Український державний університет залізничного транспорту

Кафедра експлуатації та ремонту рухомого складу

Розроблення інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень машиністом під час керування рухом поїзда

Пояснювальна записка і розрахунки
до кваліфікаційної роботи магістра

МКРМЕ 510.00.01 ПЗ

Розробив: студент групи 221-ЛЛГ-Д24
Спеціальності 273 Залізничний транспорт
Дмитро ВДОВИЧ



Керівник: доц., к.т.н.
Павло ХАРЛАМОВ

Рецензент: доц., к.т.н.
Андрій РИБІН

2026

Форма № Н-9.01

Український державний університет залізничного транспорту

Факультет «Механіко-енергетичний»
Кафедра «Експлуатації та ремонту рухомого складу»
Освітньо-кваліфікаційний рівень *магістр*
Спеціальність J7 "Залізничний транспорт"

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри д.т.н., проф.
_____ В.Г. Пузир
(підпис)
_10_ ___червня_____ 2026 р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Вдовичу Дмитру Сергійовичу

1. Тема проекту "Розроблення інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень машиністом під час керування рухом поїзда"
керівник проекту Харламов Павло Олександрович, доцент, канд. техн. наук
затверджено розпорядженням по механіко-енергетичному факультету від "24" лютого 2026 року № 8
2. Строк подання студентом проекту «15» червня 2026 року.
3. Вихідні дані до проекту Статистична звітність, існуюча технологія експлуатації.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки: 1 Аналіз умов прийняття рішень машиністом під час керування рухом поїзда. 2 Розроблення математичного забезпечення інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень. 3 Розроблення структури та алгоритмів інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень. 4 Моделювання роботи системи та оцінювання ефективності. 5 Техніко-економічне обґрунтування впровадження інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень
5. Перелік графічного матеріалу: 1 Актуальність роботи. 2 Мета, об'єкт і предмет дослідження 3 Завдання дослідження 4 Ергатична система «поїзд — машиніст — СППР» 5 Фактори виникнення помилок машиніста. 6 Показники поточної поїзної ситуації. 7 Критерій оцінки керуючих дій машиніста. 8 Напруженість роботи машиніста. 9 Структура інтелектуальної СППР. 10 Алгоритм розпізнавання поїзної ситуації. 11 Алгоритм формування рекомендацій машиністу. 12 Моделювання та оцінка ефективності 13 Техніко-економічне обґрунтування впровадження СППР 14 Висновки

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Економічна частина	Калабухін Ю.Є. д.е.н., професор		

7. Дата видачі завдання «02» вересня 2026 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання на магістерську роботу. Формування змісту та етапів роботи.	05.01.–17.01.	
2	Збирання та обробка статистичної інформації	18.02.–01.03	
3	Виконання роботи по розділам магістерської роботи. Аналіз одержаних даних, їх розрахунок та обробка	02.03.–22.04.	
4	Перевірка виконаних завдань у керівника роботи, виправлення помилок, виконання робіт по розділам консультантів	23.04.–29.04.	
5	Робота над оформленням графічної частини, проведення розрахунків та створення на їх підставі графічних матеріалів	30.04.–12.05.	
6	Перевірка виконаних робіт у керівника роботи, виправлення помилок, чистове виконання розділів магістерської роботи.	13.05.–26.05.	
7	Нормоконтроль, виправлення помилок та підготовка до захисту	27.05.–01.06	

Студент _____ Дмитро ВДОВИЧ
(підпис)

Керівник роботи _____ Павло ХАРЛАМОВ
(підпис)

Зміст

Вступ 7
1 Аналіз умов прийняття рішень машиністом під час керування рухом поїзда . 9
1.1 Особливості керування рухом поїзда в сучасних умовах експлуатації 9
1.2 Ергатична система «поїзд – машиніст – середовище» 13
1.3 Аналіз причин помилкових дій машиніста 16
1.4 Аналіз інформаційно-керуючих систем і методів підтримки прийняття рішень 20
1.5 Постановка задачі дослідження 23
2 Розроблення математичного забезпечення інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень 28
2.1 Класифікація факторів, що визначають поїзну ситуацію 28
2.2 Формування системи показників поїзної ситуації 31
2.3 Комплексний критерій оцінювання керуючих дій 34
2.4 Формалізація напруженості роботи машиніста 38
2.5 Обґрунтування вагових коефіцієнтів методом Сааті 41
2.6 Вибір інформативних ознак для розпізнавання поїзних ситуацій 45
3 Розроблення структури та алгоритмів інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень 49
3.1 Функціональна структура системи 49
3.2 Інформаційні потоки та організація обробки даних 52
3.3 Алгоритм розпізнавання поточної поїзної ситуації 55

4 Моделювання роботи системи та оцінювання ефективності 69
4.1 Постановка задачі й умови моделювання 69
4.2 Формування сценаріїв поїзних ситуацій 72
4.3 Результати розпізнавання ситуацій і формування рекомендацій 77
4.4 Аналіз чутливості та обмежень запропонованого підходу 80
4.5 Оцінювання функціональної ефективності системи 84
5 Техніко-економічне обґрунтування впровадження інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень 89
5.1 Передумови економічної оцінки 89
5.2 Визначення витрат на впровадження 91
5.3 Джерела формування річного економічного ефекту 94
5.4 Розрахунок річного економічного ефекту 97
5.5 Визначення терміну окупності 100
5.6 Оцінювання економічної доцільності впровадження 104
Висновки 110
Список використаних джерел 112

Анотація

Вдович Д. С. Розроблення інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень машиністом під час керування рухом поїзда.

У кваліфікаційній роботі магістра розглянуто розроблення інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень машиністом. Метою є підвищення обґрунтованості керуючих дій шляхом аналізу поточної поїзної ситуації та формування рекомендацій. Запропоновано оцінювання за сімома ознаками: швидкістю руху, відстанню до сигналу або перешкоди, сигнальною обстановкою, станом гальмівної системи, енерговитратами, відхиленням від графіка та профілем колії. Розроблено структуру системи, алгоритми класифікації ситуацій за чотирма рівнями та багатокритеріального вибору допустимих дій із пріоритетом безпеки руху.

Ключові слова: інтелектуальна система підтримки прийняття рішень, машиніст, поїзна ситуація, безпека руху, класифікація, багатокритеріальне оцінювання, рекомендації, економічний ефект

Abstract

Vdovych D. S. Development of an Intelligent Decision Support System for a Train Driver During Train Operation.

The master’s qualification thesis addresses the development of an intelligent decision support system for a train driver. Its aim is to improve the justification of control decisions by analysing the current train operating situation and generating recommendations. Seven input features are considered: train speed, distance to a signal or obstacle, signalling conditions, braking system condition, energy consumption, timetable deviation, and track profile. The proposed system architecture incorporates four situation classes and algorithms for selecting admissible control actions using multiple criteria, with operational safety taking priority. The estimated implementation cost per locomotive is UAH 61,850, the projected annual economic benefit is UAH 39,050, and the simple payback period is approximately 1.6 years.

Keywords: intelligent decision support system, train driver, train operating situation, railway safety, classification, multicriteria assessment, recommendations, economic benefit

Вступ

Забезпечення безпеки руху поїздів є одним з визначальних завдань залізничного транспорту. За високої інтенсивності перевізного процесу, складних режимів руху та зростання насиченості кабіни локомотива інформаційними засобами підвищуються вимоги до оперативності й обґрунтованості рішень машиніста. Умови роботи оператора характеризуються одночасним надходженням даних про швидкість руху, сигнальну обстановку, стан тягового й гальмівного обладнання, профіль колії, відхилення від графіка та можливі перешкоди. Необхідність опрацювання цих даних у реальному часі формує передумови для застосування інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень.

Під час аналізу причин транспортних подій особлива увага приділяється людському фактору. Вихідні матеріали дослідження наводять його частку на рівні 72,5 % для розглянутої сукупності подій у локомотивному господарстві. Це значення не може розглядатися як універсальний показник для всіх залізниць і періодів, проте ілюструє важливість удосконалення інформаційної підтримки локомотивної бригади. Традиційні системи сигналізації та контролю забезпечують повідомлення про окремі параметри й небезпечні стани, однак не завжди дають машиністу узгоджену оцінку ситуації та порівняння альтернативних керуючих дій.

Розвиток цифрових технологій обробки інформації, алгоритмів класифікації й багатокритеріального оцінювання створює можливості для формування рекомендацій з урахуванням безпеки руху, економічності, графіка та технічного стану рухомого складу. Водночас інтеграція інтелектуального модуля не повинна підміняти функції штатних сертифікованих систем забезпечення безпеки та відповідальність машиніста за виконання встановлених правил ведення поїзда.

Метою кваліфікаційної роботи є розроблення інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень машиністом під час керування рухом поїзда, спрямованої на підвищення безпеки руху, зменшення впливу людського фактору та підвищення ефективності керуючих дій у різних поїзних ситуаціях.

Об’єктом дослідження є процес керування рухом поїзда машиністом в умовах зміни параметрів руху й поїзної обстановки. Предметом дослідження є методи, математичні моделі, критерії та алгоритми розпізнавання поїзних ситуацій і формування рекомендацій для машиніста.

Для досягнення поставленої мети в роботі проаналізовано ергатичну систему «поїзд – машиніст – середовище», визначено групи факторів, які впливають на якість рішень, сформовано набір інформативних ознак поточної ситуації, запропоновано комплексний критерій оцінки керуючих дій та підхід до врахування напруженості роботи машиніста. На цій основі розробляється функціональна структура СППР, алгоритми розпізнавання ситуацій і формування рекомендацій, здійснюється імітаційна перевірка на характерних сценаріях та виконується техніко-економічне оцінювання можливості впровадження.

Методологічною основою роботи є системний аналіз технічних та людино-машинних систем, методи нормування параметрів, багатокритеріального оцінювання, експертного визначення вагових коефіцієнтів, алгоритмічного моделювання і порівняльного аналізу сценаріїв. Для формування рекомендації передбачається виділення допустимих керуючих дій і їх порівняння за узагальненим критерієм з обов’язковим дотриманням обмежень безпеки.

Практичне значення очікуваних результатів пов’язане з можливістю використання запропонованої архітектури як допоміжного інформаційно-аналітичного контуру в системах підготовки локомотивних бригад або під час подальших проєктних робіт з оснащення локомотивів. Важливою умовою застосування в реальній експлуатації є перевірка достовірності інформаційних каналів, оперативності обробки даних, коректності рекомендацій і відповідності технічним та нормативним вимогам до безпеки руху.

Структура роботи передбачає п’ять розділів. Перший розділ присвячено аналізу умов прийняття рішень, другий – математичному забезпеченню, третій – структурі та алгоритмам системи, четвертий – моделюванню й аналізу ефективності, п’ятий – техніко-економічному обґрунтуванню. Результати узагальнюються у висновках.

1 Аналіз умов прийняття рішень машиністом під час керування рухом поїзда

1.1 Особливості керування рухом поїзда в сучасних умовах експлуатації

Керування рухом поїзда є безперервним процесом вибору та реалізації керуючих впливів в умовах змінного профілю колії, неоднорідного транспортного потоку і технологічних обмежень. На відміну від технологічних процесів зі стабільними параметрами, ведення поїзда характеризується необхідністю враховувати змінні масу й довжину складу, допустиму швидкість, стан колійної інфраструктури, графік руху та зміни умов зчеплення. Усі ці обставини формують багатофакторну задачу, у якій перевага одного показника не повинна досягатися шляхом порушення встановлених вимог безпеки.

У нормальному режимі руху машиніст забезпечує відповідність фактичної швидкості встановленим обмеженням, підтримує допустимі режими тяги й гальмування, контролює показання сигналів і стан локомотива. У разі зміни поїзної обстановки потрібне оперативне коригування режимів керування. Так, при наближенні до заборонного сигналу доцільність продовження тяги втрачається, а пріоритетними стають оцінка відстані до місця зупинки та вибір допустимого гальмівного режиму.

Складність задачі визначається одночасним існуванням трьох часових масштабів. До першого належать швидкоплинні процеси, для яких необхідна негайна реакція на небезпеку. Другий масштаб пов’язаний з проходженням окремої дільниці і вибором режимів тяги, вибігу та гальмування. Третій охоплює виконання графіка на всьому маршруті. Система підтримки прийняття рішень повинна працювати з усіма масштабами, проте її функції мають бути обмежені допоміжним характером рекомендацій.

Під час аналізу транспортних подій у наданих матеріалах наведено розподіл причин: людський фактор – 72,5 %, технічні причини – 23,5 %, інші – 4 %. Ці значення описують розглянуту в джерельних матеріалах вибірку, а не універсальну статистику для залізничного транспорту України. Водночас вони підкреслюють доцільність удосконалення інформаційних засобів підтримки машиніста в ситуаціях із підвищеним дефіцитом часу. [1]

Особливістю сучасної кабіни є наявність численних джерел цифрової й аналогової інформації. Дані можуть надходити від швидкостеміра, бортових систем

діагностики, засобів локомотивної сигналізації, реєстраторів параметрів руху та зовнішніх диспетчерських систем. Без узгодження ці дані залишаються розрізненими повідомленнями, що підвищує інформаційне навантаження. Тому важливим стає не просте збільшення числа індикаторів, а інтеграція інформації в узагальнену оцінку поточної ситуації.

Для формування допоміжної рекомендації необхідно розрізняти спостережуваний стан системи, прогноз розвитку ситуації та множину припустимих дій. Спостережуваний стан описується набором вимірюваних ознак. Прогноз визначається зміною швидкості, відстані та технічних параметрів у часі. Припустимі дії задаються чинними обмеженнями безпеки і технічними можливостями локомотива. Вказаний поділ використано як основу подальшої математичної формалізації.

Зазначений розподіл причин транспортних подій графічно наведено на рисунку 1.1.



Рисунок 1.1 – Розподіл причин транспортних подій у розглянутій вибірці

Значна частка подій, пов’язаних з діями людини, обґрунтовує застосування методів попереджувального аналізу, але не означає автоматичної можливості усунення відповідної частки подій після встановлення СППР. Для такого висновку необхідні окремі експлуатаційні випробування.

Для обґрунтування моделі розглянуто конфлікт оперативних цілей. Виконання графіка може спонукати до інтенсивнішого розгону, тоді як економне ведення передбачає вибіг і плавніші переходи між режимами. СППР повинна порівнювати ці альтернативи лише після перевірки заборонних та обмежувальних умов, установлюючи безпеку як жорсткий фільтр. Перевага швидшого проходження дільниці не може компенсувати порушення обов’язкових обмежень руху. Саме тому в математичному й алгоритмічному забезпеченні важливо встановлювати межі застосування прийнятих припущень.

При оцінюванні результатів доцільно виділити межі прогнозної точності. Невизначеність у масі, коефіцієнті зчеплення та затримці застосування гальм впливає на розрахункову траєкторію. Доцільно аналізувати не тільки номінальну оцінку, а й консервативний варіант із гіршими допустимими параметрами, зберігаючи запас на реагування. Точність моделі оцінюється на представницьких вимірюваннях; без таких даних числові результати мають демонстраційний характер. Завдяки такому поділу можливо перевіряти окремі функції системи та уникати некоректного узагальнення результатів моделювання.

Для пояснення принципу формування запасу гальмівного шляху можна розглянути умовний приклад із початковою швидкістю 72 км/год, що відповідає 20 м/с. За припущення сталого середнього уповільнення 0,60 м/с² і сумарної затримки 2 с розрахунковий шлях складається з відрізка 40 м до початку ефективного гальмування та приблизно 333,3 м самого гальмування. Якщо доступна відстань до контрольної точки становить 450 м, арифметичний запас дорівнює 76,7 м. Прийняті числа не є нормативом для жодної серії рухомого складу та використовуються виключно для демонстрації взаємодії параметрів швидкості, часу й уповільнення.

Цей приклад показує, що система не повинна формувати висновок лише за одним виміром відстані. При зростанні початкової швидкості на чверть гальмівна складова змінюється квадратично, тому за інших рівних умов запас може зникнути дуже швидко. Крім того, затримка в отриманні й обробці даних збільшує шлях до початку гальмування. Отже, оцінювання безпеки повинно враховувати обмеження фізичної моделі та обов’язково залишати резерв на невизначеність.

Таблиця 1.1 – Параметри спрощеного розрахункового прикладу зупинки

Показник	Навчальне значення	Зміст
Початкова швидкість	72 км/год (20 м/с)	Початковий стан умовного прикладу
Уповільнення	0,60 м/с²	Припущення про сталий режим
Час затримки	2 с	Умовна сумарна затримка реагування
Відстань до об’єкта	450 м	Доступна довжина до контрольної точки
Шлях зупинки	373,3 м	40 м затримки + 333,3 м гальмування
Запас відстані	76,7 м	Різниця між доступною і потрібною відстанями

З погляду теорії керування ведення поїзда можна розглядати як послідовність рішень за обмеженого горизонту прогнозування. На кожному кроці оператор має оцінити не лише миттєвий режим, але і його наслідки для наступної ділянки маршруту. Наприклад, збереження тяги на підході до зупинки може призвести до необхідності інтенсивнішого гальмування, збільшення енерговитрат і зростання інформаційного навантаження. Навпаки, передчасне зменшення тяги може створити відхилення від графіка, яке вже неможливо компенсувати без погіршення економічності. Саме тому задача вибору режиму потребує аналізу майбутніх обмежень і чіткого розрізнення безпекових та експлуатаційних критеріїв.

