

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ

Факультет “*Транспортна інженерія*”

Кафедра “*Локомотиви*”

“ДО ЗАХИСТУ”

Зав.кафедрою *Б. Боднар* Борис БОДНАР

“ 19 ” 01 2024 р.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи *магістра*

на тему: “**Оцінка ризиків при виборі системи утримання  
локомотивів**”

за освітньою програмою: “*Інтероперабельність і безпека на залізничному  
транспорті*”

зі спеціальності 273 “*Залізничний транспорт*”  
галузі знань 27 “*Транспорт*”

Виконав: студент групи **ІН2226**

*Павло* Павло Йосипович БАРАН  
Керівник *Олександр* Олександр ОЧКАСОВ

Засвідчую, що у цій роботі немає запозичень з праць  
інших авторів без відповідних посилань.

Студент *Павло*

Дніпро, 2024

Український державний університет науки і технологій

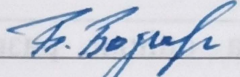
Факультет «Транспортна інженерія», кафедра «Локомотиви»

Спеціальність 273 «Залізничний транспорт»

за ОП «Інтероперабельність і безпека на залізничному транспорті»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри «Локомотиви»

 Борис БОДНАР

«30» 04 2024 р.

**ЗАВДАННЯ**

на кваліфікаційну роботу на здобуття ОС «магістр»

студенту групи *ІН2226*

**Барана Павла Йосиповича**

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Оцінка ризиків при виборі системи утримання локомотивів»  
затверджена наказом від «28» квітня 2024 р № 360ст
2. Термін подання студентом закінченої роботи «15» січня 2024 р
3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: Результати аналізу нормативних документів, що регламентують оцінку ризиків та організацію системи утримання локомотивів в Україні та країнах ЄС, дані щодо відмов елементів рухомого складу в експлуатації.
4. Перелік креслень (демонстративного матеріалу)  
Презентація за матеріалами досліджень, викладених в магістерській роботі (PowerPoint, 10...12 слайдів.

## 5. Перелік питань до розробки та термін виконання

Назва розділу кваліфікаційної роботи	Термін виконання	Обсяг розділу, %
Розділ 1. Аналіз стану питання оцінки ризиків при утриманні локомотивів.	19.11.2023	30
Розділ 2. Методика оцінки ризиків у системі утримання локомотивів.	17.12.2023	30
Розділ 3. Розробка ризик-орієнтованої системи утримання струмоприймачів. Висновки. Оформлення ВКР.	15.01.2024	40

Студент

Павло Йосипович БАРАН

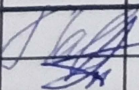
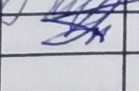
Керівник роботи

Олександр ОЧКАСОВ

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ОЦІНКИ РИЗИКІВ ПРИ УТРИМАННІ ЛОКОМОТИВІВ .....	8
1.1 Опис існуючої системи утримання локомотивів .....	8
1.2 Класифікація методів технічного обслуговування .....	13
1.3 Аналіз праць закордонних учених у питанні оцінки ризиків при виборі системи утримання локомотивів.....	23
2 МЕТОДИКА ОЦІНКИ РИЗИКІВ У СИСТЕМІ УТРИМАННЯ ЛОКОМОТИВІВ .....	31
2.1 Загальне поняття про ризик-орієнтоване технічне обслуговування.....	31
2.2 Алгоритм впровадження ризик-орієнтованого технічного обслуговування.....	33
2.3 Математичний апарат ризик-орієнтованої системи утримання локомотивів.....	40
3 РОЗРОБКА РИЗИК-ОРІЄНТОВАНОЇ СИСТЕМИ УТРИМАННЯ СТРУМОПРИЙМАЧІВ .....	50
3.1 Аналіз конструкції та функцій елементів струмоприймача.....	50
3.2 Аналіз надійності струмоприймачів.....	52
ВИСНОВКИ .....	61
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....	62

0032.226522.МДР.2024.001

Зм	Лист	№ докум	Підпис	Дата		Літ	Лист	Листов
					Оцінка ризиків при виборі системи утримання локомотивів			
Розроб		Баран П.Й.						
Перевірив		Очкасов О.Б.						
Н. контр.								
Затв.								
						ІН2226		

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE  
UKRAINIAN STATE UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGIES

Faculty “*Transport engineering*”

Department “*Locomotives*”

Explanatory Note  
to Master’s Thesis

*master*

on the topic: “ **Risk assessment when choosing a locomotive maintenance system**”

according to educational curriculum: “*Interoperability and safety in railway transport*”  
in the Speciality 273 “*Railway transport*”  
Branch of knowledge 27 “*Transport*”

Done by the student of the group IH2226:

Pavlo Josypovych BARAN

Scientific Supervisor: Oleksandr OCHKASOV

Dnipro, 2024

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра:

64 стор., 13 рис., 6 табл., 20 літературних джерел.

Об'єкт розробки – система утримання рухомого складу на залізницях України.

Мета роботи – підвищення ефективності системи технічного утримання рухомого складу шляхом впровадження ризик-орієнтованого підходу..

Метод дослідження – методи оцінки ризиків, методи аналізу та синтезу.

В магістерській роботі виконано аналіз літературних джерел, присвячених науково-технічній задачі удосконалення системи утримання локомотивів на основі оцінки ризиків, аналіз існуючої системи утримання рухомого складу в Україні та методи технічного обслуговування рухомого складу, що застосовуються у країнах ЄС.

Запропонована методика оцінки ризиків у системі технічного утримання локомотивів, наведено відповідний математичний апарат.

Наведеено приклад оцінки ризиків при утриманні струмоприймачів рухомого складу.

Ключові слова: СИСТЕМА УТРИМАННЯ, РУХОМИЙ СКЛАД, РИЗИК, МЕТОД ОЦІНКИ

					0032.226522.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		5

## ВСТУП

Залізнична галузь стикається з проблемами, пов'язаними з передчасним виходом із ладу технічних засобів залізниць, які потребують значних коштів на утримання та технічне обслуговування. Залізничні активи в основному класифікуються на два класи: рухомий склад, який включає активи, що переміщуються по залізничних коліях, та інфраструктуру, яка відноситься до основних засобів залізничного транспорту. В останні роки велика увага приділяється аналізу поведінки відмов об'єктів залізничної інфраструктури. Однак дослідники робили небагато спроб аналізу відмов і моделювання рухомого складу. Рухомий склад — це багатокomпонентна система, що складається з коліс, візків, дверей, силової установки, пантографа, зчіпного пристрою тощо. Відмова цих компонентів може коштувати дуже дорого з точки зору грошових втрат та/або незручностей для пасажирів. Це також може спричинити затримки руху поїздів або призвести до сходу з рейок. З цих причин надзвичайно важливо запобігати та зменшувати ризики, пов'язані з несправністю різних компонентів рухомого складу. Технічне обслуговування рухомого складу відіграє важливу роль у наданні безпечних, надійних і конкурентоспроможних транспортних послуг. У багатьох дослідженнях відзначається, що витрати на технічне обслуговування складають основну частину вартості життєвого циклу (LCC) рухомого складу. Відповідна стратегія технічного обслуговування не тільки зменшує загальний LCC, але й забезпечить високі стандарти безпеки та комфорту для працівників залізниці та пасажирів. Для цього використовується широкий спектр підходів до профілактичного обслуговування (PM), включаючи регулярні перевірки, технічне обслуговування, орієнтоване на надійність (RCM), технічне обслуговування на основі ризиків (RBM), моніторинг на основі стану (CBM) і комп'ютеризована система управління технічним обслуговуванням (CMMS).

					0032.226522.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		6

*Метою дослідження є підвищення ефективності системи технічного утримання рухомого складу шляхом впровадження ризик-орієнтованого підходу.*

*Об'єктом дослідження у роботі є система утримання рухомого складу на залізницях України.*

*Предметом дослідження є застосування методів оцінки ризиків у при організації технічного утримання рухомого складу.*

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні завдання:

- проаналізувати сучасний стан питання оцінки ризиків при утриманні локомотивів і світовий досвід у вирішенні даного питання;
- запропонувати методика оцінки ризиків у системі утримання локомотивів з відповідним математичним апаратом;
- розробити ризик-орієнтовану систему утримання одного з вузлів рухомого складу.

					0032.226522.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		7

# 1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ОЦІНКИ РИЗИКІВ ПРИ УТРИМАННІ ЛОКОМОТИВІВ

## 1.1 Опис існуючої системи утримання локомотивів

У теперішній час на залізницях України прийнята планово-попереджувальна система утримання, при якій ремонт виконується без врахування технічного стану, через визначені проміжки часу або пробігу, величина яких регламентується наказами Укрзалізниці [□20].

Впровадження планово-попереджувальної системи ремонту обумовлено підвищеними вимогами до надійності, а також недостатнім розвитком діагностичних засобів у депо. Планово-попереджувальна система ремонту досить проста та передбачає певний комплекс профілактичних заходів, що зменшують імовірність несподіваного виходу з ладу агрегатів, вузлів, деталей. У той же час при планово-попереджувальній системі ремонту практично не враховується технічний стан об'єкта.

Розглянемо основні визначення, які використовуються при ремонті локомотивів.

Технічне обслуговування – комплекс операцій або операція по підтриманню працездатності або справності об'єкта при використанні за призначенням, очікуванні, зберіганні та транспортуванні.

Ремонт – комплекс операцій по відновленню справності або працездатності об'єкта та відновленню ресурсу об'єкта або його складових частин.

Під системою технічного утримання рухомого складу розуміють сукупність техніко-економічних стратегій, що визначають стан працездатності рухомого складу, а також наступні параметри:

- номенклатуру ремонтних обслуговувань (види оглядів і ремонтів, а також їх якість);
- циклічність (чергування оглядів і ремонтів);
- періодичність ремонтних обслуговувань (міжремонтні пробіги та терміни виконання робіт);

					0032.226522.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		8

– глибину відновлення (характеристики оглядів і ремонтів; обсяг ремонтних і контрольно-ревізійних робіт).

Згідно з цими положеннями розробляється ряд документів, що визначають організацію, циклічність і періодичність ремонтів.

На теперішній час система технічного обслуговування та ремонту локомотивів включає в себе наступні основні види ТО та ремонтів: поточні ремонти (ПР-1, ПР-2, ПР-3), капітальні ремонти (КР-1, КР-2), технічне обслуговування (ТО-1, ТО-2, ТО-3, ТО-4). Циклограма проведення технічних обслуговувань та ремонтів наведена на рисунку 1.1.

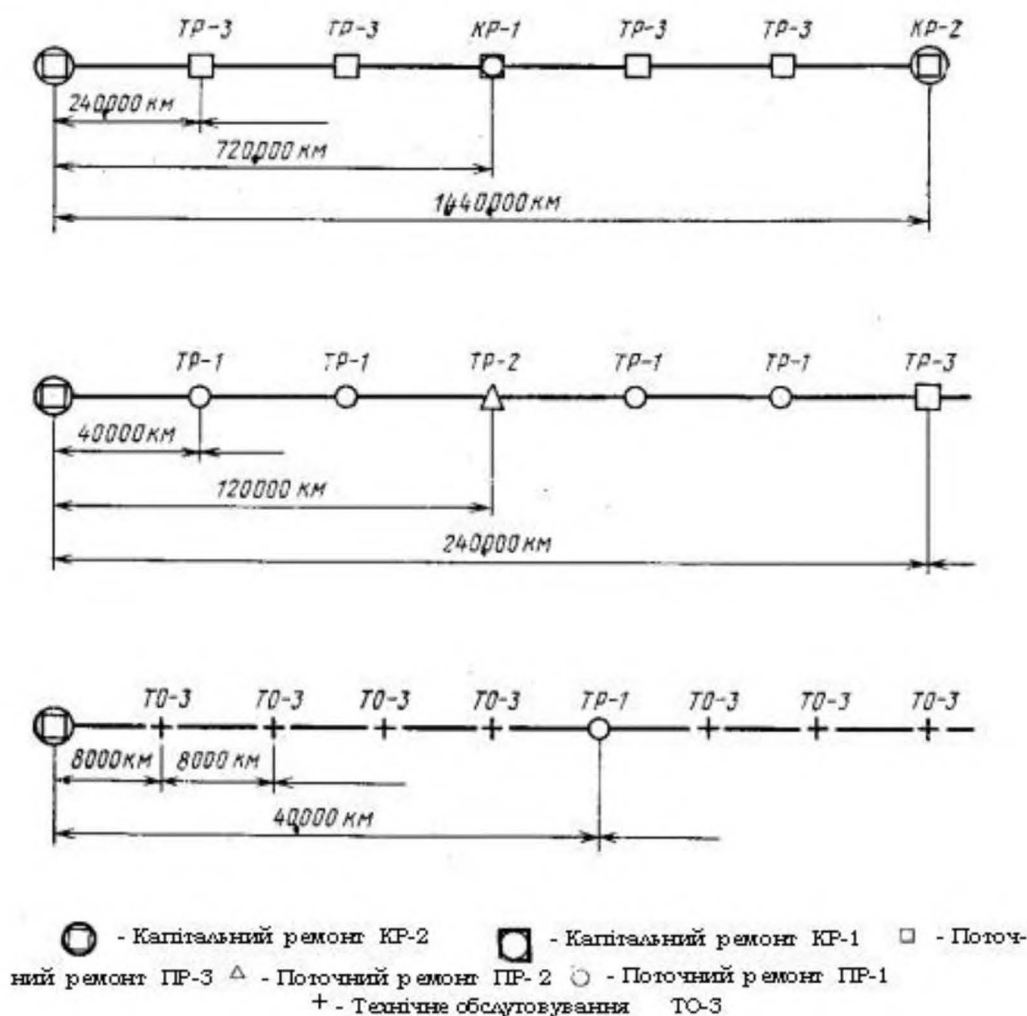


Рисунок 1.1 – Циклограма проведення ТО та ремонтів тепловозів

Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата

0032.226522.МДР.2024.001

Арк.

9

Капітальний ремонт КР-1, КР-2 виконують на ремонтних заводах. При цих видах ремонту передбачається ревізія з розборкою всіх без виключення одиниць і обладнання, заміна непридатних новими і встановлення зношених деталей, а також модернізація.

Поточні види ремонту необхідні для огляду і ремонту збірних одиниць і агрегатів локомотивів, заміни зношених деталей з метою забезпечення працездатності локомотивів в експлуатації. Виконують їх в основних депо комплексні і спеціалізовані бригади. Поточні ремонти ПР-1, ПР-2 виконують без розборки локомотивів, а ПР-3 з розборкою основних збірних одиниць і агрегатів.

