоматизоване робоче місце

АСК ВП УЗ – автоматизована система керування вантажними перевезеннями АТ «Укрзалізниця»

АСК ПП УЗ – автоматизована система керування пасажирськими перевезеннями АТ «Укрзалізниця»

АТ «Укрзалізниця» – Акціонерне товариство «Українські залізниці»

ГВВ – генератор випадкової величини

ГВР – графік виконаного руху

ЄС – Європейський союз

ЗАТ – системи залізничної автоматики і телемеханіки

КРРП – пристрої керування та регулювання рухом поїздів

ОІ – об'єкт інфраструктури

ВСТУП

Специфікою залізниць у процесі надання послуг є необхідність використання великої кількості об'єктів інфраструктури залізничного транспорту. Експлуатація залізничної транспортної інфраструктури потребує значних трудових, матеріальних та фінансових витрат. Ситуація ускладнюється тим, що залізнична транспортна інфраструктура, як сукупність технічних систем, має певні рівні надійності та безпеки, що принципово не можуть бути абсолютними. Як наслідок, при реалізації виробничого процесу експлуатації об'єктів залізничної транспортної інфраструктури виникають різні відмови та інші інциденти, випадкові за своєю природою та мають різні наслідки, що вимагають додаткових економічних витрат на їх усунення, а також призводять до економічних втрат через безпосередній вплив стану залізничної транспортної інфраструктури на перевізний процес.

Величина економічних втрат залежить від рівнів надійності та безпеки об'єктів залізничної транспортної інфраструктури, а також від особливостей їхньої технічної експлуатації. При цьому збитки, пов'язані з відмовами об'єктів залізничної транспортної інфраструктури, можуть бути дуже значними, враховуючи, що в даний час за різними оцінками від 60 % до 80 % об'єктів залізничної транспортної інфраструктури Акціонерного товариства «Українська залізниця» (далі АТ «Укрзалізниця») функціонує з перевищенням нормативного терміну експлуатації. Вказані вище обставини роблять проблему оцінки впливу стану залізничної транспортної інфраструктури на перевізний процес дуже актуальною.

Таким чином, у дипломній роботі виконані аналіз та дослідження методів оцінки якості організації виробничого процесу експлуатації об'єктів залізничної транспортної інфраструктури з урахуванням рівня надійності та безпеки їх функціонування, а також технічних та економічних ризиків, що при цьому виникають.

1 УПРАВЛІННЯ РІВНЕМ НАДІЙНОСТІ І БЕЗПЕКИ ОБ'ЄКТІВ ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ПРИ РЕАЛІЗАЦІЇ ВИРОБНИЧОГО ПРОЦЕСУ ТЕХНІЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

1.1 Загальна постановка задачі дослідження

АТ «Укрзалізниця» дуже серйозно ставиться до питань фінансової стійкості та незалежності. Вирішення цих питань компанія бачить, насамперед, у підвищенні ефективності реалізації виробничих процесів за одночасної оптимізації структури підрозділів усіх рівнів, що дозволить надавати якісні послуги на транспортному ринку, забезпечувати високий рівень привабливості залізничного транспорту для клієнтів за мінімальних витрат.

Специфіка виробничої діяльності компанії полягає у тому, що процес надання послуг перевезення забезпечується у результаті експлуатації як рухомого складу, так і розвиненої інфраструктури, що представляють собою складні технічні системи.

Відповідно до цього, слід розглянути в даному контексті положення ст. 22 Закону України «Про транспорт» [1], які визначають структурний склад залізничного транспорту країни, зокрема це:

- підприємства залізничного транспорту, що здійснюють перевезення пасажирів, вантажів, багажу, пошти;
- рухомий склад залізничного транспорту;
- залізничні шляхи сполучення;
- промислові, будівельні, торговельні та постачальницькі підприємства;
- науково-дослідні, проектно-конструкторські організації;
- підприємства промислового залізничного транспорту та інші підприємства, установи та організації незалежно від форм власності, що забезпечують його діяльність і розвиток.

З урахуванням інформації, що наведена вище, на рисунку 1.1 наведена схема інфраструктури залізничного транспорту та її функції [3].

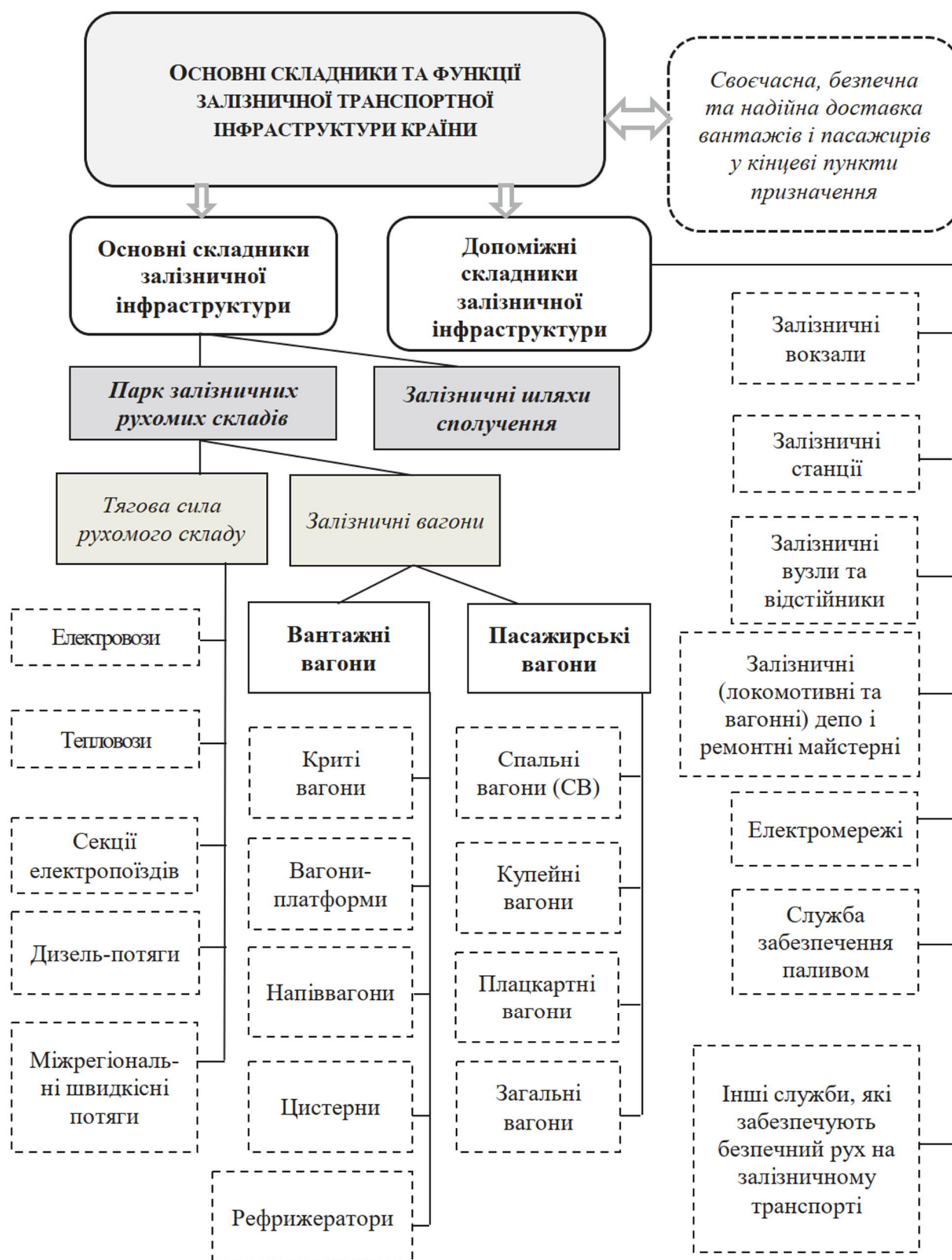


Рисунок 1.1 – Схема основних складових елементів інфраструктури залізничного транспорту країни та її функції

Інфраструктура залізничного транспорту – технологічний комплекс, що включає залізничні колії загального користування (у тому числі під'їзні колії), інженерні споруди (мости, тунелі, віадуки тощо), інші будівлі, споруди, пристрої

та обладнання, що забезпечують функціонування такого комплексу та використовуються для надання послуг з перевезення пасажирів та вантажів залізничним транспортом, повний перелік яких наведено у [2].

Так, розглядаючи на рис. 1.1 у цілому залізничну транспортну виробничу інфраструктуру країни, слід виділити в ній два складника – основний і допоміжний. До основного складника слід віднести тягову силу рухомих складів, залізничні вагони і залізничні шляхи сполучення. До допоміжного складника залізничної інфраструктури слід віднести залізничні вокзали і станції, залізничні вузли та відстійники, залізничні депо і ремонтні майстерні, електромережі, службу постачання паливом та інші служби, що забезпечують безпечний і надійний рух поїздів на залізничних шляхах сполучення в Україні. При цьому від злагодженої роботи двох цих складників залежить як основна функція залізничного транспорту, у завдання якої входить забезпечення своєчасної, безпечної і надійної доставки вантажів та пасажирів до кінцевих пунктів їх призначення, так і те, що, відповідно, чинить позитивний вплив на підвищення ефективності соціально-економічного розвитку самої країни.

Ключовими елементами інфраструктури залізничного транспорту є магістральні залізничні лінії загального користування та розміщені на них технологічні споруди, передавальні пристрої, що безпосередньо використовуються для забезпечення процесу перевезень, які є державною власністю, закріплюються за АТ «Укрзалізниця» на праві господарського відання та не підлягають приватизації [1].

На балансі АТ «Укрзалізниця» перебуває 41,6 тис. км головних, станційних, спеціальних і під'їзних колій, з яких експлуатується 39,4 тис. км (див. рисунок 1.2).

До складу інфраструктури залізничного транспорту не входить залізнична інфраструктура, якою володіють суб'єкти господарювання і використовують її виключно для власних потреб та на якій працює рухомий склад таких суб'єктів, що не має права виходу на інфраструктуру залізничного транспорту (так звані «об'єкти промислового залізничного транспорту»).



Рисунок 1.2 – Структура залізничної колії АТ «Укрзалізниця», тис. км

Відмови у технічних системах можуть знижувати ефективність реалізації виробничих процесів аж до повної неможливості їхнього функціонування. При цьому самі відмови у загальному випадку представляють собою події випадкової природи. Це означає, що з тією чи іншою ймовірністю деяка відмова може виникнути в будь-який час експлуатації технічної системи.

Якщо говорити про залізничну інфраструктуру, то її функціонування забезпечує реалізацію перевізного процесу. Тому відмови в залізничній інфраструктурі можуть призводити до зниження якості перевезень, насамперед, за рахунок незапланованих затримок у русі поїздів або порушення безпеки перевезень.

Затримки в русі поїздів залежатимуть не лише від характеристик надійності об'єктів залізничної інфраструктури, а й від характеристик процесу перевезень, що реалізується на ділянці залізниць. Оскільки значення затримок у русі поїздів, як і ймовірність їх виникнення пов'язані з випадковими подіями, якими є відмови технічних засобів залізничної інфраструктури, то доречно говорити про внутрішні технічні та економічні ризики, обумовлені власною виробничою діяльністю компанії.

Зниження ймовірності відмов об'єктів залізничної інфраструктури безумовно знижує технічні та економічні ризики, пов'язані з виробничою діяльністю, але потребує відповідних витрат, тому нескінченне зниження економічних ризиків неможливе, оскільки потребує необмежених ресурсів.

В даний час безпосередньо на підтримку виробничого процесу в АТ «Укрзалізниця», за різними оцінками, припадає понад 90 % витрат [4]. При цьому понад 20 % від загального обсягу витрат припадає на утримання та експлуатацію інфраструктури (див. рисунок 1.3).



Рисунок 1.3 – Структура операційних витрат АТ «Укрзалізниця» у 2019 р.

Співвідношення витрат на капітальний ремонт та поточну експлуатацію у різні роки змінюється, оскільки є суттєва нерівномірність вироблення основними засобами необхідного ресурсу, проте витрати на поточну експлуатацію переважають та досягають 80 %, а іноді й більше.

Погіршення стану залізничної колії та її пропускної здатності викликано некомпетентними діями керівництва АТ «Укрзалізниця», наслідком яких є неефективне управління активами, нераціональне використання коштів та систематичне невиконання необхідних обсягів ремонтів. За експертним оцінками вартість відкладених на майбутні періоди капітальних ремонтів колії перевищують 52 млрд. грн [5].

Аналіз представленої на Єдиному державному веб-порталі відкритих даних інформації [6], яка наведена у таблиці 1.1 свідчить, що у 2020 р. ситуація наблизилась до критичної межі та має суттєві ознаки загрози безпеці критичної інфраструктурі.

Наразі капітального ремонту і реконструкції потребують понад 11 тис. км залізничних колій, або 28 % від загальної протяжності експлуатованих колій. Проте за 12 місяців 2020 р. виконано капітальний ремонт і реконструкція лише 160,7 км колії, що складає менше 1,5 % від обсягу необхідних ремонтів та реконструкції (див. рисунок 1.4).

Таблиця 1.1 – Капітальний ремонт і реконструкція колії у 2020 році, км

Колії	Потребують	Виконано	Відсоток
Головні	9 145,30	145,93	1,60
Станційні і спеціальні	1 874,60	14,46	0,77
Під'їзні	0	0,31	0
Усього	11 019,90	160,70	1,46

З майже 27 тис. км головних колій 34 % (понад 9 тис. км) потребують капітального ремонту і реконструкції, на яких у 2020 р. виконано відповідних робіт лише на 145,93 км (1,6% від потреби). Крім того, капітального ремонту і реконструкції потребують 1,87 тис. км (17%) станційних і спеціальних колій, на яких за той же період виконано відповідних робіт лише на 14,46 км (0,77% від потреби).

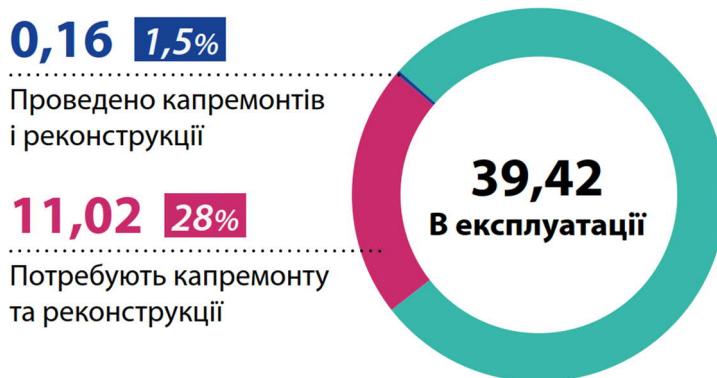


Рисунок 1.4 – Обсяги капітального ремонту і реконструкції, що виконані у 2020 році

Старіння та зношування інфраструктури характерні для всіх господарств. Так, аналіз стану матеріально-технічної бази господарства автоматики та телемеханіки показує, що на мережі залізниць на початок 2020 року знос основних

виробничих засобів господарства автоматики та телемеханіки становив понад 52 %. Як наслідок, збільшується кількість відмов, які є об'єктивною причиною порушення технології перевезень та впливають на їхню безпеку. Під відмовами, у даному випадку, розуміють події, які полягають у втраті працездатності технічного об'єкта.

Поточний стан залізничної інфраструктури та поступове зростання вантажонапруженості, безумовно, збільшують ризики, пов'язані з реалізацією АТ «Укрзалізниця» виробничих процесів, що слід враховувати при оцінці економічної безпеки та стійкості розвитку підприємства. Це вимагає використання відповідної методики їх обліку та визначення того, як впливає рівень надійності та безпеки залізничної інфраструктури на заданій ділянці залізниць з певним характером експлуатаційної роботи на рівень економічних ризиків, а також вирішення зворотного завдання.

1.2 Аналіз відмов об'єктів залізничної інфраструктури та їх наслідків

Сучасний стан технічних засобів керування та регулювання рухом поїздів, технічної діагностики та телекомунікацій, що наразі знаходяться в експлуатації на магістральному залізничному транспорті України, визначається значним ступенем зношеності основних фондів [7-9]. Узагальнені значення фізичного зносу пристроїв керування та регулювання рухом поїздів наведені у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Зведені показники фізичного зносу пристроїв КРРП на магістральному залізничному транспорті України

Система, вимірювач	Працює в межах нормативного терміну		Працює понад нормативний термін	
	кількість	%	кількість	%
Електрична централізація, стрілки	5233	17	26095	83
Автоблокування, км	2722,5	22	9522,7	78
Напівавтоматичне блокування, км	2543	37	4292	63
Диспетчерська централізація, км	1709,6	38	2819,1	62
Гіркові пристрої, стрілки	277	41	395	59
Гіркові пристрої, уповільнювачі	89	8	1063	92
Загалом, технічні одиниці	11453	35,4	20891	64,6

В таких умовах спостерігається доволі низький рівень експлуатаційної надійності функціонування пристроїв керування та регулювання рухом поїздів на залізницях України.

Зведені дані щодо статистики відмов пристроїв керування та регулювання рухом поїздів, опрацьовані протягом 2010-2018 рр. у науковій праці [10], що викликані через фактори, пов'язані із функціонуванням господарства автоматики і телекомунікацій АТ «Укрзалізниця» (служби Ш), наведені у таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Статистичні дані щодо відмов пристроїв залізничної автоматики

Рік	Кількість відмов пристроїв залізничної автоматики	Відмови пристроїв керування та регулювання рухом поїздів, що віднесені за службою Ш						
		Кількість	%	З експлуатаційних причин		Які викликали затримку поїздів		Кількість затримок поїздів
				Кількість	%	Кількість	%	
2010	6016	1432	23,8	1262	88,13	324	22,63	905
2011	4837	1515	31,3	1337	88,25	298	19,67	863
2012	4963	1552	31,3	1322	85,18	397	25,58	902
2013	4144	1467	35,4	1197	81,6	409	27,88	884
2014	4890	1196	24,5	968	80,94	302	25,25	720
2015	4832	1299	26,9	1011	77,83	431	33,18	1038
2016	4296	1241	28,9	969	78,08	472	38,03	1123
2017	5310	1330	25,1	1135	85,34	674	50,68	1656
2018	4954	1261	25,5	1065	84,46	664	62,34	1584

Із наведених у таблиці 1.3 даних випливає тенденція до збільшення кількості затримок руху поїздів через відмови пристроїв залізничної автоматики, не дивлячись на фактичні зменшення обсягу перевезень.

Також слід зазначити, що події, пов'язані з порушенням безпеки, мають значно більше наслідків, тому, незважаючи на їхню невелику кількість, матеріальні збитки обчислюються мільйонами гривень. Так, матеріальні збитки АТ «Укрзалізниця» через порушення безпеки руху на рік може досягати 15 млн. грн [11].

Стає очевидним, що робота технічних пристроїв інфраструктури залізниць є основою забезпечення заданої пропускну та провізної спроможності залізниць, забезпечення стійкості функціонування та гарантованої якості послуг.

У національних стандартах, що раніше використовувалися, не відображалися питання управління інвестиціями, витратами на поточне утримання інфраструктури та рухомого складу. Тому в структурних підрозділах обслуговування технічних засобів велося на основі нормативного терміну їхньої служби, як правило, без урахування поточного стану, що призводило до нераціонального витрачання коштів та неналежного технічного стану об'єктів інфраструктури.

Оскільки наявні в Укрзалізниці кошти на оновлення основних фондів не забезпечують необхідні обсяги оновлення (про це говорять систематичні дотації компанії з боку держави), то в рамках зусиль щодо забезпечення якості транспортних послуг, підвищення привабливості та конкурентоспроможності компанії на ринку, забезпечення поступального розвитку та економічної безпеки, розроблено перелік заходів щодо зміни організаційної структури АТ «Укрзалізниця», розроблено методи збереження працездатності засобів транспортної інфраструктури. В основі методів лежить оптимізація витрат у діяльності компанії та її окремих структурних підрозділів виходячи з економічних міркувань, що розглядається як одне з ключових завдань компанії.

Так, у рамках пошуку шляхів оптимізації витрат на утримання інфраструктури державне підприємство розглядає можливість застосування в управлінні експлуатаційною діяльністю європейського стандарту CSNEN50126-1 [12], що нормативно визначає методологію забезпечення безвідмовності, готовності, ремонтпридатності та безпеки (*RAMS*).

1.3 Загальні відомості про методологію RAMS

Методологія *RAMS* визначає підхід до експлуатації об'єктів залізничного транспорту. Основна мета впровадження методології *RAMS* полягає у зниженні вартості життєвого циклу об'єктів транспортної інфраструктури та рухомого складу при збереженні необхідного рівня надійності та безпеки перевізного процесу. Сутність *RAMS* представлена схемою на рисунку 1.5. *RAMS* поєднує у собі ряд стандартів: EN50126, EN50126-2, EN50128, EN50129, ГОСТ Р 61508, IEC62061(2005), IEC62278(2002).



Рисунок 1.5 – Сутність RAMS

Життєвий цикл продукту відповідно до RAMS (розглядається EN50126) представляється на основі V-моделі, загальний вигляд якої представлений на рисунку 1.6. У моделі виділяють низхідну гілку, яку називають розробкою або проектуванням, висхідну гілку – складання, встановлення та приймання, і горизонтальна ділянка – експлуатація об'єкта за призначенням. Модель показує, що оцінка показників надійності, безпеки, готовності та ремонтпридатності здійснюється на всіх основних етапах розробки, виробництва та експлуатації у взаємозв'язку один з одним.

В основу управління безпекою та надійністю технічних об'єктів покладено такі положення [13]:

- абсолютної надійності та безпеки не існує – після вживання захисних заходів завжди залишається певний залишковий ризик.
- залишковий ризик не повинен бути вищим за допустимий рівень.
- допустимий рівень ризику оцінюється та коригується на всіх етапах життєвого циклу.

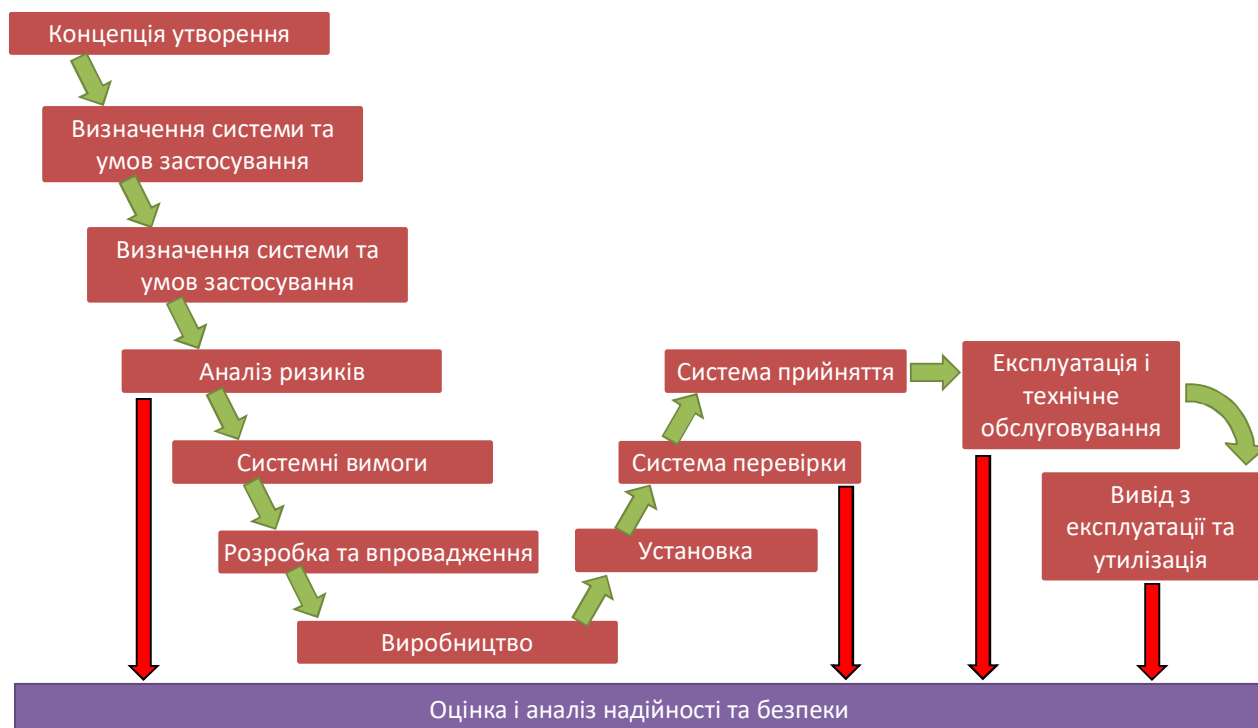


Рисунок 1.6 – V-модель життєвого циклу

Врахування ризиків на всіх етапах життєвого циклу є принципово новим підходом до управління надійністю та безпекою об'єктів залізничної інфраструктури. При цьому досягнення показниками *RAMS* встановлених вимог досягається шляхом впливу на фактори, що впливають.

Можливі ризики та їх допустимі значення визначаються ще під час розробки та впровадження продукту у виробництво, на етапах формування концепції створення та визначення умов його застосування. На основі визначають параметри продукту, які оформляють як технічного завдання. Потім з урахуванням вже фактичних ризиків підтверджуються параметри продукту після встановлення та налаштування безпосередньо під час приймання в експлуатацію. Далі оцінюються фактичні параметри об'єкта та супутні ризики у процесі експлуатації, аж до списання та утилізації продукту.

1.4 Огляд наукових підходів оцінки рівня безпеки руху

Діяльність залізничного транспорту безпосередньо пов'язана з ризиком, який у свою чергу потребує оцінки для контролю стану безпеки руху поїздів.

Наявність значень ризику тільки у цифровому уявленні не дає повноти його подальшого застосування у роботі систем без відповідних принципів забезпечення безпеки. В даний момент існують принципи забезпечення безпеки руху поїздів, які наведено в [14].