За наявності профілю маршруту та відомих обмежень доцільно попередньо формувати прогнозований допустимий коридор швидкості. Його верхня межа визначається обмеженнями руху й необхідністю зупинки перед контрольним об’єктом, а нижня може відображати прийнятий графіковий режим без надання йому нормативного статусу. Рекомендація щодо тяги або вибігу має обиратися всередині допустимого коридору. Для роботи з реальним поїздом необхідна окрема перевірка точності маршрутних даних, визначення місцеположення та врахування фактичних динамічних характеристик локомотива і складу.

У контексті підтримки прийняття рішень особливо важливими є порушення узгодженості між сигналами. Значення швидкості може виглядати прийнятним за номінального режиму, але ставати небезпечним у поєднанні з короткою відстанню до заборонного сигналу. Аналогічно допустимий режим за профілем може втрачати

безпечність у разі несправності гальм. Отже, класифікатор повинен аналізувати саме спільний стан системи, а не набір незалежних попереджень. Цей підхід забезпечує логічний зв’язок між постановкою задачі та наступним формуванням семикомпонентного вектора ознак.

1.2 Ергатична система «поїзд – машиніст – середовище»

Система керування рухом по – їзда належить до ергатичних систем, тобто людино-машинних комплексів, у яких результат залежить від взаємодії оператора з технічними засобами та середовищем. Її основними компонентами є поїзд як об’єкт керування, машиніст як суб’єкт прийняття рішень, колійна інфраструктура і зовнішні умови. Бортові інформаційні засоби забезпечують зворотний зв’язок щодо поточного стану об’єкта. [6]

На вході процесу перебувають обмеження швидкості, сигнальні показання, профіль колії, технологічний графік, технічні характеристики рухомого складу та поточні зовнішні умови. Машиніст формує керуючі впливи – зміну тягового зусилля, перехід до вибігу, вибір ступеня службового гальмування та дії відповідно до регламентів у небезпечних ситуаціях. Реакція поїзда змінює його швидкість, положення та стан обладнання, після чого цикл повторюється.

Включення інтелектуальної СППР додає до традиційного контуру окрему ланку аналітичної обробки. Вона збирає дані, порівнює їх з допустимими інтервалами, оцінює характер ситуації і формує інформаційну рекомендацію. Важливо, що СППР не змінює призначення штатних систем захисту, не скасовує показання сигналів і не має права самостійно встановлювати безпечні межі руху без належної сертифікації.

Показником якості роботи людино-машинної системи є не тільки своєчасність кінцевої керуючої дії, але й коректність інформаційного обміну. Надмірна кількість повідомлень, суперечливі сигнали та складна форма інтерфейсу можуть погіршувати прийняття рішення. Тому рекомендація має бути контекстною, короткою, прив’язаною до конкретного параметра та за необхідності супроводжуватися індикацією достовірності інформації.

Суттєвим аспектом є розподіл відповідальності. У запропонованій концепції машиніст зберігає функції контролю обстановки та остаточного прийняття рішення,

а СППР виконує функції інтелектуального помічника. З цієї причини інформація про клас небезпеки і рекомендовану дію повинна бути доступною, але не повинна перешкоджати використанню штатних органів керування.

Структуру взаємодії компонентів ергатичної системи подано на рисунку 1.2.



Рисунок 1.2 – Ергатична система «поїзд – машиніст – СППР»

Машиніст сприймає сигнали, формує керуючу дію й оцінює зміну стану поїзда за зворотним зв’язком. Інтелектуальний модуль повинен вбудовуватися в цей цикл як джерело додаткового аналізу, а не як неконтрольований замінник людини. Остаточне рішення і дотримання чинних інструкцій залишаються за локомотивною бригадою. Це створює передумови для уточнення структури вхідних даних і перевірки відповідності рекомендацій реальній поїзній обстановці.

Під час розгляду питання «інформаційне перевантаження» важливо відокремити фізичний механізм від логіки розрахунку. Додаткові показники збільшують кількість необхідних переключень уваги між індикаторами, особливо під час інтенсивного руху. Інтерфейс доцільно будувати за принципом пріоритетного представлення: першими показувати небезпеку, джерело загрози та допустиму дію. Результат перевіряється ергономічними випробуваннями, а не тільки правильністю програмної логіки. Вказана обставина особливо важлива, коли змінюються декілька параметрів одночасно, а результат має бути представлений машиністу без затримки.

Особливе значення для обраного підходу має спостережуваність поїзної ситуації. Частина характеристик вимірюється безпосередньо, а інша частина визначається за моделлю або даними інфраструктури. Необхідно розділяти фактично

виміряні та розрахункові значення, щоб не надавати оцінкам більшої достовірності, ніж вони мають. За відсутності критичної первинної інформації система повинна повідомити про обмеження своїх висновків. Запропоноване тлумачення дозволяє виконати порівняльний аналіз варіантів, не підміняючи нормативну вимогу умовним інтегральним показником.

Практична реалізація повинна враховувати двосторонній зворотний зв’язок. Після отримання рекомендації машиніст може змінити тягу або гальмівний режим, що відображається у швидкості, прискоренні та стані обладнання. Наступний цикл оцінювання має перевіряти не тільки зникнення загрози, а й відповідність фактичної динаміки прогнозованому результату. Якщо очікуваного ефекту немає, необхідно повторно оцінити обстановку і не приховувати суперечливість даних. На рівні програмної реалізації це означає необхідність зберігати вихідні параметри, проміжні стани та причину прийнятого рішення.

Для обґрунтування моделі розглянуто пріоритет штатних захисних пристроїв. Бортові засоби забезпечення безпеки виконують нормативно визначені функції контролю й втручання, тоді як СППР розглядається як допоміжна система. Рекомендаційний рівень не повинен змінювати алгоритмів сертифікованого захисту, блокувати захисні команди або формувати рекомендації всупереч правилам. Межа функцій задається технічним завданням і перевіряється до інтеграції системи на локомотиві. Саме тому в математичному й алгоритмічному забезпеченні важливо встановлювати межі застосування прийнятих припущень.

При оцінюванні результатів доцільно виділити стійкість до помилкової інформації. Некоректна швидкість, застаріле значення відстані або втрачений зв’язок можуть спотворювати висновок класифікатора. Тому важливе поєднання контролю діапазонів, часових міток та взаємної узгодженості параметрів; сумнівні дані позначаються окремо. Відсутність сигналу не можна автоматично інтерпретувати як нормальний режим руху. Завдяки такому поділу можливо перевіряти окремі функції системи та уникати некоректного узагальнення результатів моделювання.

У людино-машинній системі необхідно розрізняти автоматизацію вимірювання й автоматизацію прийняття рішення. Перша передбачає отримання технічних параметрів у цифровому вигляді; друга потребує інтерпретації умов і порівняння можливих дій. Наявність кількох цифрових екранів не означає, що машиніст отримує цілісну картину ризику. Якщо інформаційні потоки не узгоджені за часом, джерелом та фізичним змістом, виникає додаткове навантаження на увагу оператора. Розроблювана СППР повинна компенсувати цей недолік шляхом інтеграції

параметрів, але не приховувати значущі дані, що необхідні машиністу для самостійної оцінки.

Взаємодія людини з програмною рекомендацією потребує формування належної довіри. Завищена довіра може призводити до некритичного прийняття помилкової підказки, тоді як недостатня довіра зменшує фактичну користь правильно працюючої системи. Тому рекомендації повинні бути перевірюваними: за можливості вказувати суттєвий параметр, що викликав попередження, і не приховувати стан відмови інформаційного каналу. Особливо це важливо в умовах повторного формування повідомлень, коли оператор може не помітити зміни їхнього змісту. У тренажерних випробуваннях доцільно перевіряти правильність тлумачення таких сигналів і вплив їхньої кількості на час реагування.

1.3 Аналіз причин помилкових дій машиніста

Помилкове керуюче рішення може бути пов’язане не тільки з недостатньою кваліфікацією оператора, а й з неповнотою інформації, неточністю вимірювання, дефіцитом часу або погіршенням умов сприйняття. Саме тому причини необхідно класифікувати за групами, виділяючи фактори, на які СППР здатна впливати безпосередньо, та фактори, що потребують організаційних або технічних заходів.

До технічних факторів належать відмови допоміжного обладнання, ненормативний стан гальм, порушення роботи засобів контролю, запізнення сигналів і недостатня точність визначення параметрів. Інформаційні фактори охоплюють неповноту, суперечливість і надмірний обсяг повідомлень. Організаційні чинники визначаються режимами праці, правилами обміну інформацією, порядком підготовки та характером керування перевізним процесом.

Психофізіологічні чинники характеризують втому, зниження концентрації, стрес, зміну працездатності впродовж зміни та складність перерозподілу уваги. СППР не може здійснювати медичну оцінку психофізіологічного стану без спеціальних вимірювань. У межах даної роботи застосовується інший підхід: оцінюється напруженість саме поїзної ситуації як об’єктивована характеристика інформаційного й часового навантаження.

До зовнішніх факторів віднесено атмосферні явища, обмежену видимість, ухили колії, несприятливі умови зчеплення та можливі перешкоди. Небезпечність

ситуації формується поєднанням чинників: наприклад, рух до заборонного сигналу на спуску може вимагати іншої гальмівної стратегії, ніж рух на горизонтальній дільниці за тих самих початкових швидкості та відстані.

У проєктованій системі кожна група факторів повинна мати відповідне інформаційне представлення. При відсутності необхідного датчика характеристика не повинна підмінятися довільним числом. Бажано вводити ознаку невизначеності, а в умовах критичного дефіциту даних рекомендувати машиністу контролювати ситуацію відповідно до штатних правил безпечного ведення поїзда.

Таблиця 1.2 – Групи факторів виникнення помилкових дій машиніста

Група	Типові прояви	Можливість підтримки СППР
Технічні	Відмова датчика, порушення гальмування	Діагностика й повідомлення
Інформаційні	Надлишок або неповнота даних	Агрегація, перевірка, ранжування
Організаційні	Графік, інтенсивність руху	Контекстні рекомендації
Психофізіологічні	Стрес, перевантаження уваги	Скорочення обсягу повідомлень
Зовнішні	Погода, ухили, перешкоди	Облік у моделі ризику

Систематизацію груп факторів наведено на рисунку 1.3.

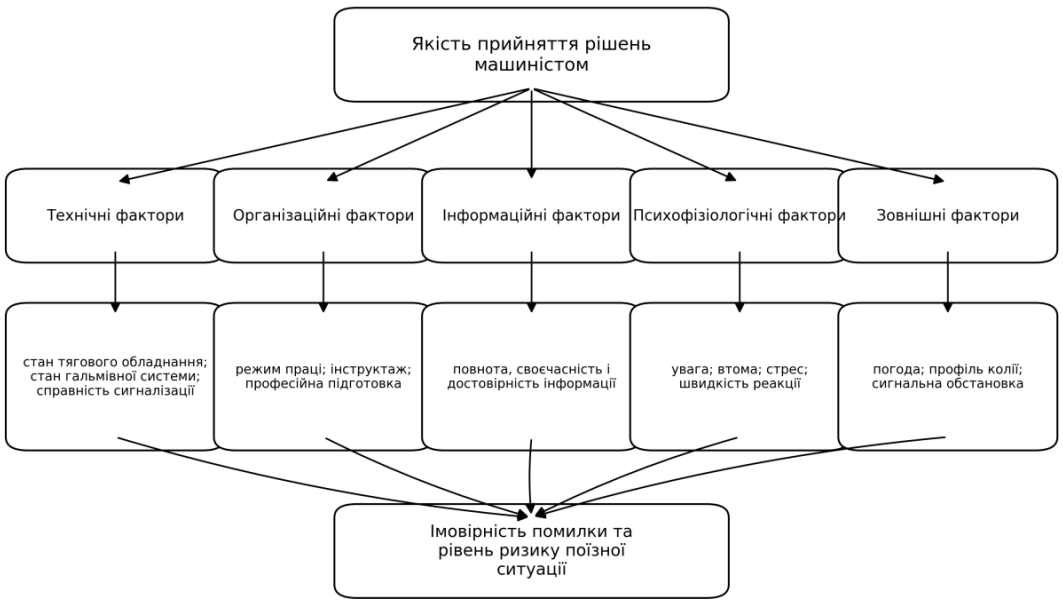


Рисунок 1.3 – Класифікація факторів, що впливають на рішення машиніста

Оператор може правильно побачити показання, але невірно інтерпретувати його у контексті профілю колії, або навпаки – прийняти раціональне рішення на основі хибно сприйнятої інформації. Ці випадки потребують різних запобіжних заходів: перевірки вхідного повідомлення та логічного контролю обраної дії. Єдина загальна оцінка людського фактору не дозволяє відокремити ці механізми. Це створює передумови для уточнення структури вхідних даних і перевірки відповідності рекомендацій реальній поїзній обстановці.

Під час розгляду питання «дефіцит часу на реакцію» важливо відокремити фізичний механізм від логіки розрахунку. У разі виявлення загрози машиніст має послідовно розпізнати її, оцінити допустимість дії та реалізувати відповідний керуючий вплив. Система може зменшити час попереднього аналізу, якщо видає однозначне повідомлення про конкретну небезпеку замість набору суперечливих сигналів. Скорочення часу реагування необхідно підтверджувати окремим експериментом із людиною-оператором. Вказана обставина особливо важлива, коли змінюються декілька параметрів одночасно, а результат має бути представлений машиністу без затримки.

Особливе значення для обраного підходу має помилка через втрату ситуаційної обізнаності. Під час тривалого руху увага може зосереджуватися на окремому індикаторі, а інші зміни обстановки залишаються непоміченими. Інтеграція швидкості, сигналу, відстані та стану гальмівної системи в одну оцінку сприяє своєчасному встановленню критичних взаємозв’язків. Проте надмірно часті попередження самі можуть провокувати звикання й погіршувати реакцію. Запропоноване тлумачення дозволяє виконати порівняльний аналіз варіантів, не підміняючи нормативну вимогу умовним інтегральним показником.

Практична реалізація повинна враховувати утома та індивідуальна варіативність. Функціональний стан машиніста змінюється залежно від тривалості роботи, умов кабіни, складності маршруту та інших причин. У цій роботі не здійснюється медичне вимірювання стомлення; замість цього кількісно описується напруженість самої ситуації за доступними параметрами. Такий показник не слід без додаткового обґрунтування тлумачити як індивідуальний психологічний діагноз. На рівні програмної реалізації це означає необхідність зберігати вихідні параметри, проміжні стани та причину прийнятого рішення.

Для обґрунтування моделі розглянуто комбінації слабких факторів. Окремі незначні відхилення – погіршення погоди, відставання від графіка та невелика зміна гальмівних характеристик – можуть спільно ускладнювати рішення. При аналізі

необхідно оцінювати їхню взаємодію, оскільки інтегральна небезпека може змінюватися не пропорційно кожному окремому фактору. У простій адитивній моделі такі ефекти можуть бути втрачені та потребують додаткових логічних правил. Саме тому в математичному й алгоритмічному забезпеченні важливо встановлювати межі застосування прийнятих припущень.

При оцінюванні результатів доцільно виділити організаційні передумови помилок. Якість підготовки, режим роботи, актуальність інструкцій та обмін інформацією з диспетчерськими службами впливають на правильність дій машиніста. СППР може підтримати окремі інформаційні функції, однак не усуває необхідності навчання, контролю технічного стану і дотримання регламентів. Підвищення безпеки має розглядатися як результат комплексу технічних та організаційних заходів. Завдяки такому поділу можливо перевіряти окремі функції системи та уникати некоректного узагальнення результатів моделювання.

Таблиця 1.3 – Приклади помилок і засобів попереджувального контролю

Механізм	Приклад	Функція СППР
Сприйняття	Не помічено зміну сигналу	Пріоритетне повідомлення про сигнальну умову
Інтерпретація	Недооцінено вплив ухилу	Порівняння доступної дистанції з розрахунковою
Планування	Вибрано невигідний режим тяги	Оцінка безпечних альтернатив за енергією
Виконання	Несвоєчасно змінено режим	Повторна оцінка фактичних параметрів
Інформаційний збій	Не отримано стан гальм	Позначення неповних даних і обмеження рекомендацій
Суперечливі дані	Зміна швидкості не узгоджується з відстанню	Повідомлення про недостовірність вхідного сигналу

Зменшення впливу людського фактору не повинно зводитися до кількості автоматично сформованих попереджень. Деякі повідомлення можуть бути правильними за змістом, але з’являтися надто пізно; інші – своєчасними, проте надто складними для швидкого сприйняття. Отже, помилка у взаємодії може виникнути і на рівні проектування інтерфейсу. Для її запобігання потрібні зрозуміла ієрархія повідомлень, чіткий зв’язок із конкретною ситуацією та перевірка того, чи не заважає система виконанню штатних процедур. Така перевірка не може бути виконана лише математичним моделюванням без участі локомотивної бригади.