При технічному обслуговуванні ТО-1, ТО-2, ТО-3, ТО-4 виконують комплекс робіт по забезпеченню безпеки руху, а також роботи з підтримки працездатності локомотива в період його експлуатації міжплановими видами поточного ремонту. ТО-3 і ТО-4 виконуються в депо приписки комплексними і спеціалізованими бригадами.

ТО-2 виконують висококваліфіковані слюсарі в спеціально оснащених пунктах, ТО-1 - локомотивні бригади.

Ремонт локомотивів виконується на основі взаємної заміни деталей, збірних одиниць і обладнання. Основним способом ремонту в депо і на заводах є крупноагрегатний метод. Для цієї мети депо і заводи мають необхідний технологічний запас обладнання і збірних одиниць.

Депо і заводи, запасні технічні частини і матеріали для ремонту рухомого складу одержують по спеціальних технічно обґрунтованих нормах по серіях локомотивів на 1 млн.км пробігу для поточного ремонту і на одиницю заводського ремонту.

Середні норми пробігу між ремонтами і ТО локомотивів регламентовані [□20] і наведені у табл. 1.1. та табл. 1.2.

					0032.226522.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		10

Таблиця 1.1 – Норми міжремонтних періодів електровозів у АТ «Укрзалізниця»

Вид та серія електровоза	НОРМАТИВНІ МІЖРЕМОНТНІ ПЕРІОДИ						Примітка
	Технічне обслуговування	Поточні ремонти			Капітальні ремонти		
	ТО-3 (тис.км)	ПР-1 (тис.км)	ПР-2 (тис.км)	ПР-3 (тис.км)	КР-1 (тис.км)	КР-2 (тис.км)	
Магістральні, в тому числі:							
Пасажирські:							
ЧС4	–	20	180	360	720	2200	–
ЧС7	15	30	200	400	800	2400	–
ЧС8	–	22	200	400	800	2400	–
ДС3	–	75	–	900	–	2700	–
ВЛ40	–	20	240	480	960	2600	–
ВЛ60в/і	–	17	165	330	–	–	–
ЧС2	12,5	25	150	300	–	–	–
Вантажні:							
ВЛ10, ВЛ11м	15	30	175	350	700	2100	В гірських умовах
ВЛ118, (м)	–	30	175	350	700	2100	–
ВЛ11м5(6)	–	50	-	400	800	2400	–
ВЛ80 к, т	–	18	200	400	800	2400	–
ВЛ80 с	–	20	240	480	960	2600	–
ВЛ82 в/і	–	18	200	400	800	2400	–
ДЕ1	15	30	200	400	800	2400	–
2ЕС5К	–	50	–	600	–	3000	–
2ЕЛ5	–	50	–	600	–	3000	–
2ЕЛ4	–	50	–	600	–	3000	–
ВЛ8	11	22	165	330			–
Маневрові, вивізні, гіркові (всіх серій):							
Вантажні (всіх серій)	—	45 діб	2 роки	4 роки	8 років	16 років	–

Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата

0032.226522.МДР.2024.001

Арк.

11

Таблиця 1.2 – Норми міжремонтних періодів тепловозів у АТ «Укрзалізниця»

Вид та серія тепловоза	НОРМАТИВНІ МІЖРЕМОНТНІ ПЕРІОДИ						Примітка
	Технічне обслуговування	Поточні ремонти			Капітальні ремонти		
		ТО-3 тис.км /діб	ПР-1 тис.км/міс	ПР-2 тис.км/міс.	ПР-3 тис.км/міс	КР-1 тис.км/рік	
Магістральні: вантажні та пасажирські:							
2ТЕ10 в/і	10/-	50/-	150/-	300/-	900/7	1800/13	-
М62, 2М62, 2М62у	8/-	40/-	-	180/-	720/4,5	1440/9	без ПР-2
	9/-	45/-	120/-	240/-	720/4,5	1440/9	з ПР-2
М62, 2М62 після виконання глибокої комплексної модернізації силовим обладнанням	13/-	65/-	130/-	260/-	1050/6	2100/12	-
2ТЕ116, ТЕП70	10/-	50/-	-	300/-	900/8	1800/14	без ПР-2
	10/-	50/-	200/-	400/-	900/8	1800/14	з ПР-2
ТЕП150	15/-	150/-	300/-	600/-	1250/10	2500/20	-
Маневрові							
ЧМЕЗ в/і	-/36	-/9	-	-/30	-/9	-/18	без ПР-2
	-/36	-/9	-/18	-/36	-/9	-/18	з ПР-2
ЧМЕЗ в/і після виконання глибокої комплексної модернізації силовим обладнанням	-/60	-/12	-	-/40	-/11	-/22	-
ТЕМ18ДМ	-/60	-/12	-/24	-/48	-/8	-/16	-
ЧМЕ2	-/15	-/4	-	-/16	-	-	-
ТУ2, ТУ3, ТУ7	-/15	-/2	-/8	-/16	-/5	-/10	-
ТЕМ103	600 год/ 15 діб	6250 год/ 15 міс.	-	18750 год /45 міс	75 000 год/ -	-	-
ТГМ23 в/і, ТГК2	-/10	-/2	-/8	-/16	-/5	-/10	-

## 1.2 Класифікація методів технічного обслуговування

Провідні науковці світу виділяють 4 типи технічного обслуговування: коригувальне технічне обслуговування (CM), профілактичне обслуговування (PM), технічне обслуговування на основі стану (CbM) і прогнозоване технічне обслуговування (PdM). Розглянемо дані види технічних обслуговувань

### *Коригувальне обслуговування (CM)*

Коригувальне технічне обслуговування, або CM, визначається як завдання з технічного обслуговування, що виконується для відновлення активу, що не відповідає або недостатньо ефективний, до оптимального або експлуатаційного стану. Один із способів, яким команди технічного обслуговування використовують коригувальне обслуговування, полягає в тому, щоб дозволити активам вийти з ладу перед їх ремонтом або заміною, оскільки це економічно та трудово ефективно. Це може бути простим методом технічного обслуговування, який також називають реактивним обслуговуванням.

Коригувальне обслуговування можна описати як очікування, поки каstrуля з водою закипить, перш ніж будуть вжиті певні заходи. Коли ви помічаєте, що вода переливається, ви вимикаєте конфорку, знімаєте каstrулю з конфорки та витираєте гарячу воду, перш ніж повернути каstrулю на конфорку. Швидше за все, ви будете уважніше стежити за водою, щоб вона не закипіла знову.

Коригувальне технічне обслуговування може бути найкращим підходом до обслуговування менших активів, при якому профілактичне обслуговування коштує дорожче, ніж повна заміна активу. Рішення про те, коли проводити коригувальне технічне обслуговування, також може бути прийнято на основі аналізу витрат і вигод. Якщо двигун потужністю 5 або 10 кВт зламається, швидше за все, буде економічно вигідніше його замінити, ніж робити ремонт. Купівля та встановлення нових деталей, оплата праці та простої під час ремонту, ймовірно, обійдуться дорожче, ніж купівля нового двигуна.

Коригувальне обслуговування не обмежується активами обладнання. Наприклад, організації, що виконують технічне обслуговування засобів стрижки

					0032.226522.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докum	Підпис	Дата		13

трави виконують коригувальні роботи. Вони виправляють небажаний стан (занадто довга трава), що, як мінімум, потрібно було б зробити до того, як довжина порушить міські правила.

Часто коригувальне технічне обслуговування вибирається як частина навмисної стратегії наїзду на відмову. Одним із прикладів коригувального обслуговування, яке слід проводити лише після виходу з ладу, є заміна перегорілого освітлювального приладу на стадіоні. Команда технічного обслуговування об'єкта чекала, поки кілька ламп не вийшли з ладу, замість того, щоб замінювати лише одне за раз. Було б марною тратою грошей намагатися передбачити, коли кожна лампочка вийде з ладу, або замінити кожен з них до того, як вона вийде з ладу. Наслідки роботи цих ліхтарів до відмови низькі. Однак лампочки потрібно замінити, перш ніж кількість перегорілих лампочок спричинить потенційну проблему з безпекою чи видимістю.

#### *Переваги коригувального обслуговування*

Незважаючи на те, що воно є реактивним за своєю природою, є деякі переваги коригувального обслуговування, наприклад:

- заощаджує гроші, допомагаючи прийняти рішення про заміну активів тоді, коли це найбільш економічно вигідно;
- дешевше планувати;
- спрощує процес для команди технічного обслуговування;
- спрощує делегування роботи

Можна обійтися без програмного забезпечення (хоча програмне забезпечення дуже корисне для коригувального обслуговування)

З усіх видів технічного обслуговування виконання коригувального технічного обслуговування є найбільш часто використовуваним і простим. Можна регулярно виконувати позапланове коригувальне обслуговування. З огляду на це, існують різні варіації коригувального обслуговування.

*Аварійне технічне обслуговування.* Цей тип коригувального обслуговування включає несправності, які виникають несподівано і є досить серйозними, що

					0032.226522.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		14

вимагають негайного усунення.

Технічне обслуговування поломки: Проводиться після того, як некритичний актив повністю виходить з ладу. Обслуговуванням варто зайнятися найближчим часом, але виробництво може тривати і без нього.

Відкладене коригувальне технічне обслуговування: Цей тип коригувального обслуговування включає ремонт, який був відкладений, але його потрібно зробити для відновлення функції активу, хоча він і не такий критичний.

Хоча коригувальне обслуговування, ймовірно, вже проводиться, є способи впровадити більш ефективне коригувальне обслуговування. Одним із способів підвищити ефективність коригувального технічного обслуговування є забезпечення кращого способу отримання повідомлень про потреби в технічному обслуговуванні. Цього можна досягти за допомогою системи запитів на технічне обслуговування. Система запитів часто є частиною програмного забезпечення комп'ютеризованої системи управління технічним обслуговуванням (CMMS). Менеджер з технічного обслуговування має навчити всіх користувачів активів (у відділі технічного обслуговування та за його межами) правильному опису проблеми в запиті на технічне обслуговування.

Ще одна порада, яка допоможе ефективніше проводити коригувальне обслуговування, полягає в тому, щоб створити організований метод постачання допоміжних матеріалів, необхідних технікам для виконання технічного обслуговування. Вони включають посібники користувача, гарантії та посібники з усунення несправностей, щоб вони були легко доступні, коли необхідно виконати роботи з технічного обслуговування. Ви також повинні тримати необхідні деталі на складі, щоб уникнути необхідності імпровізувати рішення на льоту або чекати дорогих, прискорених поставок замовлених деталей.

*Превентивне (профілактичне) технічне обслуговування (РМ)*

Превентивне технічне обслуговування, або РМ, — це технічне обслуговування, яке активно виконується на активі з метою зменшення ймовірності відмови, скорочення непередбачених простоїв і продовження терміну

					0032.226522.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		15

його служби. Профілактичне обслуговування набагато складніше, ніж коригувальне.

Щоб описати профілактичне обслуговування, використовуючи нашу аналогію з каструлею з водою, ви повинні зробити щось, щоб запобігти википанню води: використовувати трохи менше води або більшу каструлю, зменшити конфорку з високої на середню висоту, щоб вона закипала довше, і запам'ятати час, який знадобився для того, щоб вода закипіла минулого разу; Потім відняти кілька хвилин, щоб ваша вода не досягла точки кипіння.

Організації прагнуть впроваджувати профілактичне обслуговування тоді, коли вони хочуть скоротити коригувальне обслуговування, яке їм доводиться виконувати. Вони можуть відчувати себе перевантаженими ремонтами та простоями активів до такої міри, що команда не встигає за ними. Команди технічного обслуговування вирішують використовувати превентивне обслуговування, коли хочуть запобігти повному виходу з ладу великомасштабних активів. Незважаючи на те, що кількість завдань з технічного обслуговування майже нескінченна, деякі приклади профілактичного обслуговування включають:

перевірки

заміна рідин

заміна дрібних деталей (повітряний фільтр, хомути шланга і т.д.).

Рішення про те, коли застосовувати профілактичне обслуговування, багато в чому залежить від того, коли його можна використовувати разом з ефективним коригувальним обслуговуванням. Якщо ви не встигаєте за всіма ремонтними роботами, впровадження програми профілактичного обслуговування зменшить кількість відмов активів і заощадить час. Ви зможете зосередитися на скороченні часу простою машини та збільшенні швидкості виробництва за допомогою профілактичного обслуговування, що призведе до більшої доступності активів.

Профілактичне обслуговування слід використовувати, щоб запобігти виходу з ладу критично важливих та/або дорогих активів. Це слід робити, коли ви можете збалансувати менші, менш критичні завдання РМ з більшими завданнями

					0032.226522.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		16

коригувального обслуговування. В ідеалі профілактичне обслуговування має бути безперервною стратегією, яка максимально зменшує потребу в коригувальному обслуговуванні.

#### Переваги профілактичного обслуговування

Існує ряд переваг профілактичного обслуговування, хоча вам може знадобитися час, щоб скористатися цими перевагами. Їх не можна побачити за короткий час, але в довгостроковій перспективі вони значні. Профілактичне обслуговування:

- підвищує безпеку на робочому місці;
- збільшує термін служби машин або стан об'єкта;
- скорочує час простою;
- забезпечує більш високу продуктивність;
- допомагає отримати уявлення про активи та способи їх обслуговування (якщо це зроблено за допомогою програмного забезпечення CMMS)

Профілактичне обслуговування організовується наступним чином.

Необхідно розробити графік обслуговування активів до відмови разом із плануванням поповнення запасів частини та праці. Після того, як відділ технічного обслуговування координує всі ресурси, необхідні для оптимізації профілактичного обслуговування, впровадити його досить просто.

Програма профілактичного обслуговування може починатися з виконання кількох простих завдань ПМ, таких як заміна фільтра або регулярна перевірка активу. Хоча вам не потрібне програмне забезпечення або складний графік для виконання базового профілактичного обслуговування, це легше відстежувати за допомогою програмного забезпечення для керування технічним обслуговуванням.

Профілактичне обслуговування вимагає певних зусиль, але в кінцевому підсумку знижує витрати на обслуговування. Хоча лише на цю тему можна було б написати цілу публікацію в блозі, ось кілька коротких порад щодо впровадження профілактичного обслуговування:

					0032.226522.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		17

Створіть план і вирішіть, хто буде залучений до програми РМ

Переконайтеся, що у вас є ресурси (співробітники, запчастини та інструменти) для проведення профілактичного обслуговування

Проведіть інвентаризацію обладнання та інших активів вашого об'єкта

Визначте, які активи є критично важливими для виробництва, і визначте пріоритети запобігання виходу цих активів з ладу

Створюйте стандартизовані процеси та процедури управління проектами

Пріоритезуйте повторювані завдання РМ

Здійснення профілактичних робіт краще проводити за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення комп'ютеризованої системи управління технічним обслуговуванням (CMMS). Програмне забезпечення CMMS має можливість заздалегідь планувати замовлення на виконання робіт РМ, застосовувати шаблони наряд-замовлень до повторюваних робочих замовлень, пов'язувати завдання та деталі з кількома частотами та швидко перепланувати робочі замовлення за потреби.