Принцип *ALARP* (*As Low As Reasonably Practicable*) почала перша використовувати Великобританія. Суть принципу – ризик повинен бути настільки низький, настільки це можливо. Не обов'язково повністю усувати ризик, досить знизити його до допустимого рівня, коли він перестає нести певну загрозу.

Будь-який захід або їх комплекс може призвести лише до зниження рівня ризику (рисунок 1.7). При цьому зі зростанням витрат (інвестицій) на попередження ризику темп його зниження з деякого моменту зазвичай починає сповільнюватися, тому є певний доцільний рівень ризику.

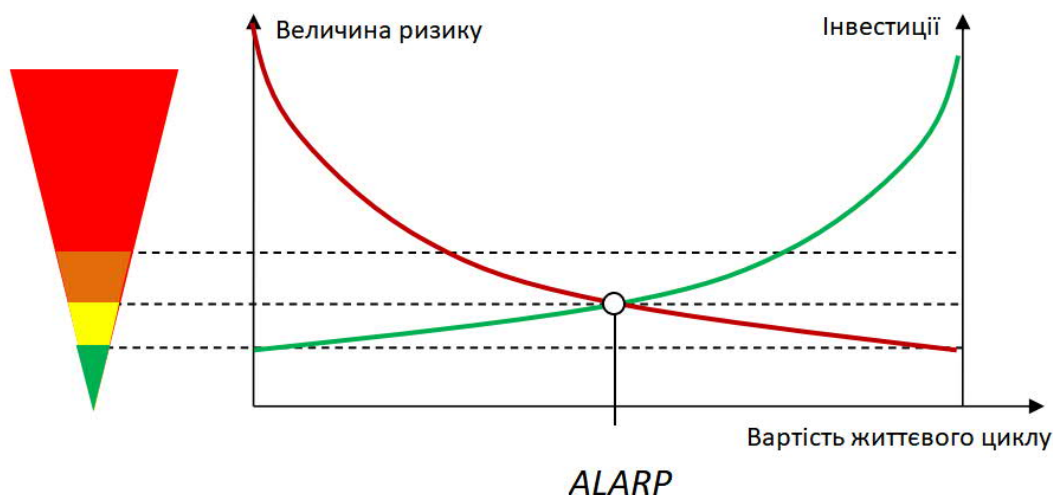


Рисунок 1.7 – Модель *ALARP*

Доцільний рівень ризику зазвичай називають *ALARP*, що означає – ризик настільки низький наскільки це можливо і можливо. Доцільний рівень ризику практично не можна досягти, тому прийнято оцінювати близькість фактичного ризику до точки *ALARP*. Для цього застосовують модель *ALARP*, яку також називають «краваткою-метеликом». Модель *ALARP* визначає рівень ризику за якісною та кількісною шкалою, залежно близькості його до доцільної величини. Модель *ALARP* зображують у вигляді піраміди (рисунок 1.7), що складається з чотирьох областей ризику різного кольору з категоріями: «неприпустимий»

(червона), «небажаний» (помаранчева), «допустимий» (жовта), «не прийнятий» у розрахунок» (зелена). Доцільний рівень ризику вважають таким, що перебуває на межі областей рівнів ризику з категоріями «небажаний» та «допустимий». Ці рівні є доцільними. На відміну від них рівень «неприпустимий» означає економію інвестицій, за неприйняттого зростання втрат за ризиковими подіями. Рівень «не враховується» говорить про те, що за ризиковими подіями втрати незначні, але, можливо, це досягнуто за рахунок зайвих інвестицій, внаслідок чого вартість життєвого циклу технічних систем виявляється завищеною.

Принцип мінімальної ендегенної смертності *MEM (Minimum Endogenous Mortality)* використовується на території Німеччини. Суть принципу – загроза, яка пов'язана з новою системою, не повинна перевищувати цифру мінімальної ендегенної смертності для індивідуума. Відповідно до цього принципу, смерть настає по різних причинах, серед яких є група «технологічних факторів», до яких відносяться: транспорт, робочі механізми, розваги та спорт, самостійні заняття, але смерть від хвороб або вроджених вад до цієї групи не відноситься. На цю групу припадає деякий процент смертей на рік, величина якого залежить від віку населення, яке розглядається. Цей ризик називається «ендегенною смертністю» (*R*). У розвинених країнах *R* є найменшим у віковій категорії від 5 до 15 років і називається «мінімальною ендегенною смертністю» (*R_m*). Іншими словами, ймовірність загибелі людини від впливу залізничного транспорту не повинна перевищувати ймовірності загибелі людини (у віці 5-15 років) в силу природних причин. З урахуванням мінімальної ендегенної смертності, ймовірність гибелі людини від дії залізничного транспорту на протязі року становить 10–5.

Принцип *GAMAB (Globalement Au Moins Aussi Bon)* діє у Франції. Суть принципу – всі нові керовані транспортні системи повинні в цілому мати ступінь ризику, принаймні, такий же, що і рівнозначна існуюча система. Цей принцип вимагає, щоб будь-яка нова система була як мінімум не гірша від системи, яку вона замінює, або будь-якій еквівалентній системі, яка існує. Принцип гарантує, що встановлення нових систем не буде йти в зворотному напрямку з точки зору абсолютної безпеки. Однак, в ситуації, коли суспільні норми і очікування постійно

розвиваються, даний принцип не є гарантією того, що безпека системи буде покращена.

Набір методів оцінки ризику у цих країнах при застосуванні принципів *ALARP*, *MEM* та *GAMAB* також буде індивідуальним та інтегрованим для відповідної ситуації на залізниці.

Оцінка ризику є частиною менеджменту ризику і є структурованим процесом, в рамках якого ідентифікують способи досягнення поставлених цілей, а також проводять аналіз наслідків, імовірності виникнення небезпечних подій для прийняття відповідних рішень.

Існуючі Міжнародні Стандарти ISO/IEC 31010:2009 «Менеджмент Ризику – Методи оцінки ризику», які були розроблені Міжнародною Електротехнічною Комісією, містять рекомендації з вибору й застосування методів оцінки ризику, які в даний момент знайшли практичне застосування у країнах ЄС [15].

Даний стандарт містить 31 метод оцінки ризиків, які можуть класифікуватися за різними ознаками.

Одним з декількох найбільш ймовірних факторів, що впливають на вибір методу оцінки ризику в залізничній галузі є можливість отримання кількісних даних на виході (див. таблицю 1.4).

Європейське залізничне агентство разом з Європейською комісією проводять широку програму для відкритого і конкурентоспроможного ринку залізничних перевезень і прагнуть при цьому покращити рівень безпеки. Реалізація Постанови Європейського Союзу (ЄС) 402/2013 (Імплементативний Регламент Європейської Комісії про загальний метод безпеки для виявлення та оцінки ризиків (CSM RA) і відміну Регламенту ЄС 352/2009) та відповідного до цього документа [16] надає змогу гармонізувати процеси оцінки ризиків серед країн-членів ЄС. Процеси, що проводяться в одній державі ЄС, отримують взаємного визнання у інших країнах європейського простору.

Таблиця 1.4 – Методи оцінки ризиків з можливістю отримання кількісних даних на виході

Номер	Назва методу оцінки	Значущість факторів, які впливають		
		Ресурси та можливості	Невизначеність	Складність
1	Аналіз дерева несправностей	Високі	Висока	Середня
2	Аналіз дерева подій	Середні	Середня	Середня
3	Аналіз причин та наслідків	Високі	Середня	Висока
4	Аналіз видів і наслідків відмов (FMEA) і аналіз критичності видів і наслідків відмов (FMECA)	Середні	Середня	Середня
5	Аналіз «краватка-метелик»	Середні	Висока	Середня
6	Аналіз рівнів захисту (LOPA)	Середні	Середня	Середня
7	Аналіз впливу людського фактору (HRA)	Середні	Середня	Середня
8	Оцінка токсикологічного ризику	Високі	Висока	Середня
9	Технічне обслуговування, яке направлене на забезпечення безпеки	Середні	Середня	Середня
10	Марківський аналіз	Високі	Низька	Висока
11	Моделювання методом Монте-Карло	Високі	Низька	Висока
12	Байєсівський аналіз	Високі	Низька	Висока
13	Аналіз ефективності витрат	Середні	Середня	Середня

Процес управління ризиками у ЄС не встановлює конкретних інструментів або методів, які будуть використані. Концепцію *CSM RA* на залізницях застосовують при будь-яких технічних, експлуатаційних або організаційних змінах залізничної системи. Якщо дані зміни впливають на безпеку, автор пропозиції приймає рішення, чи є дані зміни значущими, використовуючи при цьому відповідні критерії. У випадку, коли зміни відносяться до значущих, автор пропозиції повинен задіяти процес управління ризиками *CSM RA*.

Цей процес управління ризиками базується на аналізі та оцінці небезпек, використовуючи один чи декілька нижче приведених принципів прийняття ризику:

- застосування кодексів практики;
- порівняння з аналогічними системами (системи відліку);
- явна кількісна оцінка ризику.

Залізниці ЄС на етапі ідентифікації небезпек використовують загально визнані відомі методи оцінки ризиків [15]:

- аналіз видів і наслідків відмов (*PMEA*);
- аналіз дерева несправностей (*FTA*);
- аналіз дерева подій (*ETA*);
- дослідження небезпек і працездатності (*HAZOP*);
- ідентифікація небезпеки дослідження (*HAZID*);
- контрольні аркуші;
- структуровані групові інтерв'ю.

Слід зазначити, який би метод не використовувався, важливо мати правильне поєднання досвіду і компетенції, підтримувати неупередженість і об'єктивність. Правильна ідентифікація всіх небезпек лежить в основі всього процесу управління ризиками і дає впевненість в тому, що ризиками можна управляти під час процесу.

1.5 Аналіз процесів функціонування залізничної інфраструктури та методів їх моделювання

Якщо величина прямих економічних витрат визначатиметься, насамперед, безпосередньо рівнями надійності та безпеки інфраструктури, то величина непрямих економічних витрат буде значно залежати від того, як взаємопов'язані між собою два основні процеси: процес руху поїздів на ділянці, процес відмов та відновлення об'єктів інфраструктури персоналом.

Крім складного взаємозв'язку процесів між собою важливо відзначити, що на кожен процес впливають багато різних факторів. Так, процес руху поїздів залежить від класу та спеціалізації залізничної лінії, складеного графіка руху, допустимих швидкостей руху, категорії поїзда, взаємодії служб та інших факторів. Безвідмовність об'єктів інфраструктури залежить від кліматичних умов, навантаження, елементної бази, природи процесів, що протікають, якості змісту та інших факторів. Параметри процесу відновлення стану об'єкта інфраструктури визначаються місцезнаходженням об'єкта, наявністю шляхів підходу чи під'їзду,

стратегією технічного обслуговування та ремонту, кваліфікацією та стажем персоналу, рівнем його фізичного стану та безліччю інших факторів.

В результаті процес руху поїздів по ділянці залізниць, обладнаній інфраструктурою, і процес відмов з подальшим відновленням носять у тій чи іншій мірі випадковий характер, і, отже, доцільно описувати їх з позиції теорії ймовірностей. Тоді й оцінка економічного збитку також повинна мати ймовірнісний характер і визначатися з ризиків у вигляді можливих затримок поїздів, пов'язаних з відмовами пристроїв на ділянці.

Для того, щоб виконати оцінку економічних збитків, необхідно реалізувати модель процесу, а для отримання кількісної оцінки показника необхідна математична модель.

Можна виділити два основні підходи до моделювання – аналітичне моделювання та імітаційне моделювання. При аналітичному моделюванні процес описується виразами, що дозволяють у явній формі визначити значення досліджуваного параметра від факторів, що впливають. Дослідження аналітичних моделей, зазвичай, здійснюється методами математичного аналізу. При імітаційному моделюванні насамперед мається на увазі чисельний спосіб проведення експериментів з математичними моделями, що описують поведінку досліджуваного об'єкта. У процесі імітаційного моделювання спочатку складається змістовний опис процесу функціонування, формалізоване у вигляді математичної моделі, остання потім перетворюється на математичний алгоритм, в якому зберігається логічна структура,

Аналітичне моделювання, незважаючи на можливість отримання одразу готового результату при будь-яких поєднаннях вихідних даних, часто вимагає значних зусиль на реалізацію самої математичної моделі. Як правило, такі моделі формуються з більш простих аналітичних моделей, однак, навіть для простих аналітичних моделей існує безліч обмежень для застосування. Якщо говорити про випадкові процеси, то, наприклад, для найпростішого потоку, потрібно дотримуватися обмеження відсутності післядії, ординарності та інших властивостей. При цьому, очевидно, кожна з аналітичних моделей завжди визначає вихідний процес із деякою часткою наближення. Для складних процесів, де є

складна логічна структура між факторами, далеко не завжди вдається отримати аналітичну модель, а якщо і вдається, то частина логічної структури у більшості випадків губиться.

Імітаційні моделі складних процесів з безліччю різнорідних взаємозв'язків між факторами отримувати значно простіше, точність і адекватність моделей при цьому можуть виявитися не гіршими, а навіть кращими за аналітичні, а структура – «прозорішою». Крім того, імітаційні моделі легше піддаються «еволюції», ніж аналітичні. Так, нові фактори, умови або обмеження додають у вже існуючу модель без необхідності її переробки у вигляді додаткової логічно ув'язаної компоненти, тоді як в аналітичних моделях подібні зміни можуть мати дуже обмежений характер або взагалі можуть бути неможливими. Слід зазначити основний недолік імітаційного моделювання, який полягає у великій кількості обчислень, так як моделювання процесів здійснюється чисельно, але при сучасній продуктивності обчислювальної техніки він є не критичним.

Проведений аналіз методів моделювання визначає доцільність застосування у дипломній роботі методу імітаційного моделювання. Оскільки потрібно моделювати випадкові процеси, можна скористатися методом Монте-Карло [17].

Метод Монте-Карло – це метод статистичного моделювання. Реалізована таким методом імітаційна модель дозволить «розіграти» безліч реалізацій процесу функціонування інфраструктури на досліджуваній ділянці залізниць при різних поєднаннях факторів, що впливають з урахуванням ймовірностей їх появи, а також характеру експлуатації обладнання. Отримані результати надалі можна обробити відомими методами математичної статистики [18], а потім побудувати імовірнісні моделі.

Виділимо ряд основних етапів, які доцільно виконати для реалізації в рамках цього дослідження імітаційного моделювання методом Монте-Карло:

1. Здійснити моніторинг процесу функціонування транспортної інфраструктури, що досліджується, під час її експлуатації на заданій ділянці. Мета моніторингу – вивчення випадкових процесів, що моделюються, збирання та подання вихідних даних для моделювання. Оскільки процеси випадкові, то вихідні дані повинні мати статистичний характер і оброблятися статистичними методами.

2. Провести моделювання. Для цього необхідно розробити моделі, що дозволяють «розігрувати» випадкові події із заданими характеристиками, а також логічно пов'язувати ці події між собою. Потім, багато разів використовуючи розроблену модель, змодельовати «штучну статистику».

3. Виконати оцінку результатів моделювання. Оцінка повинна бути результатом обробки статистичних даних, отриманих в результаті імітаційного моделювання, а також отримання ймовірнісних розподілів шуканих досліджуваних величин.

Таким чином, для оцінки кількісного взаємозв'язку між рівнями надійності та безпеки об'єктів залізничної інфраструктури та рівнем економічних ризиків доцільним є застосування методу Монте-Карло, який на відміну методів аналітичного моделювання дозволяє врахувати складну логічну природу явищ, що впливають на перевізний процес, а також забезпечити прозорість структури та «еволюціонування» моделі.

2 МОНІТОРИНГ ТЕХНІЧНИХ І ЕКОНОМІЧНИХ РИЗИКІВ, ПОВ'ЯЗАНИХ З ФУНКЦІОНУВАННЯМ ОБ'ЄКТІВ ЗАЛІЗНИЧНОЇ ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

2.1 Загальні відомості

Оцінка ризиків, пов'язаних з надійністю та безпекою функціонування об'єктів залізничної інфраструктури, повинна базуватися на безперервному моніторингу процесу їх функціонування. У процесі моніторингу залежно від того, які ризики повинні в подальшому оцінюватися, потрібно здійснювати збір та реєстрацію в заданому вигляді даних про функціонування системи залізничної автоматики і телемеханіки (далі ЗАТ) за певний проміжок часу, так званим розрахунковим періодом. Прогноз ризиків здійснюється в припущенні про те, що процес функціонування системи ЗАТ надалі в цілому протікатиме аналогічним чином.

При оцінці ризиків щодо надійності та безпеки вихідні дані повинні включати відомості, приведені на рисунках 2.1 і 2.2.

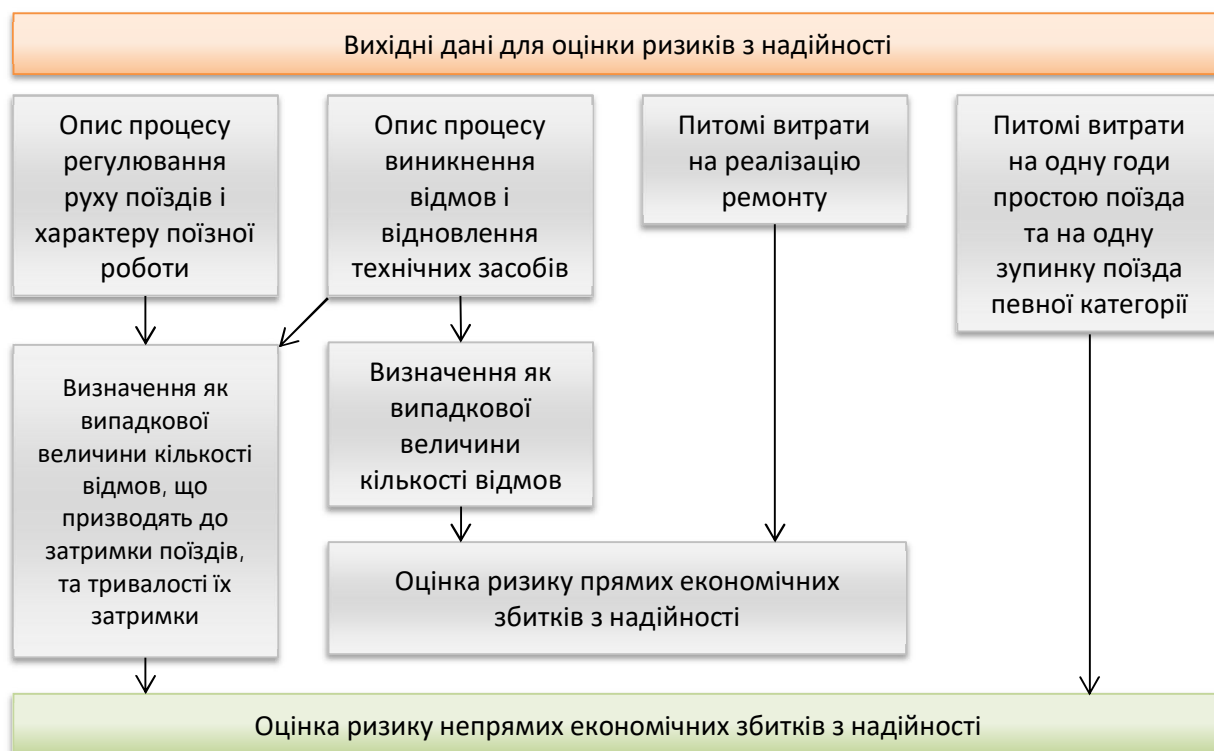


Рисунок 2.1 – Вихідні дані для оцінки ризиків з надійності функціонування залізничної інфраструктури

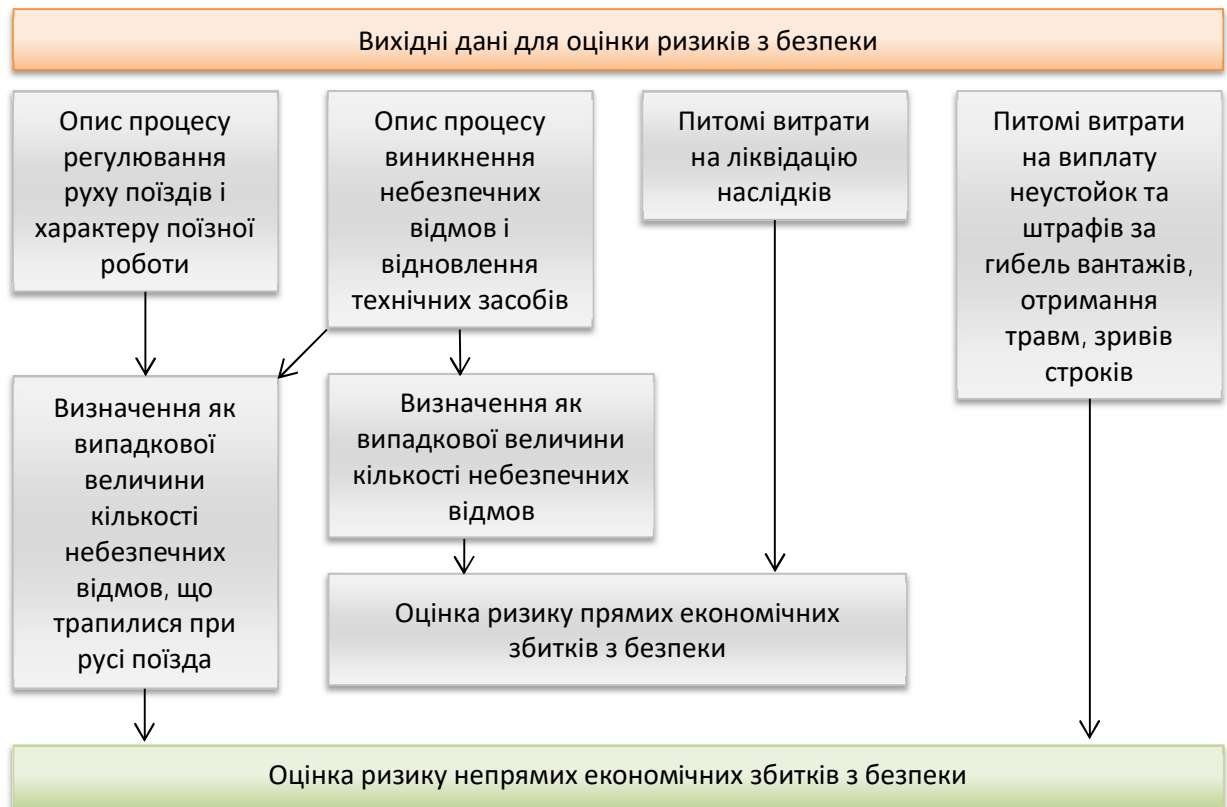


Рисунок 2.2 – Вихідні дані для оцінки ризиків з безпеки функціонування залізничної інфраструктури

Внаслідок обробки вказаних даних повинні визначатися властивості та характеристики взаємопов'язаних процесів використання залізничної інфраструктури за призначенням та відмов технічних засобів, у тому числі небезпечних.

Вивчивши у процесі наступного аналізу особливості кожного з наведених процесів та визначивши їх кількісні характеристики, можна сформулювати адекватні моделі процесів, детерміновані, або стохастичні (ймовірнісні), статичні, або динамічні [19]. Статичні моделі описують процеси, характеристики яких не змінюються у часі – стаціонарні процеси, динамічні моделі описують процеси, характеристики яких змінюються у часі – нестационарні процеси. Вибір класу моделі здійснюється внаслідок аналізу вихідних даних.

2.2 Визначення вихідних даних для оцінки економічних ризиків, пов'язаних з надійністю та безпекою об'єктів транспортної інфраструктури

Основними джерелами економічних ризиків, пов'язаних з експлуатацією залізничної інфраструктури та обумовлених їх неабсолютною надійністю та безпекою є:

- прямі витрати на реалізацію процесу усунення відмов елементів інфраструктури (ремонт) у разі виникнення;
- непрямі витрати, пов'язані з можливими затримками в русі поїздів, як зниження дільничної швидкості, або додаткових зупинок, і навіть виплатою штрафів й неустойок при затримках у термінах доставки та інших випадках;
- прямі та непрямі витрати, пов'язані з усуненням наслідків небезпечних відмов залізничної інфраструктури.

У цьому слід зазначити, що з різних господарств співвідношення між вказаним витратами по-різному. Наприклад, для колійного господарства найбільші витрати на усунення відмов, що не призвели до небезпечних наслідків, пов'язані безпосередньо з реалізацією процесу усунення відмов, тоді як для господарства електропостачання, а також автоматики і телемеханіки найбільшими є непрямі витрати, які суттєво перевищують витрати на ремонт.

Оцінка прямих витрат на усунення відмов базується на:

- інформації про кількість та характер відмов за деякий інтервал часу;
- рівні витрат на усунення відмов за той самий інтервал часу.

Оцінка непрямих витрат, пов'язаних з впливом відмов на процес руху поїздів ґрунтується на:

- інформації про характер поїзної роботи дільниці;
- рівні витрат, зумовлених затримками у русі поїздів;
- інформації про кількість та характер відмов за деякий інтервал часу.

У якості джерел вихідних даних для отримання відомостей про функціонування залізничної інфраструктури можна використовувати дані з

відповідних інформаційних систем або за відсутності останніх – з відповідних звітів.

Так, відомості про характер поїзної роботи можна отримати з інформаційної системи ГВР «Урал» [20], яка розроблена російськими фахівцями, але використовується на залізничних станціях України. Разом з тим, слід зазначити, що АТ «Укрзалізниця» також має автоматизовані системи для ведення і аналізу показників графіків виконаного руху поїздів (АГВР), що ув'язані з базами даних АСК ВП УЗ та АСК ПП УЗ [21]. При належному розвитку АРМ АГВР, як на це вказують автори робіт [22, 23], ефективність даної системи буде максимальною, що дозволить отримувати достовірну та вичерпну інформація для оцінки ризику з надійності та безпеки руху поїздів.