Окремо слід розглядати помилкові тривоги. Якщо система часто підвищує клас небезпеки через шум датчика або неістотне відхилення, машиніст може втратити довіру до повідомлень. Водночас надмірна фільтрація збільшує ризик пропуску справжньої небезпечної події. Вирішення цього протиріччя полягає в розмежуванні критичних нормативних умов, які повинні оброблятися негайно, та допоміжних оцінок, для яких можливі фільтрація й гістерезис. Отже, показники повноти виявлення небезпек і частоти хибних попереджень мають оцінюватися одночасно.

1.4 Аналіз інформаційно-керуючих систем і методів підтримки прийняття рішень

Традиційні системи інформаційного забезпечення локомотива призначені для відображення параметрів, контролю встановлених меж та попередження про визначені небезпечні стани. Принциповою відмінністю системи підтримки прийняття рішень є формування оцінки кількох альтернативних дій у конкретному контексті. Вона не обмежується сигналом про перевищення певного порога, а аналізує взаємозалежність швидкості, відстані, стану гальм і режиму руху.

Методи прийняття рішень можуть ґрунтуватися на жорстких правилах, продукційних системах, експертних оцінках, нечіткій логіці, статистичних класифікаторах і багатокритеріальній оптимізації. Правила добре піддаються поясненню, однак для складних ситуацій утворюють значну кількість комбінацій. Моделі, що навчаються за даними, мають потенціал для врахування нелінійних залежностей, проте вимагають репрезентативної навчальної вибірки й окремої перевірки стійкості.

Для задачі допоміжного аналізу поїзних ситуацій доцільним є комбінований підхід: жорсткі обмеження безпеки, нормування вимірюваних параметрів, класифікація ситуації, оцінювання небезпеки та багатокритеріальний вибір допустимих дій. За таким принципом рішення є пояснюваним і може бути перевірене на окремих сценаріях без припущення, що статистичний алгоритм вже пройшов промислову сертифікацію.

У наукових матеріалах Неведрова О. В. розглядаються теоретичні основи інтелектуальних систем керування локомотивом, зокрема адитивний критерій оцінки дій і параметр напруженості роботи машиніста. У даній кваліфікаційній роботі ці

підходи використано як науково-методичну основу проєктування допоміжної СППР; запропоновані структурні схеми та сценарні оцінки належать до концептуального рівня опрацювання, а не до результатів сертифікованих експлуатаційних випробувань. [1–5]

Обираючи метод розпізнавання, необхідно оцінювати не тільки ймовірну точність класифікації, а й швидкість обробки, стійкість до пропусків інформації, інтерпретованість результату та можливість незалежної перевірки. Для реальної бортової системи ці характеристики визначають вимоги до обчислювального блока, каналів передачі даних і періодичності оновлення рекомендацій.

Порівняльну схему методів розпізнавання поїзних ситуацій подано на рисунку 1.4.

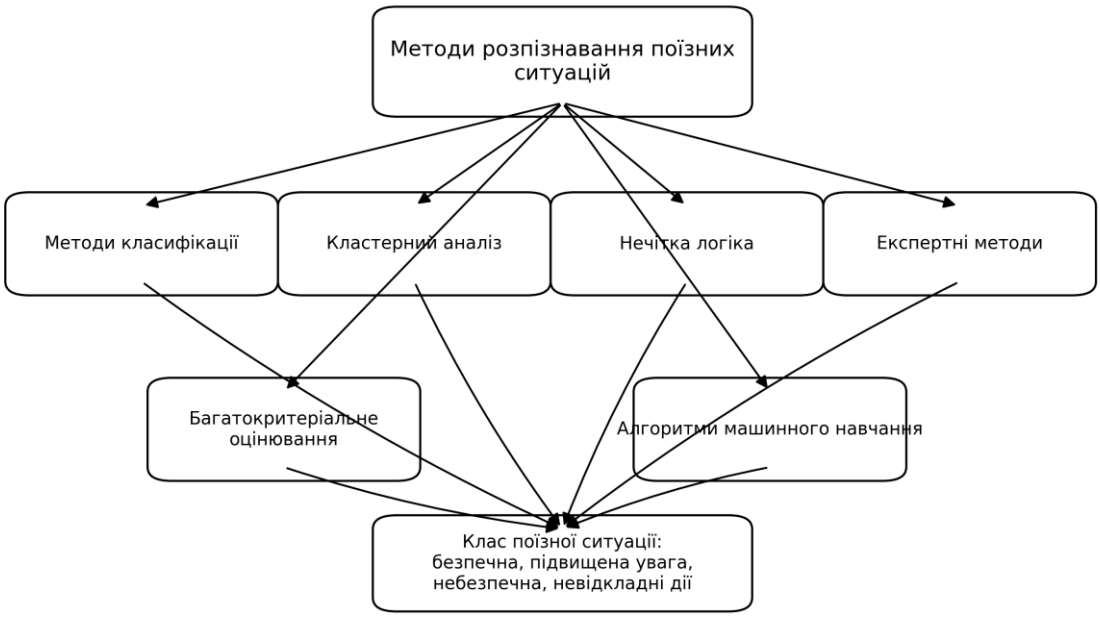


Рисунок 1.4 – Методи розпізнавання поїзних ситуацій

Звичайний індикатор показує значення параметра або стан пристрою, тоді як СППР виконує інтерпретацію сукупності показників та порівняння допустимих дій. Це дозволяє переходити від запитання «що відбувається?» до запитання «яка дія доцільна за відомих обмежень?». Рекомендація повинна супроводжуватися зрозумілою причиною її появи. Це створює передумови для уточнення структури вхідних даних і перевірки відповідності рекомендацій реальній поїзній обстановці.

Таблиця 1.4 – Порівняння методів підтримки прийняття рішень

Метод	Перевага	Обмеження
Правила й логічні умови	Прозорість та перевірюваність	Складність великої бази правил
Експертне оцінювання	Врахування досвіду фахівців	Залежність від складу експертів
Метод Сааті	Формальне узгодження ваг	Потреба перевірки узгодженості
Статистична класифікація	Урахування даних спостережень	Потреба якісної вибірки
Багатокритеріальний вибір	Порівняння альтернатив	Чутливість до ваг і нормування

Під час розгляду питання «правилові експертні алгоритми» важливо відокремити фізичний механізм від логіки розрахунку. Правила предметної області дозволяють явно встановити умови небезпеки й відповідні обмеження керування. Такі алгоритми зручні для перевірки, пояснення та аудиту, особливо коли доступна обмежена кількість документованих ситуацій. Вони потребують систематичного перегляду у разі зміни нормативних вимог або конфігурації локомотива. Вказана обставина особливо важлива, коли змінюються декілька параметрів одночасно, а результат має бути представлений машиністу без затримки.

Особливе значення для обраного підходу має нечіткі моделі оцінювання. Лінгвістичні категорії «низька швидкість», «мала відстань» або «значний ризик» можуть бути формалізовані функціями належності. Такий підхід корисний для умов із неповними або неточними оцінками та дозволяє уникати різких стрибків результату на межі одного порога. Форми функцій належності повинні отримувати експертне або експериментальне обґрунтування. Запропоноване тлумачення дозволяє виконати порівняльний аналіз варіантів, не підміняючи нормативну вимогу умовним інтегральним показником.

Практична реалізація повинна враховувати моделі машинного навчання. Статистичні методи потенційно можуть визначати складні взаємозв’язки у телеметрії та послідовностях подій. Для застосування необхідна репрезентативна розмічена вибірка різних режимів, перевірка узагальнення й аналіз помилок на критичних класах. Наявні матеріали не містять такого набору даних, тому на цій стадії нейромережеві оцінки не проголошуються перевіреним результатом. На рівні програмної реалізації це означає необхідність зберігати вихідні параметри, проміжні стани та причину прийнятого рішення.

Для обґрунтування моделі розглянуто багатокритеріальний вибір. У нормальному режимі існують альтернативи з різними витратами енергії, точністю графіка та впливом на обладнання. Для формалізованого порівняння можна застосовувати адитивний критерій із нормованими оцінками, попередньо відкинувши заборонені дії. Ваги оцінок мають відображати не довільні вподобання розробника, а погоджену ієрархію пріоритетів. Саме тому в математичному й алгоритмічному забезпеченні важливо встановлювати межі застосування прийнятих припущень.

При оцінюванні результатів доцільно виділити пояснюваність і перевірюваність. У разі попередження оператору важливо розуміти, чому саме рекомендовано знизити швидкість або перейти до гальмування. Пояснюваний алгоритм може вказати порушений параметр, рівень ризику та ключову умову вибору рішення. Такі пояснення повинні бути короткими, щоб не створювати небезпечного відволікання у критичній ситуації. Завдяки такому поділу можливо перевіряти окремі функції системи та уникати некоректного узагальнення результатів моделювання.

Порівняння різних класів систем свідчить, що сама наявність алгоритму машинного навчання не гарантує переваги над прозорими предметними правилами. Перевага правил полягає у можливості відтворити кожен висновок за відомими умовами; перевага статистичних моделей може проявлятися за великої кількості типових і коректно розмічених спостережень. Для задач безпеки особливо важливо підтверджувати поведінку на рідкісних критичних ситуаціях. Тому перспективна архітектура може поєднувати жорсткі безпекові обмеження, пояснювану класифікацію та статистичні допоміжні оцінки, які проходять незалежну перевірку.

1.5 Постановка задачі дослідження

На підставі проведеного аналізу сформульовано задачу розроблення інтелектуальної СППР, яка за поточними доступними даними повинна визначати клас поїзної ситуації, кількісно характеризувати небезпеку й напруженість роботи машиніста та формувати доцільну рекомендацію без порушення нормативних і технічних обмежень безпеки.

Задача охоплює послідовне вирішення таких взаємопов’язаних питань: формування набору ознак, приведення їх до порівнюваної шкали, обґрунтування ваг, класифікацію ситуації, відбір допустимих керуючих дій, порівняння за комплексним

критерієм і формування зрозумілого повідомлення машиністу. Для роботи на концептуальному рівні використовується модель із сімома інформативними ознаками та чотирма класами поїзних ситуацій.

Вхідні дані позначимо як D(t), вектор ознак – X(t), клас ситуації – C*(t), коефіцієнт небезпеки – R(t), оцінку напруженості – N(t), а рекомендовану дію – u*(t). У такому записі функціональна постановка задачі відображається як послідовність взаємопов’язаних перетворень від первинного вимірювання до результату.

Критерієм достатності моделі для демонстраційного моделювання є здатність алгоритму зберігати пріоритет безпеки, давати несуперечливі рекомендації на заданих сценаріях і обробляти відсутність або недостовірність частини вхідних даних. Показники прогнозованого економічного ефекту оцінюються окремо, оскільки відповідна частина роботи ґрунтується на кошторисних припущеннях.

Подальша структура кваліфікаційної роботи узгоджена із цією постановкою: у другому розділі формалізуються показники й критерії, у третьому розробляються алгоритми, у четвертому виконуються сценарні перевірки, а у п’ятому наводиться техніко-економічний розрахунок.

Узагальнену схему функціонування СППР наведено на рисунку 1.5.



Рисунок 1.5 – Узагальнена схема функціонування інтелектуальної СППР

Вхідними параметрами є доступна бортова й маршрутна інформація; виходом є клас ситуації, інтегральна оцінка та рекомендований допустимий вплив. Таким чином, дослідницьку задачу можна подати як перетворення множини вимірювань у множину керуючих альтернатив із перевіркою обмежень безпеки. Моделі вибору дії не повинні використовувати невідомі або недоступні в реальному часі параметри без позначення невизначеності. Це створює передумови для уточнення структури вхідних даних і перевірки відповідності рекомендацій реальній поїзній обстановці.

Під час розгляду питання «принцип мінімально достатніх ознак» важливо відокремити фізичний механізм від логіки розрахунку. Надлишкова інформація ускладнює обробку та може дублювати вплив одного явища у кількох критеріях. Початковий перелік із семи ознак обрано як концептуальну структуру для презентації алгоритму та сценарного дослідження. Оптимальність числа ознак має підтверджуватися статистичною перевіркою після отримання експлуатаційних даних. Вказана обставина особливо важлива, коли змінюються декілька параметрів одночасно, а результат має бути представлений машиністу без затримки.

Особливе значення для обраного підходу має побудова класів небезпеки. Чотирирівнева класифікація відділяє штатний режим від підвищеної уваги, небезпечної ситуації та ситуації невідкладних дій. Класи мають різний характер повідомлень, а тому їх необхідно розглядати як елемент взаємодії з машиністом, а не лише як математичні позначення. Критичні нормативні умови можуть вимагати безпосереднього присвоєння найвищого класу незалежно від усередненої оцінки. Запропоноване тлумачення дозволяє виконати порівняльний аналіз варіантів, не підміняючи нормативну вимогу умовним інтегральним показником.

Практична реалізація повинна враховувати контроль достовірності висновків. Кожне рішення повинно бути відтворюваним за зареєстрованими вхідними даними, налаштуваннями алгоритму та версією правил. Реєстрація потрібна для перевірки помилкових попереджень і пропущених небезпечних подій, а також для уточнення експертних параметрів. Без журналу вхідних сигналів оцінити причину помилкової рекомендації практично неможливо. На рівні програмної реалізації це означає необхідність зберігати вихідні параметри, проміжні стани та причину прийнятого рішення.

Для обґрунтування моделі розглянуто етапність проєктування. На першому етапі достатньо створити концептуальну модель і перевірити її на типових сценаріях; наступні етапи мають включати тренажерні випробування та інтеграційні тести. Такий поділ не дозволяє сплутати результат математичного моделювання з підтвердженою придатністю до експлуатації. Допуск системи на реальний локомотив потребує виконання окремих нормативних процедур. Саме тому в математичному й алгоритмічному забезпеченні важливо встановлювати межі застосування прийнятих припущень.

При оцінюванні результатів доцільно виділити показники дослідницького результату. Оцінюються здатність класифікувати задані сценарії, логічна несуперечливість рекомендацій, чутливість до змін параметрів та прогнозна

економічна доцільність. Критерії функціональної перевірки потрібно встановити до моделювання, щоб не підбирати їх під уже отриманий результат. Кількісні показники точності та швидкості роботи можуть з’явитися лише після відповідних вимірювань. Завдяки такому поділу можливо перевіряти окремі функції системи та уникати некоректного узагальнення результатів моделювання.

Таблиця 1.5 – Вимоги до концептуальної СППР

Група вимог	Сутність	Спосіб перевірки
Функціональні	Розпізнавання класів C1–C4	Сценарні тести
Безпекові	Відсутність недопустимих рекомендацій	Логічні правила та експертний перегляд
Інформаційні	Контроль якості вхідних ознак	Тести пропусків і застарілих повідомлень
Ергономічні	Коротке повідомлення за пріоритетом	Тренажерне випробування
Діагностичні	Реєстрація причини рекомендації	Аналіз журналу подій
Економічні	Порівняння витрат і прогнозних заощаджень	Кошторис і аналіз чутливості

З урахуванням проведеного аналізу послідовність подальшого дослідження повинна бути відтворюваною. Спочатку встановлюється перелік доступних параметрів, для кожного з яких визначаються джерело, фізична одиниця та критерій достовірності. Далі здійснюється формалізація умов небезпеки і формування класів ситуацій. Тільки після цього можна переходити до багатокритеріального порівняння керуючих дій. При перевірці результату необхідно порівнювати не лише кінцеву рекомендацію, але й проміжні параметри моделі. Це дозволяє встановлювати, на якому етапі виникла помилка: при вимірюванні, нормуванні, класифікації чи оцінюванні альтернатив.

У межах кваліфікаційної роботи центральним результатом є концепція алгоритмічного забезпечення, а не випробуваний промисловий пристрій. Така межа має методичне значення, оскільки дає можливість коректно інтерпретувати модельні коефіцієнти та результати економічного розрахунку. Подальші етапи повинні включати формування реальної інформаційної вибірки, незалежну перевірку правил класифікації, дослідження реакції машиніста на тренажері та уточнення вартості апаратного комплексу. Лише після отримання зазначених даних можна обґрунтовано оцінювати експлуатаційну ефективність і готовність системи до впровадження.

Висновки до розділу 1

Встановлено, що процес ведення поїзда є багатофакторною ергатичною задачею, у якій машиніст одночасно враховує технічні обмеження, зовнішні умови, графік руху та безпеку. Наведений у вихідних матеріалах розподіл причин транспортних подій засвідчує суттєву роль людського фактора, однак не дає підстав без додаткових даних прогнозувати певне відсоткове скорочення аварійності.

Обґрунтовано доцільність застосування інтелектуальної СППР як допоміжного аналітичного контуру, який інтегрує параметри руху, класифікує ситуацію та формує рекомендацію машиністу. Сформульовано вимоги до пояснюваності, достовірності, своєчасності інформації та недопущення порушень штатних захисних функцій.

Сформовано постановку задачі, що передбачає сім основних інформативних ознак, чотири класи ситуацій, оцінювання небезпеки й напруженості роботи машиніста та багатокритеріальний вибір рекомендованої дії.