На додаток до програмного забезпечення CMMS, також потрібно буде навчити своїх технічних спеціалістів здійснювати профілактичне обслуговування. Це включає в себе не тільки вивчення того, як користуватися програмним забезпеченням, але й очікування менеджерів з технічного обслуговування щодо повсякденних справ. Можуть з'явитися деякі нові завдання, які технічні спеціалісти повинні бути навчені виконувати, тому що вони ніколи раніше не виконувалися.

*Технічне обслуговування на основі стану (CbM)*

Технічне обслуговування на основі стану, або CbM, є ще однією формою профілактичного обслуговування, але воно виконується ближче до відмови, ніж традиційне профілактичне обслуговування. Технічне обслуговування на основі стану – це стратегія, при якій ви чекаєте, поки актив не продемонструє вимірювані симптоми, які вказують на те, що збій наближається або більш імовірний. Він визначається як техніка реактивного обслуговування, яка використовує дані в

					0032.226522.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		18

режимі реального часу (зібрані за допомогою датчиків), щоб визначити, коли продуктивність або стан активу досягає рівня, коли відмова наближається або є більш ймовірною.

У більшості випадків різниця між предиктивним технічним обслуговуванням і технічним обслуговуванням на основі стану невелика.

Тепер ми подумаємо про нашу каструлю з водою з точки зору технічного обслуговування, заснованого на стані. Ви повинні стежити за температурою води, щоб вона не википіла, а потім додавати їжу або регулювати налаштування пальника, перш ніж вода проллється. У цій аналогії це дуже спрощений приклад технічного обслуговування, заснованого на стані.

Технічне обслуговування на основі стану гарантує, що ви виконуєте технічне обслуговування, коли цього вимагає стан активу, а не до, не після. Це можна назвати як тип технічного обслуговування «точно вчасно». Технічне обслуговування на основі стану призначене для виконання, коли умови, які контролюються, досягають певного рівня. При цьому використовуються дані в режимі реального часу для оптимізації та пріоритезації ресурсів технічного обслуговування. Лише кілька прикладів технічного обслуговування в залежності від стану включають моніторинг температури та тиску, а також рівня масла та вібрації.

Отже, які міркування слід враховувати, перш ніж використовувати технічне обслуговування на основі стану у вашій загальній стратегії технічного обслуговування? По-перше, потрібно інвестувати в обладнання, щоб виміряти стан активів і переконатися, що технічні спеціалісти з технічного обслуговування знають, як користуватися цим обладнанням. Майте на увазі, що ця частина стратегії технічного обслуговування на основі стану може бути дорогою, але окупиться в довгостроковій перспективі.

Отримавши інструменти, необхідні для початку аналізу даних, ці дані потрібно використовувати для створення дієвої інформації. Це також гарний час, щоб освіжити будь-які правила, які застосовуються до ваших процесів або машин,

					0032.226522.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		19

оскільки вони швидко змінюються. Ненавмисне порушення правил може перешкодити найбільш запланованим планам технічного обслуговування.

Переваги технічного обслуговування на основі стану.

Існує багато переваг технічного обслуговування, заснованого на стані, які можна узагальнити наступним чином тут:

- коштує дешевше, ніж інші види обслуговування;
- підвищує надійність активів;
- зменшує кількість незапланованих збоїв;
- запобігає виконанню непотрібних завдань з технічного обслуговування;
- зберігає запчастини;
- економія на трудовитратах

Може бути завершено, коли активи працюють, що не призводить до простоїв.

Для впровадження технічного обслуговування на основі стану, необхідно виконати кілька кроків, включаючи збір даних датчиків, передачу даних, аналіз даних, щоб визначити, коли і де слід виконувати технічне обслуговування, створення та планування замовлень на роботи з технічного обслуговування, а також виконання робіт з технічного обслуговування. Моніторинг на основі стану виконує неруйнівний контроль за допомогою датчиків.

Після того, як ці датчики виконують тести, вони передають дані (або параметри, які вказують на необхідність технічного обслуговування) співробітникам. Це можна зробити за допомогою програмованого логічного контролера (ПЛК), людино-машинного інтерфейсу (HMI) або системи SCADA. Після того, як команда технічного обслуговування буде повідомлена про технічне обслуговування, яке необхідно провести, вона повинна виконати завдання з технічного обслуговування.

Програмне забезпечення для управління технічним обслуговуванням, таке як система CMMS, значно полегшує відстеження впровадження технічного обслуговування на основі стану. Ви можете документувати роботу за допомогою

					0032.226522.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		20

програми технічного обслуговування на основі стану в програмному забезпеченні CMMS. Функції програмного забезпечення дозволяють переглядати історію обслуговування, щоб допомогти в усуненні несправностей. Ви також можете використовувати звіти для порівняння даних про моніторинг стану активів.

### *Предиктивне технічне обслуговування (PdM)*

Предиктивне технічне обслуговування, або PdM, — це метод проактивного обслуговування, який використовує дані про активи в режимі реального часу (зібрані вручну або за допомогою датчиків), історичні дані про продуктивність і розширену аналітику для прогнозування того, коли станеться відмова активу. Предиктивне технічне обслуговування — це складна форма профілактичного обслуговування, яка використовується організаціями з надійною програмою технічного обслуговування.

Наша аналогія з каструлею з водою може бути занадто простою для предиктивного обслуговування, але її все одно можна застосувати. Потрібно взяти дані з минулого досвіду (час, необхідний для закипання води, варіації часу кип'ятіння залежно від кількості води та типу їжі, що готується, а також те, яке найкраще налаштування пальника для кип'ятіння води). Ці дані будуть використані для створення процедури кип'ятіння води найшвидшим і безпечним способом, не псуючи плиту та не переварюючи їжу.

Хоча обставини, за яких доцільно використовувати предиктивне технічне обслуговування, різняться для кожної організації, є деякі речі, про які слід пам'ятати, щоб допомогти прийняти рішення, коли проводити прогнозоване технічне обслуговування. Перед тим, як проводити профілактичні роботи з технічного обслуговування, слід пройти такий процес:

- визначте умовні стандарти, необхідні для ваших потреб у прогнозованому технічному обслуговуванні;
- встановіть інструменти та процеси для моніторингу;
- створіть автоматичні тригери, необхідні для індикації несправності або необхідності проведення технічного обслуговування;

					0032.226522.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		21

- збирайте необхідні дані та відстежуйте їх

- створіть наряд-замовлення при дотриманні зазначених умов технічного обслуговування;

- виконайте технічне обслуговування.

Щоб краще зрозуміти, коли слід використовувати предиктивне обслуговування, давайте розглянемо кілька прикладів того, як і коли воно використовується. Компанія може використовувати предиктивне технічне обслуговування, щоб запобігти руйнівним, дорогим відмовам. Транспортні компанії, особливо залізничні системи, використовують предиктивне технічне обслуговування через Інтернет речей (IoT) для прогнозування збоїв і виконання технічного обслуговування до того, як ці несправності стануть проблемами безпеки. Заводи використовують інфрачервону технологію як частину профілактичного обслуговування для виявлення перегріву техніки.

Існує кілька переваг предиктивного технічного обслуговування для організацій, які збільшуються, коли програма предиктивного обслуговування діє протягом деякого часу:

- економія коштів, оскільки предиктивне обслуговування займає менше часу та коштує дешевше;

- зменшує втрати робочого часу, запасних частин і матеріалів для технічного обслуговування;

- прогнозує режим відмови активів за допомогою регулярного моніторингу економічно ефективним способом;

- скорочує коригувальне обслуговування;

- надає можливість моніторингу стану аактивів у режимі реального часу;

- забезпечує мінімальну та передбачувану перерву у виробництві;

- забезпечує найвищу рентабельність інвестицій (ROI) серед усіх типів технічного обслуговування.

Це один із найсучасніших типів технічного обслуговування, тому його слід впроваджувати, коли команда технічного обслуговування добре справляється з

						Арк.
					0032.226522.МДР.2024.001	
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		22

іншими видами технічного обслуговування. Для того, щоб впровадити предиктивне обслуговування, потрібно пройти кілька етапів:

- визначте активи, придатні для предиктивного технічного обслуговування;
- підтвердіть належну технічну інфраструктуру для підтримки програми PdM;
- визначте умови, за яких моніторинг дозволить спрогнозувати майбутню відмову активів;
- вирішіть, які датчики будуть використовуватися для моніторингу умов;
- встановіть датчики;
- виділіть ресурси для виконання завдань PdM;
- навчіть співробітників інтерпретувати дані;
- збирайте та аналізуйте дані, виявляйте несправності та прогнозуйте час до відмови;
- розрахуйте та встановіть найкращий графік технічного обслуговування, щоб економічно ефективно запобігти виходу з ладу активів

Даний процес можна спростити шляхом використання програмного забезпечення для збору даних, яке можна інтегрувати з системою CMMS. Значення з програмного забезпечення предиктивного обслуговування можуть бути передані в систему CMMS, а замовлення на виконання робіт можуть бути автоматично сформовані програмним забезпеченням CMMS. Предиктивне технічне тестування проводиться автоматично датчиками на кожній машині (або шляхом ручного спостереження), а результати можуть бути записані в програмне забезпечення CMMS як частина історії активів. Звіт про технічне обслуговування також може бути згенерований для порівняння результатів різних аналізів прогнозного технічного обслуговування.

### **1.3 Аналіз праць закордонних учених у питанні оцінки ризиків при виборі системи утримання локомотивів.**

Аналіз праць закордонних учених проведено шляхом опрацювання бібліографічної і реферативної бази даних SCOPUS [19], у якій був сформований

					0032.226522.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		23

запит «risk-based AND maintenance AND railways». За даним запитом було отримано посилання на 62 документи (рис. 1.2).

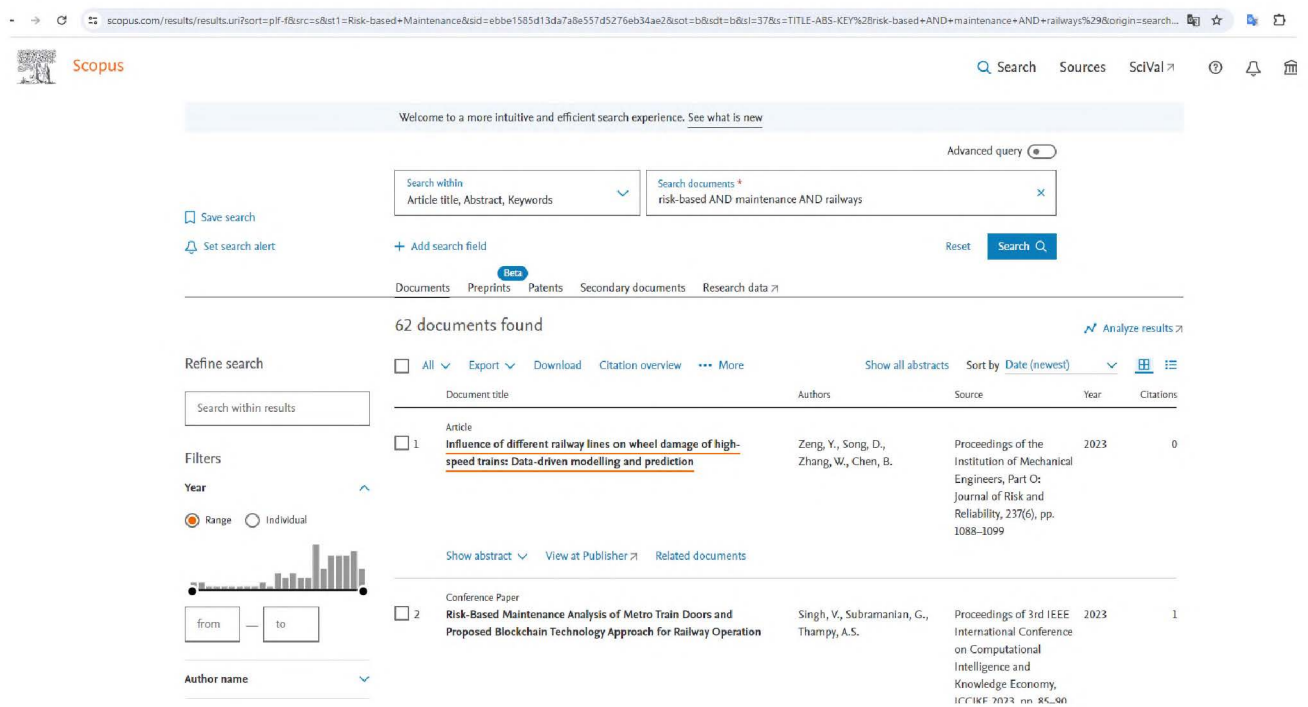


Рисунок 1.2 – Результати пошуку наукових праць у реферативній базі SCOPUS.

Розглянемо праці, які безпосередньо стосуються теми магістерської роботи.

У праці [7] визначено важливі для безпеки компоненти рухомого складу та досліджено їхні відповідні механізми відмови, основні причини та потенційний вплив на роботу залізниць на основі даних про відмови, зібраних від експлуатуючої компанії. Надані рекомендації та відповідні рішення профілактичного обслуговування для раціонального використання залізничного рухомого складу.

У праці [3] відзначається, що залізничне машинобудування зараз стикається з різними проблемами, викликаними передчасним виходом з ладу залізничних засобів, які потребують дорогих і трудомістких робіт з технічного обслуговування. Залізничні активи загалом поділяються на два типи: рухомий склад, який включає активи, які можуть пересуватися по залізниці, та інфраструктура, яка відноситься до основних фондів. Регулярна перевірка та

технічне обслуговування цих двох типів активів має важливе значення для забезпечення доступності та надійності мережі, а також безпеки та комфорту пасажирів. З цією метою особа, яка приймає рішення, має визначити найбільш прийнятний тип, частоту та ступінь (якість) технічного обслуговування залізничних активів таким чином, щоб загальні витрати, понесені протягом життєвого циклу, були мінімізовані та/або надійність залізничної мережі максимально підвищилася. Ефективним підходом до зменшення витрат на технічне обслуговування залізниці є встановлення пріоритетів і планування завдань з технічного обслуговування на основі критичності з використанням методів і інструментів аналізу ризиків. Інспекції та управлінню техобслуговуванням залізничної інфраструктури на основі оцінки ризиків на сьогоднішній день приділено достатню увагу, однак мало досліджень зосереджено на активах рухомого складу.