Що стосується відомостей про відмови та відновлення, то їх можна отримати з журналів форми ДУ-46. Нажаль, в Україні не використовуються більше ефективні та інформативні автоматизовані системи, такі як російські АСУ-Ш-2 (КЗ УО-ЖАТС, КЗ-АЛСН), КАС АНТ [24]. Але є впевненість у поступовій модернізації існуючих автоматизованих систем і їх пристосування для введення та систематизації подібної інформації.

Передвiдмовний стан залiзничної технiки – це несправний стан залiзничної технiки, у якому ймовiрнiсть її переходу в непрацездатний стан протягом заданого напрацювання вбирається з допустимого значення.

Інцидент – подія, викликана переходом залізничної техніки в непрацездатний стан, відхиленням від заданих режимів виконання технологічних процесів на інфраструктурі АТ «Укрзалізниці», у тому числі через зовнішній вплив, і що спричинило за собою порушення графіка руху поїздів.

Усі перелічені події за її накопиченні можуть призводити до відмови. Більше того, відома практика «приховання» фахівцями відмов, коли, у разі відсутності наслідків у вигляді затримок поїздів, їх списують в інші категорії подій, наприклад, у передвiдмовні стани. Тому зазначені відомості обов'язково повинні використовуватися для оцінки ризиків щодо надійності та безпеки залізничної інфраструктури.

Питомі витрати, пов'язані з різними ризиковими подіями можна визначити з відповідних звітів, у тому числі з публікованого АТ «Укрзалізниця» документа Аналіз стану безпеки руху поїздів, надійності роботи систем та пристроїв ЗАТ у господарстві автоматики та телемеханіки.

При цьому питомі витрати на реалізацію ремонту можна визначити, як усереднені витрати, пов'язані зі зберіганням, використанням, утилізацією невикористаних запасних частин та обладнання, що наведені на один ремонт.

Питомі витрати на годину простою поїзда і одну зупинку поїзда певної категорії можна визначити з використанням схеми розрахунків укрупнених норм експлуатаційних витрат [25].

Інформація про питомі витрати, зумовлені виплатою неустойок та штрафів через зрив термінів поставки, повинна формуватися в результаті обробки експериментальних даних про величину неустойок на один поїзд залежно від часу затримки. Така емпірична залежність може бути отримана шляхом апроксимації експериментальних даних.

Питомі витрати на ліквідацію наслідків небезпечних відмов, а також на виплату неустойок та штрафів за загибель вантажів, отримання травм, зрив строків постачання та інше можуть бути визначені внаслідок отримання усереднених значень зазначених показників на одну подію шляхом обробки звітів із документа «Аналіз стану безпеки руху поїздів, надійності роботи систем та пристроїв ЗАТ у господарстві автоматики та телемеханіки» за кілька попередніх років.

2.3 Формалізація вихідних даних для оцінки економічних ризиків, пов'язаних з надійністю та безпекою об'єктів транспортної інфраструктури

2.3.1. Загальні відомості щодо формалізації процесів функціонування та експлуатації залізничної інфраструктури

Формалізація має кінцеву мету отримання математичної моделі процесу, що досліджується. Так як передбачається моделювати випадкового процесу, то модель повинна бути стохастичною і являти собою розподіл тієї чи іншої випадкової величини, тобто функцію розподілу або щільність розподілу випадкової величини.

Як було сказано у п. 1.5, у дослідженні прийнято рішення реалізувати модель методом Монте-Карло [17].

Для оцінки економічних ризиків потрібно виконати формалізацію наступних випадкових процесів:

- процес виникнення відмов технічних засобів;
- процес відновлення стану технічних засобів;
- процес виникнення небезпечних відмов технічних засобів;
- процес використання об'єкта залізничної інфраструктури безпосередньо для реалізації регулювання руху поїздів, що знаходяться в його межах (використанням за призначенням);

- процес заняття об'єкта залізничної інфраструктури поїздами від сусідніх об'єктів.

Оскільки небезпечні відмови є видом відмов, пов'язаних із порушенням безпеки, то формалізація процесу їх виникнення може виконуватись одночасно з формалізацією відмов у цілому.

Незалежно від того, якого роду випадковий процес, що формується, його формалізація виконується одноманітно шляхом послідовної реалізації наступних етапів:

- збір та подання вихідних даних;
- підбір виду функції щільності ймовірностей на основі емпіричної функції розподілу;
- обчислення статистичних оцінок моментів випадкової величини;
- надання моментам випадкової величини їх статистичних оцінок;
- перевірка гіпотези про адекватність підбраної функції даних вибірки.

2.3.2. Збір та подання вихідних даних, що використовуються при оцінці ризиків щодо надійності та безпеки

У якості вихідних даних для оцінки ризиків, пов'язаних з надійністю та безпекою функціонування залізничної інфраструктури, необхідно зі звітної інформації отримати вибірку даних про функціонування залізничної інфраструктури за певний період часу, який будемо називати розрахунковим

періодом часу. Початок розрахункового періоду слід прив'язувати до дати та часу початку будь-якого календарного року.

Дані про характер експлуатаційної роботи на ділянці залізниць, що досліджується, обладнаній відповідною залізничною інфраструктурою, слід звести до таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Приклад таблиці для даних про характер експлуатаційної роботи або процес функціонування інфраструктури транспорту

№ з/п	Подія	Дата настання події (число, місяць, рік)	Час настання події (годин, хвилин)	Тривалість події (годин, хвилин)
1				
2				
...				

У стовпці «Подія» можливі значення:

- для перегінних систем – заняття;
- для станційних систем – прийом, відправлення, формування, розформування.

У стовпцях «Дата настання події» та «Час настання події» вказують календарну дату та час початку події. У стовпці «Тривалість події» вказують інтервал часу з моменту настання відповідної події до його закінчення.

Для даних про процес функціонування інфраструктури можна також використовувати структуру таблиці 2.1. При цьому у стовпці «Подія» можливі значення – «відмова», «передвідмовний стан», «зауваження до функціонування», «інцидент безпечний», «інцидент небезпечний».

Для зручності виконання подальших розрахунків доцільно виконати перерахунок моментів часу настання подій та сформувати нові структури, представлені у таблиці 2.2.

Отримані у таблиці 2.2 значення тривалості подій представляють собою випадкові величини, що описують процеси знаходження інфраструктури в активному та пасивному станах, появи в них відмов, реєстрації зауважень, передвідмовних станів, інцидентів та виконання процедури відновлення. Вказані

процеси необхідно змодельовати при синтезі імітаційної моделі як випадкові процеси.

Таблиця 2.2 – Момент настання подій, виражений у годинах

№ з/п	Подія	Час настання події, годин	Тривалість події, годин
1			
2			
...			

2.3.3. Формалізація процесів функціонування та експлуатації залізничної інфраструктури

Формалізація випадкових процесів полягає в обробці статистичних даних. При цьому обов'язково потрібно забезпечити репрезентативність вибірки статистичних даних. У разі обробки всіх подій, що фіксуються автоматично інформаційними системами, репрезентативність забезпечується тим, що вибірка відповідає генеральній сукупності об'єктів на досліджуваній ділянці.

В результаті формалізації визначається ймовірнісний закон розподілу випадкової величини – теоретична функція щільності розподілу випадкової величини.

Доцільно підбір функції щільності розподілу ймовірностей здійснювати методом моментів, для чого потрібно знати два перші моменти. Момент першого порядку – це математичне очікування, яке обчислюється за формулою

$$m_t = \int_{-\infty}^{+\infty} t \cdot f(t) dt. \quad (2.1)$$

Момент другого порядку – це дисперсія, яка описується виразом

$$D_t = \int_{-\infty}^{+\infty} (t - m_t)^2 \cdot f(t) dt. \quad (2.2)$$

Є аналогічні статистичні моменти, які для зручності позначаються значком тильди.

Статистичний момент першого порядку є середнім арифметичним значень випадкової величини

$$\tilde{m}_t = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}, \quad (2.3)$$

де n – обсяг статистичної вибірки.

Статистичний момент другого порядку – це вибіркова дисперсія, що обчислюється за формулою

$$\tilde{D}_t = \frac{\sum_{i=1}^n (t_i - m_t)^2}{n-1}. \quad (2.4)$$

У представницькій вибірці при $n \rightarrow \infty$ статистичні моменти ймовірності наближаються значеннями до ймовірнісних, тобто $\tilde{m}_t \rightarrow m_t$ та $\tilde{D}_t \rightarrow D_t$.

Отже, невідомі ймовірні моменти за умови адекватності підбраного ймовірнісного розподілу можуть бути замінені відповідними статистичними.

На основі варіаційного ряду будується гістограма, яка є емпіричною функцією щільності розподілу ймовірності. Приклад емпіричної щільності розподілу ймовірності для розподілу $\tilde{f}(T)$, що близький до нормального, представлений рисунку 2.3.

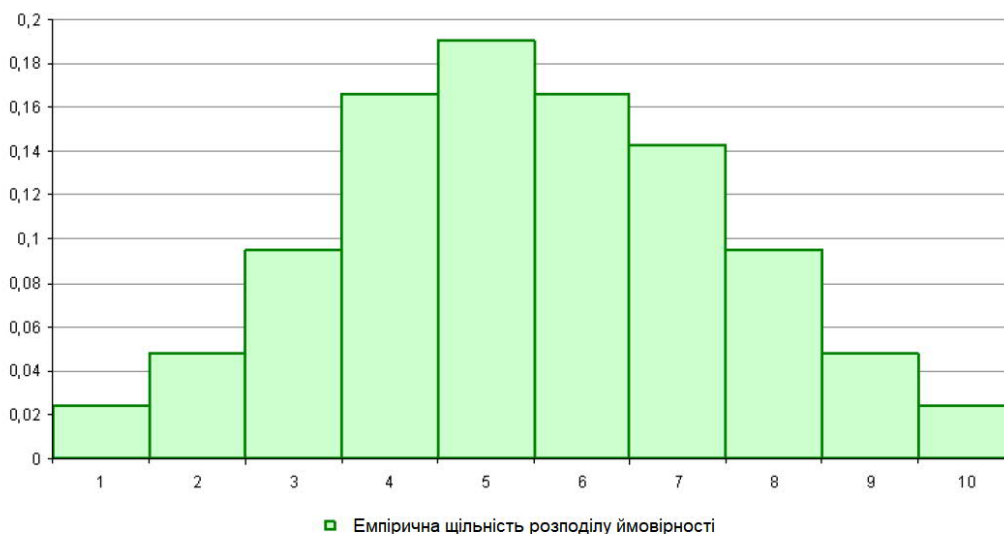


Рисунок 2.3 – Емпірична щільність розподілу ймовірності

Підбір теоретичного розподілу здійснюють на основі візуального аналізу гістограми та виявлення найближчого за формою теоретичного розподілу. При цьому необхідно уявляти, як візуально виглядає той чи інший імовірнісний розподіл. Далі визначаються статистичні оцінки невідомих параметрів теоретичного розподілу. На основі варіаційного ряду їх обчислюють за наступними формулами.

Оцінка математичного очікування часу є вибіркова середня

$$\tilde{T} = \frac{\sum_{q=1}^m T_q \cdot n_q}{\sum_{q=1}^m n_q} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{q=1}^m T_q \cdot n_q, \quad (2.5)$$

де T_q – значення параметру, що відповідає середині q -го інтервалу.

$$T_q = \frac{T_q^l + 0,5h}{2}, \quad (2.6)$$

де T_q^l – значення, що відповідає лівій межі інтервалу;

h – ордината гістограми.

Вибіркову дисперсію розраховують за формулою

$$\tilde{D}_T = \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{q=1}^m n_q (T_q - \tilde{T})^2. \quad (2.7)$$

Також визначається і середнє квадратичне відхилення випадкової величини

$$\sigma_T = \sqrt{\tilde{D}_T}. \quad (2.8)$$

В результаті підстановки обчислених значень статистичних моментів до формули теоретичного розподілу ймовірності його слід конкретизувати. Результат представлений рисунку 2.4.

У разі, якщо параметри теоретичного розподілу $\tilde{f}(T)$ не є безпосередньо моментами випадкової величини, то вони визначаються через відповідні формули взаємозв'язку.

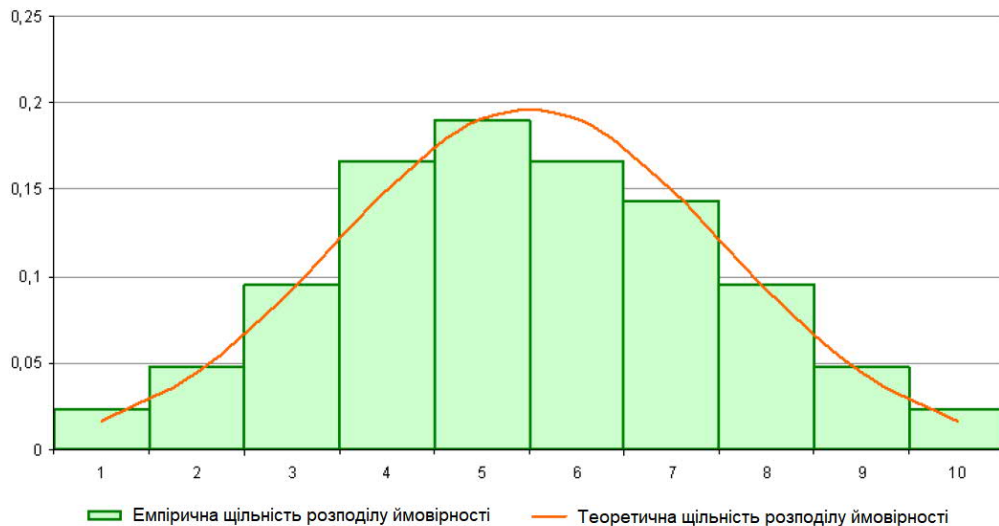


Рисунок 2.4 – Емпірична й теоретична щільність розподілу ймовірності

Після підбору теоретичного розподілу виконується перевірка адекватності моделі, що здійснюється шляхом перевірки спроможності гіпотези про характер використаного теоретичного імовірнісного розподілу. Часто для вирішення завдань статистичної перевірки гіпотез використовують критерій згоди Пірсона

$$\chi_{\text{кр}}^2 = \sum_{q=1}^m \frac{(n_q - N \cdot p_q)^2}{N \cdot p_q}, \quad (2.9)$$

де n_q – кількість виміряних значень випадкової величини, що потрапили в q -ий інтервал гістограми;

$$N = \sum_{q=1}^m n_q \text{ – загальний обсяг вимірів;}$$

p_q – теоретична можливість попадання випадкової величини в q -ий інтервал, що визначається за функцією $\tilde{f}(T)$.

Якщо $\chi^2 > \chi_{\text{кр}}^2$, гіпотеза відкидається як неспроможна, отже, необхідно для «згладжування» скористатися іншим теоретичним розподілом, у іншому випадку – приймається.

Відповідно до наведеної процедури у роботі виконана експериментальна перевірка розподілів випадкових величин, наведених у таблиці, на прикладі систем залізничної автоматики та телемеханіки.

Таблиця 2.3 – Характеристика випадкових величин

Сенс величин	Позначення величини
Величина представляє собою час відсутності руху поїздів по дільниці, обладнаною залізничною інфраструктурою, тобто, коли залізнична інфраструктура не використовується за призначенням – перебуває у пасивному стані	$T_i^п$
Тривалість руху поїзда по дільниці, обладнаною залізничною інфраструктурою, а отже, тривалість використання залізничної інфраструктури за призначенням – перебування в активному стані	T_i^a
Напрацювання між двома послідовними відмовами	T_i^B
Напрацювання між передвідмовними станами	$T_i^{пp}$
Напрацювання між зауваженнями до функціонування	T_i^3
Напрацювання між інцидентами безпечними	$T_i^{iб}$
Напрацювання між інцидентами небезпечними	$T_i^{iн}$
Час відновлення працездатного стану після і-ї відмови (інциденту)	$T_i^{відн}$

Статистичні вибірки про відмови, зауваження та інциденти, а також результати їх статистичної обробки і підбору теоретичного закону розподілу наведені у Додатку А. Під час розрахунку прийнято, що початком розрахункового періоду є 01 січня 2017 року.

2.3.4. Визначення витрат, пов'язаних з рівнем надійності та безпеки залізничної інфраструктури

Будь-яка відмова потребує витрат, у тому числі і грошових, на її усунення. У разі, якщо затримок у русі поїздів немає, то мають місце витрати на заміну – прямі економічні збитки. Якщо затримки виникли, то до прямого додається непрямий збиток, пов'язаний із затримками під час руху поїздів.

Грошові витрати доцільно висловити у питомих одиницях. Прямі витрати зручно привести на одну відмову. Для оцінки непрямих ризиків, пов'язаних із зупинками та затримками поїздів, грошові витрати доцільно представити у питомих одиницях, що визначаються на кількість зупинок та тривалість затримок поїздів.

Прямі економічні витрати значно різняться для різних господарств, тому мають розраховуватися окремо.

Прямі питомі економічні витрати на усунення однієї відмови у господарстві автоматики визначаються за формулою

$$C_{\text{пр}}^{\text{ат}} = (C_{\text{зап}}^{\text{ат}} + C_{\text{рем}}^{\text{ат}} + C_{\text{дост}}^{\text{ат}}) \cdot k_{\text{надл}}^{\text{ат}}, \quad (2.10)$$

де $C_{\text{зап}}^{\text{ат}}$ – середня вартість запасних частин та пристосувань для одного ремонту систем автоматики та телемеханіки;

$C_{\text{рем}}^{\text{ат}}$ – середня вартість самого ремонту системи автоматики та телемеханіки;

$C_{\text{дост}}^{\text{ат}}$ – середня вартість доставки матеріалів та персоналу до місця ремонту;

$k_{\text{надл}}^{\text{ат}}$ – коефіцієнт надлишкових замін у господарстві автоматики.

Прямі питомі витрати на усунення однієї відмови у господарстві електропостачання визначаються за формулою

$$C_{\text{пр}}^{\text{е}} = (C_{\text{зап}}^{\text{е}} + C_{\text{рем}}^{\text{е}} + C_{\text{дост}}^{\text{е}}) \cdot k_{\text{надл}}^{\text{е}}, \quad (2.11)$$

$C_{\text{зап}}^{\text{е}}$ – середня вартість запасних частин та пристроїв для одного ремонту систем електропостачання;

$C_{\text{рем}}^{\text{е}}$ – середня вартість самого ремонту системи електропостачання;

$C_{\text{дост}}^{\text{е}}$ – середня вартість доставки матеріалів та персоналу до місця ремонту;

$k_{\text{надл}}^{\text{е}}$ – коефіцієнт надлишкових замін у господарстві електрифікації.

Прямі питомі витрати на усунення однієї відмови у колійному господарстві визначаються за формулою

$$C_{\text{пр}}^{\text{к}} = (C_{\text{зап}}^{\text{к}} + C_{\text{рем}}^{\text{к}} + C_{\text{дост}}^{\text{к}}) \cdot k_{\text{надл}}^{\text{к}}, \quad (2.12)$$

$C_{\text{зап}}^{\text{к}}$ – середня вартість запасних частин та пристроїв для одного ремонту колії;

$C_{\text{рем}}^{\text{к}}$ – середня вартість самого ремонту колії;

$C_{\text{дост}}^{\text{к}}$ – середня вартість доставки матеріалів та персоналу до місця ремонту;

$k_{\text{надп}}^{\text{к}}$ – коефіцієнт надлишкових замін у колійному господарстві.

Небезпечні відмови крім затримок під час руху поїздів викликають прямі витрати на ліквідацію наслідків. Доцільно оцінювати питомі витрати на ліквідацію наслідків, використовуючи принцип аналогії. Для цього доцільно взяти величину збитків за відомими випадками за кілька років. У найпростішому випадку можна взяти середню величину максимальних збитків залізницями – структурним підрозділам АТ «Укрзалізниця» на один випадок порушення безпеки у вигляді сходу вагонів в організованих поїздах

$$C_{\text{лік}} = \frac{\sum_{i=1}^n C_{\text{лік } i}}{n}. \quad (2.13)$$

Ця величина має коригуватися з урахуванням нових випадків, і навіть поточного рівня інфляції. Отримані питомі величини економічних витрат у подальшому застосовуються з метою оцінки економічних ризиків. Для цього треба провести моделювання роботи залізничної інфраструктури з урахуванням її відмов та відновлення, щоб у подальшому виявити:

- ймовірність відмови, що веде до затримки в русі поїзда;
- щільність ймовірності розподілу часу затримки;
- щільність ймовірності кількості затримок поїздів.

3 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ ІНФРАСТРУКТУРИ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ В УМОВАХ РИЗИКІВ

3.1 Загальні положення

Модель на основі методу Монте-Карло, є алгоритмічною. Алгоритм пов'язує між собою окремі випадкові підпроцеси та невідповідні підпроцеси в моделі. Для імітації випадкових підпроцесів у моделі використовуються спеціальні генератори випадкових величин (ГВВ).

Імітаційна модель в процесі роботи дозволяє моделювати окремі реалізації процесу функціонування залізничної інфраструктури при її експлуатації, а безліч реалізацій у цьому випадку є зімітованою статистикою. Модель буде адекватною і достатньо точною за умови адекватності ГВВ реальним процесам, що відбуваються при експлуатації залізничної інфраструктури.

При підготовці математичної моделі процесу функціонування залізничної інфраструктури до використання слід виконати наступні кроки:

- розробити алгоритм процесу, що дозволяє врахувати причинно-наслідкові зв'язки між окремими елементами системи;
- обрати необхідні ГВВ, що дозволять відтворювати реалізації окремих підпроцесів у моделі відповідно до заданих імовірнісних розподілів;
- визначити чисельні параметри ГВВ (виконати налаштування), щоб чисельні значення змодельованих реалізацій випадкових величин відповідали діапазонам реальних реалізацій.

Процес моделювання на основі представленої моделі полягатиме в численних її прогонах з метою отримання та реєстрації статистичної сукупності, що описує досліджувані випадкові явища. Моделювання при цьому здійснюється у псевдореальному масштабі часу. Отримана в результаті моделювання статистика повинна бути оброблена статистичними методами для отримання розподілу часу і кількості затримок поїздів через відмову, а також ймовірностей відмов і

небезпечних відмов. На основі цього мають бути обчислені економічні ризики, пов'язані з надійністю та безпекою функціонування залізничної інфраструктури.

3.2 Формалізація випадкових процесів та розробка алгоритмів імітаційної моделі

3.2.1. Вимоги до алгоритмів імітаційної моделі

Процес моделювання випадкових явищ в імітаційній моделі заснований на використанні з подальшим накопиченням окремої випадкової реалізації модельованого явища, по суті – окремого екземпляра випадкового явища. Такі реалізації формують генератори випадкових величин. При цьому ГВВ є математичною моделлю і реалізується у вигляді окремої локальної процедури. Імітаційна модель є сукупністю логічно ув'язаних випадкових реалізацій, що формуються генераторами випадкових величин. Логічна взаємозв'язок дозволяє враховувати вплив результату моделювання одного випадкового явища на інші, у тому числі, не випадкові, а зумовлені раніше змодельованими подіями явища.

Під час розробки алгоритму моделі слід визначити, які явища моделюватимуться. У розділі 2 вказані основні випадкові величини, які потрібно моделювати під час реалізації імітаційної статистичної моделі. Ці величини перераховані в таблиці 3.1 і являють собою випадкові величини інтервалів часу, для яких статистичними методами встановлено числові характеристики та закони розподілу. Для моделювання кожного закону розподілу має використовуватися окремий ГВВ.

Основні стани, що враховуються в імітаційній моделі, характеристики, а також виявлені під час формалізації закони розподілу та позначення відповідних генераторів випадкових величин представлені в таблиці 3.2. Там же наведено умовні позначення генераторів випадкових величин. Ці позначення при розробці алгоритму моделі використані як позначення відповідних алгоритмічних процедур.

Таблиця 3.2 – Основні події, характеристики та закони розподілу випадкових величин, що моделюються в імітаційній моделі процесу функціонування залізничної інфраструктури

Стан	Характеристика	Позначення	Закон розподілу	Тип генератора випадкової величини	Номер генератора
Пасивний стан залізничної інфраструктури	Час перебування залізничної інфраструктури у пасивному стані	–	Гамма-розподіл	Г	1
Активний стан залізничної інфраструктури	Час перебування залізничної інфраструктури в активному стані	T_i^a	Нормальний розподіл	Н	1
Працездатний стан	Напрацювання між двома послідовними відмовами	T_i^b	Експонентний розподіл	Е	1
	Напрацювання між передвідмовними станами	$T_i^{пр}$	Експонентний розподіл	Е	2
	Напрацювання між зауваженнями до функціонування	T_i^z	Експонентний розподіл	Е	3
	Напрацювання між інцидентами безпечними	$T_i^{іб}$	Експонентний розподіл	Е	4
	Напрацювання між інцидентами небезпечними	$T_i^{ін}$	Експонентний розподіл	Е	5
Непрацездатний стан	Час відновлення працездатного стану після i -ої відмови (інциденту)	$T_i^{відн}$	Нормальний розподіл	Н	2
	Кількість зауважень	N_i^z	Експонентний розподіл	Е	6
	Кількість запобіжних станів	$N_i^{пр}$	Експонентний розподіл	Е	7

Крім явищ, вказаних у таблиці 3.2, при розробки алгоритму імітаційної моделі враховано наступне.