2 Розроблення математичного забезпечення інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень

2.1 Класифікація факторів, що визначають поїзну ситуацію

Побудова математичного забезпечення СППР починається з визначення системи факторів, які формують поточний стан руху. Під поїзною ситуацією розуміється сукупність вимірюваних і встановлених параметрів, що характеризують рух поїзда, умови його продовження та необхідність коригування керуючих дій. Ситуація змінюється в часі, тому її оцінка повинна здійснюватися повторно з періодом, достатнім для виявлення небезпечної динаміки.

Для аналізу запропоновано виділяти безпосередньо вимірювані параметри, регламентовані обмеження і похідні показники. До першої групи належать фактична швидкість, дистанція до орієнтира, сигнали про стан обладнання і витрати енергії. До другої – дозволена швидкість, встановлений графік та вимоги до гальмування. До третьої – нормовані відхилення, індекси небезпеки і коефіцієнт напруженості.

Кожна ознака оцінюється за її інформативністю, вимірюваністю та впливом на вибір керуючої дії. Наприклад, абсолютна швидкість без даних про обмеження на ділянці не визначає небезпеку однозначно. Аналогічно, однакова відстань до сигналу може бути допустимою при невеликій швидкості та недостатньою при значній швидкості, особливо на спуску.

Фактори можуть бути взаємозалежними. Підвищена швидкість скорочує наявний час реагування, несприятливі умови зчеплення можуть збільшувати гальмівний шлях, а відхилення від графіка іноді створює мотивацію до енергетично нераціональних прискорень. Тому повне виявлення небезпеки лише за одним показником є недостатнім.

Для розглянутої концептуальної СППР використано класи C_1 «безпечна ситуація», C_2 «підвищена увага», C_3 «небезпечна» і C_4 «невідкладні дії». Ці класи призначені для організації допоміжних рекомендацій. Їх не можна ототожнювати з офіційними експлуатаційними категоріями подій або нормативними ступенями небезпеки без спеціального підтвердження.

Таблиця 2.1 – Класи поїзних ситуацій у концептуальній моделі

Клас	Зміст	Тип інформаційної підтримки
C_1	Параметри у межах допустимого режиму	Контроль поточного режиму
C_2	Ознаки наближення до небажаного стану	Попередження та коригування
C_3	Ситуація вимагає зниження ризику	Пріоритетна рекомендація
C_4	Безпосередня загроза, необхідна невідкладна дія	Термінове попередження відповідно до правил

Класифікація факторів і груп їхнього впливу відображена на рисунку 2.1.

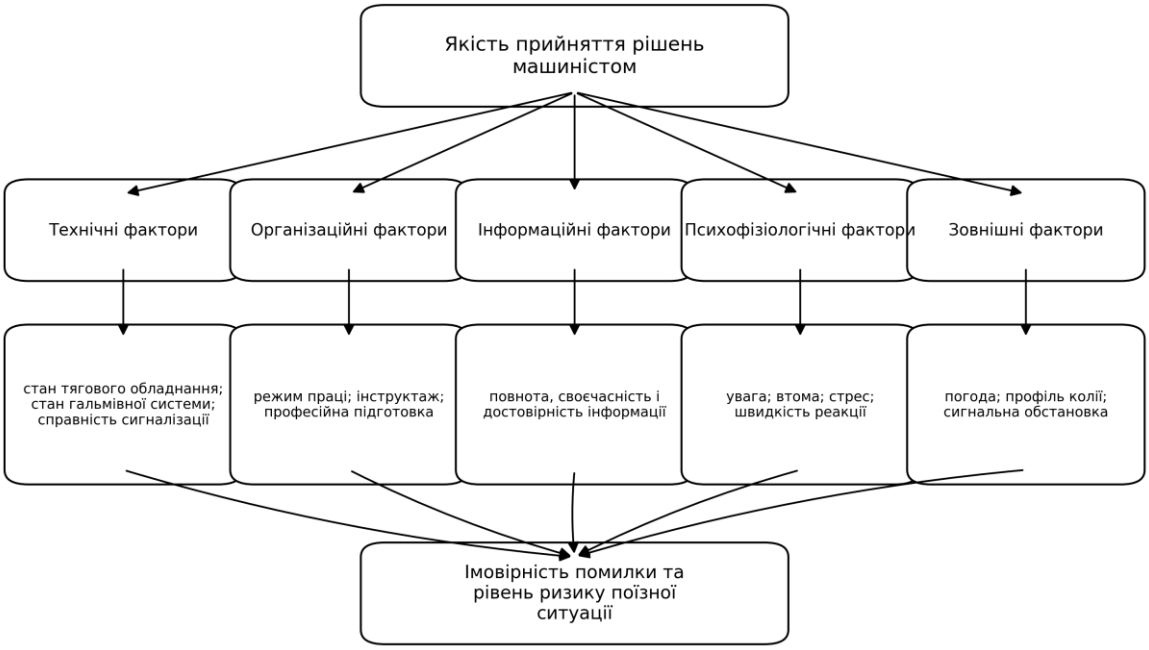


Рисунок 2.1 – Групування факторів, що характеризують поїзну ситуацію

Швидкість, ухил, зчеплення й гальмівні характеристики безпосередньо впливають на динаміку поїзда, тоді як сигнальні обмеження та розклад задають припустимий режим. Для класифікатора важливо не змішувати вимірювані фізичні стани з нормативними вимогами, оскільки вони мають різні механізми виникнення. Така декомпозиція дає змогу відокремити фізичну небезпеку від порушення встановленого правила. Це створює передумови для уточнення структури вхідних даних і перевірки відповідності рекомендацій реальній поїзній обстановці.

Під час розгляду питання «дискретні та неперервні ознаки» важливо відокремити фізичний механізм від логіки розрахунку. Швидкість і відстань змінюються неперервно, але показання сигналу або ознака справності обладнання

часто представлені обмеженою кількістю станів. Перед включенням у вектор кожен тип даних повинен мати відповідний спосіб кодування; звичайне лінійне нормування дискретних категорій не завжди коректне. Умовна числова шкала сигналів не повинна створювати хибне враження рівних фізичних відстаней між станами. Вказана обставина особливо важлива, коли змінюються декілька параметрів одночасно, а результат має бути представлений машиністу без затримки.

Особливе значення для обраного підходу має небезпека як багатофакторна характеристика. Ризик для руху визначається поєднанням можливості небажаної події та тяжкості її наслідків, а не лише одним значенням швидкості. Під час сценарного аналізу потрібно оцінювати взаємодії ознак: наприклад, зменшення відстані є особливо критичним за недостатньої гальмівної ефективності. Інтегральний індекс має допоміжний характер і не скасовує заборонних умов безпеки. Запропоноване тлумачення дозволяє виконати порівняльний аналіз варіантів, не підміняючи нормативну вимогу умовним інтегральним показником.

Практична реалізація повинна враховувати часова залежність ознак. Значення параметрів на окремому кроці може бути допустимим, хоча напрямок їх зміни вже вказує на підвищення ризику. Оцінка приросту швидкості, темпу зближення та зміни гальмівного стану розширює можливість раннього попередження. Для похідних величин потрібне фільтрування шуму, інакше алгоритм може реагувати на випадкові коливання датчиків. На рівні програмної реалізації це означає необхідність зберігати вихідні параметри, проміжні стани та причину прийнятого рішення.

Для обґрунтування моделі розглянуто спільні причини параметрів. Один фізичний фактор може проявлятися одразу в декількох ознаках, наприклад ухил впливає на прискорення й на гальмівний шлях. Без перевірки кореляції адитивна модель здатна двічі врахувати один і той самий вплив та завищити підсумкову оцінку. Для реальної системи потрібні аналіз залежностей та перевірка внеску кожного параметра. Саме тому в математичному й алгоритмічному забезпеченні важливо встановлювати межі застосування прийнятих припущень.

При оцінюванні результатів доцільно виділити консервативна інтерпретація невизначеності. Помилки вимірювань і неповнота телеметрії не можуть бути повністю усунуті навіть при коректній роботі обладнання. Якщо значення критичної ознаки невідоме, модель повинна або використати безпечну гарантовану межу, або позначити відсутність можливості достовірного висновку. Оптимістичне заповнення пропуску нулем є небезпечним для параметрів, пов’язаних з гальмівним шляхом.

Завдяки такому поділу можливо перевіряти окремі функції системи та уникати некоректного узагальнення результатів моделювання.

2.2 Формування системи показників поїзної ситуації

Для опису поточної ситуації формується вектор ознак X(t), що містить сім компонентів: швидкість V(t), відстань до сигналу або перешкоди L(t), сигнальну обстановку S(t), стан гальмівної системи B(t), відхилення витрат енергоресурсів E(t), відхилення від графіка G(t) і профіль ділянки P(t). Наведені параметри мають різні одиниці вимірювання й різну природу, тому їх не можна безпосередньо додавати до єдиного показника.

Виміряні компоненти необхідно відокремлювати від дискретних і категоріальних. Швидкість та відстань є неперервними величинами. Сигнальна обстановка характеризується дискретним станом, який перетворюється на числову ознаку за окремими правилами. Стан гальмівної системи може описуватися як категорією справності, так і діагностичними показниками, якщо вони доступні.

Перед використанням у математичній моделі показники проходять перевірку допустимості значень, узгодження одиниць вимірювання та нормування. Для безперервної ознаки за наявності встановлених мінімального й максимального значень використовується лінійне перетворення на інтервал від нуля до одиниці. Після нормування важливо забезпечити єдиний напрям шкали: більше значення повинно відповідати більшому небажаному відхиленню, а не довільно більшому фізичному параметру.

Для частини параметрів доцільніше використовувати відносне відхилення. Наприклад, небезпечність фактичної швидкості залежить від перевищення допустимого значення, а не від абсолютної швидкості. Аналогічно, важливо не саме число метрів до сигналу, а співвідношення доступної відстані з розрахунковою відстанню безпечної зупинки. Отже, нормування не замінює предметного фізичного змісту ознаки.

Для сигналів, що надійшли із запізненням, або для невідомих компонентів вектора необхідно передбачати ознаки якості даних. За відсутності критично важливої інформації система повинна повідомляти про обмежену достовірність оцінки і не формувати удавано точну числову рекомендацію.

$$X(t) = \{V(t), L(t), S(t), B(t), E(t), G(t), P(t)\} \quad (2.1)$$

де X(t) – вектор поточної поїзної ситуації;

V – швидкість руху;

L – дистанція до контрольного об’єкта;

S – сигнальний стан;

B – стан гальмівної системи;

E – відхилення енергетичних витрат;

G – відхилення від графіка;

P – параметри профілю колії.

$$x_i * = (x_i - x_i min)/(x_i max - x_i min) \quad (2.2)$$

де x_i* – нормоване значення і-ї ознаки;

x_i, x_{imin}, x_{imax} – поточне, мінімальне й максимальне значення параметра відповідно. Формула застосовується лише за умови $x_{imax} > x_{imin}$.

Таблиця 2.2 – Склад і призначення вектора інформативних ознак

Символ	Найменування	Зміст оцінювання
V	Швидкість	Порівняння з допустимим режимом
L	Відстань	Час і дистанція для реагування
S	Сигнальна обстановка	Дозвіл або заборона руху
B	Стан гальм	Можливість безпечної зупинки
E	Відхилення енерговитрат	Оцінка економічності
G	Відхилення від графіка	Оцінка виконання розкладу
P	Профіль колії	Вплив ухилів на рух і гальмування

Функціональний зв’язок параметрів та ознак наведено на рисунку 2.2.

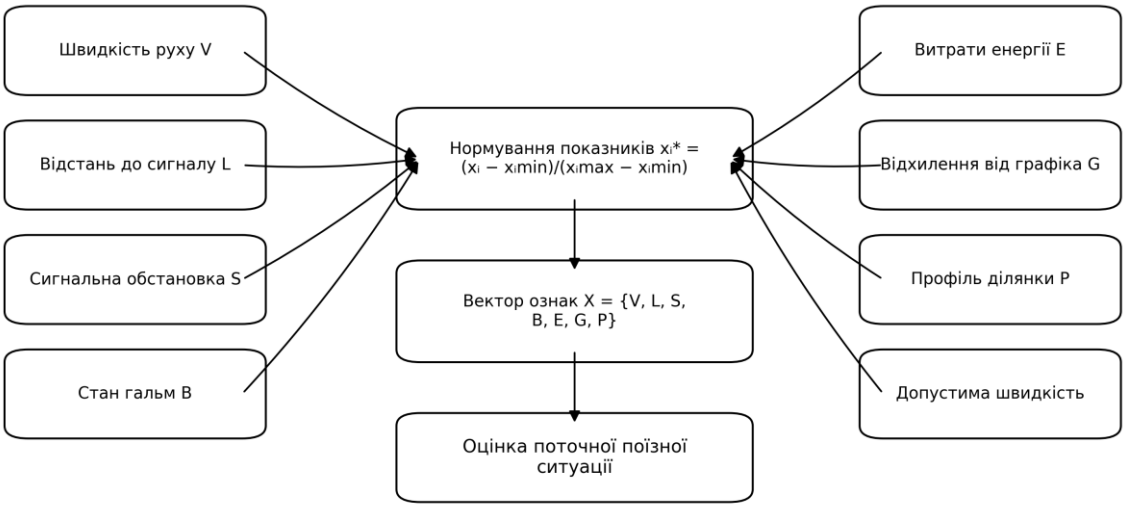


Рисунок 2.2 – Система показників поточної поїзної ситуації

Дані швидкості, відстані, витрат енергії та відхилення від графіка надходять у несумісних фізичних одиницях. Нормування дає змогу працювати зі спільною числовою шкалою, але початкові одиниці необхідно зберігати у журналі та перевіряти до виконання перетворення. Помилка перерахунку кілометрів за годину в метри за секунду здатна істотно спотворити модель гальмування. Це створює передумови для уточнення структури вхідних даних і перевірки відповідності рекомендацій реальній поїзній обстановці.

Під час розгляду питання «напрямок впливу ознаки» важливо відокремити фізичний механізм від логіки розрахунку. Для одних параметрів збільшення значення відповідає підвищенню небезпеки, для інших – навпаки. Тому після нормування потрібно визначити знак корисності або небезпеки кожного показника, щоб підсумковий критерій мав однозначну інтерпретацію. Нормування саме по собі не встановлює, чи є велика величина сприятливою для безпеки. Вказана обставина особливо важлива, коли змінюються декілька параметрів одночасно, а результат має бути представлений машиністу без затримки.

Особливе значення для обраного підходу має ознака доступної відстані. Відстань до сигналу або перешкоди є важливою лише спільно зі швидкістю й оцінкою можливої інтенсивності гальмування. Доцільно доповнювати її розрахунковим запасом зупинки або відношенням доступної відстані до потрібної, коли вихідні параметри дозволяють виконати розрахунок. Отриманий показник є похідним і не повинен автоматично дублювати вагу вихідних величин. Запропоноване тлумачення

дозволяє виконати порівняльний аналіз варіантів, не підміняючи нормативну вимогу умовним інтегральним показником.

Практична реалізація повинна враховувати параметр гальмівної системи. Оцінка справності повинна враховувати не тільки бінарний сигнал «справна/несправна», а й доступність даних про фактичну гальмівну реакцію. Під час моделювання дозволено використовувати узагальнений нормований індекс, але для промислового застосування необхідні параметри конкретного обладнання. Прийнятий навчальний індекс не є сертифікованим показником ефективності гальм. На рівні програмної реалізації це означає необхідність зберігати вихідні параметри, проміжні стани та причину прийнятого рішення.

Для обґрунтування моделі розглянуто відхилення від графіка. Запізнення і випередження можуть вимагати різних рекомендацій, але повинні бути підпорядковані вимогам швидкості та сигналізації. Знак відхилення доцільно зберігати, а для оцінювання масштабів використовувати абсолютну величину або окремі функції штрафу. Графікова складова не має права заохочувати перевищення допустимої швидкості. Саме тому в математичному й алгоритмічному забезпеченні важливо встановлювати межі застосування прийнятих припущень.

При оцінюванні результатів доцільно виділити період оновлення ознак. Різні датчики мають різні частоти опитування, тому синхронізований вектор може містити дані з неоднаковим часом спостереження. Необхідно встановити допустимий вік повідомлення, перевіряти часові мітки й позначати розриви даних, перш ніж визначати клас ситуації. Числову межу затримки слід обґрунтовувати вимогами конкретної інтегрованої системи. Завдяки такому поділу можливо перевіряти окремі функції системи та уникати некоректного узагальнення результатів моделювання.