У роботі [1] представлено стохастичну модель для планування діяльності з технічного обслуговування, що базується на прогнозуванні та оцінці ризику, у залізничному секторі. Новизна підходу полягає у впровадженні концепції ризику в плануванні технічного обслуговування, таким чином передбачаючи, що пріоритети технічного обслуговування базуються на критичності активів, визначеній відповідною ймовірністю відмови, пов'язаною з умовами деградації активів, а також подальшими прямими та непрямими збитками.

Цей підхід належить до рамок «прогнозного технічного обслуговування», метою якого є втручання, коли актив досяг певного стану деградації. Зокрема, ця робота чітко розглядає стохастичну природу ризику та операцій з технічного обслуговування в реальному світі, вводячи стохастичні терміни. При цьому варто зазначити, що адаптивні моделі перепланування лише частково вирішують цю проблему, оскільки вони розглядають детерміновані підпроблеми загальної проблеми та не можуть постійно змінювати стохастичні вхідні змінні. Тому, щоб впоратися з цією проблемою, у цій статті проблема планування технічного обслуговування на основі оцінки ризику сформульована в термінах стохастичного

					0032.226522.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		25

програмування. Після надання формального опису методології надаються деякі експериментальні результати та даються вказівки щодо її можливого застосування.

Мета роботи [□5] полягає в тому, щоб запропонувати структуру моделювання, яка є критичною по відношенню до існуючих правил технічного обслуговування рухомого складу і покращити політику примусового технічного обслуговування, не порушуючи його основну структуру. Розглянутий парк складається з ідентичних поїздів. Фіксоване періодичне планування профілактичного обслуговування встановлюється виробниками для вимог безпеки та експлуатаційної якості. Кожен капітальний ремонт включає в себе набір заздалегідь визначених завдань, таких як перевірка, мінімальний ремонт і профілактична заміна деяких компонентів. Під час перевірки, якщо рівень зносу компонента перевищує первинний поріг заміни, його замінюють незалежно від стану. У разі виходу з ладу хоча б одного компонента під час роботи поїзда його негайно замінюють. У [□5] автори пропонують запровадження кон'юктурної діяльності з технічного обслуговування для покращення стратегії періодичного технічного обслуговування, працюючи в межах обмежень накладеного планування. Неналежне технічне обслуговування може включати ранні огляди або прискорені профілактичні заміни деяких компонентів (щодо запланованої профілактичної заміни або порогу їх первинної заміни). Завдання динамічного обслуговування може бути застосоване додатково під час коригувальних заходів або попередньо запланованих оглядів. Для врахування стохастичних залежностей між компонентами системи використовуються матриці залежностей. Введено поняття «особливий поріг заміни», призначений для кон'юктурної профілактичної заміни, а також ступінь гнучкості дат огляду. Для оптимізації також враховуються численні обмеження: доступність, години роботи та кількість систем, що одночасно оглядаються. Проведено порівняння між стратегією періодичного обслуговування з опортуністичними завданнями та без них.

У праці [□2] автори зазначають, що на залізничному транспорті необхідно

					0032.226522.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		26

постійно проводити технічне обслуговування, щоб забезпечити безпеку та безперервну роботу. У цій структурі, хоча, з одного боку, незаплановані коригувальні заходи з технічного обслуговування, які виконуються при виникненні несправності, є дорогими та призведуть до низької якості обслуговування, з іншого боку, профілактичне технічне обслуговування, яке не враховує фактичний стан активів, часто є непотрібним і, як виявляється, створює проблеми і витрати, яких можна уникнути. Щоб вирішити цю проблему, авторами пропонується система підтримки прийняття рішень на основі оцінки ризику для планування діяльності з прогнозованого технічного обслуговування. У такій структурі втручання плануються з урахуванням прогнозованого стану зносу залізничних технічних засобів і виконуються при досягненні заданого порогу, таким чином мінімізуючи ймовірність як раптових, так і непотрібних операцій. З метою пошуку оптимального планування прогнозного технічного обслуговування, у цій статті також розглядається розподілений у просторі аспект залізничної інфраструктури, визначаючи найкращий шлях і призначення діяльності для кожної групи технічного обслуговування. Модель планування сформульована як задача змішаного цілочисельного лінійного програмування (MILP), спрямована на мінімізацію ризику відповідно до рекомендацій ISO 55000. Запропоновано матеверистичний підхід до вирішення, який застосовано до реальної залізничної мережі. Відповідні результати показують, як запропонована модель планування може використовувати результати інструментів прогнозування та моделей зносу на основі даних, отриманих на місці, для пом'якшення ризику раптового збою за допомогою економічно ефективного плану обслуговування на рівні мережі.

У роботі [6] автори відзначають, що технічне обслуговування проводиться для запобігання виникненню подій, які призводять до несправності та переривання виробничого процесу або роботи відповідного обладнання. Одним із основних підходів у технічному обслуговуванні є визначення ризику виходу обладнання з ладу. Оскільки зниження рівня ризику відмови підвищує надійність

					0032.226522.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		27

і доступність обладнання та знижує вартість зупинки, визначення ризику відмови є важливим. У статті представлено нечіткий гібридний підхід, включаючи режим відмови та ефективний аналіз (FMEA), лабораторну техніку випробування та оцінки прийняття рішень (DEMATEL) та аналітичний мережевий процес (ANP), щоб вибрати відповідну політику технічного обслуговування шляхом визначення ризику відмови. Автори прагнуть розробити метод, заснований на оцінці ризику, для вибору належної стратегії технічного обслуговування, щоб мати доступне та надійне обладнання для проведення колійних робіт. Через врахування однакової ваги факторів ризику, виникнення збоїв, тяжкості збою та здатності виявлення збоїв у FMEA традиційний метод FMEA не може правильно передбачити поведінку системи.

Отже, у цій статті фактори ризику як нечіткі змінні пропонуються та оцінюються за допомогою нечітких лінгвістичних термінів і нечітких рейтингів. У конкретному дослідженні цей підхід використовується для оцінки та визначення ризику режимів відмови для залізничної компанії.

Спочатку нечітка FMEA використовується для визначення основного ризику та підризиків режимів відмови. По-друге, нечіткий метод DEMATEL використовується для того, щоб висунути взаємозв'язок між основними ризиками, які визначаються за допомогою нечіткого FMEA. Потім ваги підризиків розраховуються за допомогою нечіткого підходу ANP на основі причинно-наслідкових зв'язків, які виявляються за допомогою методу DEMATEL. Нарешті, ваги підризиків визначаються множенням ваг, отриманих з нечіткої FMEA, на ваги суперматриці ANP. Вагові коефіцієнти підризиків були визначені на основі цих розглянутих залежностей, і ці ваги були використані для тримбовки для визначення політики технічного обслуговування. Нарешті, було розроблено деякі стратегії та пропозиції щодо потреб у зменшенні ризиків та покращенні доступності обладнання.

У роботі [9] представлено методологію моделювання прийняття рішень щодо технічного обслуговування на основі оцінки ризиків для оптимізації

									Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата	0032.226522.МДР.2024.001				28

технічного обслуговування залізничних активів, яка враховує цільові ризики та витрати на технічне обслуговування в процесі прийняття рішень. Підхід до аналізу ризику «знизу вгору» було розроблено з використанням підходу нечіткої аргументації (FRA) та процесу нечіткої аналітичної ієрархії (Fuzzy-AHP) для створення моделі ризику. Модель загальних витрат також була розроблена для оцінки витрат на ремонт/оновлення, технічне обслуговування та перевірку продуктивності. Потім була розроблена модель підтримки прийняття рішень щодо технічного обслуговування на основі оцінки ризику шляхом інтеграції моделі ризику з моделлю витрат, у якій методи багатокритеріального прийняття рішень (MCDM) використовуються для обробки запропонованої моделі підтримки прийняття рішень щодо технічного обслуговування на основі ризику. Ілюстративний приклад на ділянці вибору рішення щодо технічного обслуговування колійної системи використано для демонстрації застосування запропонованої методології. Результати показують, що за допомогою запропонованої методології якісні та кількісні дані про ризики та інформацію щодо витрат на технічне обслуговування, пов'язаних із залізничними активами, можна оцінити ефективно та результативно, що надає дуже корисну інформацію залізничним інженерам, менеджерам та особам, які приймають рішення.

У роботі [18] відзначається, що колеса є життєво важливими компонентами залізничних транспортних засобів і можуть стикатися з різними проблемами під час тривалої експлуатації, наприклад, зносом і дефектами. Існуюча стратегія превентивного обточування з фіксованим інтервалом обточування та глибиною різання спричиняє величезні витрати на обслуговування. Щоб зменшити вартість життєвого циклу (LCC), авторами пропонується оптимальна стратегія обточування під час життєвого циклу (LCR) для профілактичного обслуговування коліс поїзда на основі оцінки ризику. Спочатку будуються ймовірнісні моделі зносу, обточування та дефектів коліс. Потім будується марківський процес прийняття рішень для моделювання повного процесу зношування колеса протягом його життєвого циклу з послідовним

					0032.226522.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		29

прийняттям рішення про обточування.

З урахуванням LCC і витрат, пов'язаних з безпекою розроблені так звані «матриці винагород». Крім того, пропонується двоконтурна схема оптимізації для досягнення оптимальної стратегії LCR, що мінімізує LCC. У внутрішньому циклі ітераційна стратегія приймається для досягнення оптимальної стратегії обточування. Ця схема забезпечує швидку конвергенцію та глобальну оптимізацію прийняття рішень щодо технічного обслуговування як для поточного, так і для капітального ремонту. Наведено приклад механізму оптимальної стратегії обточування, включаючи принципи продовження, захисту та відмови. Основні компроміси щодо глибини різання та обмежень капітального ремонту забезпечують можливість оптимізації. Дослідження конкретного випадку та польові випробування демонструють, що шляхом контролю зношування колеса та тривалості його служби стратегія LCR може не тільки зменшити LCC технічного обслуговування колеса, але й підвищити надійність і безпеку роботи колеса.

					0032.226522.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		30

## 2 МЕТОДИКА ОЦІНКИ РИЗИКІВ У СИСТЕМІ УТРИМАННЯ ЛОКОМОТИВІВ

### 2.1 Загальне поняття про ризик-орієнтоване технічне обслуговування.

Головною метою управління технічним обслуговуванням є мінімізація несподіваних відмов обладнання економічно ефективним способом. Технічне обслуговування на основі оцінки ризику (RbM) – це підхід, який використовує ризик неотримання ресурсів на технічне обслуговування. Розглянемо основні принципи, які закладені у систему технічного обслуговування на основі оцінки ризиків.

Ризик-орієнтоване технічне обслуговування (RbM) – це методологія технічного обслуговування, яка використовує принципи оцінки ризиків для оптимізації завдань технічного обслуговування та розподілу ресурсів. Він передбачає систематичне визначення критичності засобів (активів), режимів відмови та ризику невдачі з метою створення плану технічного обслуговування, який мінімізує ризик відмови.

Використовуючи ризик-орієнтований підхід до технічного обслуговування, зусилля з технічного обслуговування перенаправляються з засобів з найнижчим ризиком відмови на засоби з найбільшим ризиком відмови. Засоби з високим рівнем ризику різняться залежно від галузі та організації. Розглянемо декілька прикладів:

- Основні системи (наприклад, електричні, сантехнічні, кліматичні тощо) у будівлях і спорудах
- Життєво важливі виробничі лінії на виробничих підприємствах
- Важка техніка, що використовується при будівництві та обслуговуванні інфраструктури
- Автомобілі, що використовуються для перевезення вантажів.

Ризик-орієнтоване обслуговування є критично важливим, оскільки незаплановані простой складають основну частку витрат підприємств.

					0032.226522.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		31

Дослідження [□8] показали, що витрати на незаплановані простої досягають до 250 000 доларів на годину і знижують продуктивність на 20%.

Для мінімізації даних витрат, команди технічного обслуговування використовують різноманітні стратегії та методи технічного обслуговування, але змушені робити це за низьку ціну. Це спонукає організації розвивати свої стратегії технічного обслуговування, що виходять за рамки традиційних:

- коригувальне технічне обслуговування (CM) [□11];
- технічне обслуговування, що базується на часі (TbM) [□16];
- попереджувальне (превентивне) технічне обслуговування (PM) [□13].

Технічне обслуговування, засноване на оцінці ризиків, надає організаціям системний спосіб визначення типу та частоти технічного обслуговування, яке отримує кожен засіб. Замість того, щоб витратити час і енергію на обслуговування обладнання, яке цього не потребує (що може принести більше шкоди, ніж користі), організації можуть виділити достатні ресурси на технічне обслуговування засобів, збої в роботі яких мають найбільший вплив на організацію.

Існує багато способів, за допомогою яких організації можуть підвищити надійність, а також знизити витрати на технічне обслуговування. Ризик-орієнтоване обслуговування – лише один із таких підходів. До інших належать:

- Технічне обслуговування на основі стану (CbM) [□10];
- Предиктивне технічне обслуговування (PdM) [□12];
- Технічне обслуговування, орієнтоване на надійність (RCM) [□14];
- Технічне обслуговування сумарної продуктивності (TPM) [□17];
- Аналіз режимів і наслідків відмов (FMEA) [□4].

Підхід до обслуговування, заснований на оцінці ризиків рекомендується до застосування у наступних випадках:

- для дуже дорогого унікального обладнання, яке складно замінити;
- при обмеженому бюджеті на технічне обслуговування або обмежених ресурсах на технічне обслуговування

									Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата	0032.226522.МДР.2024.001				32

- при наявності віддалених засобів, що ускладнює регулярне технічне обслуговування внаслідок необхідності здійснення поїздок;
- для критично важливого обладнання для якого відсутні альтернативи та заміни;
- якщо стоїть мета підвищення рентабельності інвестицій (ROI) шляхом оптимізації поточного плану технічного обслуговування.

## **2.2 Алгоритм впровадження ризик-орієнтованого технічного обслуговування.**

### *Методика впровадження ризик-орієнтованого обслуговування*

Проведення технічного обслуговування на основі оцінки ризиків є систематичним процесом, що означає, що існує загальноприйнята послідовність кроків, яких слід дотримуватися. Двома основними частинами цього процесу є:

- проведення аналізу критичності;
- оцінка ризику.

Важливо зазначити, що впровадження технічного обслуговування, заснованого на оцінці ризиків, є технічним процесом, який передбачає отримання інформації від міжфункціональної команди, включаючи експлуатацію, технічне обслуговування, інжиніринг, безпеку та інші.