Зауваження до функціонування інфраструктури та передвідмовні стани окремо, як правило, відмови не викликають. Однак, при накопиченні вказаних станів може виникнути відмова. При моделюванні процесу накопичення зауважень та запобіжних станів доцільно скористатися моделлю Генріха [26] (див. рисунок 3.1), яка застосовується при вирішенні завдань ризик-менеджменту в авіації,

судноплавстві та інших областях. Піраміда Генріха отримана емпірично під час аналізу виробничого травматизму. Встановлено, що на 300 подій на виробництві припадає 30 випадків легких травм та 1 випадок із тяжкими наслідками.

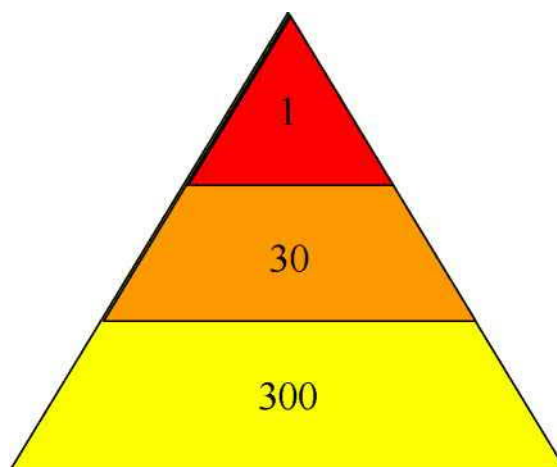


Рисунок 3.1 – Модель Генріха

Відповідно, при розробці моделей появи відмов через накопичення передвідмовних станів та зауважень враховується таке співвідношення: на тридцять передвідмовних станів, або зауважень припадає в середньому одна відмова, що не суперечить статистичним даним.

Для зручності сприйняття представимо розроблювані алгоритми як блок-схем.

3.2.2. Основні алгоритми моделі

Блок-схема загального алгоритму роботи моделі представлена на рисунку 3.2. Як видно з блок-схеми, послідовно реалізуються такі процеси:

- моделюються відмови та відновлення залізничної інфраструктури;
- моделюється процес реєстрації зауважень до функціонування залізничної інфраструктури. У процесі моделювання формується додатковий потік відмов, зумовлений накопиченням зауважень;
- моделюється процес появи передвідмовних станів залізничної інфраструктури. У процесі моделювання формується додатковий потік відмов, обумовлений накопиченням передвідмовних станів;

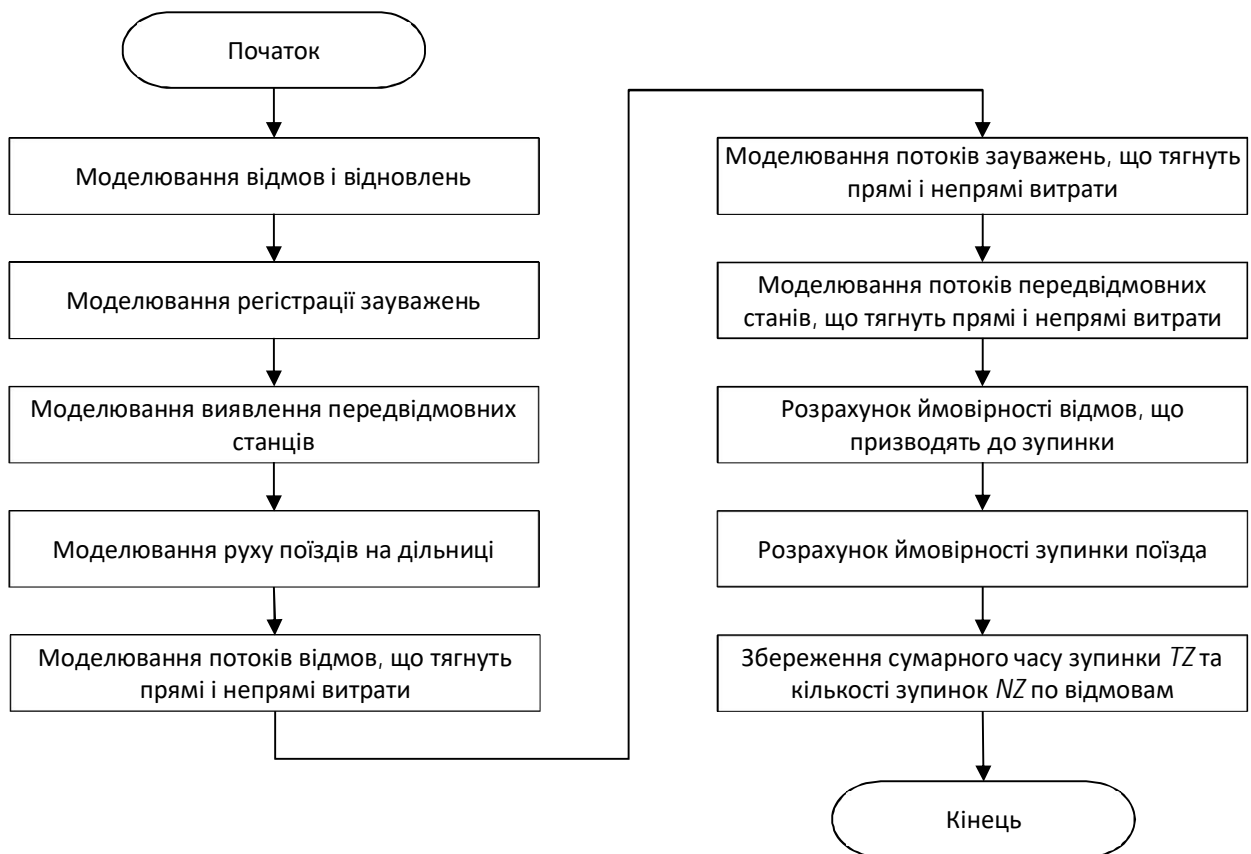


Рисунок 3.2 – Загальний алгоритм імітаційної моделі

– моделюється процес руху поїздів дільницею, що обладнана досліджуваною залізничною інфраструктурою. В результаті формується статистична сукупність реалізацій поїзних пересувань;

– здійснюється моделювання потоків відмов, що не призводять до затримок у русі поїздів та призводять до них. Перший потік характеризується подіями, коли перебування залізничної інфраструктури у непрацездатному стані збігається з її перебуванням у пасивному стані, а другий – в активному. Як наслідок, перший потік тягне за собою лише прямі економічні витрати, а другий – додатково внутрішні та зовнішні непрямі економічні витрати;

– аналогічним чином здійснюється моделювання потоків відмов, які призводять до затримок у русі поїздів і не призводять до них, що формуються через накопичення зауважень;

– моделюються потоки відмов, що виникають через накопичення передвідмовних станів і призводять до затримок у русі поїздів або не призводять до них;

- узагальнюються результати моделювання та обчислюються ймовірність відмови, що призводить до затримок у русі поїздів i , як наслідок, додаткових непрямих економічних витрат;

- розраховується ймовірність затримки поїзда через можливе виникнення відмови залізничної інфраструктури під час його руху;

- зберігаються змодельовані статистичні дані про сумарну кількість затриманих поїздів NZ та часу їх затримки TZ по кожному із змодельованих відмов, як її додаткові властивості. Ці дані і є шуканою статистикою про вплив різних відмов на процес руху поїздів.

Отримана в моделі статистика надалі повинна бути оброблена для визначення економічних ризиків.

Кожен блок схеми на рисунку 3.2 представляє окрему процедуру з можливих, яка має особистий алгоритмом виконання. Розглянемо декілька з них з найбільш складним алгоритмом моделювання процесу.

Так, алгоритм представлений рисунку 3.3 представляє собою процес моделювання відмов та відновлення залізничної інфраструктури. Наведений алгоритм і реалізується у наступній послідовності:

- встановлюються початкові значення умови моделювання, значенням усіх змінних присвоюють нуль. Перелік змінних: змінною f описується лічильник кількості відмов, у якому після моделювання зберігається кількість зімітованих відмов; змінною t описується лічильник часу, що фіксує моменти виникнення подій у моделі (моменти появи відмов та моменти відновлень); змінною z описується ознака події (відмова або відновлення);

- моделюється одна реалізація інтервалу часу між відмови T_1 . Для цього використовується генератор випадкової величини Е.1 (див. таблицю 3.2);

- записується час виникнення відмови з урахуванням уже минулого часу $t = t + T_1$, збільшується значення лічильника відмов на одиницю $f = f + 1$, а також встановлюється ознака події $z = 0$ – відмова;

- моделюється одна реалізація інтервалу часу відновлення T_2 . Для цього використовується генератор випадкової величини Н.2 (див. таблицю 3.2);

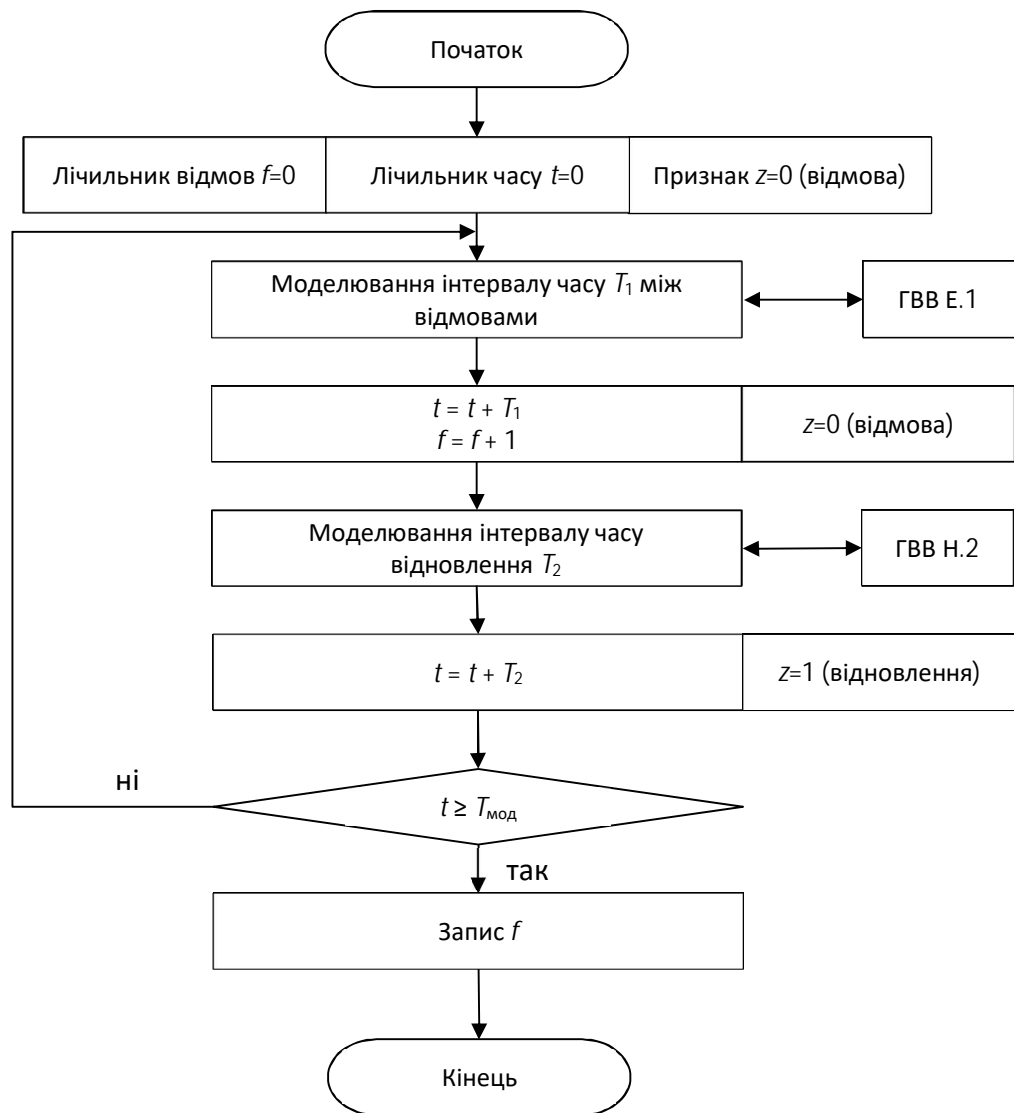


Рисунок 3.3 – Алгоритм моделювання відмов та відновлень залізничної інфраструктури

– записується час відновлення з урахуванням минулого від початку моделювання часу $t = t + T_2$, а також встановлюється ознака події $z = 1$ – відновлення;

– якщо поточне значення в лічильнику часу t менше заданого часу моделювання, відбувається повернення до операції моделювання інтервалу часу між відмовими з метою формування нової реалізації, інакше відбувається перехід до операції по гілці «так»;

– у пам'ять ЕОМ записується кількість змодельованих відмов f для подальшої обробки.

Розглянутий алгоритм використовується для моделювання небезпечних відмов. Алгоритм при цьому моделює вихідні дані з метою оцінки ризиків безпеки руху поїздів. В цьому випадку замість генератора Е.1 необхідно використовувати Е.5 без зміни інших елементів алгоритму. Крім того, цей алгоритм використовується для моделювання інцидентів безпечних, але тут замість генератора Е.1 використовується генератор Е.4.

Розглянемо також алгоритм визначення ймовірності затримки поїзда через відмову, блок-схема якого наведена на рисунку 3.4.

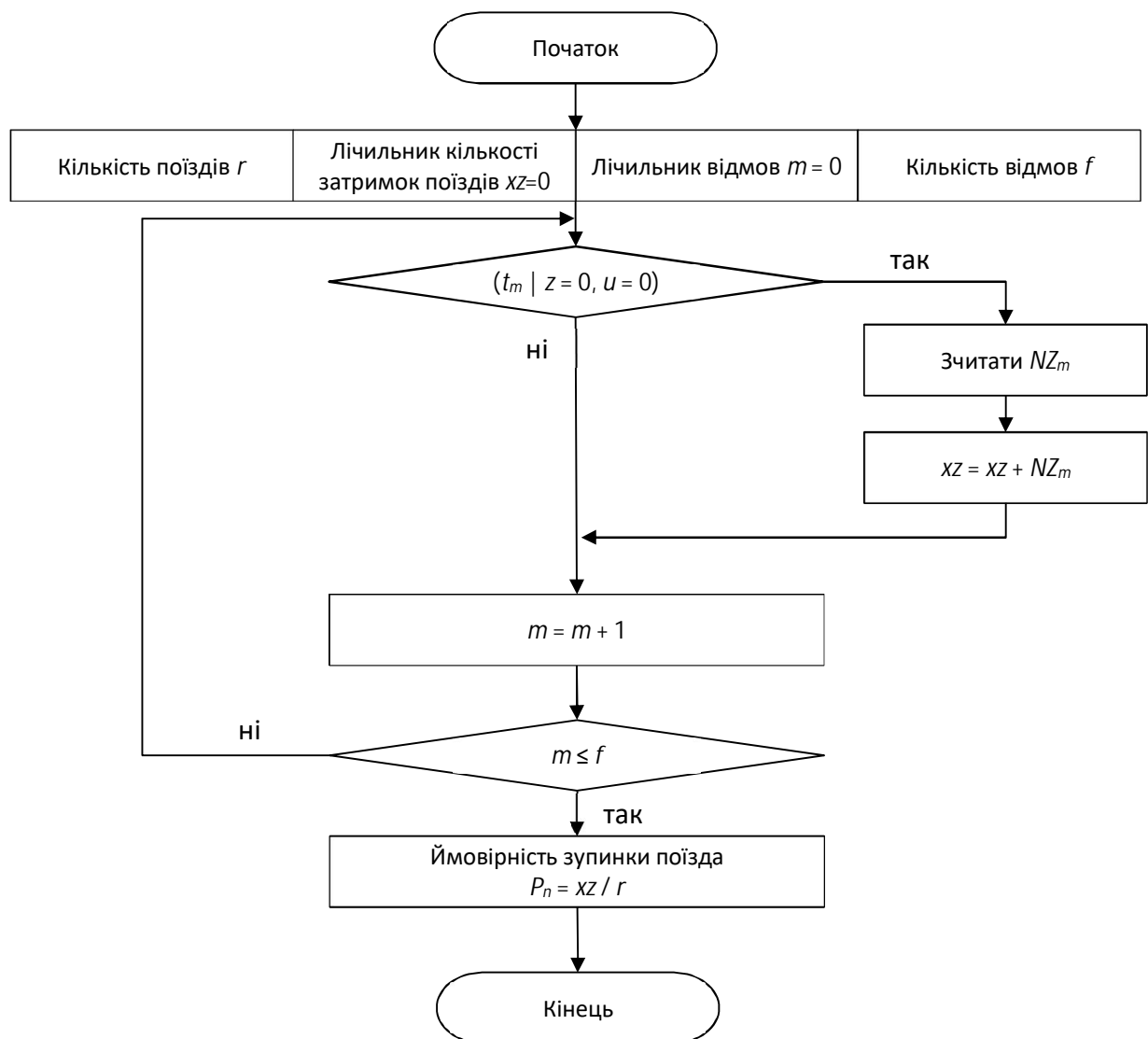


Рисунок 3.4 – Алгоритм визначення ймовірності затримки поїзда через відмову

Вказаний алгоритм реалізується наступним чином:

– встановлюються початкові умови моделювання, значенням змінних присвоюється нуль, окрім змінних f і r . Перелік змінних: змінною xz описується

лічильник кількості затримок поїздів через відмови; змінною m описується лічильник проаналізованих відмов; змінною f – кількість змодельованих відмов, а змінної r – кількість змодельованих пересувань поїздів.

– виконується пошук часу виникнення відмови, що призвело до затримки у русі поїздів t_m , використовуючи для цього ознаки $z = 0$ (відмова) або $z = 1$ (відмова, що викликала затримку);

– якщо відмова m має вказані ознаки, то відбувається перехід по гілці «так» і зчитується значення змінної NZ_m та розраховується нове значення змінної $xz = xz + NZ_m$, інакше відбувається вихід по гілці «ні» без зміни значення xz ;

– значення лічильника проаналізованих відмов m збільшується на одиницю для переходу до аналізу наступної відмови;

– якщо значення лічильника m не перевищує кількостей змодельованих відмов f , відбувається повернення до пошуку нового часу виникнення відмови, інакше відбувається вихід з циклу по гілці «так»;

– обчислюють ймовірність затримки поїзда через відмову здійснюється за формулою

$$P_3 = \frac{xz}{r}. \quad (3.1)$$

Таким чином, розглянуто технологічні алгоритми, що описують реалізацію імітаційної моделі.

3.2.3. Генератори випадкових величин

Окрема реалізація випадкової величини у ГВВ реалізується за допомогою спеціальної процедури, в основі якої лежить «кидання одиничного жереба». Поодинокі жереби бувають різних видів. З їхньою допомогою розігруються значення окремих випадкових величин, чи сукупності значень кількох. Результат реалізації процедури еквівалентний спрацьовуванню датчика, тому генератори випадкових величин називають датчиками випадкових величин.

Одиничний жереб різних видів можна реалізувати на основі окремої реалізації числа R із заданого діапазону значень, яке підпорядковане закону

рівномірного розподілу. Щільність рівномірного розподілу в інтервалі (a, b) описується співвідношенням

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & \text{при } a \leq x \leq b \\ 0 & \text{при } x < a, x > b \end{cases} \quad (3.2)$$

Функція розподілу рівномірно розподіленої випадкової величини має наступний вигляд

$$F(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{при } a \leq x \leq b \\ 1 & \text{при } x > b \end{cases} \quad (3.3)$$

Основні види жеребів, які можна моделювати на основі рівномірно розподіленого випадкового числа з описом методик, що дозволяють реалізувати випадкові генератори величин, представлені в таблиці 3.3.

Легко помітити, що всі методики реалізації генераторів випадкових величин з таблиці 3.3 [27] зводяться до одноразовому чи багаторазовому розіграшу випадкового числа R з рівномірним законом розподілу у діапазоні від 0 до 1 і відповідному перерахунку за формулами взаємозв'язку.

В результаті формалізації, виконаної в розділі 2, були отримані розподіли випадкових величин. Ці результати представлені у таблиці 3.2. Вочевидь, що для реалізації ГВВ потрібно використовувати жереб виду 3.

ГВВ виду Е з таблиці 3.2 повинен формувати випадкову величину, що розподілена експоненційно.

Щільність розподілу експоненційного розподіленої випадкової величини описується наступним виразом [28]

$$f_e(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t}, \quad t \geq 0, \quad (3.4)$$

де λ – інтенсивність потоку подій, підпорядкованих експоненційному розподілу.

Таблиця 3.3 – Основні види жеребів

№	Назва	Опис
1	«Сталася подія A чи ні?»	<p>Вихідні дані: Нехай відома ймовірність $p(A)$ події A.</p> <p>Методика реалізації жереба: 1) згенерувати випадкове число R у діапазоні від 0 до 1; 2) розрахувати результат</p> $y = \begin{cases} 1, & \text{при } R \leq p(A) \\ 0, & \text{при } R > p(A) \end{cases}$
2	«Яка з кількох несумісних подій відбулася?»	<p>Вихідні дані: Нехай відомі ймовірності $p(A_1), p(A_2), \dots, p(A_n)$ подій A_1, A_2, \dots, A_n. При цьому виконується умова $p(A_1) + p(A_2) + \dots + p(A_n) = 1$.</p> <p>Методика реалізації жереба: 1) згенерувати випадкове число R у діапазоні від 0 до 1; 2) розрахувати результат</p> $y = \begin{cases} 1, & \text{при } 0 \leq R \leq p(A_1) \\ 2, & \text{при } p(A_1) < R \leq p(A_2) \\ 3, & \text{при } p(A_2) < R \leq p(A_3) \\ \dots & \dots \end{cases}$ <p>де y – результат, який вказує номер події, що відбулася.</p>
3	«Яке значення набула випадкова величина X ?»	<p>Вихідні дані: Нехай відома щільність ймовірності випадкової величини $f(x)$.</p> <p>Методика реалізації жереба: 1) згенерувати випадкове число R у діапазоні від 0 до 1; 2) обчислити функцію розподілу випадкової величини $F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx$; 3) виконати перетворення $\psi(x) = F^{-1}(x)$; 4) черговою реалізацією випадкової величини, що задана функцією розподілу $F(x)$ є число $X_i = F^{-1}(r_i)$, де r_i – реалізація випадкового числа R, отримана на кроці 1.</p>
4	«Яку сукупність значень набули випадкові величини X_1, X_2, \dots, X_k ?»	<p>Вихідні дані: Нехай: а) випадкові величини незалежні; б) випадкові величини залежні.</p> <p>Методика реалізації жереба: а) k раз виконати процедуру, що описує жереб 3. б) перед кожним наступним виконанням процедури, описаної жеребом 3, перевіряється, що всі попередні значення набрали значення, задані в умові (умовна ймовірність), інакше подія X_k вважається такою, що не відбулася.</p>

Функція розподілу експоненційно розподіленої випадкової величини має вигляд:

$$F_e(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad t \geq 0, \quad (3.5)$$

Інтенсивність потоку подій λ є єдиним чисельним параметром, який необхідно визначити, щоб конкретизувати розподіл.

Реалізації розподілених за експонентним законом випадкових чисел моделюють за допомогою формули[29]

$$t_{ei} = -\frac{1}{\lambda} \ln(r_i), \quad (3.6)$$

З використанням формули (3.6) формуються реалізації випадкових величин генераторами Е.1-Е.7 таблиці 3.2. Різниця між розрахунками полягатиме у різних значеннях параметра розподілу λ .

Генератор випадкової величини виду (Н) у таблиці 3.2 повинен формувати нормально розподілену випадкову величину.

Щільність ймовірності нормально розподіленої випадкової величини описується формулою:

$$f_H(t) = \frac{1}{\sigma_H \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(t-m_H)^2}{2\sigma_H^2}}, \quad (3.7)$$

де m_H – математичне очікування випадкової величини;

σ_H – середнє квадратичне відхилення випадкової величини.

Функція розподілу нормально розподіленої випадкової величини представляє собою співвідношення

$$F_H(t) = 0,5 + \Phi_0\left(\frac{t-m_H}{\sigma_H}\right), \quad (3.8)$$

де $\Phi_0(x)$ – функція Лапласа [27].

Параметрами, що конкретизують розподіл, є математичне очікування випадкової величини m_H та середнє квадратичне відхилення випадкової величини σ_H .

Моделювання стандартних нормальних випадкових чисел t_i на основі стандартних рівномірних випадкових чисел r_i можна здійснювати за формулою

$$t_i = \sqrt{\frac{12}{n}} \left(\sum_{i=1}^n r_i - \frac{n}{2} \right), \quad (3.9)$$

Отримати дві реалізації стандартних нормальних чисел t_i та t_{i+1} на основі двох реалізацій стандартних рівномірних випадкових чисел можна за допомогою перетворення Бокса-Мюллера [30]

$$\begin{aligned} t_i &= \sqrt{-2 \ln r_i} \cdot \sin(2\pi r_{i+1}), \\ t_{i+1} &= \sqrt{-2 \ln r_i} \cdot \cos(2\pi r_{i+1}). \end{aligned} \quad (3.10)$$

Нормально розподілені випадкові числа з параметрами m_H і σ_H отримують з використанням додаткової формули

$$t_{Hi} = m_H + \sigma_H \cdot t_i. \quad (3.11)$$

З використанням формул (3.9)-(3.11) формуються реалізації випадкових величин генераторами Н.1-Н.2 таблиці 3.2. Різниця між розрахунками полягатиме у різних параметрах розподілів генераторів.

Генератор випадкової величини виду (Г) таблиці 3.2 повинен формувати розподілену випадкову величину з гамма-розподілом.

Щільність ймовірності гамма-розподілу має вигляд

$$f(t) = \frac{1}{\beta^\alpha \cdot \Gamma(\alpha)} \cdot t^{\alpha-1} \cdot e^{-\frac{t}{\beta}}, \quad (3.12)$$

де $\Gamma(\alpha)$ – гамма-функція Ейлера [27];

α, β – параметри розподілу.