Таблиця 2.3 – Приклад узгодження різнорідних ознак

Ознака	Одиниця	Тип даних	Спосіб передавання
Швидкість	км/год	Неперервна	Число та час вимірювання
Відстань	м	Неперервна	Число та джерело
Сигнал	категорія	Дискретна	Код стану
Стан гальм	індекс/статус	Змішана	Статус достовірності
Енергоспоживання	кВт·год	Неперервна	Лічильник/розрахунок
Графік	с або хв	Знакова	Різниця планового й фактичного часу
Профіль	‰	Неперервна	Маршрутна модель

2.3 Комплексний критерій оцінювання керуючих дій

Оцінювання керуючих дій виконується як багатокритеріальна задача. Різні дії можуть мати неоднаковий вплив на безпеку, витрати енергії, виконання розкладу й технічну надійність. Так, зменшення тяги може забезпечувати економію енергії, але збільшувати запізнення; інтенсивне гальмування здатне підвищувати безпеку в критичній ситуації, однак не повинно безпідставно застосовуватися в штатному режимі. [1, 3]

Для порівняння припустимих альтернатив використовують адитивний критерій як зважену суму часткових оцінок. Часткові оцінки повинні бути нормовані до зіставної шкали. Вагові коефіцієнти залежать від класу ситуації. У штатному режимі можуть враховуватися енергетичні й часові показники, тоді як у небезпечній ситуації домінує забезпечення безпеки руху.

Пріоритет безпеки не слід розглядати тільки як збільшення вагового коефіцієнта. Перед багатокритеріальним порівнянням необхідно відкинути всі альтернативи, що порушують обов'язкові обмеження швидкості, сигналізації, допустимих режимів гальмування та інших регламентованих параметрів. Отже, на множині допустимих дій оптимізується комплексний показник, а всі неприйнятні з погляду безпеки дії не розглядаються.

Величина ваги має відображати важливість критерію лише в межах визначеної ситуації. Для запобігання необґрунтованому зміщенню результатів необхідно контролювати суму ваг і тестувати чутливість вибору до їх зміни. Якщо навіть невелика зміна ваг призводить до кардинальної зміни рекомендації, необхідно додатково перевірити стійкість моделі.

Багатокритеріальний критерій у даній роботі використовується для концептуального вибору рекомендації. Він не замінює тягові розрахунки, нормативні гальмівні розрахунки чи інструкції ведення поїзда, а дозволяє структуровано порівняти вже допустимі варіанти керування.

$$K(u) = \alpha_1 K\text{б}(u) + \alpha_2 K\text{е}(u) + \alpha_3 K\text{г}(u) + \alpha_4 K\text{н}(u) \qquad (2.3)$$

де K(u) – узагальнена оцінка керуючої дії u;

Кб, Ке, Кг, Кн – часткові критерії безпеки, енергоефективності, графіка та надійності; α_1, α_2, α_3, α_4 – вагові коефіцієнти, для яких $\alpha_i \geq 0$ і сума $\alpha_i = 1$.

$$u* = arg\ max\ K(u),\ u \in U\text{доп} \qquad (2.4)$$

де u* – дія з найбільшою оцінкою;

Uдоп – множина керуючих дій, що відповідають чинним обмеженням безпеки та технічним умовам.

Структуру формування комплексного критерію представлено на рисунку 2.3.

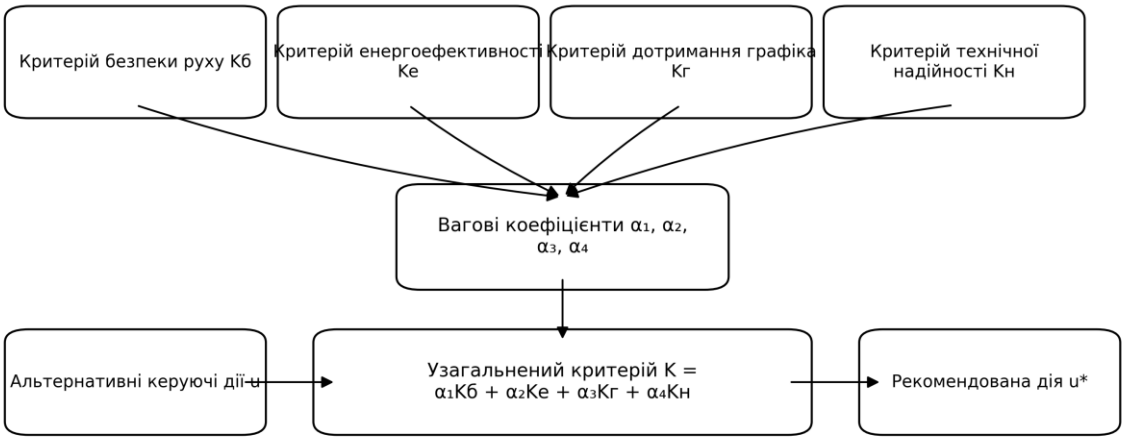


Рисунок 2.3 – Формування комплексного критерію керуючих дій

Перед порівнянням енерговитрат або графікового відхилення потрібно сформувати множину керуючих альтернатив, які задовольняють обов’язковим обмеженням безпеки. Такий двоетапний підхід не допускає ситуації, коли високий бал енергоефективності компенсує небезпечну дію в загальній сумі. Набір обмежень формується за правилами експлуатації і технічними характеристиками конкретного поїзда. Це створює передумови для уточнення структури вхідних даних і перевірки відповідності рекомендацій реальній поїзній обстановці.

Під час розгляду питання «інтерпретація часткових критеріїв» важливо відокремити фізичний механізм від логіки розрахунку. Критерії безпеки, економічності, графіка й надійності мають бути нормовані в одному напрямку, якщо використовується максимум інтегральної оцінки. Для штрафних показників зростання втрат повинно приводити до зменшення якості, інакше вибір максимуму матиме хибний фізичний зміст. Математичні позначення необхідно узгодити в усіх формулах і таблицях розділу. Вказана обставина особливо важлива, коли змінюються

декілька параметрів одночасно, а результат має бути представлений машиністу без затримки.

Особливе значення для обраного підходу має адаптивність ваг до ситуації. У штатному режимі можуть порівнюватися декілька безпечних способів руху, тоді як у критичній обстановці відносна значущість інших цілей зменшується. Тому ваги розглядаються як функції класу ситуації, але сам принцип безпеки забезпечується не лише вагою, а й попереднім фільтром. Навіть дуже велика вага безпеки не гарантує безпечності за невдалого визначення часткової шкали. Запропоноване тлумачення дозволяє виконати порівняльний аналіз варіантів, не підміняючи нормативну вимогу умовним інтегральним показником.

Практична реалізація повинна враховувати перевірка стійкості ранжування. Незначні зміни ваг або оцінок можуть змінити порядок альтернатив, якщо значення комплексного критерію близькі. Потрібно обчислювати різницю між найкращими оцінками і перевіряти, чи зберігається рекомендована дія в межах обґрунтованої похибки. За відсутності стійкого вибору системі доцільно видавати консервативну рекомендацію або попередження про невизначеність. На рівні програмної реалізації це означає необхідність зберігати вихідні параметри, проміжні стани та причину прийнятого рішення.

Для обґрунтування моделі розглянуто технічна надійність як критерій. Різкі зміни тяги та інтенсивне гальмування можуть бути припустимими, але впливати на навантаження обладнання й потребу в обслуговуванні. У некритичних умовах цей критерій підтримує більш плавне ведення поїзда; за реальної загрози він підпорядковується безпечному гальмуванню. Зв’язок між дією та фактичним зношуванням потребує експлуатаційного підтвердження. Саме тому в математичному й алгоритмічному забезпеченні важливо встановлювати межі застосування прийнятих припущень.

При оцінюванні результатів доцільно виділити контроль монотонності оцінки. За інших рівних умов зменшення запасу до перешкоди не повинно покращувати часткову оцінку безпеки. Такий простий принцип дозволяє формувати автоматичні тести математичної моделі і виявляти помилки знаків або некоректні шкали. Монотонність не завжди глобальна, тому перевіряється для чітко встановлених режимів. Завдяки такому поділу можливо перевіряти окремі функції системи та уникати некоректного узагальнення результатів моделювання.

Для демонстраційного порівняння двох уже допустимих дій можна використати умовні ваги 0,50; 0,20; 0,20; 0,10 та нормовані оцінки, наведені в таблиці 2.4. Зважене

значення для дії А дорівнює 0,50·0,95 + 0,20·0,60 + 0,20·0,70 + 0,10·0,85 = 0,820. Для дії Б відповідна сума становить 0,50·0,90 + 0,20·0,85 + 0,20·0,80 + 0,10·0,75 = 0,855. Формально дія Б має кращу інтегральну оцінку, але такий висновок коректний лише за умови, що обидві дії пройшли незалежну перевірку безпеки.

Для критичної ситуації важливим є те, що максимізація середнього критерію не дозволяє замінювати обов'язкову вимогу зупинки виграшем у графіку чи витратах енергії. Тому практичний алгоритм містить послідовність: визначення нормативних обмежень, формування множини допустимих дій, багатокритеріальне порівняння цієї множини та перевірка стійкості вибору. Це розділяє безумовні заборони й відносні експлуатаційні переваги.

Таблиця 2.4 – Демонстраційне зіставлення двох допустимих дій

Критерій	Вага (умовна)	Дія А	Дія Б
Безпека	0,50	0,95	0,90
Енергоефективність	0,20	0,60	0,85
Графік	0,20	0,70	0,80
Надійність	0,10	0,85	0,75
Зважена оцінка	1,00	0,820	0,855

2.4 Формалізація напруженості роботи машиніста

Напруженість роботи машиніста розглядається як інтегральний показник складності поточної поїзної ситуації для оператора. Вона не ототожнюється з медичним або психологічним діагнозом, оскільки в межах роботи не застосовуються інструменти безпосереднього вимірювання фізіологічних реакцій. В основу оцінки покладено доступні характеристики ситуації: рівень небезпеки, кількість значущих інформаційних сигналів, дефіцит часу та складність необхідної дії.

Підвищення небезпеки об'єктивно збільшує вимоги до точності рішення. Зростання інформаційного навантаження може виникати при одночасній зміні кількох параметрів, наприклад сигнальної обстановки, швидкості та стану гальм. Дефіцит часу визначається різницею між доступним інтервалом до критичної точки й орієнтовним часом реагування. Складність дії пов'язана з необхідністю послідовного виконання операцій.

У концептуальній моделі використовується зважена сума нормованих складових. Отриманий показник може застосовуватися для вибору режиму подання рекомендації. Низька напруженість допускає інформаційний характер повідомлення. При середній напруженості повідомлення має бути конкретним і своєчасним. Висока напруженість потребує мінімізації тексту та виділення лише пріоритетної дії.

У демонстраційних матеріалах наведено коефіцієнти для трьох ситуацій: перешкода попереду – 0,77, несприятливі погодні умови – 0,69, червоний сигнал на спуску – 0,57. Ці значення використовуються як вихідні сценарні оцінки, а не як універсально виміряні характеристики всіх умов експлуатації. Під час роботи з іншими локомотивами їх необхідно калібрувати.

Для інтерпретації в матеріалах презентації прийнято три умовні рівні: низький за $N < 0,3$, середній при $0,3 \leq N < 0,6$ і високий при $N \geq 0,6$. Межі є параметрами моделі, а не нормативними значеннями. Вони можуть бути уточнені за результатами експериментальних даних і експертного оцінювання.

$$N(t) = \beta_1 R(t) + \beta_2 I(t) + \beta_3 T(t) + \beta_4 Q(t) \quad (2.5)$$

де N(t) – коефіцієнт напруженості;

R(t) – рівень небезпеки,

I(t) – інформаційне навантаження,

T(t) – дефіцит часу,

Q(t) – складність керуючої дії;

β_i – невід’ємні нормовані вагові коефіцієнти, сума яких дорівнює одиниці.

Таблиця 2.5 – Демонстраційні оцінки напруженості роботи машиніста

Поїзна ситуація	**N**	**Умовний рівень**
Перешкода попереду	0,77	Високий
Несприятливі погодні умови	0,69	Високий
Червоний сигнал на спуску	0,57	Середній

Взаємодію складових індексу напруженості наведено на рисунку 2.4.



Рисунок 2.4 – Формування показника напруженості роботи машиніста

Небезпека характеризує можливі наслідки ситуації для руху, а напруженість – складність її оцінювання та своєчасного виконання необхідної дії. Ці величини можуть бути пов’язані, проте не тотожні: однотипний ризик за різного обсягу інформації може створювати різне навантаження на оператора. Отже, показник N(t) не замінює індекс R(t) у перевірці безпеки. Це створює передумови для уточнення структури вхідних даних і перевірки відповідності рекомендацій реальній поїзній обстановці.

Під час розгляду питання «оцінка дефіциту часу» важливо відокремити фізичний механізм від логіки розрахунку. Часова складова має враховувати доступний час до контрольної події та необхідний час для розпізнавання, прийняття рішення й виконання дії. Чим менша різниця між цими інтервалами, тим більш напруженою є ситуація з погляду оперативної роботи. Задані часові параметри необхідно визначати за реальними експериментами і технічними затримками, а не призначати довільно. Вказана обставина особливо важлива, коли змінюються декілька параметрів одночасно, а результат має бути представлений машиністу без затримки.

Особливе значення для обраного підходу має оцінка інформаційної складності. Висока кількість одночасно критичних ознак може збільшувати навантаження навіть тоді, коли абсолютний ризик залишається помірним. Для практичної моделі можна враховувати кількість змінених параметрів і ступінь їх суперечливості, нормуючи результат на визначену шкалу. Такий індекс не є прямим психофізіологічним

вимірюванням стану конкретного машиніста. Запропоноване тлумачення дозволяє виконати порівняльний аналіз варіантів, не підміняючи нормативну вимогу умовним інтегральним показником.

Практична реалізація повинна враховувати складність керуючої дії. Перехід від тяги до вибігу зазвичай потребує іншого набору операцій, ніж організація гальмування в обмеженій відстані. Показник складності дозволяє врахувати послідовність операцій, їхню терміновість та залежність від зовнішніх факторів. Порівняння різних дій має спиратися на навчальні регламенти й експертну оцінку. На рівні програмної реалізації це означає необхідність зберігати вихідні параметри, проміжні стани та причину прийнятого рішення.

Для обґрунтування моделі розглянуто порогові категорії n(t). Для наочного представлення доцільно застосовувати інтервали низької, середньої та високої напруженості, наведені в презентаційній моделі. Такі інтервали допомагають змінювати щільність і терміновість повідомлення, але не визначають самі по собі режим екстреного гальмування. Пороги є концептуальними й потребують перевірки за участю машиністів. Саме тому в математичному й алгоритмічному забезпеченні важливо встановлювати межі застосування прийнятих припущень.

При оцінюванні результатів доцільно виділити стійкість до короткочасних стрибків. Шум окремих датчиків здатний викликати неодноразове переключення категорії напруженості поблизу порогового значення. Доцільне введення гістерезису або часової фільтрації, щоб важливе попередження залишалося стабільним і зрозумілим. Фільтрація не повинна затримувати негайне повідомлення про критичне порушення. Завдяки такому поділу можливо перевіряти окремі функції системи та уникати некоректного узагальнення результатів моделювання.

2.5 Обґрунтування вагових коефіцієнтів методом Сааті

Вагові коефіцієнти багатокритеріальної моделі доцільно встановлювати на основі структурованих експертних суджень. Одним із відповідних методів є метод аналізу ієрархій Сааті, у якому відносна важливість показників оцінюється за результатами попарних порівнянь. Використання цього підходу дозволяє зафіксувати логіку експертного вибору та перевірити узгодженість отриманих оцінок. [1]

Для чотирьох критеріїв формується квадратна матриця A четвертого порядку. Її елементи a_{ij} характеризують відносну перевагу i-го критерію над j-м. Для узгодженої матриці виконуються співвідношення $a_{ii} = 1$ і $a_{ji} = 1/a_{ij}$. Власний вектор матриці або його нормоване наближення використовується для визначення ваг α_i.

Оскільки клас поїзної ситуації змінюється, одна фіксована матриця попарних порівнянь може бути недостатньою. У небезпечній ситуації безпека має безумовний пріоритет, тоді як у штатній ситуації ваги економічності й графіка можуть зростати в допустимих межах. Для промислової реалізації доцільно сформувати бази експертних порівнянь для кожного класу і перевірити їх за фактичними прикладами.

Для пояснення розрахунку наведемо демонстраційний приклад із пріоритетами 0,55; 0,20; 0,15 та 0,10 для безпеки, енергоефективності, графіка та надійності відповідно. Зазначені числа є ілюстративними та не приписуються експериментам або опитуванню експертів, яких у вихідних матеріалах не наведено. Якщо матрицю утворено як відношення відповідних ваг, вона має повну узгодженість за побудовою.

Для перевірки несуперечливості експертних оцінок використовується індекс CI, визначений через найбільше власне значення матриці, та відношення узгодженості CR. Потреба в перегляді оцінок визначається методикою Сааті. В конкретній сертифікованій системі пороги мають фіксуватися у програмній документації разом із правилами зміни ваг.

$$A = [a_{ij}],\ a_{ji} = 1/a_{ij},\ a_{ii} = 1 \tag{2.6}$$

де A – матриця попарних порівнянь;

a_{ij} – експертна оцінка відносної важливості i-го критерію щодо j-го.

$$CI = (\lambda max - n)/(n - 1),\ CR = CI/RI \tag{2.7}$$

де λmax – найбільше власне значення матриці A;

n – кількість критеріїв;

RI – табличний випадковий індекс узгодженості, для n = 4 у класичній методиці використовується RI = 0,90.