Методологія технічного обслуговування, заснованої на оцінці ризиків полягає у наступному

### ***Етап 1: Збір даних про технічне обслуговування***

З метою впровадження технічного обслуговування на основі оцінки ризиків, необхідно зібрати наступні дані про технічні засоби:

- Назва та кількість засобів
- Вартість придбання
- Вік
- Середній час напрацювання на відмову (MTBF)
- Статистичні дані по середньому часу ремонту (MTTR)

					0032.226522.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		33

- Вартість незапланованих простоїв
- періодичність технічного обслуговування

Ця інформація є легко доступна в більшості сучасних комп'ютеризованих систем управління технічним обслуговуванням (CMMS).

**Етап 2: Визначення критичності технічних засобів**

Технічне обслуговування на основі оцінки ризиків надає пріоритет роботам з технічного обслуговування критично важливих технічних засобів. Критичність - це міра важливості технічного засобу для організації. Критичні технічні засоби, як правило, впливають на організацію в цілому або являють собою єдину точку критичного збою. Наприклад, котел має вирішальне значення для роботи системи опалення.

Організації використовують аналіз критичності, щоб оцінити серйозність відмови технічних засобів для організації. Поширеним інструментом для проведення аналізу критичності є матриця критичності, яка наведена на рис 2.1. Події відмов ранжуються в матриці за ступенем серйозності за кількома категоріями, такими як безпека, виробництво та вартість.

Оскільки існує кілька способів відмови технічного засобу, кожен з яких має різний рівень ризику, потрібно встановити базовий рівень. Необхідно вибрати одну ймовірну відмову, яка має найсерйозніші наслідки. Для оцінки відмови за кожною категорією використовується дана матриця.

Ці рейтинги використовуються для створення рейтингу критичності технічних засобів (ACR). ACR можна розрахувати, помноживши рейтинг у кожній категорії разом, додавши бали разом або просто взявши найвищий бал у будь-якій категорії. Наприклад, припустимо, що серйозність несправності оцінюється наступним чином:

Безпека = 2

Навколишнє середовище = 1

Виробництво = 3

Обладнання = 1

					0032.226522.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		34

МАТРИЦЯ КРИТИЧНОСТІ		Серйозність				
		1 Незначно	2 Відчутно	3 Помірно	4 Серйозно	5 Катастрофічно
Категорія	<b>Безпека</b>	Травми, що не потребують медичної допомоги	Незначні травми, що потребують медичної допомоги	Серйозні травми, що потребують госпіталізації чи тривалого лікування	Травми, що небезпечні для життя чи множинні серйозні травми, які вимагають госпіталізації	Смертельні травми чи множинні небезпечні для життя травми
	<b>Навколишнє середовище</b>	Відсутнє або незначне забруднення	Незначне забруднення; може бути локалізовано; вимагається повідомлення у відповідні органи	Помірне забруднення; заходи боротьби мінімальної ефективності	Значне забруднення; вимагається евакуація	Велике забруднення повітря, води і т.п. Можливе притягнення до кримінальної відповідальності
	<b>Виробництво</b>	Незначна зупинку	Зупинка коротше допустимої межі	Зупинка довше допустимої межі; мінімальне відновлення	Зупинка довше допустимої межі; значне відновлення	Тривала зупинка в роботі. Відновлення неможливе
	<b>Обладнання</b>	Мінімальне пошкодження обладнання; відсутнє пошкодження іншого обладнання	Незначне пошкодження обладнання; мінімальне пошкодження іншого обладнання	Значне пошкодження обладнання, незначне пошкодження іншого обладнання	Руйнування обладнання; значне пошкодження іншого обладнання	Руйнування обладнання та іншого обладнання
	<b>Кошти</b>	Збиток менше ніж 250 тис дол.	Збиток від 500 тис дол. до 2 млн дол.	Збиток від 2 млн дол. до 6 млн дол.	Збиток від 6 млн дол. до 10 млн дол.	Збиток більше 10 млн дол.

Рисунок 2.1 – Матриця критичності.

					0032.226522.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		35

Вартість = 1

Отже, ACR буде таким:

6 – при множенні ( $2 \times 1 \times 3 \times 1 \times 1 = 6$ )

8 – при додаванні ( $2 + 1 + 3 + 1 + 1 = 8$ )

3 – при виборі найвищої категоріальної оцінки (виробництво, в даному прикладі).

Який би спосіб не був вибраний, вищий бал означає, що технічний засіб є більш критичним порівняно з іншими, які ви аналізували.

### ***Етап 3: Визначення ймовірності відмови***

Після того, як критичність відома, необхідно визначити ймовірність відмови. Як і у випадку з критичністю, ймовірність відмови оцінюється за шкалою від 1 до 5 (можна використовувати і більшу шкалу).

Розглянемо приклад використання 5-ти бальної шкали, де:

1 – відмова дуже мало ймовірна (очікується, відмова стається в середньому рідше, ніж раз на 2 роки);

2 – відмова мало ймовірна (очікується, що вийде з ладу в середньому рідше, ніж раз на рік);

3 – випадкові відмови (очікується, що відмови стаються в середньому 1-2 рази на рік);

4 – ймовірні відмови (очікується, що відмови стаються в середньому більше двох разів на рік);

5 – часті відмови.

### ***Етап 4: Розрахунок числа пріоритетності ризику***

Число пріоритетності ризику (RPN) – це числове значення, яке кількісно оцінює ризик відмови технічного засобу. Воно розраховується шляхом множення рейтингу серйозності відмови технічного засобу на рейтинг ймовірності відмови. Більш складні розрахунки також враховують рейтинг виявлення, який кількісно визначає ймовірність виявлення неминучої несправності до того, як вона станеться. У нашому випадку показник виявлення розглядати не будемо.

					0032.226522.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		36

У таблиці нижче наведено розраховане число пріоритету ризику для 3 різних активів.

Таблиця 2.1 - Приклад розрахунку числа пріоритетності ризику

	Серйозність відмови	Ймовірність відмови	RPN
Технічний засіб 1	2	4	8
Технічний засіб 2	5	1	5
Технічний засіб 3	4	3	12

У цьому прикладі серйозність відмови була визначена за допомогою найвищого показника оцінки серйозності в будь-якій категорії з матриці критичності, показаної раніше. Імовірність відмови відповідає 5-бальній шкалі з попереднього етапу.

#### ***Етап 5: Аналіз результатів***

Для прикладу розглянемо, які висновки можна зробити для вищенаведеного випадку:

Технічний засіб 1 з найбільшою ймовірністю вийде з ладу, але наслідки відмови відносно незначні. Не виключено, що проблеми надійності пов'язані старінням обладнання або неадекватним профілактичним обслуговуванням, однак потребуються подальші дослідження.

Виходячи зі значення RPN, Технічний засіб 2 має найменший ризик. Однак, незважаючи на те, що ймовірність низька, ступінь тяжкості висока. У цьому випадку відмовам варто запобігати.

Технічний засіб 3 має найбільший ризик, згідно з його RPN. Збій трапляється на регулярній основі і призводить до відносно важких наслідків. Пріоритет повинен бути відданий саме цьому технічному засобу.

					0032.226522.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		37

### Етап 6: Пріоритизація відмов технічних засобів

Число пріоритетності ризику дозволяє легко порівнювати ризики, пов'язані з відмовами, відносно один одного, і визначати, які з них вимагають невідкладних дій. Одним з інструментів, який можна використовувати, є матриця ризиків (рис. , подібна до тієї, що показана нижче.

		ЙМОВІРНІСТЬ				
		1	2	3	4	5
СЕРЬОЗНІСТЬ	1	1	2	3	4	5
	2	2	4	6	8	10
	3	3	6	9	12	15
	4	4	8	12	16	20
	5	5	10	15	20	25

Рисунок 2.2 – Матриця ризиків

Таблиця показує усі можливі бали за пріоритетом ризику за 5-бальною шкалою, позначеною кольором за рівнем ризику.

У цій таблиці показники зеленого кольору представляють технічні засоби з найменшим рівнем ризику та низьким пріоритетом. Жовті та помаранчеві бали представляють технічні засоби з низьким або середнім ризиком та середнім або високим ризиком відповідно. Оцінка червоного кольору вказує на те, що відмова технічного засобу пов'язана з високим ризиком і має бути пріоритетом для команди технічного обслуговування.

Незважаючи на те, що матриця є корисним інструментом для прийняття рішень, вона не замінює інші оцінки. Наприклад RPN для Технічного засобу 2, як показано вище, дорівнював 5, що, згідно з матрицею, робить його низькопріоритетним. Однак його тяжкість оцінюється в 5 балів. Навіть якщо не очікується, що відмова станеться, все одно варто спробувати запобігти даній

відмові, особливо якщо це може призвести до смертельних травм, знищити обладнання або створити екологічну кризу.

### ***Етап 7: Розробка заходів по зниженню ризиків***

Після визначення технічних засобів, відмови яких становлять найбільшу загрозу для організації, необхідно створити план технічного обслуговування, щоб запобігти майбутнім відмовам. Найбільш поширеними методами обслуговування є:

- коригувальне технічне обслуговування (CM) [□11];
- профілактичне обслуговування (PM) [□13];
- технічне обслуговування на основі стану (CbM) [□10];
- предиктивне технічне обслуговування (PdM) [□12].

Для вибору техніки використання необхідно враховувати наступне:

- Які ресурси для обслуговування є у розпорядженні?
- Які рекомендації виробника по обслуговуванню?
- Скільки років технічному засобу та яка тривалість його експлуатації?
- Яка вартість заміни технічного засобу?
- Чи економічно вигідно запобігати відмові?
- Чим загрожує незапобігання цій відмові?
- Які ще зміни потрібно внести, щоб підтримати цю стратегію?

### ***Етап 8: Удосконалення***

Оптимізація програми технічного обслуговування відповідно до ризик-орієнтованого підходу не є одноразовою подією. Потрібно постійно оновлювати рейтинги критичності та ризику з метою поліпшення ключових показників управління технічними засобами. Після того, як буде вирішено питання технічних засобів з найвищим ризиком, необхідно зосередитись на інших технічних засобах і повторювати процес знову і знову. Цей процес також можна використовувати, щоб визначити пріоритетність конкретних відмов відмов в межах однієї групи технічних засобів.

					0032.226522.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		39

## 2.3 Математичний апарат ризик-орієнтованої системи утримання локомотивів.

*Визначення загальної ймовірності відмови в результаті дії різних причин.* Оцінка ймовірності відмови є складним завданням, оскільки вимагає ретельного аналізу даних про історичний стан, протоколів перевірок та інших факторів, що впливають на продуктивність рухомого складу. Ймовірність того, що в компоненті рухомого складу станеться несправність, безпосередньо пов'язана з ймовірністю (ймовірністю) виникнення пов'язаних з нею першопричин.

Позначимо через  $A_j, j = 1, \dots, 6$ , подію, у якій першопричина  $j$  призводить до відмови. Тоді сумарну ймовірність відмови ( $PoF$ ) за заданий інтервал  $(0, t)$  можна визначити наступним чином:

$$PoF(t) = \Pr\left(\bigcup_{j=1}^6 A_j(t)\right) = \sum_{j=1}^6 \Pr(A_j(t)) - \sum_{j=1}^6 \sum_{k>j}^6 \Pr(A_j(t) \cap A_k(t)) + \dots - \Pr\left(\bigcap_{j=1}^6 A_j(t)\right), \quad (2.1)$$

де  $\cup$  представляє об'єднання подій.

Нехай  $PoF_j(t), j = 1, \dots, 6$  являє собою ймовірність того, що першопричина  $j$  призведе до відмови до точки часу  $t$ . У разі взаємовиключних подій (відмов), загальну ймовірність відмови можна визначити шляхом підсумовування ймовірностей відмови компонента через різні першопричини, тобто:

$$PoF(t) = \sum_{j=1}^6 PoF_j(t). \quad (2.2)$$

						Арк.
					0032.226522.МДР.2024.001	
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		40

Ймовірність відмови через кожну першопричину може бути обчислена окремо за допомогою аналізу даних, наданих компаніями-операторами поїздів, і використанням експертних методів виявлення. Відповідні стохастичні моделі, що використовуються для досягнення цієї мети, представлені наступним чином.

**Електричні несправності.** Позначимо через  $PoF_1(t)$  ймовірність того, що компонент рухомого складу вийде з ладу протягом інтервалу часу  $(0, t)$  через електричну несправність. Тоді:

$$PoF_1(t) = \Pr[T_{elec} < t] = F_{T_{elec}}(t), \quad (2.3)$$

де  $T_{elec}$  - час до виникнення електричної несправності в компоненті з відповідною кумулятивною функцією розподілу (CDF), заданою  $F_{T_{elec}}(\cdot)$ .

**Структурні пошкодження.** Для визначення ймовірності відмови, викликані структурними пошкодженнями, використовується метод граничного стану. Позначимо  $PoF_2(t)$  ймовірність того, що компонент рухомого складу вийде з ладу протягом інтервалу часу  $(0, t)$  через пошкодження конструкції. Тоді:

$$PoF_2(t) = \Pr[R_t - s \leq 0] = F_{R_t}(s), \quad (2.$$

4)

де  $R_t$  - несуча здатність компонента (який часто називається опором) в інтервалі часу  $(0, t)$  з відповідним CDF, заданим  $F_{R_t}(\cdot)$ ;

$s$  - ефект навантаження, що виникає в результаті різних умов експлуатації.

					0032.226522.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		41

У випадку, коли навантаження невизначене і моделюється випадковою величиною  $S$  з функцією густини ймовірності  $f_S(\cdot)$ , рівняння (4) набуває наступного вигляду:

$$PoF_2(t) = \Pr[R_t - S \leq 0] = \int_0^\infty F_{R_t}(S) f_S(S) dS. \quad (2.5)$$

**Функціональні збої.** Позначимо як  $PoF_3(t)$  ймовірність того, що компонент рухомого складу вийде з ладу протягом інтервалу часу  $(0, t)$  через функціональний збій (наприклад, не відкриється, не закриється). Тоді:

$$PoF_3(t) = \Pr[T_{func} < t] = F_{T_{func}}(t). \quad (2.6)$$

де  $T_{func}$  - час до виникнення функціонального збою в компоненті з відповідним CDF, заданим  $F_{T_{func}}(\cdot)$ .

**Зношення.** Для визначення ймовірності відмови зношення використовується імовірнісна модель кумулятивного збитку, в якій відмова відбувається, коли процес зношення перевищує певний пороговий рівень. Позначимо як  $PoF_4(t)$  ймовірність того, що компонент рухомого складу вийде з ладу через зношення. Тоді:

$$PoF_4(t) = \Pr[a_{cr} - A(t) < 0], \quad (2.7)$$

де  $A(t)$  і  $a_{cr}$  - відповідно, тривалість процесу зношення (наприклад, розвитку втомної тріщини) в момент  $t$  і критичну довжину зношення, при якій відбувається руйнування.