Параметри розподілу α та β пов'язані з математичним очікуванням дисперсією наступними співвідношеннями

$$m = \alpha \cdot \beta, \quad D = \alpha \cdot \beta^2. \quad (3.13)$$

Генерація випадкової величини за гамма-розподілом здійснюється у два етапи.

Спочатку моделюють розподіл із використанням цілих частин параметрів розподілу. У цьому випадку розподіл відповідає розподілу Ерланга, який є сумою експонентних розподілів

$$t_{1,i} = \sum_{j=1}^n -\ln r_j, \quad (3.14)$$

де n – ціла частина параметра, що визначає порядок розподілу Ерланга (ціла частина параметра α).

Далі моделюють гамма-величину в інтервалі від 0 до 1. Для діють за наступним алгоритмом.

Крок 1. Вважають змінну z рівною одиниці, тобто $z = 1$.

Крок 2. Генерують незалежні рівномірно розподілені випадкові величини з інтервалу $(0, 1)$: (V_{2m-1}, V_{2m}) .

Крок 3. Якщо $V_{2m-1} \leq \frac{e}{e + \delta}$, то перейти до кроку 4, інакше – до кроку 5.

Крок 4. Обчислити $\xi_m = \left(\frac{V_{2m-1}(e + \delta)}{e} \right)^{\frac{1}{\delta}}$, $\eta_m = V_{2m} \cdot \xi_m^{\delta-1}$. Перейти до кроку 6.

Крок 5. Обчислити $\xi_m = 1 - \ln \frac{V_{2m-1} - \frac{e}{e + \delta}}{1 - \frac{e}{e + \delta}}$, $\eta_m = V_{2m} \cdot e^{-\xi_m}$.

Крок 6. Якщо $\eta_m > e^{-\xi_m} \cdot \xi_m^{\delta-1}$, то збільшити z на одиницю і перейти до кроку 2.

Крок 7. $\xi = \xi_m$ – є реалізація гамма-розподілу з параметрами $\alpha = \delta$ та $\beta = 1$.

Тоді остаточно випадкова величина з гамма-розподілом і нецілим α може бути згенерована за формулою

$$t_{r,i} = \beta \left(\xi - \sum_{j=1}^{\lfloor n \rfloor} \ln r_j \right), \quad (3.15)$$

де ξ – обчислюють за наведеним вище алгоритмом;

$\lfloor n \rfloor$ – ціла частина параметра α .

Таким чином, визначено математичні моделі всіх генераторів випадкових величин, що входять до імітаційної моделі. Ці моделі повинні бути включені до загальної моделі у відповідних місцях алгоритму.

Для того щоб модель ГВВ могла генерувати реалізації випадкової величини необхідно виконати налаштування параметрів генератора. Для цього достатньо підставити в математичні моделі генераторів обчислені на етапі формалізації (див. розділ 2) значення параметрів відповідних випадкових розподілів. Це дозволить прив'язати генератори до емпіричних даних. Числові параметри різних генераторів випадкових величин для зручності зведено у таблицю 3.4.

Таблиця 3.4 – Параметри налаштування генераторів випадкових величин

Характеристика	Тип генератора випадкової величини	Номер ГВВ	Параметри	Обмеження
Час перебування залізничної інфраструктури у пасивному стані	Г	1	$\alpha = 0,11$ $\beta = 1$	$t_{\min} = 0,0166$ год. $t_{\max} = 120$ год.
Час перебування залізничної інфраструктури в активному стані	Н	1	$m = 0,0467$ год. $\sigma = 0,0117$ год.	$t_{\min} = 0,0166$ год. $t_{\max} = 120$ год.
Напрацювання між двома послідовними відмовами	Е	1	$\lambda_{\text{в}} = 0,00013$ год ⁻¹	$t_{\min} = 0$ год. $t_{\max} = 10\,000$ год.
Напрацювання між передвідмовними станами	Е	2	$\lambda_{\text{пр}} = 0,000451$ год ⁻¹	$t_{\min} = 0$ год. $t_{\max} = 2\,160$ год.
Напрацювання між зауваженнями до функціонування	Е	3	$\lambda_{\text{з}} = 0,00068$ год ⁻¹	$t_{\min} = 0$ год. $t_{\max} = 2\,160$ год.
Напрацювання між інцидентами безпечними	Е	4	$\lambda_{\text{іб}} = 0,00011$ год ⁻¹	$t_{\min} = 0$ год. $t_{\max} = 10\,000$ год.
Напрацювання між інцидентами небезпечними	Е	5	$\lambda_{\text{ін}} = 0,00002$ год ⁻¹	$t_{\min} = 0$ год. $t_{\max} = 100\,000\,000$ год.
Час відновлення працездатного стану після i -ї відмови (інциденту)	Н	2	$m = 0,9$ год. $\sigma = 0,3$ год.	$t_{\min} = 0,1$ год. $t_{\max} = 3$ год.
Кількість зауважень	5	6	$\lambda_{\text{N}} = 0,374$ раз ⁻¹	$N_{\min} = 0, N_{\max} = 100$
Кількість передвідмовних станів	Е	7	$\lambda_{\text{N}} = 0,374$ раз ⁻¹	$N_{\min} = 0, N_{\max} = 100$

3.3 Моделювання процесу функціонування залізничної інфраструктури

Перед початком моделювання слід встановити час моделювання $T_{\text{мод}}$, який визначає обсяг змодельованих імітаційною моделлю статистичних даних. Час моделювання не повинен бути маленьким і повинен становити десятки років (у годинах), а при оцінці ризиків з безпеки сотні років.

Моделювання здійснюється шляхом багаторазового прогону алгоритмів, що описують імітаційну модель для накопичення статистики.

В силу відмінності чисельних значень вихідних даних, що описують процеси функціонування, та величини наслідків при відмовах для об'єктів залізничної інфраструктури на досліджуваній ділянці залізниць, співвіднесених з різними господарствами: господарством автоматики та телемеханіки, господарством електропостачання, господарством колії, моделювання слід здійснювати окремо для кожного з об'єктів. Крім того, розміри та співвідношення наслідків через затримку та зупинку для вантажних та пасажирських поїздів також різні, тому необхідно окремо моделювати процеси функціонування залізничної інфраструктури з кожним типом поїздів. Результати моделювання слід узагальнити після завершення.

Формально результати моделювання є кортежем статистичних даних (упорядкована множина) виду $Z = \{t, z, u, TZ, NZ\}$ і також включають обчислені значення ймовірностей $P_{\text{ан}}$, P_z і вихідні дані, отримані при формалізації випадкових розподілів. Ймовірність $P_{\text{ан}}$ представляє собою можливість ризикової події, що призводить до непрямих економічних витрат. На основі цих статистичних даних здійснюється оцінка та, за необхідності, аналіз економічних ризиків.

3.4 Оцінка економічних збитків

3.4.1. Прямі економічні збитки

Оцінка прямих економічних збитків, пов'язаної з надійністю залізничної інфраструктури, за розрахунковий інтервал часу T_p здійснюється за формулою

$$C_{\text{пр}}^{\text{н}} = \left(C_{\text{пр}}^{\text{ат}} \cdot \lambda_{\text{в}}^{\text{ат}} + C_{\text{пр}}^{\text{е}} \cdot \lambda_{\text{в}}^{\text{е}} + C_{\text{пр}}^{\text{к}} \cdot \lambda_{\text{в}}^{\text{к}} \right) \cdot T_{\text{р}}. \quad (3.16)$$

Оцінка прямих економічних збитків, пов'язаних з безпекою експлуатації залізничної інфраструктури, за той самий інтервал часу здійснюється як

$$C_{\text{пр}}^{\text{б}} = \left(C_{\text{лік}}^{\text{ат}} \cdot \lambda_{\text{ін}}^{\text{ат}} + C_{\text{лік}}^{\text{е}} \cdot \lambda_{\text{ін}}^{\text{е}} + C_{\text{лік}}^{\text{к}} \cdot \lambda_{\text{ін}}^{\text{к}} \right) \cdot T_{\text{р}}. \quad (3.17)$$

3.4.2. Непрямі економічні збитки

Непрямі економічні збитки, як зазначено раніше, визначається часом та кількістю затримок руху поїздів, які описані за допомогою ймовірнісних розподілів. Отже, величина збитків має імовірнісний характер. Тому доцільно розраховувати довірчий інтервал, при цьому довірна ймовірність повинна складати 0,95.

Оцінку внутрішніх економічних витрат слід здійснювати з використанням наступних формул.

Складова витрат відмов залізничної інфраструктури, обумовлена збитками в поїзній роботі за наведеними витратами

$$C_{\Sigma}^{\text{п}} = C_{\text{пр(вант)}}^{\text{п}} \cdot T_{\text{вант}} + C_{\text{зуп(вант)}}^{\text{п}} \cdot N_{\text{вант}} + C_{\text{пр(пас)}}^{\text{п}} \cdot T_{\text{пас}} + C_{\text{зуп(пас)}}^{\text{п}} \cdot N_{\text{пас}}, \quad (3.18)$$

де $C_{\text{пр(вант)}}^{\text{п}}, C_{\text{пр(пас)}}^{\text{п}}$ – витрати пов'язані з простоем вантажних та пасажирських поїздів, грн/год;

$C_{\text{зуп(вант)}}^{\text{п}}, C_{\text{зуп(пас)}}^{\text{п}}$ – витрати пов'язані з зупинками вантажних та пасажирських поїздів, грн/год;

$T_{\text{вант}}, T_{\text{пас}}$ – тривалість простою вантажних та пасажирських поїздів, год;

$N_{\text{вант}}, N_{\text{пас}}$ – кількість зупинок вантажних та пасажирських поїздів.

Складова витрат за додатковими експлуатаційними витратами

$$C_{\Sigma}^{\text{е}} = C_{\text{пр(вант)}}^{\text{е}} \cdot T_{\text{вант}} + C_{\text{зуп(вант)}}^{\text{е}} \cdot N_{\text{вант}} + C_{\text{пр(пас)}}^{\text{е}} \cdot T_{\text{пас}} + C_{\text{зуп(пас)}}^{\text{е}} \cdot N_{\text{пас}}. \quad (3.19)$$

Сумарні питомі витрати за усіма господарствами

$$C_{\text{внутр}} = C_{\Sigma}^{\text{е(ат)}} + C_{\Sigma}^{\text{е(е)}} + C_{\Sigma}^{\text{е(к)}} + C_{\Sigma}^{\text{п(ат)}} + C_{\Sigma}^{\text{п(е)}} + C_{\Sigma}^{\text{п(к)}}. \quad (3.20)$$

Оцінка зовнішніх непрямих економічних витрат має здійснюватися з використанням емпіричних моделей витрат від часу затримки поїздів та частоти затримки

$$C_{\text{внеш}} = C_{\text{комп}}(T_{\text{вант}}) + C_{\text{комп}}(T_{\text{пас}}) + C_{\text{комп}}(T_{\text{вант}}, f) + C_{\text{комп}}(T_{\text{пас}}, f). \quad (3.21)$$

Далі виконується оцінка результуючих економічних ризиків.

3.5 Оцінка результуючого економічного ризику

Результуючий економічний ризик визначається шляхом множення ймовірності ризикової події на наслідки. Окремо можна визначити прямі та непрямі економічні ризики щодо надійності та безпеки.

Прямий економічний ризик щодо надійності залізничної інфраструктури визначається як

$$R_{\text{прн}} = P_{\text{відм}} \cdot C_{\text{пр}}^{\text{н}}. \quad (3.22)$$

Прямий економічний ризик безпеки визначається як

$$R_{\text{прб}} = P_{\text{нвідм}} \cdot C_{\text{пр}}^{\text{б}}. \quad (3.23)$$

Непрямий економічний ризик з надійності обчислюється як

$$R_{\text{нпрн}} = P_{\text{ан}} \cdot (C_{\text{внутр}} + C_{\text{внеш}}). \quad (3.24)$$

Непрямий економічний ризик безпеки обчислюється як

$$R_{\text{нпрб}} = P_{\text{оп ан}} \cdot (C_{\text{внутр}} + C_{\text{внеш}}). \quad (3.25)$$

Аналіз ризиків може здійснюватися за допомогою кривих або матриць ризиків. При цьому можна розглядати складові ризику окремо, як ймовірність ризикової події та наслідки, які виникнуть з цією ймовірністю.

Взаємозв'язок між рівнями відповідних економічних ризиків та показниками надійності та безпеки функціонування залізничної інфраструктури виявляється шляхом підстановки в імітаційну модель відповідних рівнів надійності та безпеки у вигляді інтенсивності відмов $\lambda_{\text{в}}$ та інтенсивності небезпечних відмов

$\lambda_{\text{нв}}$ з подальшим обчисленням рівнів економічних ризиків з надійності $R_{\text{н}}$ та безпеки $R_{\text{б}}$. Провівши табуляцію результатів при зміні інтенсивності відмов та інтенсивності небезпечних відмов можна вирішувати і обернену задачу – оцінювати допустимі рівні надійності $\lambda_{\text{в}} = f_1(R_{\text{н}})$ та безпеки $\lambda_{\text{нв}} = f_2(R_{\text{б}})$ на основі заданих величин економічних ризиків.

Надалі на основі табульованих результатів для кожної ділянки залізниць, що включає в себе той чи інший об'єкт залізничної інфраструктури, можна побудувати емпіричні моделі з урахуванням конкретних ймовірнісних розподілів випадкових факторів, наприклад, методом найменших квадратів.

Застосування моделі у якості одного з компонентів інформаційних систем, що обробляють статистичні дані, дозволить автоматично планувати обсяг грошового запасу, необхідного на компенсацію наслідків функціонування залізничної інфраструктури на конкретній ділянці залізниць, а також оцінювати допустимі рівні надійності та безпеки функціонування залізничної інфраструктури.

4 ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ ПЕРЕВІЗНОГО ПРОЦЕСУ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО РЕСУРСУ ОБ'ЄКТІВ ІНФРАСТРУКТУРИ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

4.1 Поняття про функціональний ресурс інфраструктури залізничного транспорту

Якість підсистем інфраструктури залізничного транспорту безпосередньо впливає на процес їх функціонування і, як наслідок, якість надання послуг залізничного перевезення.

У якості комплексного показника якості підсистем інфраструктури залізничного транспорту доцільно використовувати поняття «функціональний ресурс» об'єкта залізничної інфраструктури.

Функціональний ресурс визначає потенційну можливість застосування підсистеми транспортної інфраструктури в різних умовах експлуатації та характеризує кількість та якість реалізованих їй функцій, тобто, інакше кажучи, характеризує якість функціонування різних технічних систем забезпечення руху поїздів на залізничному транспорті. Розглянемо методику оцінки функціонального ресурсу підсистем інфраструктури залізничного транспорту на прикладі систем залізничної автоматики та телемеханіки (ЗАТ).

Оцінка функціонального ресурсу для систем ЗАТ, поряд з оцінкою їх залишкового ресурсу, оцінкою економічної ефективності та відповідних ризиків є обов'язковим етапом при проведенні обстеження, пов'язаного з прийняттям рішення про продовження призначеного терміну служби діючих пристроїв та об'єктів ЗАТ, або рішення про їх модернізацію та заміну.

4.2 Система показників оцінки функціонального ресурсу

Функціональний ресурс оцінюють на основі сукупності кількісних та якісних показників, які враховують специфіку функціональних вимог, що висуваються до систем ЗАТ на станції або перегоні. Перелік основних характеристик систем ЗАТ та відповідних їм типів показників наведено у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Перелік характеристик та типів показників, які застосовуються при оцінці функціонального ресурсу систем ЗАТ

Тип показника	Характеристика	Пояснення
Кількісний	Пропускна та провізна здатність залізничної лінії	Визначається розрахунком
	Надійність	Визначається розрахунком
	Безпека	Підтверджується розрахунком
Якісний	Обов'язкові функціональні вимоги до систем ЗАТ	Визначаються ДСТУ 4178-2003 [31]
	Додаткові функціональні вимоги до систем ЗАТ	Визначаються для перегінних та станційних систем ЗАТ з урахуванням класу та спеціалізації залізничної лінії [31]

Кількісні показники виражаються їх чисельними значеннями (інтервалами значень). Перелік кількісних показників, що використовуються в оцінці функціонального ресурсу систем ЗАТ, наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Перелік кількісних показників, що враховуються при оцінці функціонального ресурсу систем ЗАТ

№ з/п	Характеристика	Показник	Позначення
1	Пропускна та провізна спроможність залізничної лінії	Коефіцієнт використання пропускної спроможності залізничної лінії	k
2	Надійність	Інтенсивність відмов системи ЗАТ	λ
3	Безпека	Інтенсивність небезпечних відмов системи ЗАТ	λ^H

Перелік значень кількісних показників, що використовуються при оцінці функціонального ресурсу систем ЗАТ, наведено у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Перелік значень кількісних показників, що використовуються в оцінці функціонального ресурсу систем ЗАТ

№ з/п	Значення показника	Позначення
1	Проектне значення коефіцієнта використання пропускної спроможності залізничної лінії	$k_{пр}$
2	Фактичне значення коефіцієнта використання пропускної спроможності залізничної лінії	$k_{ф}$
3	Проектне значення інтенсивності відмов системи ЗАТ	$\lambda_{пр}$
4	Допустиме значення інтенсивності відмов системи ЗАТ в передбачуваних або фактичних умовах застосування	$\lambda_{д}$
5	Фактичне значення інтенсивності небезпечних відмов	$\lambda_{ф}^н$
6	Допустиме значення інтенсивності небезпечних відмов	$\lambda_{д}^н$

Оцінка функціонального ресурсу для систем ЗАТ, що знаходяться в експлуатації, та нових систем ЗАТ, призначених для модернізації або заміни аналогічних систем, що виробили свій ресурс, здійснюється на основі різних сукупностей значень кількісних показників. Переліки значень показників, що використовуються при оцінці функціонального ресурсу для нових систем, що знаходяться в експлуатації, ЗАТ наведені в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Переліки значень показників, що застосовуються при оцінці функціонального ресурсу для нових систем, що знаходяться в експлуатації

Характеристика	Перелік значень кількісних показників	
	Нова система ЗАТ	Система ЗАТ, що знаходиться в експлуатації
Пропускна спроможність залізничної лінії	$k_{пр}$	$k_{ф}$
Надійність	$\lambda_{пр}, \lambda_{д}$	–
Безпека	–	$\lambda_{ф}^н, \lambda_{д}^н$

Перелік якісних показників, що використовуються при оцінці функціонального ресурсу систем ЗАТ, відповідає функціональним вимогам або додатковим (потенційним) функціональним можливостям систем ЗАТ. Кожен із якісних показників, що використовуються при оцінці функціонального ресурсу систем ЗАТ, може приймати одне з можливих значень – «ТАК» чи «НІ». Значення «ТАК» означає, що відповідна функціональна вимога (можливість) для даної системи ЗАТ виконується або мається. Значення «НІ» означає, що відповідна функціональна вимога (можливість) для даної системи ЗАТ не виконується або не підтверджується, тобто відсутня.

Якісні показники, що враховуються при оцінці функціонального ресурсу систем ЗАТ, поділяються на обов'язкові та додаткові.

Обов'язкові якісні показники формуються на основі функціональних вимог до систем ЗАТ на станції та перегінні відповідно до [31] з урахуванням класу та спеціалізації залізничної лінії. Додаткові якісні показники оцінюють потенційні функціональні можливості системи ЗАТ до розширення функціональних вимог, що пред'являються до неї, технічних і технологічних можливостей.

Залежно від класу та спеціалізації залізничної лінії одні й самі якісні показники включаються до переліку обов'язкових чи додаткових показників.

Оцінка функціонального ресурсу систем ЗАТ базується на використанні кількісних показників, зазначених у таблиці 4.4 та сукупності якісних показників. Вихідні дані щодо значень цих показників наведено у таблиці 4.5.

Тип системи ЗАТ визначається її розміщенням: на станції чи перегоні. Клас та спеціалізація залізничної лінії визначається залежно від характеру поїзної роботи [32].

Вихідні дані про ділянку залізниць визначення коефіцієнта використання пропускної спроможності залізничної лінії розрізняють для станцій і залізничних ділянок по перегонам.

Таблиця 4.5 – Вихідні дані щодо визначення показників

Початкові дані	Галузь застосування
Тип системи ЗАТ	Визначення кількісних та якісних показників
Клас та спеціалізація залізничної лінії	Визначення кількісних та якісних показників
Дані про ділянку залізниці	Визначення проектного для нових та фактичного – для систем ЗАТ, що експлуатуються, значення коефіцієнта використання пропускної спроможності залізничної лінії
Дані про умови застосування системи ЗАТ	Визначення проектної інтенсивності відмов нової системи ЗАТ у передбачуваних умовах експлуатації
Статистичні дані про відмови, передвідмовні стани, інциденти, зауваження в роботі систем ЗАТ у процесі експлуатації за розрахунковий інтервал часу	Розрахунок фактичних значень інтенсивності відмов та інтенсивності небезпечних відмов
Допустимі значення інтенсивності відмов та інтенсивності небезпечних відмов	Оцінка функціонального ресурсу системи ЗАТ

Для перегонів:

- кількість основних колій;
- засоби сигналізації та зв'язку з руху поїздів;
- колійний розвиток проміжних окремих пунктів;
- прийнятий тип графіка руху;
- часи ходу поїздів перегонами;
- станційні та міжпоїзні інтервали;
- особливі умови організації руху поїздів (підштовхування або подвійна тяга поїздів, обслуговування примикань на перегоні, порядок проходження по сплетення колій, перегонів з одноколійними мостами на двоколійних лініях та ін).

Для станцій:

- схеми станції та техніко-розпорядчий акт станції;
- технічні норми технологічного процесу станції;
- технічного оснащення станції та прилеглих ділянок;
- вихідні дані для розрахунку розмірів руху у вигляді діаграми поїздопотоків.

Дані про передбачувані умови застосування системи ЗАТ повинні включати відомості про кліматичну зону, про клас і спеціалізацію залізничної лінії.

Дані про відмови, передвідмовні стани, зауваження та інциденти, що виникали в системі ЗАТ у процесі експлуатації за розрахунковий інтервал часу, представляють собою відомості про моменти настання (виявлення) відмов та небезпечних відмов у досліджуваній системі ЗАТ, а також моментів відновлення її працездатного стану. На основі оцінки надійності та безпеки функціонування системи ЗАТ отримують фактичне значення інтенсивності небезпечних відмов λ_{ϕ}^H , допустимі значення інтенсивності відмов λ_d та небезпечних відмов λ_d^H .

Коефіцієнт використання пропускної спроможності ділянки залізничних ліній, обладнаних системами ЗАТ, як для нових систем ЗАТ, так і для тих, які перебувають у експлуатації визначається за формулою

$$k = \frac{n_H}{n_P}, \quad (4.1)$$

де n_H – наявна пропускна спроможність ділянки залізниць (станції чи перегону);

n_P – потрібна пропускна спроможність ділянки залізниць

Для нових систем ЗАТ наявна пропускна спроможність визначається стосовно передбачуваних умов експлуатації, а для тих, що перебувають у експлуатації – до фактичних.

Наявна пропускна спроможність ділянки залізниць розраховується на основі вихідних даних таблиці 4.5 відповідно до Інструкції з розрахунку наявної пропускної спроможності залізниць [33].

Значення потрібної пропускна спроможність -п визначається для ділянки залізничних ліній як вихідні дані при оцінці функціонального ресурсу системи ЗАТ.

Визначення проектного значення інтенсивності відмов здійснюється лише для нових систем ЗАТ. Для систем ЗАТ, що знаходяться у експлуатації, проводиться оцінка залишкового ресурсу [34-37].

У якості вихідних даних для розрахунку використовується проектне значення інтенсивності відмов системи ЗАТ $\lambda_{\text{п}}$, що визначається виробником і задане як техніко-експлуатаційний показник нової системи ЗАТ, а також відомості про передбачувані умови застосування, оформлені у вигляді таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Загальна характеристика ЗАТ та умов її застосування

Характеристика	Примітка
Тип системи	Тип
Кліматична зона	Номер зони від 1 до 9
Клас та спеціалізація залізничної лінії	Клас: 1, 2, 3, 4, 5. Спеціалізація: В, С, П, Р, О, Т, М

Проектне значення інтенсивності відмов системи ЗАТ у передбачуваних умовах експлуатації $\lambda_{\text{пр}}$ визначається шляхом коригування, що застосовується до проектного значення інтенсивності відмов системи ЗАТ $\lambda_{\text{п}}$ – техніко-експлуатаційному показнику, системою поправочних коефіцієнтів, що враховують вплив передбачуваних умов застосування.

Система поправочних коефіцієнтів включає наступний перелік:

- $k_{\text{к}}$ – поправочний кліматичний коефіцієнт;
- $k_{\text{н}}$ – поправочний коефіцієнт завантаженості ділянки залізниці.

Поправочний кліматичний коефіцієнт $k_{\text{к}}$ служить для врахування впливу кліматичних особливостей району застосування на надійність функціонування апаратури системи ЗАТ. Поправочний коефіцієнт завантаженості ділянки залізниці $k_{\text{н}}$ визначається класом та спеціалізацією залізничної лінії. Клас та спеціалізація залізничної лінії визначається з таблиці 4.6.

Проектне значення інтенсивності відмов системи ЗАТ у передбачуваних умовах застосування розраховується за формулою

$$\lambda_{\text{пр}} = \lambda_{\text{п}} \cdot k_{\text{н}} \cdot k_{\text{к}}. \quad (4.2)$$

Далі розглянуто визначення якісних показників, що використовуються в оцінці функціонального ресурсу систем ЗАТ.

Обов'язкові якісні показники визначаються вимогами [31] до систем ЗАТ на станціях і перегонах та наведені у Додатку Б.

Результати розрахунку кількісних показників зводять у таблицю 4.7.

На основі таблиць у Додатку Б залежно від типу системи ЗАТ, класу та спеціалізації залізничної лінії формуються таблиці для фіксації значень якісних показників, окремо для основних та додаткових якісних показників у вигляді таблиці 4.8.