Таблиця 2.6 – Приклад нормованих ваг критеріїв

Критерій	Приклад ваги	Використання
Безпека руху	0,55	Основний пріоритет
Енергоефективність	0,20	За умови безпечності
Дотримання графіка	0,15	Після перевірки обмежень
Технічна надійність	0,10	Зменшення навантажень
Разом	1,00	Нормування

Етапи визначення ваг методом Сааті показано на рисунку 2.5.



Рисунок 2.5 – Послідовність визначення вагових коефіцієнтів методом Сааті

У методі Сааті спочатку формулюють мету порівняння, потім обирають критерії, а після цього оцінюють відносну важливість кожної пари. Такий підхід робить джерело ваг прозорішим, ніж пряме довільне задання чотирьох чисел. Вибір експертів і формулювання порівнянь повинні бути документовані. Це створює передумови для уточнення структури вхідних даних і перевірки відповідності рекомендацій реальній поїзній обстановці.

Під час розгляду питання «матриця попарних порівнянь» важливо відокремити фізичний механізм від логіки розрахунку. Для n критеріїв формується квадратна позитивна матриця з одиничною діагоналлю та оберненими елементами aij=1/aji. Ця властивість забезпечує узгодження напрямків двох парних суджень і дозволяє обчислювати власний вектор пріоритетів. Числові значення навчального прикладу не слід видавати за результати фактичного опитування експертів. Вказана обставина особливо важлива, коли змінюються декілька параметрів одночасно, а результат має бути представлений машиністу без затримки.

Особливе значення для обраного підходу має нормування пріоритетів. Ваги мають бути невід’ємними та у сумі дорівнювати одиниці, щоб інтегральний критерій зберігав інтерпретацію зваженої середньої. Знаходження власного вектора можна

перевіряти альтернативним способом геометричного середнього рядків; близькість результатів підтримує обчислювальну надійність. Жодний спосіб нормування не усуває змістовних суперечностей у самих оцінках експертів. Запропоноване тлумачення дозволяє виконати порівняльний аналіз варіантів, не підміняючи нормативну вимогу умовним інтегральним показником.

Практична реалізація повинна враховувати перевірка узгодженості. Індекс узгодженості визначається через найбільше власне число матриці та число критеріїв; після нормування на випадковий індекс утворюється відношення узгодженості. Якщо оцінки суперечливі, необхідно уточнити судження, а не використовувати отримані ваги без перевірки. Допустиму межу показника слід приймати за обраною методикою та задокументувати. На рівні програмної реалізації це означає необхідність зберігати вихідні параметри, проміжні стани та причину прийнятого рішення.

Для обґрунтування моделі розглянуто залежність ваг від класу ситуації. Пріоритети в штатному та критичному режимах можуть різнитися через різну роль економічності і графіка. Практично можна формувати окремі матриці порівнянь для кількох класів ситуацій або використовувати нормативний фільтр безпеки та одну матрицю для залишкових альтернатив. Підхід потрібно узгодити з експертами та перевірити на стійкість рекомендацій. Саме тому в математичному й алгоритмічному забезпеченні важливо встановлювати межі застосування прийнятих припущень.

При оцінюванні результатів доцільно виділити колективне експертне рішення. У складних транспортних задачах ваги доцільно встановлювати із залученням фахівців з локомотивного господарства, безпеки руху та ергономіки. Для групового рішення необхідно визначити спосіб агрегування матриць та документувати розбіжності оцінок. Без експертної процедури числові ваги в роботі є лише демонстраційним прикладом. Завдяки такому поділу можливо перевіряти окремі функції системи та уникати некоректного узагальнення результатів моделювання.

Для матриці чотирьох критеріїв число незалежних попарних оцінок дорівнює шести. Важливо звернути увагу, що судження експерта утворюють цілісну систему: якщо безпека визнана значно важливішою за енергоефективність, а енергоефективність – важливішою за графік, пряме порівняння безпеки й графіка не повинно суперечити цій логіці. Саме для перевірки подібних суперечностей обчислюється відношення узгодженості. Неузгоджену матрицю потрібно уточнювати, а не механічно нормувати. У цій роботі не наведено протоколу експертного опитування; тому демонстраційні ваги використовуються для пояснення

алгоритму, але не проголошуються остаточно визначеними експертними параметрами.

Таблиця 2.7 – Етапи перевірки вагових коефіцієнтів

Етап	Вхід	Контроль
Визначення критеріїв	Безпека, енергія, графік, надійність	Відсутність дублювання цілей
Парне порівняння	Експертна матриця	Обернена симетрія
Пошук пріоритетів	Власний вектор	Невід'ємність і сума ваг 1
Узгодженість	Найбільше власне число	Індекс і відношення узгодженості
Тест альтернатив	Керуючі дії	Стійкість ранжування
Експертне уточнення	Спірні парні оцінки	Повторна перевірка

2.6 Вибір інформативних ознак для розпізнавання поїзних ситуацій

Вибір інформативних ознак має забезпечувати достатній опис ситуації при обмеженій кількості каналів і прийнятній складності обробки. У роботі використано сім базових показників, які охоплюють динаміку руху, сигнальну обстановку, стан гальмування та експлуатаційні критерії. Усі ці параметри мають безпосередній зв'язок із вибором режиму руху або необхідністю втручання машиніста.

Надмірна кількість взаємозалежних параметрів може створювати подвійний облік одного фізичного ефекту. Наприклад, фактична швидкість і відхилення швидкості від дозволеного значення не повинні розглядатися як незалежні рівнозначні ознаки в одній адитивній оцінці без спеціального обґрунтування. Аналогічно слід враховувати кореляцію між профілем колії та розрахунковим гальмівним шляхом.

Інформативність може оцінюватися за здатністю ознаки розрізняти класи C_1–C_4, стійкістю вимірювання, доступністю на бортовому обладнанні та впливом на кінцеву рекомендацію. Для подальшого машинного навчання потрібні реальні марковані дані. За відсутності такої вибірки у даній роботі використовується сценарно-правиловий спосіб класифікації з формалізованими параметрами.

Якщо ознака недоступна, алгоритм повинен знизити довіру до результату або переключитися на попередньо визначений консервативний режим. Особливо це важливо для відстані до контрольного об'єкта та стану гальмівної системи. У цих

випадках неповнота інформації не повинна інтерпретуватися як відсутність небезпеки.

Таким чином, визначений набір ознак є мінімальним концептуальним набором, придатним для демонстраційного моделювання. Його склад може розширюватися при врахуванні конкретної серії локомотива, систем локомотивної сигналізації, динамічних характеристик поїзда та умов обігу.

Послідовність відбору ознак показано на рисунку 2.6.

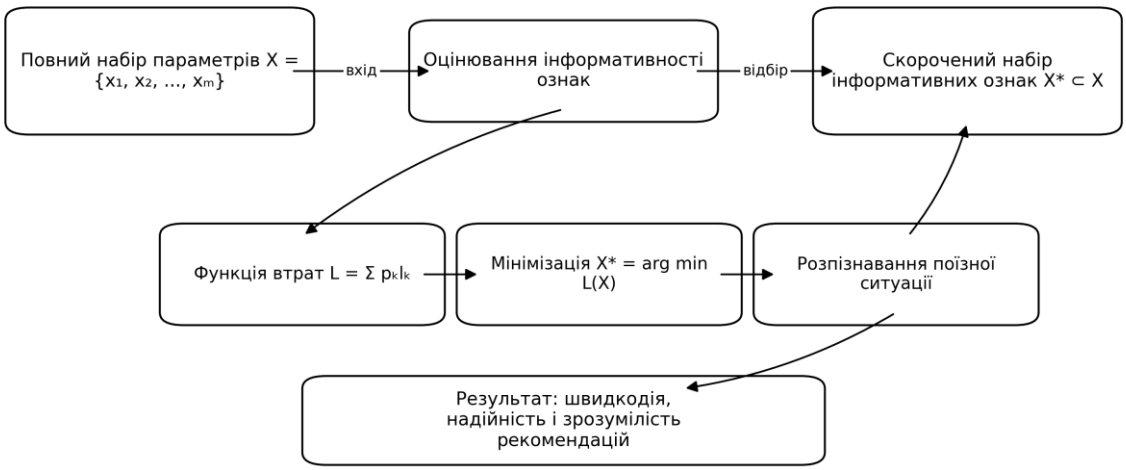


Рисунок 2.6 – Вибір інформативних ознак поїзної ситуації

Ознака повинна відображати процес, що безпосередньо впливає на обмеження руху, допустимі дії або прогноз наслідків. Наявність великої кількості вимірювань ще не означає, що всі вони корисні для класифікації; частина параметрів може дублювати один фізичний фактор. Рішення про включення ознаки має бути обґрунтоване її внеском у розрізнення сценаріїв. Це створює передумови для уточнення структури вхідних даних і перевірки відповідності рекомендацій реальній поїзній обстановці.

Під час розгляду питання «доступність у реальному часі» важливо відокремити фізичний механізм від логіки розрахунку. Система може використовувати тільки дані, які надходять достатньо своєчасно та мають визначене джерело. Тому ознаки, що відомі лише за підсумком рейсу, непридатні як безпосередній вхід поточного алгоритму, навіть якщо корисні для післярейсового аналізу. Потрібно окремо зазначати розрахункові і вимірювані показники. Вказана обставина особливо важлива, коли змінюються декілька параметрів одночасно, а результат має бути представлений машиністу без затримки.

Особливе значення для обраного підходу має робастність до шуму. Ознака з високою теоретичною значущістю може бути непридатною через нестабільне або неточне вимірювання. Оцінка корисності включає похибку, частоту оновлення, число пропусків і здатність моделі зберігати клас у межах похибки. Надмірна реакція на шум веде до помилкових попереджень. Запропоноване тлумачення дозволяє виконати порівняльний аналіз варіантів, не підміняючи нормативну вимогу умовним інтегральним показником.

Практична реалізація повинна враховувати взаємна залежність ознак. Швидкість, запас гальмівного шляху та відстань до перешкоди пов’язані через рівняння руху. У практичній системі доцільно перевіряти кореляцію, а також оцінювати зміну якості класифікації при послідовному вилученні ознак. Без репрезентативної вибірки можна виконати лише логічний, але не статистичний аналіз. На рівні програмної реалізації це означає необхідність зберігати вихідні параметри, проміжні стани та причину прийнятого рішення.

Для обґрунтування моделі розглянуто чутливість рішень до окремого параметра. Якщо незначна зміна однієї ознаки різко змінює рекомендовану дію, потрібно встановити фізичну причину такої чутливості. Для некритичних ознак бажана плавність, а для нормативних заборон допустимий жорсткий перехід до безпечної дії. Тестування повинно розрізняти математичні артефакти і свідомо встановлені правила безпеки. Саме тому в математичному й алгоритмічному забезпеченні важливо встановлювати межі застосування прийнятих припущень.

При оцінюванні результатів доцільно виділити підсумковий вибір семи ознак. Базовий вектор повинен залишатися достатньо компактним для пояснення машиністу та аналізу роботи алгоритму. Сім показників охоплюють динаміку, сигналізацію, технічний стан і експлуатаційні цілі, але не претендують на повну модель усіх умов залізничних перевезень. Після експлуатаційних досліджень склад ознак може коригуватися із підтвердженням їхньої інформативності. Завдяки такому поділу можливо перевіряти окремі функції системи та уникати некоректного узагальнення результатів моделювання.

Висновки до розділу 2

Запропоновано математичний опис поточної поїзної ситуації на основі семикомпонентного вектора ознак, попереднього нормування показників і поділу ситуацій на чотири класи. Обґрунтовано потребу врахування як фізичних параметрів руху, так і сигнальних та експлуатаційних обмежень.

Сформульовано багатокритеріальний підхід до вибору керуючої дії, що охоплює безпеку, енергоефективність, графік і технічну надійність. Установлено, що всі альтернативи, які порушують обов’язкові обмеження безпеки, повинні виключатися з порівняння до розрахунку узагальненого критерію.

Формалізовано інтегральний показник напруженості роботи машиніста та розглянуто метод Сааті для визначення ваг. Сценарні значення 0,77; 0,69; 0,57 і демонстраційні ваги використано як приклади, що потребують подальшого експериментального підтвердження.

3 Розроблення структури та алгоритмів інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень

3.1 Функціональна структура системи

Розроблення функціональної структури інтелектуальної СППР здійснюється з урахуванням поділу її функцій на отримання інформації, розпізнавання поточної ситуації, кількісну оцінку небезпеки й формування рекомендації машиністу. Така декомпозиція дозволяє незалежно перевіряти призначення окремих модулів і встановлювати контроль якості результатів кожного етапу. [2]

Запропонована структура включає блок збору та перевірки даних, блок нормування, модуль формування вектора ознак, модуль класифікації поїзної ситуації, модуль обчислення оцінок небезпеки й напруженості та блок вибору рекомендованої дії. Результат відображається на інформаційному інтерфейсі і після зміни вхідних параметрів уточнюється в наступному циклі.

Блок збору даних отримує числові значення швидкості, відстані, параметрів тягового та гальмівного обладнання. Інформація про сигнали, профіль і графік вводиться як окремі потоки. Кожен канал має містити не тільки значення параметра, але й позначку часу, ознаку достовірності та джерело. Застаріла інформація не повинна безумовно використовуватися для формування поточної рекомендації.

Модуль класифікації реалізує алгоритм віднесення поточного стану до класів C_1–C_4. Для концептуальної моделі передбачено поєднання предметних правил і числових оцінок. Модуль небезпеки розраховує R(t), а модуль напруженості формує N(t). Вони використовуються як допоміжні характеристики, але не можуть скасовувати імперативні сигнали про заборону руху або несправність обладнання.

Блок вибору дії порівнює тільки допустимі варіанти Uдоп. Він враховує функціональний критерій K(u), параметри ситуації, клас C* і вимоги до терміновості попередження. Формування рекомендації завершується перетворенням технічного рішення на коротке текстове повідомлення, доступне для сприйняття під час ведення поїзда.

У режимі реальної експлуатації структуру потрібно доповнити засобами резервування, кіберзахисту, реєстрації подій, конфігураційного контролю і процедурою переходу до безпечного стану при несправності. У цій роботі їх

розглянуто як вимоги до подальшого проєктування, а не як реалізовані та випробувані функції.

Функціональну структуру наведено на рисунку 3.1.

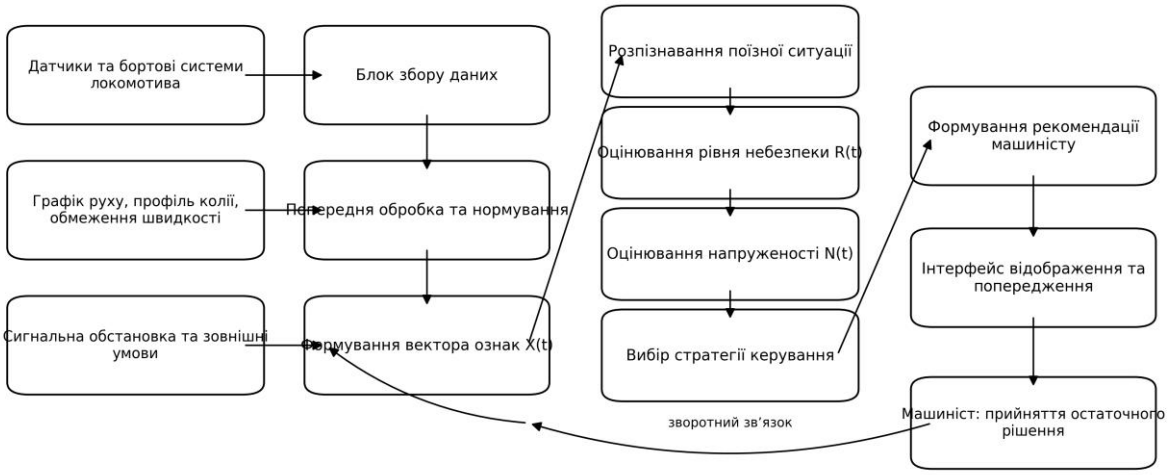


Рисунок 3.1 – Функціональна структура інтелектуальної СППР

Таблиця 3.1 – Призначення функціональних блоків СППР

Блок	Вхід	Результат
Збір і перевірка	Сигнали датчиків та зовнішні дані	Узгоджений потік D(t)
Нормування	D(t)	Нормовані показники
Розпізнавання	Вектор X(t)	Клас ситуації C*
Оцінювання	X(t), C*	R(t), N(t)
Вибір дії	C*, R(t), N(t), Uдоп	Рекомендація u*
Інтерфейс	u*, статус даних	Повідомлення машиністу

Розподіл системи на функціональні блоки дає змогу відокремити процедури отримання інформації, класифікації, оцінювання ризику та вибору керуючих дій. Кожний блок має визначений формат входу й виходу, що полегшує автономне тестування та пошук помилки. Склад модулів можна деталізувати після вибору конкретної апаратної платформи. Це створює передумови для уточнення структури вхідних даних і перевірки відповідності рекомендацій реальній поїзній обстановці.