					0032.226522.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		42

Нехай випадкові величини  $T_0$  і  $T_{cr}$  представляють час початку процесу зношення і час (з моменту ініціації) для досягнення критичного розміру  $a_{cr}$  відповідно. Тоді, рівняння (7) може бути записано як:

$$PoF_4(t) = \Pr[T_0 + T_{cr} < t] = \int_0^t f_{T_0}(t-y)F_{T_{cr}}(y)dy = \int_0^t F_{T_0}(t-y)f_{T_{cr}}(y)dy \quad (2.8)$$

де  $f_{T_0}$  і  $f_{T_{cr}}$  – функції густини ймовірності;

$F_{T_0}$  і  $F_{T_{cr}}$  – CDF для відповідних випадкових величин.

**Помилки.** Враховуються два різних типи помилок: операційні помилки та людські помилки. Операційні помилки викликані несправністю обладнання, а людські помилки виникають через неправильне виконання людських дій під час роботи поїзда. Позначимо через  $PoF_5(t)$  ймовірність того, що помилка або клас помилок призведе до відмови компонента протягом інтервалу часу  $(0, t)$ . Тоді:

$$PoF_5(t) = \Pr[T_{err} < t] = F_{T_{err}}(t), \quad (2.9)$$

де  $T_{err}$  - час до виникнення помилки з відповідним CDF, заданим  $F_{T_{err}}(\cdot)$ .

**Природні (зовнішні) небезпеки.** Зовнішні небезпеки – це загрози, спричинені стихійними лихами (наприклад, землетрусами, грозами та блискавками), які не можуть бути контрольовані. Припустимо, що зовнішні небезпеки виникають за неоднорідним законом Пуассона  $\{N(t) : t \geq 0\}$  з функцією інтенсивності  $h(t)$  і функцією середнього значення  $H(t)$ , тобто:

					0032.226522.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		43

$$H(t) = \int_0^t h(y) dy, t \geq 0. \quad (2.10)$$

Імовірність того, що компонент рухомого складу вийде з ладу протягом інтервалу часу  $(0, t)$  внаслідок природної події, визначається формулою:

$$PoF_6(t) = \Pr[N(t) = 0] = e^{-H(t)}. \quad (2.11)$$

### ***Визначення загальних наслідків відмови.***

Відмова компонента рухомого складу може спровокувати протягом короткого періоду послідовність відмов в інших компонентах, що призводить до обмеження швидкості, перебоїв у обслуговуванні, відміни поїздів тощо. З цієї причини виникнення відмови може накласти великі фінансові штрафи. У даній моделі розглядаються три фактори вартості як потенційні наслідки відмови, що відбуваються в рухомому складі. До них належать: витрати, пов'язані з безпекою, такі як травми, компенсація працівникам, медична допомога тощо ( $C_S$ ), витрати на M&R ( $C_{M\&R}$ ), штрафи через затримку поїзда або перебої в обслуговуванні ( $C_P$ ), та витрати на втрату репутації (або втрату коштів) у зв'язку з відміною поїзда ( $C_L$ ). Оскільки несподівані відмови часто відбуваються без будь-якого попередження в невідомий час у майбутньому, рівень інфляції також враховується для отримання реалістичних значень витрат на відмову протягом життєвого циклу виробу. З цією метою теперішні значення витрат перетворюються в майбутні вартості, застосовуючи середньорічний рівень інфляції  $r(\geq 0)$  у відсотках. Майбутня величина витрат, понесених у зв'язку з відміною поїзда в будь-який момент часу  $t$  задається формулою:

$$C(t) = (1 + r)^t \cdot C_0, \quad (2.12)$$

					0032.226522.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		44

де  $C_0$  - вартість витрат на теперішній час.

Тому завищена загальна вартість наслідків відмови в будь-який момент часу  $t$  в майбутньому розраховується наступним чином:

$$C_0 F(t) = (1+r)^t \cdot [C_S + C_{M\&R} + C_P + C_L], \quad (2.13)$$

де  $C_S$  - витрати, пов'язані з нещасними випадками;

$C_{M\&R}$  - варіюється в залежності від типу компонента, що вийшов з ладу, а також необхідних ресурсів для перевірки та технічного обслуговування (наприклад, обладнання для неруйнівного контролю, робоча сила з технічного обслуговування);

$C_P$  розраховується шляхом множення очікуваного загального часу затримки поїзда в хвилинах ( $T_d$ ) на фіксовану вартість штрафу за хвилинну затримку ( $c_p$ ).

Тобто:

$$C_P = T_d \cdot c_p. \quad (2.14)$$

Відміна поїзда визначається як нездатність поїзда дістатися до місця призначення або незупинка поїзда на передбачених графіком станціях. Загалом існує два типи відмін поїздів: повна та часткова. Повна відміна - це коли поїзд не курсує повністю або проходить менше половини запланованого кілометражу, або зупиняється менш ніж на половині передбачених графіком станцій. З іншого боку, поїзд вважається частково відміненим, якщо він проходить більше половини запланованого кілометражу та станцій, на яких передбачена зупинка. Поїзда, які завершують свій запланований маршрут, але прибувають більш ніж на 119 хвилин із запізненням до кінцевого пункту призначення, також вважаються повністю відміненими. Величина  $C_L$  розраховується шляхом множення середньої загальної

					0032.226522.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		45

кількості відмінених (частково або повністю) поїздів ( $N_C$  на фіксовану вартість репутаційних втрат (або зборів) на пасажирський поїзд ( $c_l$ ), тобто:

$$C_L = N_C \cdot c_l. \quad (2.15)$$

### ***Розрахунок загального ризику***

Після моделювання ймовірності відмови та оцінки економічних наслідків розраховується та аналізується потенційний ризик відмови компонента рухомого складу. Ризик відмови в момент часу  $t$ ,  $RoF(t)$ , кількісно оцінюється шляхом множення загальної ймовірності того, що відмова станеться до часу  $t$  і загальних наслідків відмови в момент виникнення. Тобто:

$$RoF(t) = PoF(t) \cdot CoF(t), t \geq 0. \quad (2.16)$$

де  $PoF$  і  $CoF(t)$  задаються, відповідно, рівняннями (2.2) і (2.13). Отже:

$$RoF(t) = \sum_{j=1}^6 PoF_j(t) \cdot (1+r)^t [C_S + C_{M\&R} + C_P + C_L], t \geq 0 \quad (2.17)$$

Оскільки накопичена ймовірність настання відмови є монотонною зростаючою функцією (оскільки система старіє з часом), а наслідком відмови також є незростаюча функція (як ми припускали  $r \geq 0$ ), то пов'язаний з цим ризик відмови буде описуватись безперервною монотонною функцією, що зростає з часом. Ця функція виражається в грошовому терміні, а отже, значення функції може бути використано для пріоритезації та планування програм РМ. Загалом, у будь-який момент часу активу з високим  $RoF$  надається більший пріоритет для технічного обслуговування порівняно з активами з низьким  $RoF$ , і тому його слід перевіряти частіше, ніж інші.

									Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата	0032.226522.МДР.2024.001				46

### ***Розробка програми технічного утримання на основі оцінки ризиків.***

Завдання РМ для рухомого складу, як правило, можуть бути заплановані в межах трьох часових горизонтів, а саме: короткострокові (щоденні), середньострокові (від тижня до місяця) і довгострокові (річні) на основі показників ризику. Мета, що враховується для оптимізації програм технічного утримання РМ або мінімізує загальні витрати/час простою послуг, або максимізує надійність системи/безпеку транспортування.

Для цього використовується такі методи оптимізації як нелінійна оптимізація, динамічне програмування, стохастична оптимізація тощо.

Згідно з аналізом витрат і вигод, діяльність повинна здійснюватися до тих пір, поки вигоди перевищують витрати. Тому компанії-оператору поїзда вигідно проводити РМ тільки тоді, коли зниження загального ризику відмови стає більшим, ніж витрати на проведення дії РМ над компонентом, що не вийшов з ладу ( $C_{PM}$ ). Припустимо, що складова рухомого складу залізниці підлягає  $n(=1,2,\dots)$  РМ у час  $t_1, t_2, \dots, t_n$  протягом свого життєвого циклу  $T$ .

Нехай  $0 \leq \alpha_{ij}(t) \leq 1$ ,  $i=1,2,\dots,6$  показує вплив  $i$ -го РМ, проведеного в момент часу  $t_i$ , на зменшення ймовірності виникнення відмов, що виникли в результаті першопричини  $j$ , де 0 вказує на відсутність зменшення, а 1 - на 100-відсоткове зниження ймовірності настання відмови. Таким чином, зниження ризику відмови ( $RRoF$ ), що досягається при виконанні дії РМ  $i$  в період часу,  $t_i$  виражається:

$$RRoF(t_i) = \sum_{j=1}^6 (1 - \alpha_{ij}(t_i)) PoF_j(t_i) \cdot (1+r)^{t_i} \cdot [C_S + C_{M\&R} + C_P + C_L], t \geq 0, (2.18)$$

де  $0 \leq RRoF(t_i) \leq RoF(t_i)$  для будь-якого  $t_i \geq 0$ , і  $\alpha(\cdot)$  - незростаюча функція, яка залежить від типу дій РМ (мінімальні, недосконалі або досконалі), стану технічного засобу в кожен період перевірки і т.д.

									Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата	0032.226522.МДР.2024.001				47

З метою визначення оптимального графіка РМ (із зазначенням часу проведення всіх робіт з технічного обслуговування  $T_1^*, T_2^*, \dots$  протягом життєвого циклу компонента), задача оптимізації формулюється наступним чином:

$$\max \sum_{t_1, t_2, \dots, t_n}^T RRoF(t_i) - nC_{PM}, \quad (2.19)$$

$$RoF(t_i) \leq \mu, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (2.20)$$

$$RRoF(t_i) \geq C_{PM}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (2.21)$$

$$0 < t_1 < t_2 < \dots < t_n < T; \quad n = 1, 2, \dots, \quad (2.22)$$

$$0 \leq \alpha_{ij}(t) \leq 1; \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad j = 1, \dots, 6. \quad (2.23)$$

Рівняння (2.19) являє собою цільову функцію, яка полягає в максимізації вигоди від дій РМ (тобто зниження ризику несподіваних відмов мінус витрати, пов'язані з виконанням дій РМ). Рівняння (2.20) показує, що ризик відмови активу завжди повинен бути нижче рівня  $\mu$ . Рівняння (2.21) являє собою умову, яка повинна бути виконана для того, щоб зробити дії РМ економічно вигідними. Оскільки дії РМ плануються заздалегідь, а ремонтні послуги надаються сервісним компаніям, пов'язані з ними витрати не враховуються в цьому аналізі на рівень інфляції.

Обмеження  $0 < t_1 < t_2 < \dots < t_n < T$  в рівнянні (2.22) передбачає, що кожен компонент повинен бути замінений новим після закінчення терміну його служби через вимоги безпеки або наявність фізичних або технічних обмежень (таких як технологічне старіння або конструктивні зміни). Рівняння (2.23) визначає

					0032.226522.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		48

коефіцієнт поліпшення дій РМ, тобто ступінь зниження ймовірності відмов, що виникають в результаті різних першопричин.

Графік технічного обслуговування, що ґрунтується на моделі оптимізації в рівняннях (2.19)-(2.23), може бути оновлений, коли з'являється нова інформація після виконання кожного завдання контролю.

Типовий графік РМ та його вплив на рівень ризику технічного засобу (активу) в динаміці показаний на рис 2.3.

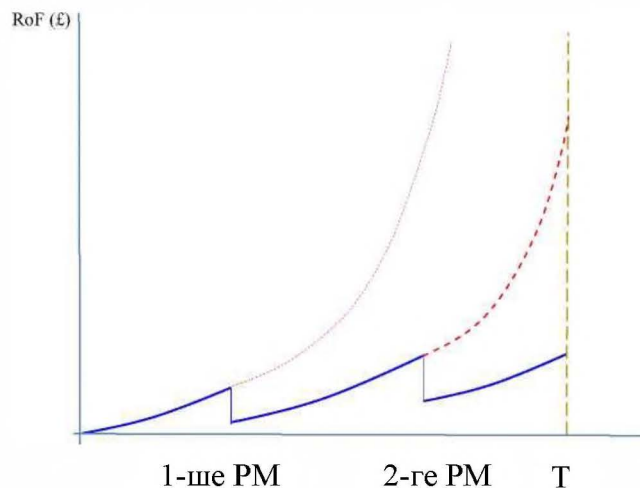


Рисунок 2.3 - Вплив профілактичного обслуговування на зниження ризику відмови

Слід зазначити, що оскільки ресурси технічного обслуговування вивільняються на критичній основі, а завдання РМ будуть виконуватися перед несподіваними збоями, витрачається менше часу та коштів, а також може виникнути менше пошкоджень. На цьому етапі оцінюється ефективність запропонованого методу інспекції та технічного обслуговування (з точки зору життєвого циклу рухомого складу, вартості всього терміну служби або надійності транспортного обслуговування) та порівнюється з методологіями інспекції, що використовуються в даний час у галузі залізничного транспорту, наприклад, напрацювання на відмову, періодичне оновлення та інспекція, орієнтована на надійність. З цією метою можуть бути використані деякі передові обчислювальні методи, такі як підхід моделювання Монте-Карло (MCS) протягом усього терміну служби рухомого складу.

					0032.226522.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		49

## 3 РОЗРОБКА РИЗИК-ОРІЄНТОВАНОЇ СИСТЕМИ УТРИМАННЯ СТРУМОПРИЙМАЧІВ

### 3.1 Аналіз конструкції та функцій елементів струмоприймача

Розглянемо струмоприймач (пантограф) електропоїзда серії 380, який є типовим для швидкісних електропоїздів, у тому числі двосистемних електропоїздів HRCS2 виробництва компанії «Hyundai Rotem» та електропоїздів ЕКр-1 виробництва «КВБЗ», які здійснюють швидкісні перевезення в Україні.

Аналіз даних про надійність пантографів показує, що їх несправності є причиною значної частки затримок і скасування поїздів. Пантограф - це підпружинений пристрій, встановлений на даху поїзда, який передає електричний струм від повітряних проводів (кабелів) до поїзда (рис. 3.1).



Рисунок 3.1 – Основні складові струмоприймача (пантографа)

Струмоприймач пантографного типу складається з декількох компонентів, серед яких дев'ять є найбільш критичними. Це:

- основа: частина пантографа, яка підтримує усю конструкцію і кріпиться на електричних ізоляторах, закріплених на даху поїзда.
- нижня рама: кріпиться до основи через коливну опору і може нахилитися до даху поїзда. На базовому кінці нижньої рами до коробчатої конструкції приварена пара вертикальних кронштейнів, які кріпляться на шарнірах базової рами. На верхньому кінці нижнього важеля до конструкції, що містить корпус підшипника, приварена ще одна пара кронштейнів, на яких обертаються верхня рама і тяга управління.
- верхня рама: верхня рама має конічний круглий поперечний переріз (для

									Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата	0032.226522.МДР.2024.001				50

покращення аеродинамічних характеристик), і має можливість повороту на голчатому підшипнику нижньої рами. Проріз на нижній стороні верхньої рами на кінці кулака дозволяє стрижню керування вийти зсередини трубки та приєднатися за допомогою важеля керування до нижньої рами. На верхньому кінці верхньої рами передбачені три кронштейни, які підтримують підшипники ковзання, що не потребують обслуговування, на яких встановлений вузол полоза.