Таблиця 4.7 – Обчислені значення кількісних показників системи ЗАТ

№ п/п	Позначення показника	Обчислене значення
1	$k_{пр}$	
2	$k_{ф}$	
3	$\lambda_{пр}$	
4	$\lambda_{д}$	
5	$\lambda_{ф}^н$	
6	$\lambda_{д}^н$	

Таблиця 4.8 – Значення основних (додаткових) якісних показників системи ЗАТ

№ п/п	Позначення	Певне значення
1	z_1	
2	z_2	
...	...	
n	z_n	

Вихідні дані для оцінки функціонального ресурсу систем ЗАТ включають дані з таблиць 4.7 і 4.8.

4.3 Кількісна оцінка функціонального ресурсу систем залізничної автоматики та телемеханіки

Оцінка функціонального ресурсу системи ЗАТ здійснюється на основі критеріїв (правил) та одержуваних на їх основі результуючих показників.

Результуючі кількісні показники системи ЗАТ представлені в таблиці 4.9.

Таблиця 4.9 – Результати, що використовуються при оцінці функціонального ресурсу систем ЗАТ

Результативний показник	Система ЗАТ	
	Нова система ЗАТ	Система ЗАТ, що знаходиться в експлуатації
Z_1	$Z_1 = \begin{cases} k_{\text{пр}} \geq 1,15 \Rightarrow k_{\text{пр}} \\ k_{\text{пр}} < 1,15 \Rightarrow 0 \end{cases}$	$Z_1 = \begin{cases} k_{\text{ф}} \geq 1 \Rightarrow k_{\text{ф}} \\ k_{\text{ф}} < 1 \Rightarrow 0 \end{cases}$
Z_2	$Z_2 = \begin{cases} \lambda_{\text{пр}} \leq \lambda_{\text{д}} \Rightarrow \frac{\lambda_{\text{д}}}{\lambda_{\text{пр}}} \\ \lambda_{\text{пр}} > \lambda_{\text{д}} \Rightarrow 0 \end{cases}$	$Z_2 = \begin{cases} \text{є залишковий ресурс} \Rightarrow 1 \\ \text{залишковий ресурс відсутній} \Rightarrow 0 \end{cases}$
Z_3	$Z_3 = \begin{cases} \text{є документ} \Rightarrow 1 \\ \text{документ відсутній} \Rightarrow 0 \end{cases}$	$Z_2 = \begin{cases} \lambda_{\text{ф}} \leq \lambda_{\text{д}} \Rightarrow \frac{\lambda_{\text{д}}}{\lambda_{\text{ф}}} \\ \lambda_{\text{ф}} > \lambda_{\text{д}} \Rightarrow 0 \end{cases}$

Інтегральний кількісний показник визначається шляхом перемноження приватних показників таблиці 4.8

$$Z = Z_1 \cdot Z_2 \cdot Z_3. \quad (4.3)$$

Якщо хоча б один із результуючих показників дорівнює нулю, то і інтегральний показник також дорівнює нулю. В інших випадках значення показника $Z > 1$.

Величина запасу за кількісними критеріями обчислюється на основі формули

$$\Delta Z = \begin{cases} Z \geq 1 \Rightarrow Z - 1; \\ Z = 0 \Rightarrow 0. \end{cases} \quad (4.4)$$

При оцінці якісних показників окремо формують інтегральний показник за основними та додатковими якісними показниками:

– обов'язкові якісні показники

$$Z_o = \begin{cases} \text{всі } z_i \text{ визначені у значенні «так»} \Rightarrow 1; \\ \text{хоча б один } z_i \text{ визначений у значенні «ні»} \Rightarrow 0. \end{cases} \quad (4.5)$$

– Додаткові якісні показники

$$Z_d = \begin{cases} 0,75 \leq \eta \leq 1 & \Rightarrow 3; \\ 0,50 \leq \eta \leq 0,75 & \Rightarrow 2; \\ 0,25 \leq \eta \leq 0,50 & \Rightarrow 1; \\ 0 \leq \eta \leq 0,25 & \Rightarrow 0. \end{cases} \quad (4.6)$$

Причому

$$\eta = \frac{m_z}{M_z}, \quad (4.7)$$

де m_z – кількість додаткових якісних показників у значенні «так» для залізничної лінії відповідного класу та спеціалізації;

M_z – загальна кількість додаткових якісних показників для залізничної лінії відповідного класу та спеціалізації.

Інтегральний показник, що характеризує виконання обов'язкових функціональних вимог для системи ЗАТ, обчислюється за такою формулою:

$$R = \Delta Z \cdot Z_0. \quad (4.8)$$

На основі обчислених значень інтегральних показників R та Z_d здійснюється оцінка організаційно-технологічної надійності перевізного процесу при експлуатації аналізованої системи ЗАТ з використанням матриці, поданої в таблиці 4.10.

Таблиця 4.10 – Оцінка рівня функціонального ресурсу

		Показник Z_d			
		$Z_d = 3$	$Z_d = 2$	$Z_d = 1$	$Z_d = 0$
Показник R	$R > 3$	Високий	Високий	Високий	Середній
	$0,22 < R \leq 3$	Високий	Середній	Середній	Незначний
	$0 < R \leq 0,22$	Середній	Незначний	Незначний	Незначний
	$R = 0$	Відсутнє	Відсутнє	Відсутнє	Відсутнє

Результати оцінки функціонального ресурсу для систем ЗАТ, що перебувають в експлуатації, спільно з результатами оцінки їх залишкового ресурсу є основою для розрахунку економічної ефективності продовження призначеного терміну служби або прийняття рішення про їх модернізацію або заміну.

Оцінка функціонального ресурсу для нових систем ЗАТ дозволяє визначити їх застосування залежно від функціональних можливостей у конкретних умовах експлуатації. Для систем ЗАТ, що знаходяться в експлуатації, у яких функціональний ресурс, характеризується як «незначний», може розглядатися питання їх модернізації. Для тих самих систем, що характеризуються значенням функціонального ресурсу «середній» і «високий», рекомендується продовження терміну служби з урахуванням результатів розрахунку залишкового ресурсу систем ЗАТ.

Оцінка організаційно-технологічної надійності перевізного процесу відповідатиме наступній оцінці рівня функціонального ресурсу: висока (високий рівень), середня (середній рівень), низька (незначний рівень), критична (функціональний ресурс відсутній).

Для систем ЗАТ, у яких функціональний ресурс відсутній, виконується додатковий аналіз причин та надання рекомендацій відповідно до таблиці 4.11.

Таблиця 4.11 – Рекомендації за відсутності функціонального ресурсу

Значення фактору	Пояснення	Рекомендація
$Z_1 = 0$	Незадовільна пропускна спроможність ділянки залізничної лінії	1. Рекомендується комплексна модернізація об'єктів інфраструктури з урахуванням вимог щодо забезпечення готівкової пропускної спроможності до систем ЗАТ на перегонах і станціях.
$Z_2 = 0$	Недостатній рівень надійності	Для нової системи ЗАТ її застосування не рекомендується у цих умовах. Для системи ЗАТ, що перебуває в експлуатації, рекомендується модернізація або заміна на основі результатів розрахунку залишкового ресурсу.
$Z_3 = 0$	У системі ЗАТ незадовільний рівень безпеки	Для нової системи ЗАТ її застосування не рекомендується у цих умовах. Для системи ЗАТ, що знаходиться в експлуатації, рекомендується модернізація або заміна.
$Z_0 = 0$	Функціонал системи ЗАТ не відповідає вимогам ДСТУ	Рекомендується замінити систему ЗАТ.

Таким чином, для оцінки якості підсистем інфраструктури залізничного транспорту доцільно використання функціонального ресурсу, який визначає потенційну можливість застосування підсистеми транспортної інфраструктури в різних умовах експлуатації.

На прикладі систем залізничної автоматики та телемеханіки розглянуто перелік обов'язкових та додаткових якісних показників функціонального ресурсу, який залежить від типу системи (підсистеми транспортної інфраструктури) класу та спеціалізації залізничної лінії.

Наведено загальні методики розрахунку кількісних та оцінки якісних показників функціонального ресурсу, а також методику визначення інтегральних показників. Розглянуто метод оцінки організаційно-технологічної надійності перевізного процесу на основі аналізу функціонального ресурсу залізничної транспортної інфраструктури.

5 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА ОЦІНКА РИЗИКУ ФУНКЦІОНУВАННЯ ОБ'ЄКТУ ІНФРАСТРУКТУРИ

5.1 Постановка задачі

Ризик функціонування об'єкта інфраструктури (далі ОІ) визначається співвідношенням ймовірності ризику безвідмовності P_{OI} та можливої величини збитків через затримки поїздів та усунення відмов $C_{\text{сум}}$. У якості об'єкта залізничної інфраструктури розглядається деяка залізнична станція.

Вихідні дані для визначення ризику безвідмовності та безпеки для даного об'єкту отримані у результаті імітаційного моделювання роботи залізничної станції за великий період часу. Характеристика отриманих показників наведена у таблиці 5.1. Як елемент ОІ у дослідженні розглядається еталонний комплекс управління стрілкою [38].

Таблиця 5.1 – Характеристика показників для визначення ризику безвідмовності та безпеки ОІ

Позначення показника	Найменування показника	Значення показника
λ_1	Інтенсивність використання елемента ОІ, год ⁻¹	4,17
$T_{\text{вик}}$	Середня тривалість використання елемента ОІ, год	0,068
λ_2	Інтенсивність відмов елемента ОІ, 10 ⁻⁵ год ⁻¹	0,6509
μ_2	Інтенсивність відновлення елемента ОІ після відмови, год ⁻¹	1,1
$C_{\text{п-г}}$	Середня вартість однієї години простою поїзда, тис. грн	3,393
$C_{\text{зуп}}$	Середня вартість однієї додаткової зупинки поїзда, тис. грн	0,12746
T_p	Розрахунковий період, год	26280
n_e	Кількість елементів ОІ	157

У дослідженні поставлені наступні практичні задачі:

- розрахувати величину збитків $C_{\text{сум}}$, ймовірність ризику по безвідмовності об'єкта інфраструктури P_{OI} , та ймовірність активного небезпечного стану об'єкту $P_{\text{ан}}$;
- побудувати матриці ризиків з безвідмовності та безпеки для ОІ;
- зробити висновки.

5.2 Методика визначення ризику безпеки об'єктів залізничної інфраструктури

У відповідності до теорії масового обслуговування [39, 40], середній час простою одного поїзда можна визначити як

$$T_1 = \frac{M[x_1] \cdot (1 - \psi_1 - \psi_2) + 0,5 \cdot \lambda_1 \cdot D[x_1] + 0,5 \cdot \lambda_2 \cdot D[x_2]}{(1 - \psi_1 - \psi_2) \cdot (1 - \psi_2)}, \quad (5.1)$$

де $M[x_1]$ – середній час пропуску поїзда по елементу ОІ, год;

ψ_1 – питома навантаження щодо використання елемента ОІ;

ψ_2 – питома навантаження щодо усунення відмов елемента ОІ;

$D[x_1]$ – дисперсія тривалості пропуску поїзда по елементу ОІ, год²;

$D[x_2]$ – дисперсія тривалості усунення відмови елемента ОІ, год².

Питомі навантаження ψ_1 і ψ_2 розраховуються за формулами

$$\psi_1 = \frac{\lambda_1}{\mu_1}, \quad (5.2)$$

$$\psi_2 = \frac{\lambda_2}{\mu_2}, \quad (5.3)$$

де μ_1 – інтенсивність використання елемента ОІ поїздами, $\mu_1 = 1/T_{\text{вик}}$, п/год.

Числові характеристики випадкових часу пропуску поїзда по елементу ОІ x_1 та тривалості усунення відмови елемента ОІ x_2 визначаються як

$$M[x_1] = \frac{\sum_{j=1}^n x_{1j}}{n}, \quad (5.4)$$

$$D[x_1] = \frac{\sum_{j=1}^n (x_{1j} - M[x_1])^2}{n - 1}, \quad (5.5)$$

$$D[x_2] = \frac{\sum_{j=1}^m (x_{2j} - M[x_2])^2}{m-1}, \quad (5.6)$$

де n – кількість поїздів, що пропускаються по елементу ОІ за розрахунковий період T_p , $n = \lambda_1 \cdot T_p$;

m – кількість відмов елемента ОІ за розрахунковий період T_p , $m = \lambda_2 \cdot T_p$.

Середня кількість поїздів, що простоюють, визначається як

$$\bar{N}_1 = \lambda_1 \cdot T_1, \quad (5.7)$$

Остаточо, середня кількість ΔN_1 та час додаткових зупинок поїздів ΔT_1 у годинах внаслідок відмов елемента ОІ визначаються за формулами

$$\Delta T_1 = T_1(\lambda_2) - T_1(0), \quad \Delta N_1 = \bar{N}_1(\lambda_2) - \bar{N}_1(0), \quad (5.8)$$

де $N_1(0)$, $T_1(0)$ – середня довжина черги поїздів і кількість поїздів, що простоюють, за відсутності відмов елемента ОІ;

$N_1(\lambda_2)$, $T_1(\lambda_2)$ – середня довжина черги поїздів і кількість поїздів, що простоюють, за наявності відмов елемента ОІ інтенсивністю λ_2 .

Сумарні збитки від відмов ОІ внаслідок простою поїздів за розрахунковий період C_T у тис. грн обчислюють за формулою

$$C_T = C_{\text{п-г}} \cdot \Delta T_1 \cdot n \cdot n_e. \quad (5.9)$$

Сумарні збитки від відмов ОІ внаслідок додаткових зупинок поїздів за розрахунковий період $C_{\text{зуп}}$ у тис. грн обчислюють за формулою

$$C_N = C_{\text{зуп}} \cdot \Delta N_1 \cdot n \cdot n_e. \quad (5.10)$$

Тоді сумарні збитки представляють собою

$$C_{\text{сум}} = C_T + C_N. \quad (5.11)$$

Значення ймовірності використання елементу ОІ P_1 і ймовірності його відмови P_2 визначаються як

$$P_1 = \frac{\lambda_1 \cdot \mu_2}{(\lambda_2 + \mu_2) \cdot (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1)} - \frac{(\mu_2 - \mu_1) \cdot c_2}{(\lambda_1 + \mu_1 - \mu_2)} \cdot e^{-(\lambda_2 + \mu_1) \cdot T_p} - c_0 \cdot e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1) \cdot T_p} - c_2 \cdot e^{-(\lambda_2 + \mu_2) \cdot T_p}, \quad (5.12)$$

$$P_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 + \mu_2} + c_2 \cdot e^{-(\lambda_2 + \mu_2) \cdot T_p}, \quad (5.13)$$

$$\text{де } c_2 = -\frac{\lambda_2}{\lambda_2 + \mu_2};$$

$$c_0 = 1 - \frac{\mu_2 \cdot (\lambda_2 + \mu_1)}{(\lambda_2 + \mu_2) \cdot (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1)} + \frac{(\mu_2 - \mu_1) \cdot \lambda_2}{(\lambda_1 + \mu_1 - \mu_2) \cdot (\lambda_2 + \mu_2)};$$

$$t = T_p.$$

Тоді ймовірність ризику безвідмовності для ОІ складає

$$P_{OI} = P_1 \cdot P_2. \quad (5.14)$$

Таким чином, отримані вирази для визначення показника, що використовується для оцінки ймовірності ризику безвідмовності для ОІ, а також для показник, що характеризує наслідки ризику безвідмовності для ОІ. Отримані показники використовуються при аналізі ризику безвідмовності для ОІ на різних етапах життєвого циклу за допомогою матриць ризику. У таблиці 5.2 наведено матрицю ризиків ОІ. Відповідно до цієї матриці визначається рівень ризику для ОІ.

Таблиця 5.2 – Матриця ризику для ОІ

Можливість ризику		Рівні тяжкості наслідків (величина збитків)				
		<50 тис. грн	50-200 тис. грн	200-4000 тис. грн	4000-20000 тис. грн	> 20000 тис. грн
		незначний	серйозний	критичний	катастрофічний	тяжкий
$0,9 \leq P_{OI} \leq 1$	Часте	Ч1	Ч2	Ч3	Ч4	Ч5
$0,1 \leq P_{OI} < 0,9$	Імовірне	І1	І2	І3	І4	І5
$10^{-3} \leq P_{OI} < 0,1$	Випадкове	В1	В2	В3	В4	В5
$10^{-5} \leq P_{OI} < 10^{-3}$	Рідкісне	Р1	Р2	Р3	Р4	Р5
$10^{-7} \leq P_{OI} < 10^{-5}$	Дуже рідкісне	Д1	Д2	Д3	Д4	Д5

$P_{OI} < 10^{-7}$	Мало- ймовірне	M1	M2	M3	M4	M5
--------------------	-------------------	----	----	----	----	----

Визначення ризику безпеки для ОІ ґрунтується на теорії випадкових імпульсних потоків [41]. Інтенсивність відмов ОІ, які можуть призвести до порушення безпеки руху поїздів, визначається за формулою

$$\lambda_2^{оп} = k \cdot \lambda_2. \quad (5.15)$$

Середня тривалість активного стану ОІ

$$\bar{\tau}_a = T_{вик}. \quad (5.16)$$

Середня тривалість пасивного стану ОІ

$$\bar{\tau}_п = 1/\lambda_1. \quad (5.17)$$

Середня тривалість відповідно небезпечного та безпечного станів ОІ:

$$\bar{\tau}_н = k/\mu_2, \quad \bar{\tau}_б = 1/\lambda_2^{оп}. \quad (5.18)$$

Математичне очікування тривалості збігу активних та небезпечних станів ОІ визначається як

$$\bar{\tau}_{ан} = \frac{\bar{\tau}_a \cdot \bar{\tau}_н}{\bar{\tau}_a + \bar{\tau}_н}. \quad (5.19)$$

Середню інтенсивність переходу ОІ в активний небезпечний стан можна визначити за формулою

$$\bar{\mu}_{ан} = \frac{\bar{\tau}_н + \bar{\tau}_a}{(\bar{\tau}_a + \bar{\tau}_п)(\bar{\tau}_н + \bar{\tau}_б)}. \quad (5.20)$$

Середню тривалість сукупності пасивного небезпечного, активного безпечного та пасивного безпечного станів ОІ можна визначити за формулою

$$\bar{\tau}_{пб} = \frac{1}{\bar{\mu}_{ан}} - \bar{\tau}_{ан}. \quad (5.21)$$

При припущенні про те, що випадкова величина $\tau_{пб}$ розподілена за експоненційним законом, параметр закону розподілу $\tau_{пб}$ можна визначити як

$$\lambda_{пб} = \frac{1}{\bar{\tau}_{пб}}. \quad (5.22)$$

За розрахунковий час T_p ймовірність виникнення ризику для ОІ з безпеки під час руху поїздів визначається за формулою

$$P_{ан} = \frac{\bar{\tau}_a \cdot \bar{\tau}_h}{(\bar{\tau}_a + \bar{\tau}_n)(\bar{\tau}_h + \bar{\tau}_b)} + \left(1 - \frac{\bar{\tau}_a \cdot \bar{\tau}_h}{(\bar{\tau}_a + \bar{\tau}_n)(\bar{\tau}_h + \bar{\tau}_b)}\right) \left(1 - e^{-\lambda_{пб} \cdot T_p}\right). \quad (5.23)$$

У таблиці 5.3 наведено матрицю ризиків безпеки для ОІ. Відповідно до цієї матриці визначається рівень ризику для ОІ.

Таблиця 5.3 – Матриця ризику безпеки для ОІ

Можливість ризику		Рівні тяжкості наслідків (величина збитків)				
		незначний	серйозний	критичний	катастрофічний	тяжкий
$0,9 \leq P_{ОІ} \leq 1$	Часте	Ч1	Ч2	Ч3	Ч4	Ч5
$0,1 \leq P_{ОІ} < 0,9$	Імовірне	І1	І2	І3	І4	І5
$10^{-3} \leq P_{ОІ} < 0,1$	Випадкове	В1	В2	В3	В4	В5
$10^{-5} \leq P_{ОІ} < 10^{-3}$	Рідкісне	Р1	Р2	Р3	Р4	Р5
$10^{-7} \leq P_{ОІ} < 10^{-5}$	Дуже рідкісне	Д1	Д2	Д3	Д4	Д5
$P_{ОІ} < 10^{-7}$	Мало-ймовірне	М1	М2	М3	М4	М5

5.3 Результати оцінки ризику функціонування об'єкту інфраструктури залізничного транспорту

З метою отримання результатів щодо оцінки ризику безвідмовності та безпеки руху елемента ОІ виконаємо розрахунки за методикою, що наведена у п. 5.2, з даними, отриманими методом імітаційного моделювання, які представлені у п. 5.1.

Визначимо параметри тривалості простою одного поїзда T_1 .

$$\mu_1 = \frac{1}{T_{\text{вик}}} = \frac{1}{0,068} = 14,71 \text{ год}^{-1}$$

$$\psi_1 = \frac{\lambda_1}{\mu_1} = \frac{4,17}{14,71} = 0,28$$

$$\psi_2 = \frac{\lambda_2}{\mu_2} = \frac{0,6509 \cdot 10^{-5}}{1,1} = 0,59 \cdot 10^{-5}$$

$$\psi_1 + \psi_2 = 0,28 + 0,59 \cdot 10^{-5} = 0,280006$$

$$M[x_1] = T_{\text{вик}} = 0,068 \text{ год}$$

$$D[x_1] \approx 0, \quad D[x_2] \approx 0$$

$$T_1(\lambda_2) = \frac{0,068 \cdot (1 - 0,280006) + 0,5 \cdot 4,17 \cdot 0 + 0,6509 \cdot 10^{-5} \cdot 0}{(1 - 0,280006) \cdot (1 - 0,59 \cdot 10^{-5})} = 0,068000401 \text{ год}$$

Середня кількість поїздів, що простоюють, складають

$$\bar{N}_1(\lambda_2) = \lambda_1 \cdot T_1(\lambda_2) = 4,17 \cdot 0,068000401 = 0,283561673 \text{ поїздів.}$$

Остаточно, середня кількість ΔN_1 та час додаткових зупинок поїздів ΔT_1 у годинах внаслідок відмов елемента ОІ визначаються дорівнюють

$$T_1(0) = \frac{0,068 \cdot (1 - 0,28) + 0,5 \cdot 4,17 \cdot 0 + 0,5 \cdot 0 \cdot 0}{(1 - 0,28) \cdot (1 - 0)} = 0,068 \text{ год;}$$

$$\Delta T_1 = T_1(\lambda_2) - T_1(0) = 0,068000401 - 0,068 = 0,000000401 \text{ год;}$$

$$\bar{N}_1(0) = \lambda_1 \cdot T_1(0) = 4,17 \cdot 0,068 = 0,28356 \text{ поїздів;}$$

$$\Delta N_1 = \bar{N}_1(\lambda_2) - \bar{N}_1(0) = 0,283561673 - 0,28356 = 0,000001673 \text{ поїздів.}$$

Сумарні збитки від відмов ОІ внаслідок простою поїздів за розрахунковий період C_T складають

$$C_T = C_{\text{п-г}} \cdot \Delta T_1 \cdot n \cdot n_e = 3,393 \cdot 0,000000401 \cdot 109588 \cdot 157 = 23,40943 \text{ тис. грн.}$$

Сумарні збитки від відмов ОІ внаслідок додаткових зупинок поїздів за розрахунковий період C_N складають

$$C_N = C_{зуп} \cdot \Delta N_1 \cdot n \cdot n_e = 0,12746 \cdot 0,000001673 \cdot 109588 \cdot 157 = 3,66887 \text{ тис. грн.}$$

Сумарні збитки по ОІ складають

$$C_{сум} = C_T + C_N = 23,40943 + 3,66887 = 27,0783 \text{ тис. грн.}$$

Знайдемо значення ймовірностей станів ОІ:

– ймовірність використання елемента ОІ

$$c_2 = -\frac{0,6509 \cdot 10^{-5}}{0,6509 \cdot 10^{-5} + 1,1} = -0,5917 \cdot 10^{-5}$$

$$\begin{aligned} c_0 &= 1 - \frac{1,1 \cdot (0,6509 \cdot 10^{-5} + 14,71)}{(0,6509 \cdot 10^{-5} + 1,1) \cdot (4,17 + 0,6509 \cdot 10^{-5} + 14,71)} + \\ &+ \frac{(1,1 - 14,71) \cdot 0,6509 \cdot 10^{-5}}{(4,17 + 14,71 - 1,1) \cdot (0,6509 \cdot 10^{-5} + 1,1)} = \\ &= 1 - 0,779126821 - 0,000004529 = 0,22086865 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_1 &= \frac{4,17 \cdot 1,1}{(0,6509 \cdot 10^{-5} + 1,1) \cdot (4,17 + 0,6509 \cdot 10^{-5} + 14,71)} - \\ &- \frac{(-1,1 + 14,71) \cdot 0,5917 \cdot 10^{-5}}{(4,17 + 14,71 - 1,1)} \cdot e^{-\left(0,6509 \cdot 10^{-5} + 14,71\right) \cdot 1095} - \\ &- 0,22086865 \cdot e^{-\left(4,17 + 0,6509 \cdot 10^{-5} + 14,71\right) \cdot 1095} + 0,5917 \cdot 10^{-5} \cdot e^{-\left(0,6509 \cdot 10^{-5} + 1,1\right) \cdot 1095} = \\ &= 0,220867261 - 0 - 0 - 0 = 0,220867261 \end{aligned}$$

– ймовірність відмови елемента ОІ

$$P_2 = \frac{0,6509 \cdot 10^{-5}}{0,6509 \cdot 10^{-5} + 1,1} - 0,5917 \cdot 10^{-5} \cdot e^{-\left(0,6509 \cdot 10^{-5} + 1,1\right) \cdot 1095} = 0,5917 \cdot 10^{-5}$$

Отже, ймовірність ризику з безвідмовності для ОІ складає

$$P_{OI} = P_1 \cdot P_2 = 0,5917 \cdot 10^{-5} \cdot 0,220867261 = 0,1307 \cdot 10^{-5}$$

Таким чином, отримано значення показників для оцінки ймовірності ризику безвідмовності для ОІ $P_{OI} = 0,1307 \cdot 10^{-5}$ і наслідків ризику безвідмовності для ОІ $C_{\text{сум}} = 27,0783$ тис. грн. Отримані показники використовуються при аналізі ризику безвідмовності для ОІ на різних етапах життєвого циклу за допомогою матриць ризику. У таблиці 5.2 наведено матрицю ризиків ОІ. Відповідно до даної матриці рівень ризику функціонування ОІ відповідає рівню Д1. Ймовірність виникнення ситуації, що призводить до ризику, малоімовірна, але можлива. Можна припустити, що ця ситуація може виникнути у винятковому випадку. Можливі незначні втрати. Цей ризик вважається не прийнятним до уваги.