Під час розгляду питання «незалежність каналу безпеки» важливо відокремити фізичний механізм від логіки розрахунку. Нормативні заборони й технічні

блокування не повинні замінюватися результатом статистичного або багатокритеріального алгоритму. Для цього перед модулем вибору альтернатив установлюється обов'язкова перевірка допустимості керуючої дії. Порушення такого правила є підставою визнати рекомендацію некоректною незалежно від її інтегральної оцінки. Вказана обставина особливо важлива, коли змінюються декілька параметрів одночасно, а результат має бути представлений машиністу без затримки.

Особливе значення для обраного підходу має модуль якості даних. Потоки від датчиків відрізняються похибкою, затримками та можливістю відмови. Система повинна зберігати атрибути джерела, позначку часу й статус достовірності для кожної критичної ознаки, а не лише нормоване числове значення. За відсутності даних про гальма або сигнали неможливо гарантувати повноту оцінки небезпеки. Запропоноване тлумачення дозволяє виконати порівняльний аналіз варіантів, не підміняючи нормативну вимогу умовним інтегральним показником.

Практична реалізація повинна враховувати підсистема журналювання. Для перевірки роботи алгоритму необхідно відтворити послідовність вхідних значень, правил класифікації, ваг і запропонованих дій. Запис у журнал забезпечує простежуваність висновку та допомагає аналізувати розбіжність між рекомендацією і фактичною дією машиніста. Журнал повинен бути захищений від несанкціонованого редагування. На рівні програмної реалізації це означає необхідність зберігати вихідні параметри, проміжні стани та причину прийнятого рішення.

Для обґрунтування моделі розглянуто масштабування алгоритму. Застосування однакового логічного ядра до різних серій локомотивів можливе лише за розділення універсальних правил та конфігураційних параметрів. Технічні обмеження швидкості, характеристики гальмування і доступні сигнали зберігаються у відповідному конфігураційному наборі. Перенесення системи без повторної перевірки не може вважатися безпечним. Саме тому в математичному й алгоритмічному забезпеченні важливо встановлювати межі застосування прийнятих припущень.

При оцінюванні результатів доцільно виділити обробка виняткових режимів. У разі втрати даних або внутрішньої помилки програмного модуля рекомендаційна частина повинна переходити в режим повідомлення про обмежену працездатність. Така поведінка зменшує ризик видавання некоректної поради з надмірною впевненістю. Порядок повідомлення про відмову необхідно узгодити з машиністами

і штатною сигналізацією. Завдяки такому поділу можливо перевіряти окремі функції системи та уникати некоректного узагальнення результатів моделювання.

Таблиця 3.2 – Контрольні ознаки працездатності модулів

Модуль	Нормальний результат	Реакція на відмову
Збір сигналів	Узгоджені дані з мітками часу	Відмітка відсутнього каналу
Нормування	Показники у визначеному діапазоні	Позначення некоректного значення
Класифікація	Клас C1–C4	Заборона необґрунтованого висновку
Оцінювання	Значення R, N та причина	Статус недостатньої інформації
Рекомендації	Допустима дія з поясненням	Повідомлення про обмеження роботи
Інтерфейс	Актуальний пріоритетний текст	Індикація збою без приховування штатних засобів

3.2 Інформаційні потоки та організація обробки даних

Інформаційна взаємодія модулів має забезпечувати узгодженість вимірювань, оскільки окремі параметри можуть оновлюватися з різною частотою. Наприклад, швидкість руху може змінюватися безперервно, тоді як інформація про профіль колії або обмеження швидкості визначається за місцеположенням. Для подальшого аналізу необхідно формувати синхронізований інформаційний зріз на момент t.

Базовою структурою обміну є запис D(t), який містить значення параметрів, часові мітки та прапорці якості. Перед передачею до математичної моделі виконуються перевірки фізично допустимих меж, відповідності одиниць вимірювання і відсутності застарілих даних. У випадку некоректного сигналу від відповідного каналу генерується повідомлення про збій або повторний запит інформації.

Для системи, яка працює в режимі реального часу, важливі затримка обробки та максимальний допустимий інтервал між оновленнями. Однак числові вимоги до затримок залежать від конкретної серії локомотива, апаратури та сценарію безпеки. Через відсутність підтверджених експлуатаційних випробувань у роботі не задається довільний норматив у мілісекундах; замість цього визначено логічну вимогу своєчасності й умови відхилення недостовірних повідомлень.

Потоки інформації можна поділити на первинні, похідні та рекомендаційні. Первинні формуються датчиками і зовнішніми інформаційними системами. Похідні містять нормовані ознаки, класи ситуацій та індекси ризику. Рекомендаційні потоки містять результат вибору керуючої дії з обов'язковою прив'язкою до конкретного класу ситуації.

Необхідно зберігати журнал процесу прийняття рекомендації: час отримання інформації, її джерело, нормовані ознаки, встановлений клас, значення критерію та кінцеву дію. Такий журнал потрібний для післярейсового аналізу і перевірки коректності алгоритму. При цьому доступ до даних і їх зберігання мають відповідати вимогам інформаційної безпеки.

$$D(t) \rightarrow X(t) \rightarrow C*(t) \rightarrow \{R(t), N(t)\} \rightarrow u*(t) \quad (3.1)$$

де D(t) – узгоджені первинні дані;
X(t) – нормований вектор ознак;
C*(t) – розпізнаний клас ситуації;
R(t), N(t) – оцінки небезпеки й напруженості;
u*(t) – рекомендована дія.
Схему інформаційних потоків наведено на рисунку 3.2.

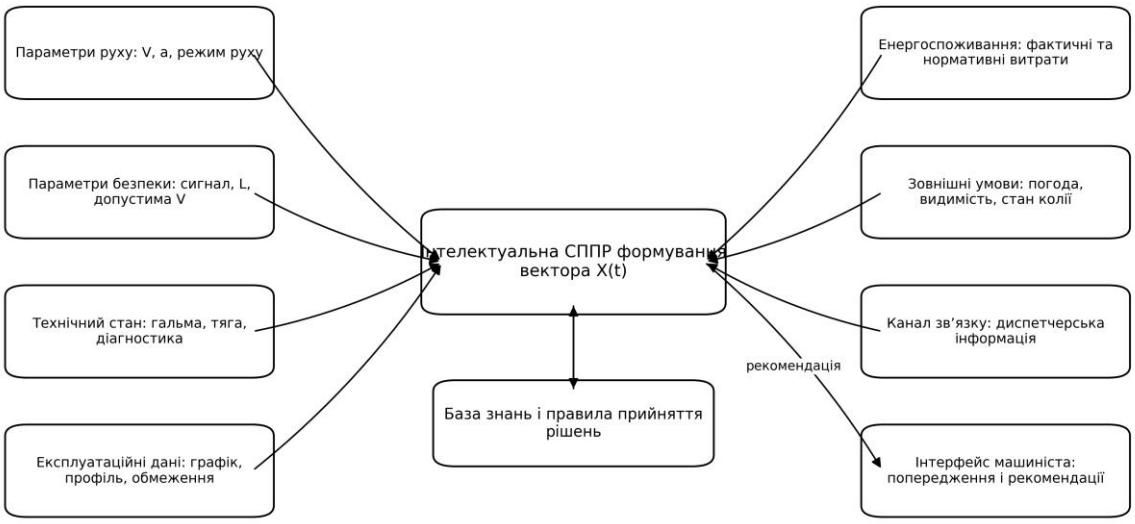


Рисунок 3.2 – Інформаційні потоки системи підтримки прийняття рішень

Показники швидкості й стану гальм можуть оновлюватися частіше, ніж профіль або маршрутні обмеження. Для формування X(t) необхідно визначити єдиний момент

оцінювання та спосіб вибору найближчих чинних вимірювань. Застосування застарілого повідомлення без контролю віку даних може призвести до некоректної класифікації. Це створює передумови для уточнення структури вхідних даних і перевірки відповідності рекомендацій реальній поїзній обстановці.

Під час розгляду питання «контроль фізичної правдоподібності» важливо відокремити фізичний механізм від логіки розрахунку. Швидкість не повинна мати фізично неможливих стрибків, відстань до контрольного об’єкта має узгоджуватися зі зміною координати. Такі перевірки дозволяють виявляти помилки датчиків або порушення формату передачі ще до нормування. Пороги допустимих змін слід визначати за технічними характеристиками поїзда. Вказана обставина особливо важлива, коли змінюються декілька параметрів одночасно, а результат має бути представлений машиністу без затримки.

Особливе значення для обраного підходу має кодування сигнальної обстановки. Дискретні сигнали описують нормативні умови руху й не завжди допускають лінійне впорядкування за ступенем небезпеки. Їх доцільно відображати наборами станів із явно заданими дозволами або заборонами. Числове значення такого коду не слід без обґрунтування підставляти до фізичних рівнянь. Запропоноване тлумачення дозволяє виконати порівняльний аналіз варіантів, не підміняючи нормативну вимогу умовним інтегральним показником.

Практична реалізація повинна враховувати походження розрахункових параметрів. Частина показників може обчислюватися з первинної інформації, наприклад запас відстані до зупинки або відхилення енергоспоживання. Для них потрібно зберігати формулу, набір використаних джерел і версію налаштування, щоб пояснити походження результату. Похибка похідного показника залежить від похибок усіх його вхідних параметрів. На рівні програмної реалізації це означає необхідність зберігати вихідні параметри, проміжні стани та причину прийнятого рішення.

Для обґрунтування моделі розглянуто погодження одиниць вимірювання. Швидкість у км/год, відстань у метрах, час у секундах і енергія в кВт·год мають різні шкали. До розрахунку гальмівних характеристик необхідно перейти до узгоджених одиниць, а перед багатокритеріальною оцінкою – до визначених безрозмірних показників. Змішування одиниць у програмному інтерфейсі є джерелом систематичної помилки. Саме тому в математичному й алгоритмічному забезпеченні важливо встановлювати межі застосування прийнятих припущень.

При оцінюванні результатів доцільно виділити рівні доступу до інформації. Вимірювання, налаштування ваг, журнал подій і кінцеві повідомлення мають різну чутливість до помилки або несанкціонованої зміни. Доцільно відділяти функції перегляду, експертного налаштування та адміністрування, а також фіксувати зміну конфігурації. Такі вимоги необхідні при переході від демонстраційного алгоритму до промислового програмного комплексу. Завдяки такому поділу можливо перевіряти окремі функції системи та уникати некоректного узагальнення результатів моделювання.

Приклад організації обробки можна описати наступним чином. Пакет швидкості має значення і часову мітку, маршрутний запис – координату й обмеження, повідомлення стану гальм – код технічного стану. Після приведення часових позначок до одного моменту формується структура D(t). Значення, для яких допустимий інтервал оновлення перевищено, позначаються як недостовірні. Лише після цього здійснюється перетворення фізичних одиниць та нормування ознак. Така послідовність запобігає використанню арифметично коректних, але застарілих даних.

3.3 Алгоритм розпізнавання поточної поїзної ситуації

Алгоритм розпізнавання передбачає послідовне отримання інформації, перевірку її якості, нормування, формування вектора ознак і зіставлення результату з умовами класифікації. Завдання алгоритму полягає у визначенні класу ситуації, який відображає необхідний характер підтримки машиніста. Розпізнавання повинно виконуватися циклічно протягом руху.

На першому етапі система формує актуальний набір D(t) з наявних джерел. Якщо відсутня критично важлива інформація, наприклад щодо стану гальм або відстані до контрольного об’єкта, алгоритм не повинен продовжувати звичайний цикл класифікації без урахування невизначеності. У такому випадку передбачається окрема службова ознака відсутності даних і відповідне повідомлення оператору.

Після перевірки всі безперервні ознаки переводяться на зіставну шкалу, а дискретні стани кодуються відповідно до правил предметної області. Сформований вектор X(t) подається на модуль класифікації, де визначається найбільш обґрунтований клас C*. Для навчальної моделі застосовуються логічні умови, які

задаються на рівні сценаріїв. Відповідні пороги мають бути предметом окремого експертного й експериментального узгодження.

Варто підкреслити, що інтегральне числове значення R(t) не є єдиною підставою для класифікації. Деякі ситуації можуть бути віднесені до класу невідкладних дій за виконанням критичної предметної умови навіть тоді, коли підсумкове значення R(t) є меншим за вибраний демонстраційний числовий поріг. Це дозволяє уникнути некоректного ототожнення середнього індексу з безпечністю всіх часткових параметрів.

Виходом алгоритму є клас ситуації, коротка інформація про причину його встановлення та службова оцінка якості даних. При повторному оновленні вектора ознак система повинна перевіряти, чи змінився клас, і за потреби сформувати нову рекомендацію. Це запобігає ситуації, коли порада залишається на екрані після істотної зміни умов.

$$C*(t) = F(X(t), \Omega),\ C* \in \{C_1, C_2, C_3, C_4\} \qquad (3.2)$$

де F – функція класифікації;

Ω – сукупність логічних правил, налаштувань і допустимих меж;

C_1–C_4 – класи поточної поїзної ситуації.

Блок-схему послідовності розпізнавання наведено на рисунку 3.3.

Після збору даних кожна критична ознака отримує статус доступності та достовірності. Якщо важливе вимірювання відсутнє, класифікатор не повинен трактувати цю ситуацію як безпечну; потрібен окремий результат «дані неповні». Подальші рекомендації допускаються лише в межах інформації, достатньої для їх обґрунтування. Це створює передумови для уточнення структури вхідних даних і перевірки відповідності рекомендацій реальній поїзній обстановці.

Під час розгляду питання «правила категоризації» важливо відокремити фізичний механізм від логіки розрахунку. Формування класів C1–C4 може поєднувати числову оцінку ризику та предметні правила, які безпосередньо визначають критичний стан. Наприклад, за обґрунтованого виявлення загрози зі скороченням запасу зупинки клас підвищується незалежно від усередненого бала. Правила повинні бути перевірені фахівцями й не суперечити експлуатаційним документам. Вказана обставина особливо важлива, коли змінюються декілька параметрів одночасно, а результат має бути представлений машиністу без затримки.

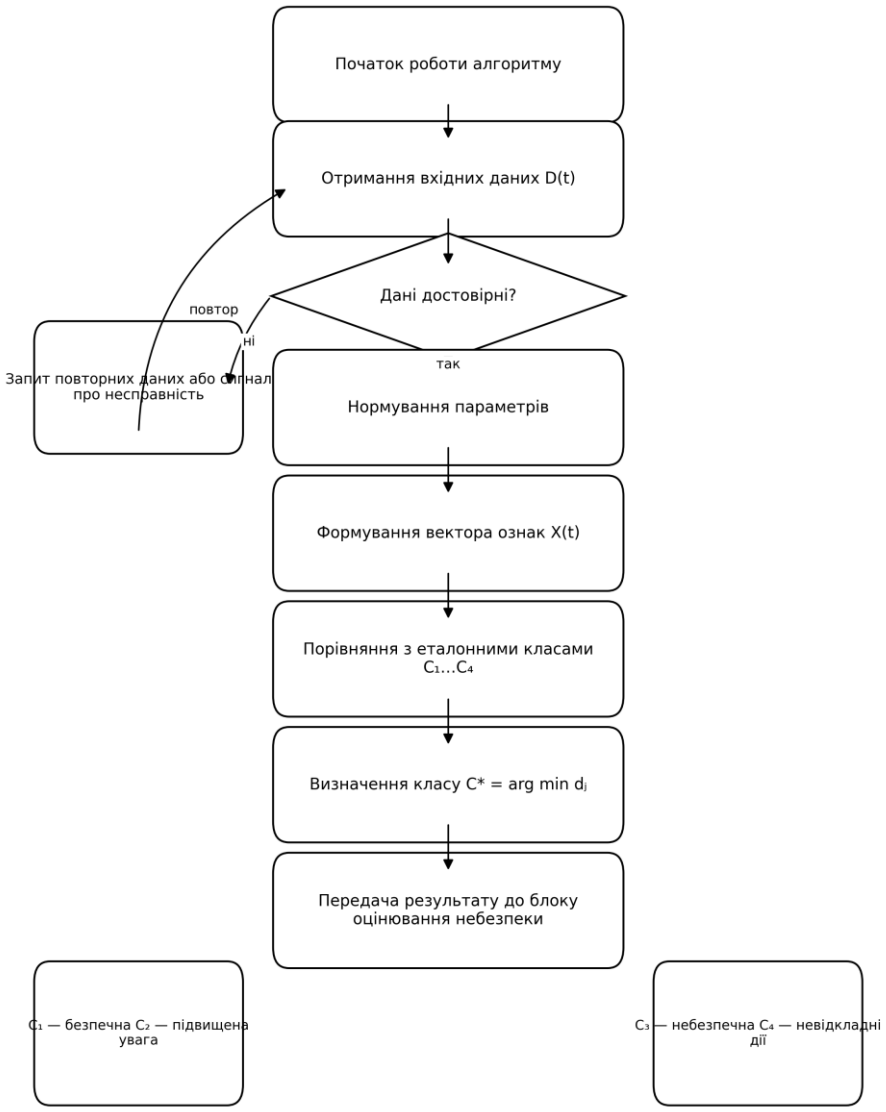


Рисунок 3.3 – Алгоритм розпізнавання поточної поїзної ситуації

Особливе значення для обраного підходу має умови переходу між класами. За зміни швидкості, стану гальм і відстані клас може змінюватися протягом короткого часу. Логіка переходу повинна враховувати різну терміновість: підвищення небезпеки виконується негайно, тоді як зниження може потребувати підтвердження стабільності даних. Це зменшує миготіння повідомлень і не затримує критичну реакцію. Запропоноване тлумачення дозволяє виконати порівняльний аналіз варіантів, не підміняючи нормативну вимогу умовним інтегральним показником.