- тяга управління: він складається з трубчастого вузла з підшипником ковзання, встановленого в регульованому штуцері на верхньому кінці, і пластини-крила, прикріпленої за допомогою болтів з розпіркою на кінці кулака. Тяга управління утримує полоз і пружинний вузол в номінальному вертикальному положенні.
- полоз: полоз складається з високоміцної порожнистої трубки, яка включає знімні пружинні вузли, прикручені болтами до кожного кінця. Він обертається в трьох підшипниках, встановлених у верхній частині верхньої рами. Полоз після складання покривається саморуйнуючою стрічкою для обмеження дуги від повітряного проводу.
- каретка: складається з алюмінієвих екструдованих профілів, які кріпляться болтами до монтажних поперечних ременів і торцевих рогів з вісьмома кріпленнями. Монтажні поперечні ремені включають точки повороту, поворот головки, обмежувачі ходу та точки кріплення полоза. Каретка сконструйована таким чином, щоб мати мінімальну динамічну масу, що відповідає вимогам до роботи вугільних вставок. У опущеному стані руху каретки перешкоджають регульовані гумові упори, встановлені на основі. Пантограф піднімається за допомогою циліндра, встановленого між основою і нижньою рамою. Демпфірування пантографа забезпечується діафрагмою всередині підйомного циліндра.
- блок управління є пневматичним і включає в себе повітряні фільтри і регулятор тиску.

					0032.226522.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		51

### 3.2 Аналіз надійності струмоприймачів

Струмоприймач схильний до ряду складних режимів відмови, які пов'язані з механічними конструкціями, електричними вузлами, пневматичною передачею, управлінням мережею тощо. Основні режими відмови були визначені за допомогою аналізу важливості і перераховані наступним чином: тріщини, розриви, втома, піттинг, знос і електричний пробій. Дані, необхідні для цього дослідження, були зібрані з літератури, а також з інформаційної системи управління технічним обслуговуванням (MMIS) компанії, яка підтримується програмним забезпеченням SAP Brown. Ця система не тільки контролює всі роботи з технічного обслуговування, що проводяться субпідрядниками, але й фіксує діяльність поїзда в експлуатації.

Електропоїзд класу 350, розглянутий у цьому дослідженні, пропрацював приблизно 16 440 год/8 733 300 км протягом перших двох років служби. Загалом за період дослідження було зареєстровано 65 випадків відмов, пов'язаних із пантографом. Кількість відмов рухомого складу, пов'язаних з блоком пантографа показано на рис. 3.2.

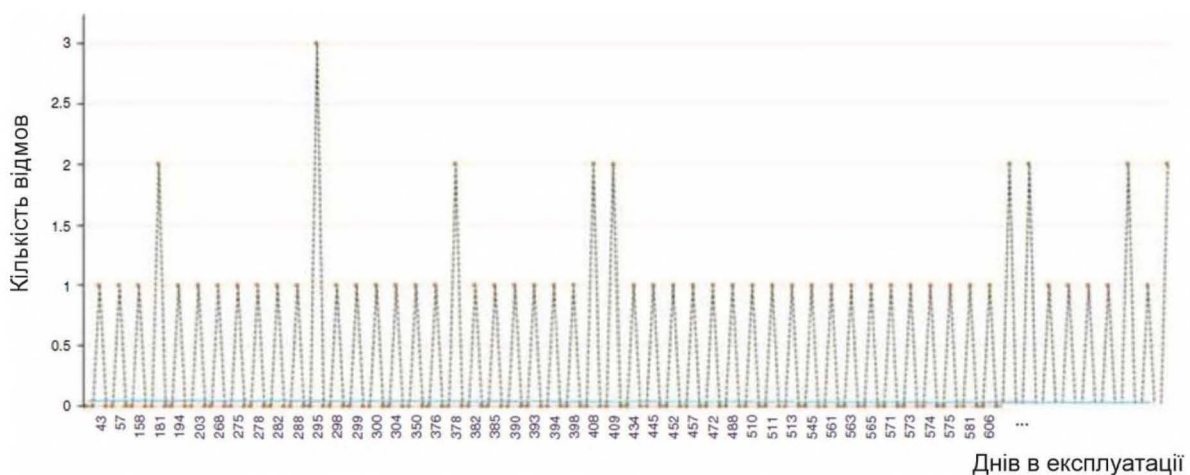


Рисунок 3.2 – Динаміка відмов струмоприймачів за час експлуатації

З проведеного аналізу було виявлено, що для опису часу напрацювання до відмови пантографів найкраще підходить експоненціальний закон розподілу. Середній час між відмовами та середній пробіг між відмовами пантографів відповідно становить 252,92 год і 134275 кілометрів.

									Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата	0032.226522.МДР.2024.001				52

У MMIS компанії першопричини відмов організовані на системній основі та ідентифікуються первинним (одна літера) та вторинним (від однієї до трьох літер) кодом. Перелік кодів дефектів, що використовуються для пантографів та колекторної апаратури, із зазначенням кількості відмов, про які повідомлялося з кожної причини, наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Коди дефектів, випадки відмов та їх частота

Код	Випадок відмови	Кількість відмов
GA	Повітряний циліндр	1
GB	Ізоляція проводів	0
GC	Вугільні вставки	11
GI	Ізолятори	1
GJ	Пристрій автоматичного опускання	1
GK	Функціонування ізольованої труби автоматичного пристрою опускання	3
GL	З'єднання кабелів/шин	0
GM	Компресор	0
GP	Функціонування трубопроводів пантографа	6
GV	Контрольні клапани	5
GZF	Невідомі причини відмови	37
Всього		65

На рис. 3.3 зображена гістограма, на якій показана кількість відмов пантографа під кожним кодом дефекту в порядку зменшення. Для того, щоб повністю зрозуміти загальні першопричини несправностей пантографа, проводиться аналіз типів збоїв, що виникли під кожним кодом, що може їх спричиняти та які дії щодо усунення мали місце або повинні відбутися. Як показано на малюнку, найбільша кількість відмов, пов'язаних із системою

					0032.226522.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		53

пантографа, була закодована під GZF (перевірено, але неможливо визначити фактичну несправність).

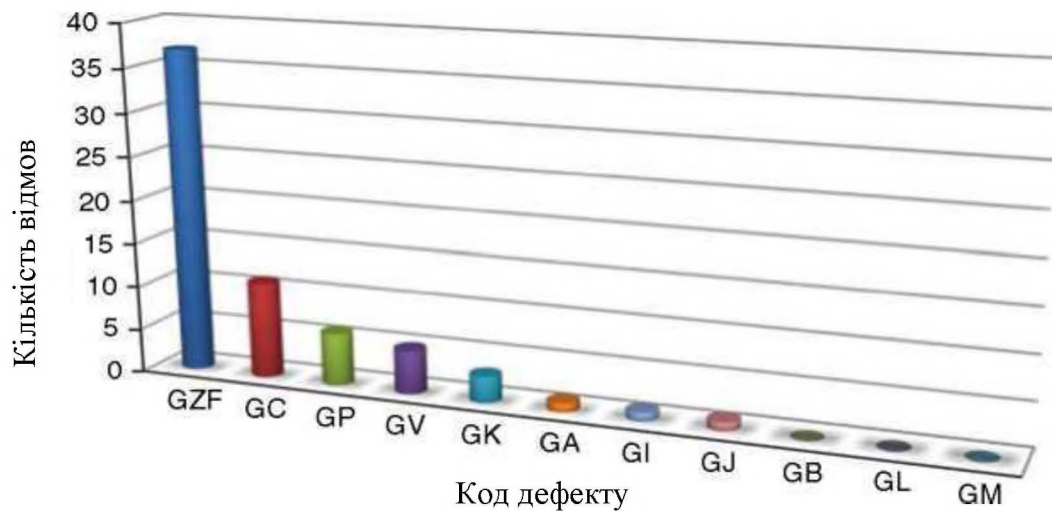


Рисунок 3.3 – Гістограма відмов за кодами дефектів.

Вугільні вставки (ГХ) виявились другою за величиною причиною відмов системи пантографа. Загалом було дев'ять відмов, пов'язаних із трубопровідними роботами, у тому числі шість відмов під кодом дефекту GP і три несправності під кодом дефекту GK. Чотири з цих дев'яти несправностей були виявлені пробоїнами в трубах через зовнішні впливи, такі як спалах через пошкодження, спричинені морськими бризками, або пошкодження, спричинені ударом об предмет.

Інші несправності так чи інакше пов'язані з технічним обслуговуванням і людськими помилками, такими як погано затягнуті з'єднання на повітряному контурі або стяжні болти. Ці відмови зазвичай виникають після виконання деяких завдань з технічного обслуговування пантографа. Всього було п'ять несправностей, пов'язаних з кодом дефекту, що відноситься до клапанів пантографа (GV). Подальший аналіз показав, що ці несправності були пов'язані з регулятором повітря пантографа в блоці управління.

Стався один збій у пантографа, закодований відповідно до GA, це був інцидент, коли машиніст не зміг підняти пантограф. Після огляду було

встановлено, що причиною несправності був несправний підйомний поршень, який потім був замінений на новий. Була одна відмова, пов'язана з ізоляторами пантографів (GI). Поломкою став спалах на даху, який утворив дірку в даху з алюмінієвою обшивкою. Була одна несправність, пов'язана з пристроєм автоматичного опускання пантографа (GJ). Ця несправність виникла через те, що тиск підйому пантографа на панелі керування був низьким, і недостатнім для підтримки пантографа в піднятому положенні. Під час роботи поїзда не було зафіксовано ізоляції проводів (GB), з'єднань кабелів/шин (GL) та компресора (GM). Однак все ще існує ймовірність того, що ці компоненти з часом зіпсуються або будуть неправильно встановлені під час капітального ремонту.

У табл. 3.2 наведена розподіл відмов по номерах електропоїздів.

Таблиця 3.2 – Розподіл відмов по номерах електропоїздів

Номер електропоїзда	GA	GB	GC	GI	GJ	GK	GL	GM	GP	GV	GZF
001	0	0	2	0	1	0	0	0	1	0	1
002	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	2
005	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
010	0	0	1	0	0	0	0	0	0	3	0
Олія	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2
105	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	3
108	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
114	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1
115	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	4

Кумулятивна крива часу відмови показана на рис. 3.4

					0032.226522.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		55

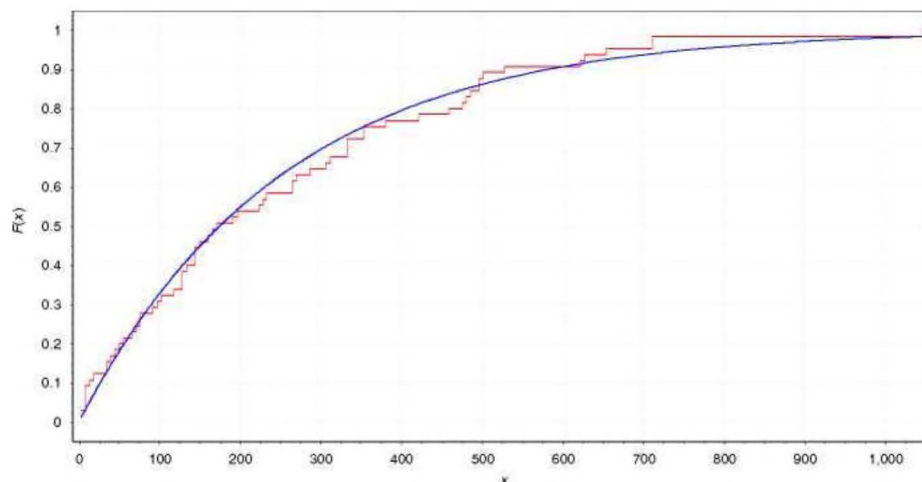


Рисунок 3.4 – Кумулятивна крива часу відмови

Інформація про затримки була отримана з системи баз даних, яка використовується для моніторингу руху поїздів і відстеження затримок на залізничній мережі Великої Британії, під назвою TRain RUnning SysTem TOPS. Він записує характеристики поїзда та експлуатаційні дані, включаючи час відправлення, час прибуття та зупинки на станціях протягом усього рейсу. У разі затримки прибуття або відправлення поїздів система генерує код тривоги і досліджуються причини, що призвели до затримки. Система показує, чи була затримка викликана помилкою пасажира або поїзної бригади, проблемами з надійністю поїзда або проблемами з інфраструктурою/сигналізацією. Варто зазначити, що не всі затримки поїздів пов'язані з технічними дефектами, і не всі дефекти призведуть до затримок. З цієї причини визначається код відповідальності, щоб розрізнити несправності, викликані технічними дефектами, і ті, які викликані помилками іншими причинами або пасажирами. Перелік кодів відповідальності наведено в таблиці 3.3.

Електропоїзд типу 380 в цілому можна вважати складною ремонтпридатною системою, в якій будь-які несправності, виявлені в підсистемах, можуть бути відновлені до стану «як новий (AGAN)» за допомогою дій РМ або заміни дефектного компонента. В рамках договору франчайзингу на компанію-оператора поїзда накладається фінансовий штраф за кожну затримку або скасування. Відмови пантографа призвели до затримки в цілому 2 523

					0032.226522.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		56

хвилини, 123 повних скасування і 71 часткового скасування з фінансовими штрафами в розмірі 50 ум. од. за кожну хвилину затримки, 1 000 ум. од. за кожне повне скасування і 500 ум. од. за кожне часткове скасування. Погодинна ставка ремонтних робіт дорівнює 50 ум.од.