Визначення ризику безпеки для ОІ ґрунтується на теорії випадкових імпульсних потоків. Інтенсивність відмов ОІ, які можуть призвести до порушення безпеки руху поїздів, визначається за формулою:

$$\lambda_2^{\text{оп}} = 0,01 \cdot 0,6509 \cdot 10^{-5} = 0,6509 \cdot 10^{-7} \text{ год}^{-1}$$

Середня тривалість активного стану ОІ складає

$$\bar{\tau}_a = 0,068 \text{ год.}$$

Середня тривалість пасивного стану ОІ дорівнює

$$\bar{\tau}_п = 1 / 4,17 = 0,2398 \text{ год.}$$

Середня тривалість небезпечного та безпечного станів ОІ складають відповідно

$$\bar{\tau}_н = 0,01 / 1,1 = 0,009091 \text{ год,}$$

$$\bar{\tau}_б = 1 / 0,6509 \cdot 10^{-7} = 1,5363 \cdot 10^7 \text{ год.}$$

Математичне очікування тривалості збігу активних та небезпечних станів ОІ дорівнює

$$\bar{\tau}_{\text{ан}} = \frac{0,068 \cdot 0,009091}{0,068 + 0,009091} = 0,00802 \text{ год.}$$

Середню інтенсивність переходу ОІ в активний небезпечний стан складає

$$\bar{\mu}_{\text{ан}} = \frac{0,009091 + 0,068}{(0,068 + 0,2398)(0,009091 + 1,5363 \cdot 10^7)} = 1,6302681 \cdot 10^{-8} \text{ год}^{-1}.$$

Середня тривалість пасивного небезпечного, активного безпечного та пасивного безпечного станів ОІ дорівнює

$$\bar{\tau}_{\text{пб}} = \frac{1}{1,6302681 \cdot 10^{-8}} - 0,00802 = 6,13396 \cdot 10^7 \text{ год.}$$

При цьому параметр закону розподілу $\tau_{\text{пб}}$ складає

$$\lambda_{\text{пб}} = \frac{1}{6,13396 \cdot 10^7} = 1,6302682 \cdot 10^{-8} \text{ год}^{-1}.$$

За розрахунковий час T_p ймовірність виникнення ризику для ОІ з безпеки під час руху поїздів дорівнює

$$P_{\text{ан}} = \frac{0,068 \cdot 0,009091}{(0,068 + 0,2398)(0,009091 + 1,5363 \cdot 10^7)} + \left(1 - \frac{0,068 \cdot 0,009091}{(0,068 + 0,2398)(0,009091 + 1,5363 \cdot 10^7)}\right) \times \left(1 - e^{-1,6302682 \cdot 10^{-8} \cdot 26280}\right) = 4,28 \cdot 10^{-4}$$

У таблиці 5.3 наведено матрицю ризиків безпеки для ОІ. Відповідно до даної матриці рівень ризику для ОІ відповідає рівню Р1.

Таким чином, на практичному прикладі виконано оцінку ризику відмови елементу об'єкту інфраструктури залізничного транспорту і рівня безпеки перевізного процесу. Методика, що розглянута, є універсальною і може бути застосована для будь якого елементу транспортної інфраструктури.

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі отримане рішення наукового завдання щодо оцінки економічних та технічних ризиків, а також організаційно-технологічної надійності перевізного процесу, пов'язаних з якістю функціонування об'єктів залізничної інфраструктури, яке має значення для розвитку транспортної галузі.

Основні результати дипломної роботи полягають у наступному:

1. Виконано всебічний аналіз відмов залізничної інфраструктури та оцінка їхнього впливу на економічні збитки АТ «Укрзалізниця». Виявлено, що в управлінні надійністю та безпекою функціонування залізничної інфраструктури доцільно відштовхуватися від економічних ризиків, пов'язаних із виробничою діяльністю у вигляді послуг перевезення. Наведено системний аналіз процесів, що впливають на рівень економічних витрат, пов'язаних з експлуатацією об'єктів залізничної транспортної інфраструктури, а саме процесу руху поїздів на різних ділянках, процесу відмов та відновлення після відмови об'єктів інфраструктури з урахуванням впливу людського фактору.

2. У роботі обґрунтовано доцільність застосування методу Монте-Карло для оцінки кількісного взаємозв'язку між рівнями надійності та безпеки об'єктів залізничної інфраструктури та рівнем економічних ризиків.

3. Розроблено імітаційну модель, що дозволяє проводити статистичний аналіз взаємозв'язку між рівнем технічних ризиків у вигляді затримок у русі поїздів протягом часу усунення відмов об'єктів залізничної інфраструктури, характеристиками виробничого процесу експлуатації та рівнем надійності об'єктів залізничної інфраструктури.

4. Розглянуто метод аналізу рівня надійності для підвищення об'єктивності оцінки функціонування об'єктів залізничної інфраструктури, при цьому в імітаційній моделі використані дані про відхилення від норм утримання та передвідмовні стани, які враховуються за допомогою моделі Генріха, що застосовується у управлінні ризиками.

5. Розкрито поняття «функціональний ресурс» для об'єктів залізничної транспортної інфраструктури як комплексну характеристику якості виробничого

процесу технічної експлуатації залізничної інфраструктури. Виконано огляд номенклатури якісних та кількісних показників функціонального ресурсу об'єктів інфраструктури залізничного транспорту. Розглянутий метод оцінки організаційно-технологічної надійності перевізного процесу на основі аналізу функціонального ресурсу залізничної транспортної інфраструктури.

6. За допомогою розробленої імітаційної моделі отримані результати функціонування елементів інфраструктури, на основі яких виконано аналіз та оцінка ризику відмови та безпеки руху перевізного процесу. Використання розглянутого методу оцінки ризиків відмов дозволить підвищити якість та безпеку використання інфраструктури залізничного транспорту України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про транспорт: Закон України від 10 листопада 1994 р. №232/94-ВР / Верховна Рада України [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/232/94-%D0%B2%D1%80#o204> (дата звернення: 18.10.2021).
2. Технічний регламент безпеки інфраструктури залізничного транспорту, затверджений постановою КМУ від 11.07.2013 № 494.
3. Піріашвілі О. Проблеми модернізації на залізничному транспорті України / О. Піріашвілі, В. Овчиннікова. // Підприємництво та інновації. – 2019. – №10. – С. 74–81. DOI:10.37320/2415-3583/10.11.
4. Консолідована фінансова звітність АТ «Укрзалізниця», складена за МСФЗ [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://www.uz.gov.ua/about/investors/financial_statements/kfz_msfz/.
5. Кулак О. За 5 років витрати на ремонт колій зменшились у 3,5 рази [Електронний ресурс] / О. Кулак // Ukraine rail monitoring. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <https://urm.media/7143-2/>.
6. Філія «ГІОЦ» АТ «Укрзалізниця» [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://data.gov.ua/organization/filiia-hiots-pat-ukrzaliznytsia>.
7. Pricevicius G., Dainys L., Adomaitis D., Šajev I. Railway segment management information system. Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream). Vilnius, 2016, pp. 1-5. DOI: 10.1109/estream39242.2016.7485925.
8. Бунчаков О. Сучасні пристрої та технології – запорука підвищення ефективної діяльності господарства [Електронний ресурс] / О. Бунчаков // Центр інформації транспорту України. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <https://railway-publish.com/interview/oleg-bunchukov-suchasni-pristroyi-ta-tehnologiyi-zaporuka-pidvishhennya-efektivnoyi-diyalnosti-gospodarstva>.
9. Каменєв О. Ю. Прогнозна динаміка впливу людського та технічного чинників на експлуатаційну надійність пристроїв залізничної автоматики / О. Ю. Каменєв, А. О. Лапко, О. В. Щєбликіна. // Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. – 2020. – №40. – С. 168–178. DOI: 10.31498/2225-6733.40.2020.216226

10. Експлуатаційні показники роботи пристроїв залізничної автоматики / А. О. Лапко, О. Ю. Каменєв, В. Г. Сагайдачний, Т. А. Коцюба. // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2019. – №3. – С. 37–43. DOI: 10.18664/iksz.v0i3.170695

11. Річний інтегрований звіт АТ «Укрзалізниця» за 2020 рік [Електронний ресурс] // Портал для співробітників АТ «Укрзалізниця» – Режим доступу до ресурсу: <http://portal.uz.gov.ua/wp-content/uploads/2021/08/ukr-int-zvit-2020.pdf>.

12. CSN EN 50126-1 - Railway applications - specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS), 2001.

13. UK Defence Standard 00-56 Safety Management Requirements, 1999.

14. Розсоха О. В. Аналіз і особливості існуючих наукових підходів щодо визначення рівня безпеки руху / О. В. Розсоха, Ю. В. Смачило. // Зб. наук. пр. Держ. економ.-технолог. ун-ту трансп. Серія: Транспортні системи і технології. – 2016. № 28. – С. 202–214.

15. ISO/IEC 31010:2009 Risk management - Risk assessment techniques (IDT) [Електронний ресурс] // International Electrotechnical Commission. – 2009. – Режим доступу до ресурсу: http://www.previ.be/pdf/31010_FDIS.pdf.

16. Common Safety Method for risk evaluation and assessment Guidance on the application of Commission Regulation (EU) 402/2013 [Електронний ресурс] // Office of Rail Regulation. – 2015. – Режим доступу до ресурсу: http://orr.gov.uk/_data/assets/pdf_file/0006/3867/common_safety_method_guidance.pdf.

17. Статистичні та Монте-Карло алгоритми моделювання випадкових процесів у макро- і мікросистемах у MathCAD: монографія / П. С. Кособуцький; М-во освіти і науки України, Нац. ун-т «Львів. політехніка». – Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2014. – 412 с. – ISBN 978-617-607-611-7

18. Математична статистика: Навч. посіб. для студ. баз. напрямку «Приклад. математика» / Н. А. Ружевиц; Нац. ун-т «Львів. політехніка». – Л., 2001. – 167 с.

19. Мышкис А. Д. Элементы теории математических моделей. М.: ЛИБРОКОМ. – 2011. – 191 с.

20. ГИД «Урал-ВНИИЖТ»: Справочная система [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://gidural.ru/doku.php>.

21. Філія «Головний інформаційно-обчислювальний центр» АТ «Укрзалізниця» [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://gioc.uz.gov.ua/>.

22. Овчаренко С. М. Аналіз графіка виконаного руху в інформаційній системі ПАТ «Укрзалізниця»: перспективи розвитку / С. М. Овчаренко. // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. Інформаційно-комунікаційні технології та математичне моделювання. – 2016. – №2 (62). – С. 70–77.

23. Розвиток системи аналізу графіка виконаного руху пасажирських та приміських поїздів в ПАТ «Укрзалізниця» / С. М. Овчаренко, Т. О. Стегній, Л. В. Василькова, О. О. Овчаренко. // Залізничний транспорт України. Транспортні системи та логістика. – 2017. – №2. – С. 21–24.

24. Системы сбора информации на железнодорожном транспорте. Курс лекций / Е. Р. Крамаренко – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2005. – 145 с.

25. Економіка залізниці: історія, сьогодення, перспективи розвитку Г. Д. Ейтутіс, О. М. Кривопішин, І. П. Федорко, В. М. Осовик, М. С. Семенюк; за ред. Г. Д. Ейтутіса, О. М. Кривопішина. – Ніжин: ТОВ «Видавництво «Аспект-Поліграф», 2014. – 292 с.

26. Heinrich H. W. Industrial Accident prevention. McGraw-Hill Book Company, 1936.

27. Вентцель Е.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Е. С. Вентцель, Л.А. Овчаров // М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. –1988. – 480 с.

28. Крылов В. В. Теория телеграфика и её приложения / В. В. Крылов, С. С. Самохвалова. // СПб.: БХВ-Петербург. – 2012. – 288 с.

29. Галанов, Ю. И. Статистическое моделирование: учебное пособие / Ю. И. Галанов. // 2-е изд., доп. – Томск: Изд-во ТПУ. – 2010. – 42с.

30. Golder, E. R. The Box-Muller Method for Generating Pseudo-Random Normal Deviates / E. R. Golder, J. G. Settle // Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics), –1976, –Vol. 25. –No. 1.– pp. 12-20.

31. ДСТУ 4178-2003. Комплекси технічних засобів систем керування та регулювання руху поїздів. Функційна безпечність і надійність. Вимоги та методи випробовування. Чинний від 01.07.2003.

32. Методика классификации железнодорожных линий ОАО «РЖД», утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 4 марта 2015 года № 551р.

33. Інструкція з розрахунку наявної пропускної спроможності залізниць України: Навч.-метод. посіб. / Розробники О. Ф. Вергун та ін. – К.: Транспорт України, 2002. – 376 с. ISBN 966-7737-10-1

34. Горелик А. В. Оценка остаточного ресурса стрелочных электроприводов / А. В. Горелик, В. С. Дорохов, Н. В. Бугреев, А. В. Орлов, В. С. Смагин // Наука и бизнес: пути развития. – 2019. – №4(94). – С. 35–40.

35. Горелик А. В. Проблемы эффективного планирования капитального ремонта и модернизации объектов железнодорожной автоматики и телемеханики / А. В. Горелик, В. И. Линьков, В. С. Дорохов, П. А. Неваров // Транспорт Урала. – 2019. – №1. – С. 36–40.

36. Горелик А. В. Прогнозирование сроков замены аппаратуры железнодорожной автоматики и телемеханики / А. В. Горелик, А. В. Орлов, Ю. С. Смагин, А. Н. Малых // РУТ (МИИТ), ВИНТИ – Москва – 2018. – С. 82–86.

37. Горелик А. В. Статистическая оценка ресурса стрелочных электроприводов / А. В. Горелик, В. С. Дорохов, А. В. Орлов, В. С. Смагин // Современные наукоемкие технологии. – 2019. – №9. – С. 58–63.

38. Методы оценки рисков для систем электрической и диспетчерской централизации / А.В. Горелик [и др.] // М.: МИИТ, 2011. Деп. в ВИНТИ, № 532–В2011.

39. Дудник І. М. Вступ до загальної теорії систем: Навчальний посібник/ І. М. Дудник. – К.: Кондор, 2009. – 205 с.

40. Вентцель Е. Ф., Овчаров Л. А. Прикладные задачи теории вероятностей. – М.: Радио и связь, 1989. – 416 с.

41. Седякин Н. М. Элементы теории случайных импульсных потоков / Н. М. Седякин. – М.: Советское радио, 1965. – 261 с.

ДОДАТОК А
СТАТИСТИЧНІ ВИБІРКИ ВИПАДКОВИХ ВЕЛИЧИН
ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЇХ ОБРОБКИ

Таблиця А.1 – Статистичні дані про відмови, зауваження та інциденти

Тип події	Дата настання події			Час настання події		Час настання події, год.	Тривалість події, год
	число	місяць	рік	годин	хвилин		
Інцидент	7	7	2017	1	5	4489,08	3
Відмова	31	8	2017	17	30	5825,5	0,15
Відмова	14	9	2017	13	15	6157,25	1,53
Відмова	28	7	2019	0	50	22512,83	0,05
Зауваження	14	11	2018	16	20	328,33	0
Зауваження	23	12	2018	15	30	1263,50	0
Зауваження	24	12	2018	16	40	1288,67	0
Зауваження	14	1	2019	12	10	9084,17	0
Зауваження	15	2	2019	9	20	9849,33	0
Зауваження	24	2	2019	14	50	10070,83	0
Зауваження	13	3	2019	9	20	10473,33	0
Зауваження	18	3	2019	20	11	10604,18	0
Зауваження	24	4	2019	15	8	11487,13	0
Зауваження	15	5	2019	9	18	11985,30	0
Зауваження	12	6	2019	15	18	12663,30	0
Зауваження	18	6	2019	18	9	12810,15	0
Зауваження	15	7	2019	15	18	13455,30	0
Зауваження	12	8	2019	18	8	14130,13	0
Зауваження	11	9	2019	13	8	14845,13	0
Зауваження	4	10	2019	16	18	15400,30	0
Зауваження	7	10	2019	7	18	15463,30	0
Зауваження	8	10	2019	10	28	15490,47	0

Таблиця А.2 – Дані про кількість зауважень на станції

Тип події	Загальна кількість виявлених нових зауважень	Дата виявлення			Час виявлення	
		число	місяць	рік	годин	хвилини
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
Зауваження	1	14	11	2018	16	20
Зауваження	11	23	12	2018	15	30
Зауваження	1	24	12	2018	16	40
Зауваження	4	14	1	2019	12	10
Зауваження	1	15	2	2019	9	20
Зауваження	9	24	2	2019	14	50
Зауваження	2	13	3	2019	9	20
Зауваження	1	18	3	2019	20	11
Зауваження	24	24	4	2019	15	8
Зауваження	2	15	5	2019	9	18
Зауваження	2	12	6	2019	15	18

Закінчення таблиці А.2

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
Зауваження	1	18	6	2019	18	9
Зауваження	1	15	7	2019	15	18
Зауваження	1	12	8	2019	18	8
Зауваження	2	11	9	2019	13	8
Зауваження	4	4	10	2019	16	18
Зауваження	1	7	10	2019	7	18
Зауваження	4	8	10	2019	10	28

Таблиця А.3 – Статистичні дані про час до відновлення станції

№	Значення часу до відновлення	№	Значення часу до відновлення	№	Значення часу до відновлення	№	Значення часу до відновлення
1	0,500239	26	0,843756	51	0,978823	76	0,867543
2	1,571458	27	1,12348	52	0,626989	77	1,105288
3	0,648284	28	1,002125	53	0,656511	78	0,870912
4	0,79858	29	1,120311	54	0,676429	79	1,499906
5	0,833467	30	0,858803	55	0,668133	80	1,069569
6	0,691422	31	1,369299	56	0,925885	81	0,923398
7	0,938951	32	0,410292	57	1,282218	82	1,21946
8	1,000546	33	1,289033	58	1,210775	83	0,880215
9	1,016324	34	0,808777	59	0,869274	84	0,954074
10	0,902696	35	0,990382	60	1,414464	85	1,092959
11	1,015311	36	0,495334	61	1,203221	86	0,838655
12	0,727244	37	0,335627	62	0,878973	87	0,991247
13	0,550822	38	1,361876	63	1,346641	88	0,849864
14	0,361808	39	0,591453	64	0,811082	89	1,222757
15	0,936545	40	1,145247	65	0,86047	90	0,569395
16	0,478333	41	0,678846	66	1,11399	91	1,042167
17	0,732259	42	1,065546	67	0,901825	92	0,756394
18	1,093241	43	1,127835	68	0,541059	93	1,259223
19	0,650108	44	1,356252	69	0,987289	94	0,813286
20	1,070081	45	0,711982	70	0,475104	95	1,302228
21	1,315352	46	1,045824	71	0,80719	96	1,154007
22	0,732608	47	0,633624	72	0,633454	97	0,967286
23	0,59436	48	1,30558	73	1,131588	98	1,146692
24	0,799843	49	0,034931	74	0,174311	99	0,541059
25	0,920291	50	0,98935	75	0,991174	100	1,302285

Таблиця А.4 – Інтервали між поїздами, що прибувають на станцію

№п/п	Час відправлення	Час у годинах	Інтервали між поїздами
1	0:14	0,2333	0,2333
2	0:40	0,6667	0,4333
3	4:12	4,2000	3,5333
4	5:04	5,0667	0,8667
5	6:19	6,3167	1,2500
6	6:26	6,4333	0,1167
7	7:00	7,0000	0,5667
8	7:56	7,9333	0,9333
9	8:58	8,9667	1,0333
10	9:39	9,6500	0,6833
11	9:55	9,9167	0,2667
12	10:19	10,3167	0,4000
13	11:01	11,0167	0,7000
14	13:17	13,2833	2,2667
15	13:35	13,5833	0,3000
16	13:50	13,8333	0,2500
17	14:26	14,4333	0,6000
18	14:52	14,8667	0,4333
19	15:26	15,4333	0,5667
20	15:41	15,6833	0,2500
21	16:01	16,0167	0,3333
22	16:10	16,1667	0,1500
23	16:35	16,5833	0,4167
24	16:49	16,8167	0,2333
25	17:23	17,3833	0,5667
26	17:38	17,6333	0,2500
27	18:00	18,0000	0,3667
28	18:06	18,1000	0,1000
29	18:48	18,8000	0,7000
30	19:01	19,0167	0,2167
31	19:26	19,4333	0,4167
32	19:33	19,5500	0,1167
33	20:02	20,0333	0,4833
34	20:30	20,5000	0,4667
35	21:10	21,1667	0,6667
36	21:29	21,4833	0,3167
37	21:47	21,7833	0,3000
38	22:05	22,0833	0,3000
39	22:23	22,3833	0,3000
40	22:31	22,5167	0,1333
41	23:01	23,0167	0,5000
42	23:16	23,2667	0,2500
43	23:30	23,5000	0,2333
44	23:46	23,7667	0,2667

Таблиця А.5 – Тривалість знаходження поїзда на станції

№ спостереження	Час заняття (хв)	Час заняття (годин)
1	2,5	0,042
2	3,0	0,051
3	2,0	0,034
4	3,4	0,057
5	2,4	0,040
6	3,5	0,058
7	2,5	0,042
8	3,2	0,053
9	2,4	0,041
10	1,4	0,023
11	2,9	0,048
12	3,2	0,054
13	2,8	0,047
14	3,1	0,052
15	2,9	0,048
16	4,5	0,075
17	2,9	0,048
18	1,6	0,027
19	3,4	0,056
20	1,9	0,031
21	4,4	0,073
22	2,5	0,041
23	2,6	0,044
24	1,9	0,031
25	2,4	0,040
26	1,9	0,032
27	2,9	0,049
28	2,9	0,048
29	2,1	0,035
30	4,0	0,067
31	3,6	0,059
32	1,4	0,024
33	3,6	0,061
34	3,4	0,057
35	3,6	0,060
36	3,8	0,063
37	2,2	0,036
38	1,4	0,024
39	2,3	0,039
40	2,0	0,034
41	3,3	0,055
42	3,0	0,050
43	2,9	0,048
44	3,1	0,052

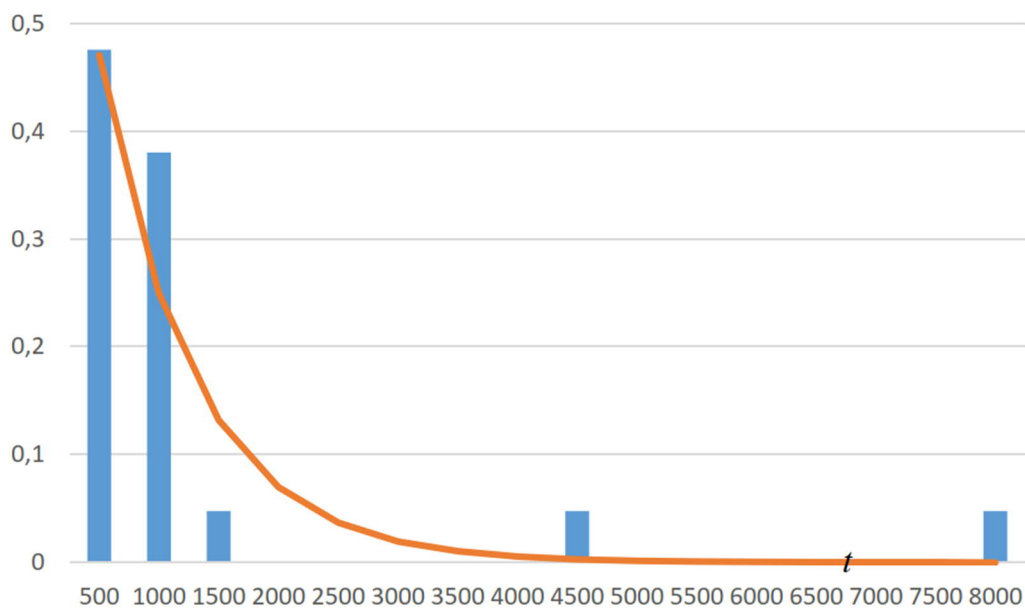
$f(t)$ 

Рисунок А.1 – Гістограма емпіричного статистичного та крива теоретичного ймовірнісного розподілу інтервалів часу між відмовами, зауваженнями та інцидентами на станції