Таблиця 3.3 – Затримки руху поїздів, відсортовані за кодами причин

Код	Опис
DTM	Затримка, спричинена втручанням поїзної бригади, яка не вважається технічною несправністю
NR	Затримка, спричинена деякими дефектами інфраструктури. Прикладами таких типів дефектів можуть бути дефекти з контактною мережею, проблеми з сигналізацією, дефекти колії тощо.
PAS	Затримка, спричинена помилками пасажирів
V	Затримка, спричинена актом вандалізму у поїзді
Y	Затримка, спричинена технічним дефектом поїзда або дефектом, спричиненим технічним обслуговуванням
Y (NFF)	Затримка, спричинена підозрою на технічний дефект поїзда, але після розслідування не було встановлено першопричину
Y (NT)	Затримка, викликана або незапланованим рухом поїзда, щоб повернути його в депо технічного обслуговування або нетехнічний дефект

Виконання завдань з технічного обслуговування (коригувального або профілактичного) на системі пантографа коштуватиме близько 5 770 ум. од.; однак у випадку з РМ оператори поїздів будуть повідомлені заздалегідь, і порушення графіка руху буде зведено до мінімуму. Річний рівень інфляції витрат на утримання встановлено на рівні 3 відсотків. Залежна від часу функція ризику проілюстрована на рис. 3.5.

						Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата	0032.226522.МДР.2024.001	57

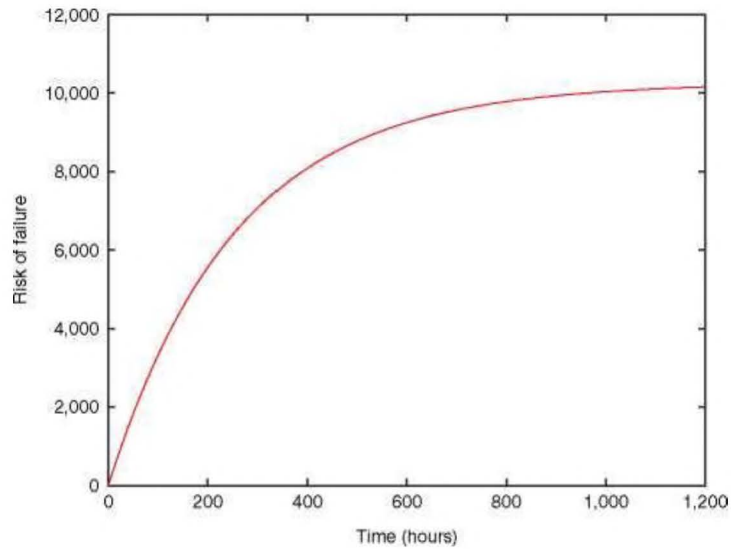


Рисунок 3.5 – Функція ризику відмови

Умова, яка повинна бути виконана для обслуговування РМ, полягає в тому, що зниження загального ризику відмови стає як мінімум рівним витратам на проведення технічного обслуговування РМ, тобто  $RoF = 5\,770$  ум. од.

Підставивши у рівняння (2.18) значення 5,770, отримаємо значення інтервалу РМ приблизно 212 год. Ризик відмови в роботі за часовою програмою РМ з постійними інтервалами 212 год показаний на рис. 3.6. Рівень надійності пантографа на момент РМ оцінюється в 0,432.

Для того, щоб оцінити переваги, отримані від виконання дій РМ протягом усього терміну служби пантографа (10 000 год), був використаний підхід MCS.

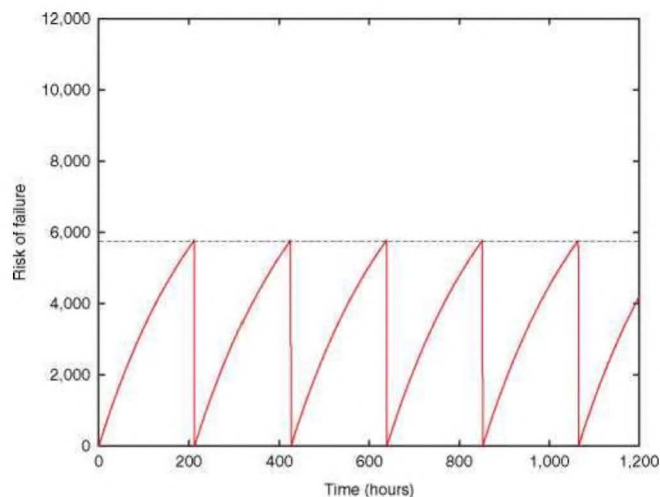


Рисунок 4.6 – Функція ризику відмови під час профілактичного обслуговування АГАН

					0032.226522.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		58

У даному аналізі використовувався метод дискретизації тривалості стану, при якому моделюються цикли «вгору» і «вниз». Період часу становить від одного профілактичного обслуговування до іншого, де кожна дія РМ повністю відновлює стан відповідної складової.

Симуляція припиняється після закінчення певного напрацювання. За результатами моделювання встановлено, що оптимальним інтервалом часу для проведення превентивного технічного обслуговування РМ пантографа є  $T^* = 417$  год. При порівнянні з сучасною практикою технічного обслуговування, при якій технічне обслуговування виконуються кожні 500 год, виявляється, що запропонований метод дозволяє знизити ризик відмови на 6,82 відсотка.

Було висунуто припущення, що заходи з технічного обслуговування пантографа повністю відновлюють стан системи і роблять її АГАН. Однак на практиці стан системи після кожного технічного обслуговування може бути покращений до кращого стану, ніж це було безпосередньо перед технічним обслуговуванням, але не АГАН, тобто так зване недосконале технічне обслуговування. Ефект недосконалих дій з технічного обслуговування в даній роботі характеризується зниженням ймовірності відмови (а отже, і ризику відмови). Ризик відмови при недосконалій програмі РМ зі ступенем обслуговування  $\alpha = 0,8$  показаний на рис. 4.7. Як видно, інтервали ПМ стають все коротшими і коротшими в міру старіння системи.

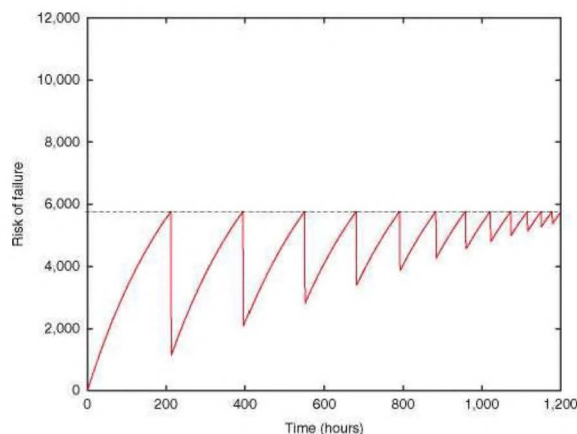


Рисунок 4.7 – Функція ризику відмови при недосконалому профілактичному обслуговуванні

					0032.226522.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		59

Також було висунуто припущення, що ресурси для обслуговування пантографа завжди доступні і вивільняються миттєво. Однак на практиці ресурси технічного обслуговування можуть бути відправлені в залізничне депо зі звичайним або прискореним терміном. Ризик відмови функціонує за програмою AGAN PM, де поріг ризику становить  $\mu = 4\,000$ , а час технічного обслуговування рівномірно розподілений від 0 до 100 год, показаний на рис. 4.7.

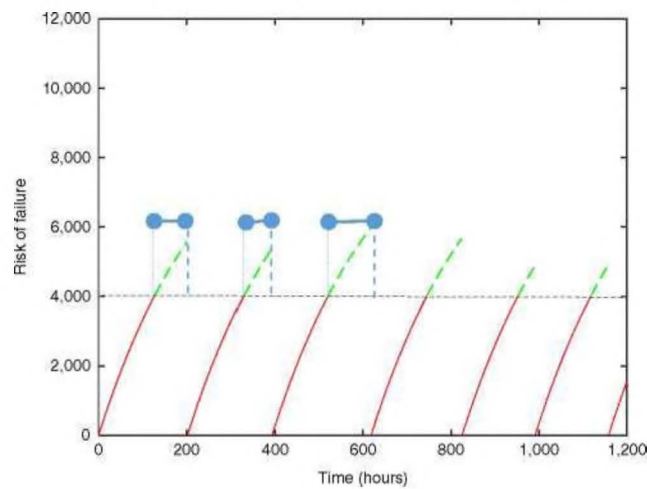


Рисунок 4.7 – Функція ризику відмови при профілактичному технічному обслуговуванні з врахуванням часу доставки матеріалів

					0032.226522.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		60

## ВИСНОВКИ

У дипломній магістерській роботі представлено новий підхід до ризик-орієнтованого моделювання для інспектування та управління технічним обслуговуванням рухомого складу. У запропонованому підході за допомогою аналізу важливості були визначені основні режими відмов різних компонентів рухомого складу, а також їх загальні першопричини, а потім використані деякі стохастичні моделі для оцінки ймовірності виникнення відмов. З іншого боку, наслідки відмов були розраховані шляхом застосування завищеного підходу до моделювання витрат, який включав витрати, пов'язані з загрозою безпеці, затримками поїздів або їх відміною.

Розроблено кількісну модель оцінки ризику відмови для різних компонентів у часі, що є загальною ймовірністю відмови, помноженою на сумарні наслідки відмови в будь-який момент часу в майбутньому. Потім показник ризику, що залежить від часу, використовувався для визначення пріоритетів і планування дій з технічного обслуговування в довгостроковій перспективі. Запропонована модель також має можливість оновлювати плани технічного обслуговування залишкового терміну служби технічного засобу, коли з'являється нова інформація з інспекційних заходів або систем безперервного моніторингу. З метою наочної ілюстрації запропонованого підходу модель була застосована до пантографів рухомого складу шотландської компанії-оператора поїздів та оцінена її продуктивність з точки зору економічної вигоди. Результати свідчать про те, що запропонована методологія моделювання RBI&M має значний потенціал для зниження витрат протягом життєвого циклу, забезпечуючи при цьому більш високий рівень безпеки та якості послуг у порівнянні з методологіями інспектування, що використовуються в даний час, включаючи перевірку, періодичну поновлення та інспекцію, орієнтовану на надійність.

					0032.226522.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		61

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Consilvio, A., Di Febraro, A., & Sacco, N. (2016). Stochastic scheduling approach for predictive risk-based railway maintenance. 2016 IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT). doi:10.1109/icirt.2016.7588732
2. Consilvio, A., Di Febraro, A., Meo, R., & Sacco, N. (2018). Risk-based optimal scheduling of maintenance activities in a railway network. EURO Journal on Transportation and Logistics. doi:10.1007/s13676-018-0117-z
3. Dinmohammadi, F. Alkali, B. Shafiee M. A risk-based model for inspection and maintenance of railway rolling stock / F. Dinmohammadi, B. Alkali, M. Shafiee // Risk, Reliability and Safety: Innovating Theory and Practice - Proceedings of the 26th European Safety and Reliability Conference, ESREL 2016 Pages 186, 2017 26th European Safety and Reliability Conference, ESREL 2016 Glasgow 25 September 2016 through 29 September 2016
4. Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) [Електронний документ] Режим доступу: <https://ftmaintenance.com/maintenance-glossary/failure-modes-and-effects-analysis/>
5. Ghamlouch, H. Grall, A. Opportunistic maintenance strategy for a train fleet under safety constraints and inter-system dependencies / H. Ghamlouch, A. Grall // Safety and Reliability – Safe Societies in a Changing World – Haugen et al. (Eds) 2018 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-8153-8682-7
6. Nazeri, A., & Naderikia, R. (2017). A new fuzzy approach to identify the critical risk factors in maintenance management. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 92(9-12), 3749–3783. doi:10.1007/s00170-017-0222-4
7. Shafiee, M. Preventive maintenance and failure analysis of safety-critical assets in railway rolling stock / Mahmood Shafiee // Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Pages

										Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата	0032.226522.МДР.2024.001					62

20722017 7th Annual Conference on Industrial Engineering and Operations Management, IEOM 2017 Rabat 11 April 2017 through 13 April 2017.

8. Vanson Bourne. The Costs, Causes & Consequences of Unplanned Downtime [Електронний документ] Режим доступу: <https://www.servicemax.com/unplanned-downtime>
9. Wang, L., An, M., Qin, Y., & Jia, L. (2018). A Risk-Based Maintenance Decision-Making Approach for Railway Asset Management. International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering, 28(04), 453–483. doi:10.1142/s0218194018400065
10. What is Condition-based Maintenance (CbM)? [Електронний документ] Режим доступу: <https://ftmaintenance.com/maintenance-management/what-is-condition-based-maintenance/>
11. What is Corrective Maintenance? [Електронний документ] Режим доступу: <https://ftmaintenance.com/maintenance-management/what-is-corrective-maintenance/>
12. What is Predictive Maintenance? How PdM Works and When to Use It [Електронний документ] Режим доступу: <https://ftmaintenance.com/maintenance-management/what-is-predictive-maintenance/>
13. What is Preventive Maintenance (PM)? [Електронний документ] Режим доступу: <https://ftmaintenance.com/maintenance-management/what-is-preventive-maintenance/>
14. What is Reliability-Centered Maintenance? [Електронний документ] Режим доступу: <https://ftmaintenance.com/maintenance-management/what-is-reliability-centered-maintenance/>
15. What is Risk-based Maintenance? [Електронний документ] Режим доступу: <https://ftmaintenance.com/maintenance-management/what-is-risk-based-maintenance/>
16. What is Time-based Maintenance (TbM)? [Електронний документ] Режим

					0032.226522.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		63

доступу: <https://ftmaintenance.com/maintenance-management/what-is-time-based-maintenance/>

17. What is Total Productive Maintenance? [Електронний документ] Режим доступу: <https://ftmaintenance.com/maintenance-management/what-is-total-productive-maintenance/>

18. Zeng, Y , Song, D , Zhang, W, Zhou, B, Xie, M, Tang, X. An Optimal Life Cycle Reprofileing Strategy of Train Wheels Based on Markov Decision Process of Wheel Degradation / Yuanchen Zeng , Dongli Song , Weihua Zhang, Bin Zhou, Mingyuan Xie, and Xu Tang // IEEE transactions on intelligent transportation systems.

19. Бібліографічна і реферативна база даних SCOPUS [Електронний документ] Режим доступу: <https://www.scopus.com/results/results.uri?sort=plf-f&src=s&st1=Risk-based+Maintenance&sid=ebbe1585d13da7a8e557d5276eb34ae2&sot=b&sdt=b&sl=37&s=TITLE-ABS-KEY%28risk-based+AND+maintenance+AND+railways%29&origin=searchbasic&editSaveSearch=&yearFrom=Before+1960&yearTo=Present&sessionSearchId=ebbe1585d13da7a8e557d5276eb34ae2&limit=10&offset=60>

20. Положення про планово-попереджувальну систему ремонту і технічного обслуговування рухомого складу (локомотиви та моторвагонний рухомий склад). Додаток №11 до протоколу № Ц-85/25 Ком.т. засідання правління АТ «Укрзалізниця» від 01.05.2023 р. [Електронний документ] Режим доступу: [https://uz.gov.ua/about/technical\\_and\\_social\\_policy/repair\\_docs/ndi/](https://uz.gov.ua/about/technical_and_social_policy/repair_docs/ndi/)

					0032.226522.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		64