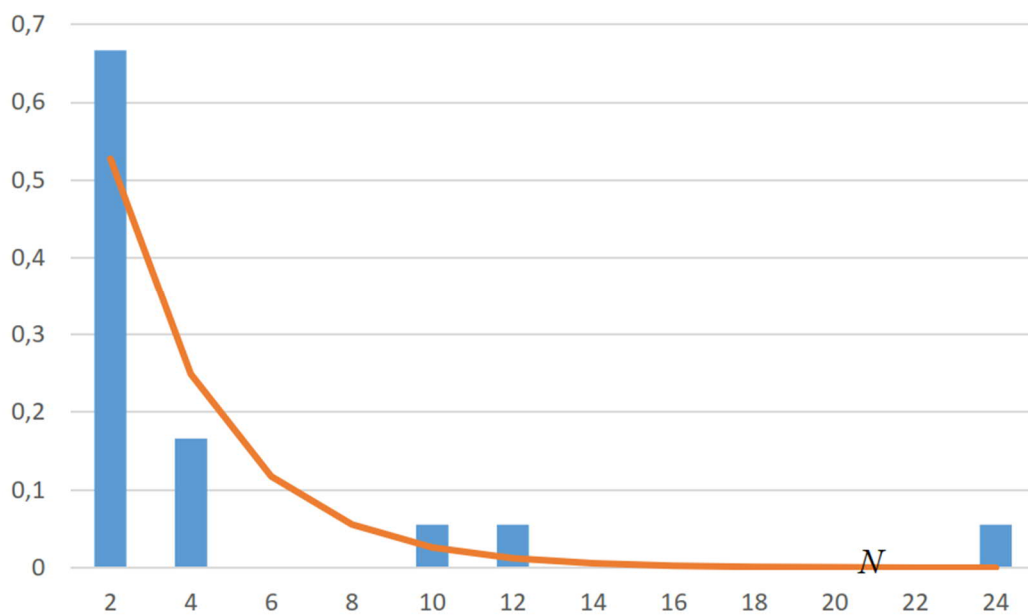
 $f(N)$ 

Рисунок А.2 – Емпіричний та теоретичний розподіл щільності ймовірності кількості зауважень на станції

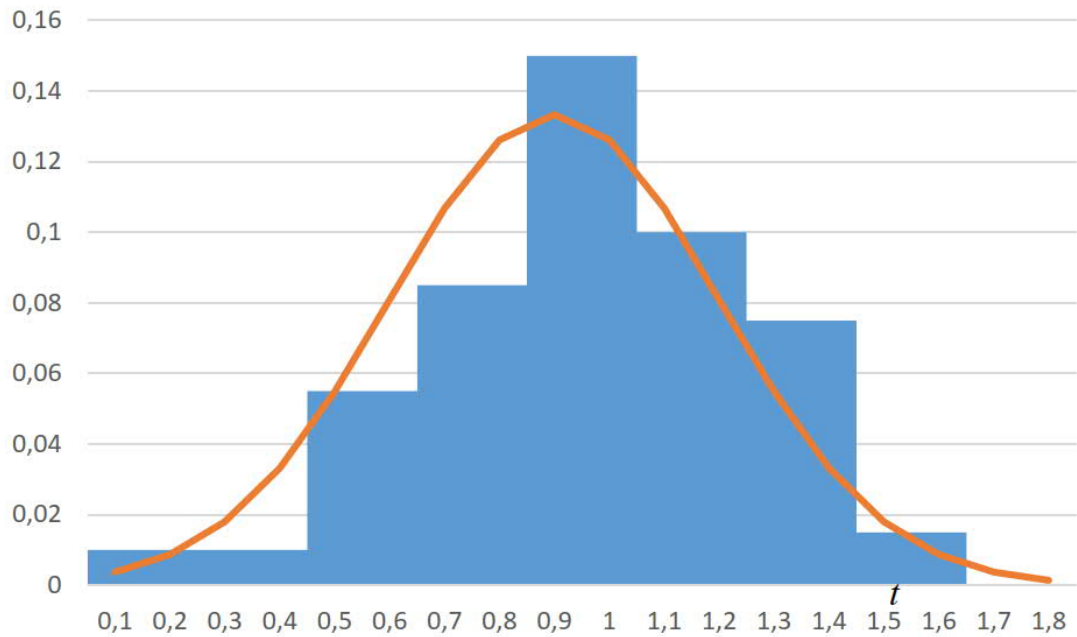
$f(t)$ 

Рисунок А.3 – Емпіричний і теоретичний розподіл щільності ймовірності часу до відновлення станції

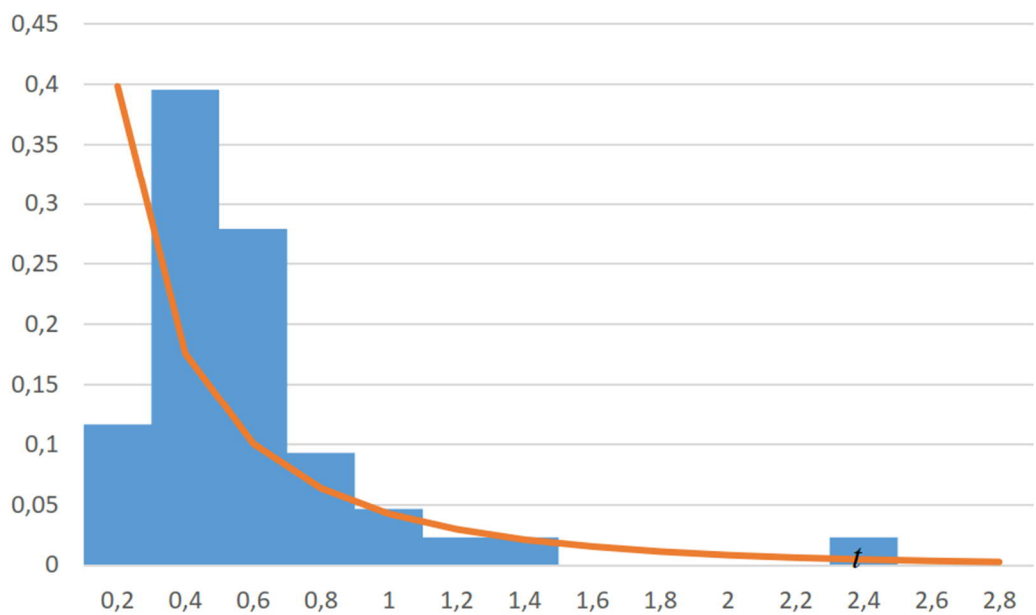
 $f(t)$ 

Рисунок А.4 – Емпіричний та теоретичний розподіл щільності ймовірності інтервалів між поїздами

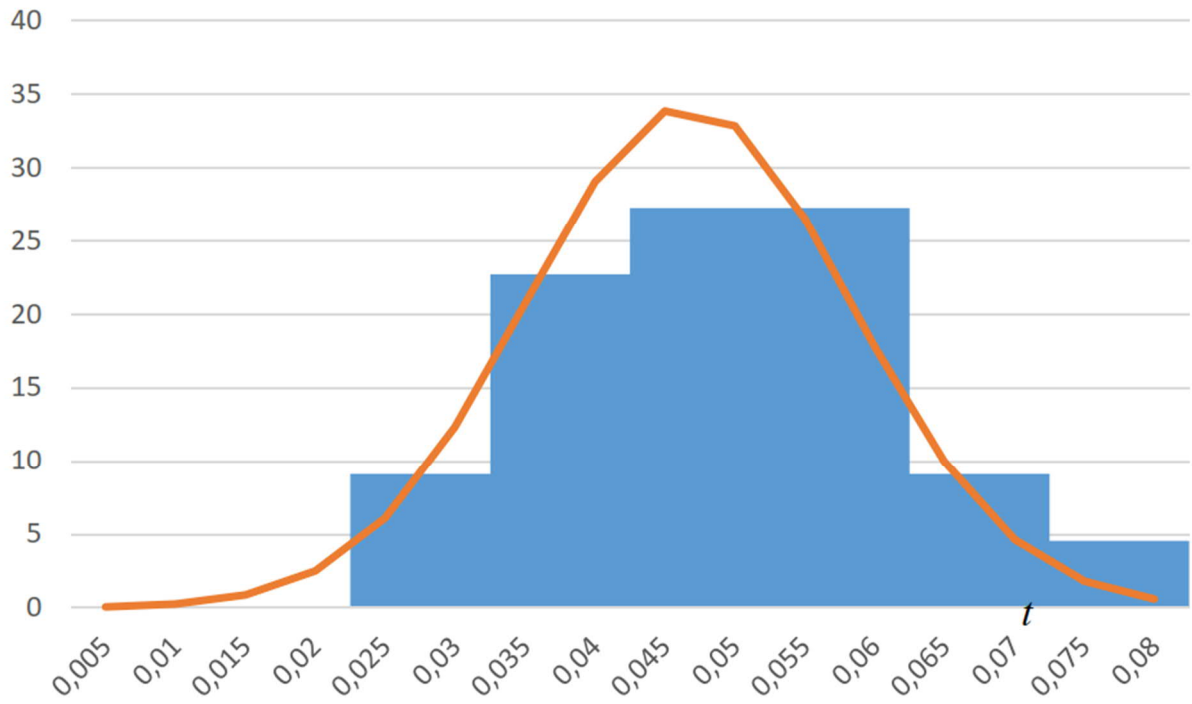


Рисунок А.5 – Емпіричний та теоретичний розподіл щільності ймовірності часу знаходження поїзда на станції

ДОДАТОК Б
ПОКАЗНИКИ ОЦІНЮВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОСТІ СИСТЕМИ
ЗАЛІЗНИЧНОЇ АВТОМАТИКИ І ТЕЛЕМЕХАНІКИ

Таблиця Б.1 – Обов’язкові функціональні вимоги до систем ЗАТ на перегонах

№ з/п	Вимога	Показник
1	2	3
1	Системи повинні забезпечувати реалізацію функцій безпеки	z_1
2	Системи повинні забезпечувати реалізацію технологічних функцій	z_2
3	Реалізація функції включення роздільної спроможності залізничного світлофора повинна задовольняти вимогам [31]	z_3
4	Реалізація функції зміни напрямку руху залізничних поїздів шляхом перегону повинна задовольняти вимогам [31]	z_4
5	Реалізація управління та контролю перегінними системами має здійснюватися відповідно до [31]	z_5
6	Системи повинні забезпечувати контроль за реалізацією функції відповідно до [31]	z_6
7	Черговому персоналу системи повинні забезпечувати можливості відповідно до [31]	z_7
8	Підлогове обладнання перегінних систем повинно встановлюватися відповідно до вимог габариту залізничного рухомого складу та габаритів наближення будівель, відповідно до [31]	z_8
9	Відповідно до [31] технічні засоби перегінної системи повинні виконувати свої функції у всіх передбачених при їх розробці та (або) проектуванні умовах та режимах, не створюючи при цьому перешкод для функціонування як інших технічних засобів залізничної автоматики та телемеханіки, так і об’єктові інфраструктури залізничної лінії	z_9
10	Відповідно до проекту з обладнання ділянки залізничної лінії технічні засоби перегінної системи мають бути функціонально, інформаційно та технічно сумісними із системами, переліченими в [31]	z_{10}
11	Відповідно до [31] технічні засоби перегінної системи повинні забезпечувати безпечну взаємодію з іншими системами залізничної автоматики та телемеханіки, що діють на даній ділянці залізничної лінії, або забезпечувати можливість інтегрування функцій цих систем	z_{11}
12	Апаратні та програмні засоби перегінних систем повинні бути розроблені, спроектовані та виготовлені таким чином, щоб у всіх передбачених проектом умовах та режимах їх роботи, за дотримання всіх вимог, встановлених в експлуатаційній документації, забезпечувалася реалізація всіх функцій щодо забезпечення безпеки руху поїздів протягом встановленого терміну служби [31]	z_{12}
13	Система повинна задовольняти вимоги до відмови та їх виявлення відповідно до [31]	z_{13}

Закінчення таблиці Б.1

1	2	3
14	Якщо концепцією побудови програмно-апаратних засобів перегінних систем допускається накопичення відмов, які не виявляються в процесі експлуатації, то ймовірність виникнення небезпечної відмови через їх накопичення за період експлуатації не повинна перевищувати задану ймовірність небезпечної відмови [31]	z_{14}
15	Програмно-апаратні засоби перегінних систем повинні забезпечувати відновлення працездатного стану із стану захисної відмови лише за участю експлуатаційного персоналу [31]	z_{15}
16	Програмні засоби, що застосовуються у перегінних системах, повинні задовольняти вимогам [31]	z_{16}

Таблиця Б.2 – Перелік контрольованих показників та методів контролю для нових систем, що знаходяться в експлуатації, на перегоні

Система ЗАТ	Перелік контрольованих показників	Метод контролю
Нова	$z_1, z_2, z_8 - z_{11}$	Експертиза технічного завдання на систему в частині функціональних вимог та вимог безпеки
	$z_3, z_4, z_8 - z_{11}$	Експертиза алгоритмічного забезпечення системи
	$z_5 - z_7, z_{13}, z_{11}$	Експертиза концепції забезпечення безпеки системи
	$z_5 - z_7$	Експертиза проектної оцінки безпеки системи
	$z_{12} - z_{16}$	Експертиза апаратних та програмних засобів системи на відповідність положень концепції безпеки
	$z_5 - z_{16}$	Експертиза технічних рішень
	$z_1 - z_2, z_3, z_4, z_{16}$	Випробування технологічного програмного забезпечення
Експлуатована	$z_{12} - z_{15}$	Випробування програмно-апаратних коштів
	$z_1, z_2, z_3 - z_4$	Експертиза документа «Доказ безпеки»
	$z_5 - z_7, z_8 - z_{11}$	Експертиза експлуатаційної документації
	$z_1 - z_2, z_3, z_4, z_{10}, z_{13}, z_{15}$	Проведення автономних випробувань системи
	z_3, z_4	Проведення приймальних випробувань
	$z_1 - z_2, z_3, z_5 - z_{16}$	Експертиза проекту
	$z_3, z_4, z_8 - z_{11}$	Відомості про порушення під час виконання функцій. Збір, обробка та аналіз даних про відмови та збої, що мали місце в процесі експлуатації. Визначення фактичних значень кількісних показників безпеки та даних, накопичених у процесі експлуатації, а також оцінка відповідності цих показників заданим значенням.

ДОДАТОК В
ПЕРЕЛІК МУЛЬТИМЕДІЙНОГО ДЕМОНСТРАЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ
ДО ДИПЛОМНОЇ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ

	<p style="text-align: center;">Український державний університет науки і технологій Навчально-науковий інститут «Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту»</p>	1
<p>Оцінка надійності та ризиків процесу експлуатації об'єктів інфраструктури залізничного транспорту</p> <p>Студентка групи УЛ 2026 Васюра Олена Вікторівна</p>		

2
<p>Мета роботи: дослідження взаємозв'язку між показниками надійності функціонування об'єктів транспортної інфраструктури та рівнем технічних і економічних ризиків, пов'язаних із процесом експлуатації даних об'єктів</p> <p>Об'єкт дослідження: виробничий процес експлуатації об'єктів залізничної транспортної інфраструктури</p> <p>Предмет дослідження: взаємозв'язок між рівнем надійності функціонування об'єктів залізничної транспортної інфраструктури та відповідними технічними та економічними ризиками, що виникають під час реалізації виробничого процесу технічної експлуатації, а також організаційно-технологічної надійності перевізного процесу з урахуванням стану об'єктів транспортної інфраструктури</p> <p>Методи дослідження: математична статистика, теорія ймовірності, теорія ризиків, імітаційне моделювання</p>

Основні складові елементи інфраструктури транспорту

3



Структура колій АТ «Укрзалізниця»

4



Характеристика витрат АТ «Укрзалізниця»

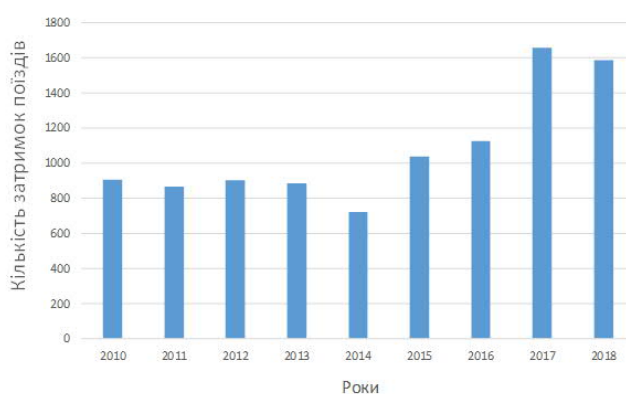
5



Показники зносу пристроїв регулювання руху поїздів

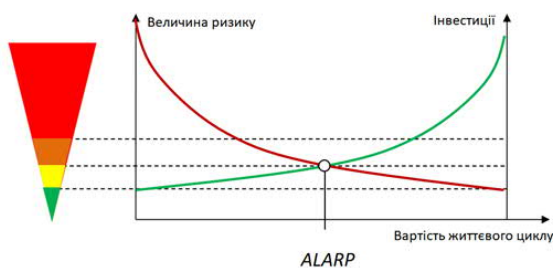
6

Система, вимірник	Працює в межах нормативного терміну		Працює понад нормативний термін	
	кількість	%	кількість	%
Електрична централізація, стрілки	5233	17	26095	83
Автоблокування, км	2722,5	22	9522,7	78
Напівавтоматичне блокування, км	2543	37	4292	63
Диспетчерська централізація, км	1709,6	38	2819,1	62
Гіркові пристрої, стрілки	277	41	395	59
Гіркові пристрої, уповільнювачі	89	8	1063	92
Загалом, технічні одиниці	11453	35,4	20891	64,6



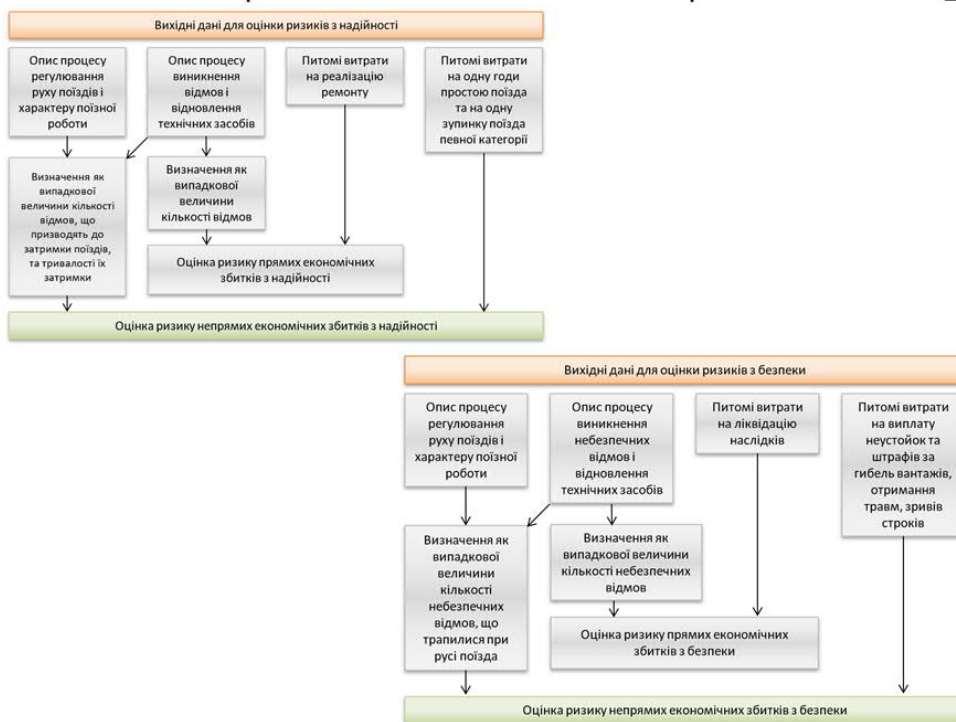
Методологія RAMS

7



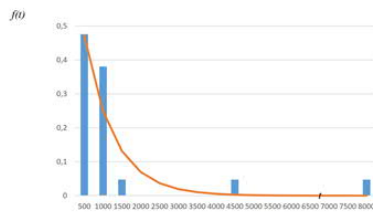
Моніторинг технічних і економічних ризиків

8

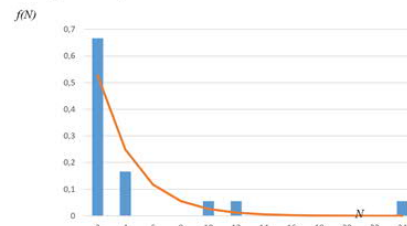


Статистичні характеристики випадкових величин процесу функціонування пристроїв ЗАТ

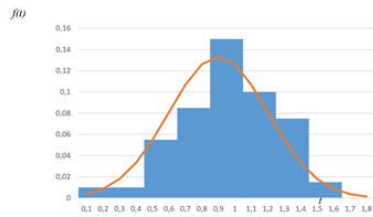
9



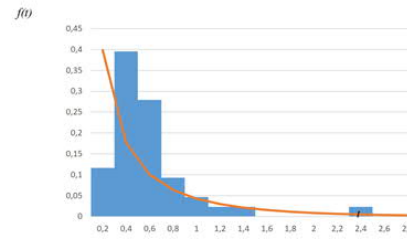
Розподіл інтервалів часу між відмовами, зауваженнями та інцидентами на станції



Розподіл кількості зауважень на станції



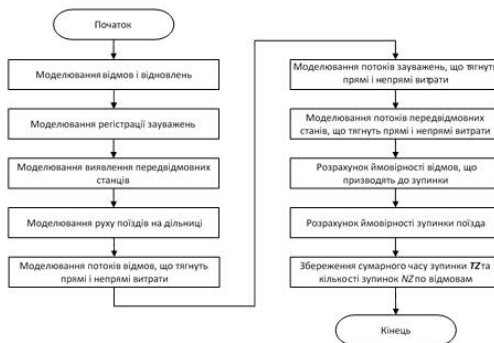
Розподіл часу до відновлення станції



Розподіл інтервалів між поїздами

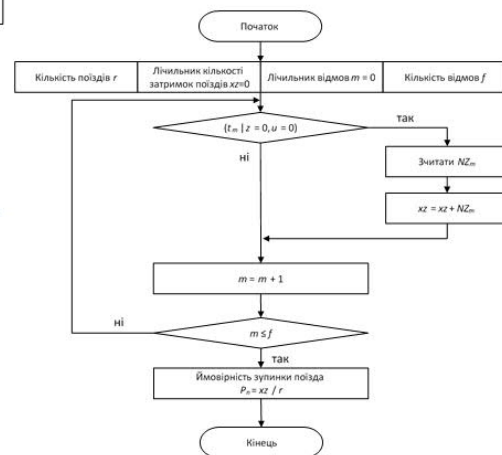
Алгоритми імітаційної моделі

10



Алгоритм визначення ймовірності затримки поїзда через відмову

Загальний алгоритм імітаційної моделі



Оцінка ризику процесу функціонування об'єкту інфраструктури 11

Результати моделювання

Позначення показника	найменування показника	Значення показника
λ_1	Інтенсивність використання елемента ОІ, год ⁻¹	4,17
$T_{\text{вн}}$	Середня тривалість використання елемента ОІ, год	0,068
λ_2	Інтенсивність відмов елемента ОІ, 10^{-5} год ⁻¹	0,6509
μ_2	Інтенсивність відновлення елемента ОІ після відмови, год ⁻¹	1,1
$C_{\text{пр}}$	Середня вартість однієї години простою поїзда, тис. грн	3,393
$C_{\text{оп}}$	Середня вартість однієї додаткової зупинки поїзда, тис. грн	0,12746
T_p	Розрахунковий період, год	26280
n_e	Кількість елементів ОІ	157

Ймовірність використання ОІ – 0,220867261

Оцінка ризику відмови ОІ – $0,1307 \times 10^{-5}$

Оцінка ризику з безпеки ОІ – $4,28 \times 10^{-4}$

Сумарні збитки по об'єкту інфраструктури – 27,0783 тис. грн.

Матриця ризику з відмови

Можливість ризику	Рівні тяжкості наслідків (величина збитків)					
	<50 тис. грн	50-200 тис. грн	200-4000 тис. грн	4000-20000 тис. грн	> 20000 тис. грн	
	незначний	серйозний	критичний	катастрофічний	тяжкий	
$0,9 \leq P_{\text{ок}} \leq 1$	Часте	Ч1	Ч2	Ч3	Ч4	Ч5
$0,1 \leq P_{\text{ок}} < 0,9$	Імовірне	І1	І2	І3	І4	І5
$10^{-3} \leq P_{\text{ок}} < 0,1$	Випадкове	В1	В2	В3	В4	В5
$10^{-5} \leq P_{\text{ок}} < 10^{-3}$	Рідкісне	Р1	Р2	Р3	Р4	Р5
$10^{-7} \leq P_{\text{ок}} < 10^{-5}$	Дуже рідкісне	Д1	Д2	Д3	Д4	Д5
$P_{\text{ок}} < 10^{-7}$	Мало-імовірне	М1	М2	М3	М4	М5

Матриця ризику з безпеки

Можливість ризику	Рівні тяжкості наслідків (величина збитків)					
	незначний	серйозний	критичний	катастрофічний	тяжкий	
$0,9 \leq P_{\text{ок}} \leq 1$	Часте	Ч1	Ч2	Ч3	Ч4	Ч5
$0,1 \leq P_{\text{ок}} < 0,9$	Імовірне	І1	І2	І3	І4	І5
$10^{-3} \leq P_{\text{ок}} < 0,1$	Випадкове	В1	В2	В3	В4	В5
$10^{-5} \leq P_{\text{ок}} < 10^{-3}$	Рідкісне	Р1	Р2	Р3	Р4	Р5
$10^{-7} \leq P_{\text{ок}} < 10^{-5}$	Дуже рідкісне	Д1	Д2	Д3	Д4	Д5
$P_{\text{ок}} < 10^{-7}$	Мало-імовірне	М1	М2	М3	М4	М5

Дякую за увагу

ДОДАТОК Г
ВІДОМІСТЬ МАТЕРІАЛІВ ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ

№ п/п	Назва матеріалу ДР, що надано до захисту	Аркушів	Характеристика матеріалу	Формат листа
1	Оцінка надійності та ризиків процесу експлуатації об'єктів інфраструктури залізничного транспорту	104	Пояснювальна записка	А4