Практична реалізація повинна враховувати контроль причин класифікації. Вихід алгоритму доцільно доповнювати набором ознак, які найбільше вплинули на присвоєння класу. Наприклад, машиніст отримує не абстрактне «клас С3», а пояснення «обмежений запас відстані до заборонного сигналу». Форма повідомлення повинна бути узгоджена з ергономічними вимогами. На рівні програмної реалізації

це означає необхідність зберігати вихідні параметри, проміжні стани та причину прийнятого рішення.

Для обґрунтування моделі розглянуто циклічна повторна оцінка. Алгоритм повторно визначає X(t), C*(t) і R(t) після кожного актуального оновлення вхідної інформації. Це дозволяє виявляти як розвиток небезпеки, так і результат виконаної дії, не залишаючи застарілої рекомендації на екрані. Тривалість циклу має відповідати вимогам до реакції в конкретній реалізації. Саме тому в математичному й алгоритмічному забезпеченні важливо встановлювати межі застосування прийнятих припущень.

При оцінюванні результатів доцільно виділити реєстрація помилок класифікації. Для подальших випробувань потрібні окремі показники помилкових тривог, пропущених критичних ситуацій і переходів між близькими класами. Без маркованої вибірки ці показники не можуть бути виміряні достовірно; сценарний тест перевіряє лише відповідність заданим правилам. Робота повинна чітко відділяти логічні тести від доказу реальної точності розпізнавання. Завдяки такому поділу можливо перевіряти окремі функції системи та уникати некоректного узагальнення результатів моделювання.

Таблиця 3.3 – Перевірочні переходи між класами

Початковий клас	Подія	Очікувана реакція
C1	Отримано обмеження швидкості	Перехід до C2
C2	Відстань зменшилася до небезпечного запасу	Перехід до C3
C3	Підтверджено критичну перешкоду	Перехід до C4
C3	Небезпечні умови зникли та стабільні	Перевірка перед зниженням класу
Будь-який	Втрачено критичний канал даних	Позначення неповноти й консервативна реакція

3.4 Алгоритм оцінювання небезпеки й напруженості роботи машиніста

Після визначення класу ситуації СППР виконує оцінювання двох взаємопов’язаних, але різних характеристик. Рівень небезпеки R(t) характеризує можливість небажаного розвитку подій при поточних параметрах. Напруженість N(t)

відображає складність аналізу й реагування для машиніста. При цьому ці показники можуть змінюватися неодночасно: за невисокої небезпеки може виникати значне інформаційне навантаження, а в окремій критичній ситуації достатньо одного однозначного сигналу.

Для розрахунку небезпеки використовується нормована комбінація характеристик поточної ситуації з вагами, які відповідають її класу. В практичному застосуванні доцільно відокремлювати дані про безпосередньо загрозливі умови – заборонний сигнал, обмежену можливість зупинки, втрату гальмівної здатності – від параметрів, що лише побічно впливають на ризик.

Величина N(t) визначається з урахуванням R(t), інформаційної насиченості, дефіциту часу та складності необхідної керуючої дії. Для запропонованої моделі використовуються нормовані оцінки, а числові коефіцієнти мають бути отримані з експертного аналізу або експериментальних спостережень. У межах даної роботи показано алгоритмічний принцип їх обчислення.

Сценарні коефіцієнти 0,77 для перешкоди попереду, 0,69 для несприятливої погоди та 0,57 для червоного сигналу на спуску відображають різні типи складних ситуацій. Наведені оцінки не замінюють розрахунків фактичного гальмівного шляху чи визначення допустимої швидкості за нормативними документами.

Результатом роботи блока є пара числових характеристик і клас ситуації. На цій основі визначається пріоритет виведення повідомлення, але конкретна рекомендована дія встановлюється окремим алгоритмом після перевірки фізичних і регламентних обмежень.

$$R(t) = \Sigma\gamma_i r_i(t), \ \Sigma\gamma_i = 1 \quad (3.3)$$

де $r_i(t)$ – нормовані часткові оцінки небезпечних факторів;

γ_i – їх ваги, що використовуються лише після перевірки критичних обмежень; сума ваг дорівнює одиниці.

$$N(t) = \beta_1 R(t) + \beta_2 I(t) + \beta_3 T(t) + \beta_4 Q(t) \quad (3.4)$$

де складові визначені у формулі (2.5); під час реалізації всі вони нормуються до узгодженої шкали.

Схему взаємозв’язку оцінок небезпеки та напруженості наведено на рисунку 3.4.

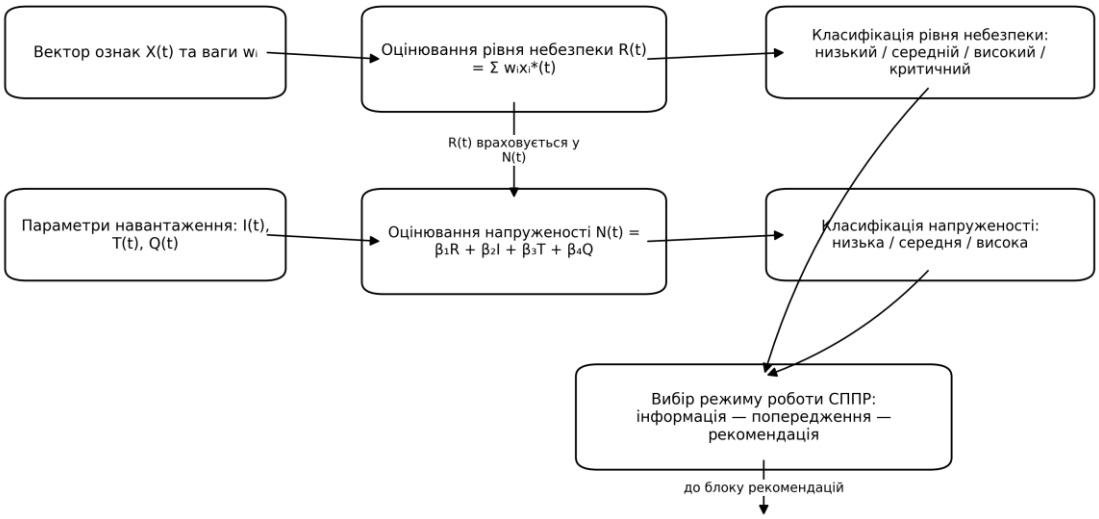


Рисунок 3.4 – Оцінювання небезпеки й напруженості

Індекс R характеризує рівень небезпеки поїзної ситуації, а N описує складність її оцінювання для машиніста. Одне й те саме повідомлення може потребувати іншої форми подання за високого інформаційного навантаження, хоча безпековий клас залишається незмінним. Змішування двох індексів призводить до невизначеності керуючої логіки. Це створює передумови для уточнення структури вхідних даних і перевірки відповідності рекомендацій реальній поїзній обстановці.

Під час розгляду питання «нормування часткових показників» важливо відокремити фізичний механізм від логіки розрахунку. Кожний компонент інтегральної оцінки повинен мати визначені інтервали і фізичний напрямок впливу. Застосування шкали від нуля до одиниці полегшує порівняння, але потребує фіксації нижньої та верхньої меж і правил виходу за них. Після зміни конфігурації локомотива межі необхідно переглянути. Вказана обставина особливо важлива, коли змінюються декілька параметрів одночасно, а результат має бути представлений машиністу без затримки.

Особливе значення для обраного підходу має логічні правила для критичних подій. Умови, що безпосередньо порушують вимоги безпеки, не можна маскувати середнім значенням інтегрального індексу. Тому блок оцінювання доповнюється правилами підвищення класу за встановлення критичної ознаки, навіть якщо R(t) не досяг демонстраційного порога 0,8. Таке рішення є принциповим для узгодження сценарних результатів та рекомендацій. Запропоноване тлумачення дозволяє

виконати порівняльний аналіз варіантів, не підміняючи нормативну вимогу умовним інтегральним показником.

Практична реалізація повинна враховувати аналіз суміжних ситуацій. Можливі сценарії з близькими значеннями інтегрального індексу, але різними джерелами загрози. Наприклад, погодні обмеження та несправність гальм можуть давати схожий R, проте потребувати різної технічної інтерпретації. Система повинна зберігати не тільки скалярну оцінку, а й код причини небезпеки. На рівні програмної реалізації це означає необхідність зберігати вихідні параметри, проміжні стани та причину прийнятого рішення.

Для обґрунтування моделі розглянуто врахування невизначеності. Під час оцінювання необхідно відрізняти впевнено виміряну подію від прогнозу за неповними даними. Доцільним є службовий прапорець якості, який впливає на спосіб подання рекомендації та попереджає про неповну надійність результату. Визначення ймовірнісних довірчих інтервалів можливе лише після появи відповідної статистики. Саме тому в математичному й алгоритмічному забезпеченні важливо встановлювати межі застосування прийнятих припущень.

При оцінюванні результатів доцільно виділити оновлення індексів у часі. Показники R(t) та N(t) мають перераховуватися після зміни швидкості, положення та стану обладнання. Фіксоване значення не може бути підставою для тривалої рекомендації, якщо поїзд продовжує рух до контрольного об’єкта. Точність повторної оцінки перевіряється узгодженням часових міток і контролем зміни вихідних ознак. Завдяки такому поділу можливо перевіряти окремі функції системи та уникати некоректного узагальнення результатів моделювання.

3.5 Алгоритм формування рекомендацій машиністу

Алгоритм формування рекомендацій є заключним етапом інтелектуальної обробки. Його вхідними параметрами виступають клас C*, оцінки R(t) та N(t), а також множина доступних керуючих дій. Мета алгоритму – визначити найбільш обґрунтовану дію, подати її в зрозумілій формі та забезпечити оновлення рекомендації після зміни ситуації.

Насамперед з початкової множини альтернатив формується множина допустимих дій Uдоп. Вилучаються варіанти, які порушують обов’язкові вимоги

безпеки. Цей етап принциповий: небезпечна дія не може ставати рекомендованою лише через високе значення часткового критерію економічності або дотримання графіка.

Для решти альтернатив обчислюється комплексний критерій K(u). Вагові коефіцієнти залежать від класу ситуації, а показник напруженості впливає на форму та терміновість подання повідомлення. За високої напруженості система не повинна перевантажувати машиніста переліком рівноцінних альтернатив; доцільно подати одну чітку пріоритетну пораду разом із мінімально необхідним поясненням.

У безпечному режимі рекомендація може полягати в підтриманні поточної швидкості та контролі штатних параметрів. У класі підвищеної уваги доцільним є повідомлення про необхідність контролю швидкості чи переходу до більш обережного режиму. У небезпечних і критичних ситуаціях застосовуються рекомендації щодо гальмування відповідно до діючих правил та фактичних умов руху.

Система повинна відрізняти умовне формування текстової рекомендації від автоматичного керуючого впливу на тягове й гальмівне обладнання. У роботі передбачається саме інформаційна підтримка машиніста. Впровадження автоматичного виконання дій потребувало б іншої архітектури безпеки, сертифікації та окремого обґрунтування.

Після повідомлення машиніста система продовжує відстежувати параметри руху. Якщо ситуація нормалізується, рекомендація повинна бути скасована або замінена. Якщо виявлено нову загрозу, обчислення повторюється з оновленими даними. Журнал результатів дозволяє згодом оцінити стійкість алгоритму на однакових або подібних сценаріях.

До переліку можливих керуючих дій входять підтримання режиму, зменшення тяги, вибіг, службове та екстрене гальмування. Конкретний склад допустимих альтернатив формується з урахуванням типу рухомого складу та нормативних умов, а не лише зручності математичної моделі. СППР не має пропонувати дію, яку неможливо безпечно реалізувати на даному поїзді. Це створює передумови для уточнення структури вхідних даних і перевірки відповідності рекомендацій реальній поїзній обстановці.

$$u*(t) = arg\ max\ \{K(u,t) \mid u \in U\text{доп}(t)\} \qquad (3.5)$$

де u*(t) – рекомендована дія, що максимізує комплексний критерій серед дій, які відповідають поточним обмеженням безпеки.

Таблиця 3.4 – Приклади повідомлень за класами ситуацій

Клас	Типова порада	Принцип подання
C_1	Підтримувати допустимий режим	Не створювати зайвих повідомлень
C_2	Посилити контроль, зменшити тягу	Попереджувальне повідомлення
C_3	Забезпечити зниження швидкості	Пріоритетність безпеки
C_4	Негайно діяти відповідно до правил	Коротке термінове повідомлення

Алгоритм формування рекомендацій представлено на рисунку 3.5.

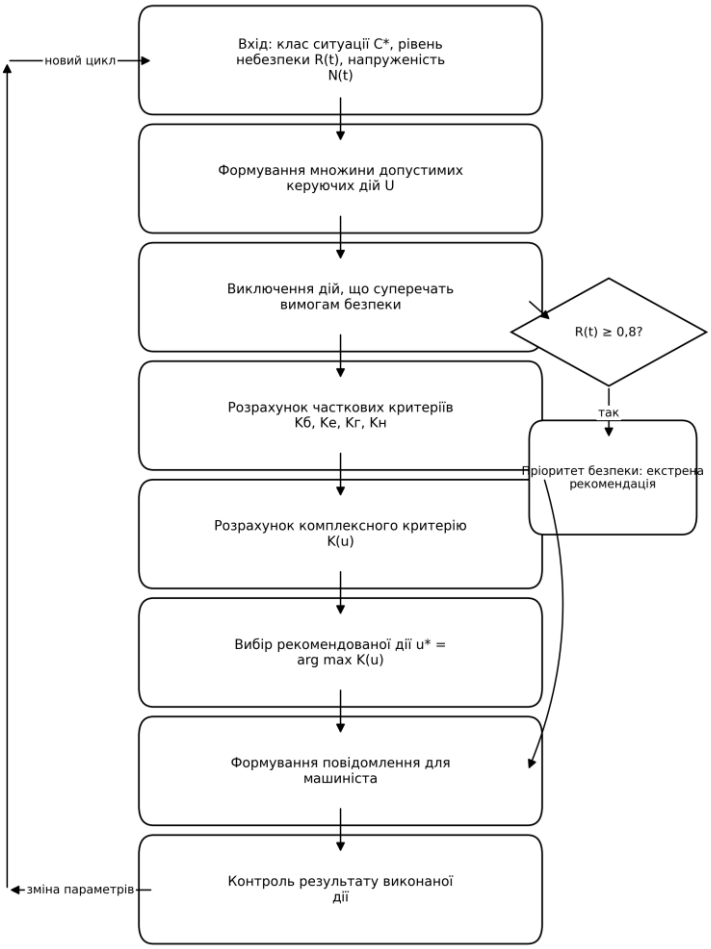


Рисунок 3.5 – Алгоритм формування рекомендацій машиністу

Під час розгляду питання «двоетапний принцип вибору» важливо відокремити фізичний механізм від логіки розрахунку. На першому етапі всі альтернативи перевіряються за обов’язковими обмеженнями; на другому порівнюються інші властивості безпечних дій. Це дозволяє одночасно дотримуватися пріоритету безпеки й вибирати енергоефективний режим за наявності кількох припустимих варіантів. Застосування тільки вагового середнього без перевірки обмежень є недостатнім. Вказана обставина особливо важлива, коли змінюються декілька параметрів одночасно, а результат має бути представлений машиністу без затримки.

Особливе значення для обраного підходу має пояснення вибору рекомендації. Кінцеве повідомлення має містити результат і ключову причину, наприклад «знизити швидкість: наближення до обмеження». Коротке пояснення зменшує ризик неправильного тлумачення та допомагає оператору оцінити релевантність поради. У критичному класі надмірні технічні деталі не слід виводити на основний екран. Запропоноване тлумачення дозволяє виконати порівняльний аналіз варіантів, не підміняючи нормативну вимогу умовним інтегральним показником.

Практична реалізація повинна враховувати перевірка реакції поїзда. Після запропонованої дії алгоритм оцінює, чи змінився стан згідно з очікуваним напрямком. Якщо швидкість не зменшується за наявної необхідності гальмування, ситуація повинна бути переоцінена з урахуванням стану гальм і доступної відстані. Система не повинна автоматично повторювати неефективну пораду без аналізу причин. На рівні програмної реалізації це означає необхідність зберігати вихідні параметри, проміжні стани та причину прийнятого рішення.

Для обґрунтування моделі розглянуто протоколювання рекомендацій. Для кожного рішення зберігаються вхідний вектор, клас небезпеки, перелік допустимих альтернатив та обраний варіант. Це забезпечує можливість наступної перевірки коректності правил і пошуку причин помилкових попереджень. Висновок про причинний вплив СППР на безпеку потребує окремого порівняльного дослідження. Саме тому в математичному й алгоритмічному забезпеченні важливо встановлювати межі застосування прийнятих припущень.

При оцінюванні результатів доцільно виділити робота з відхиленням від графіка. У штатному русі система може порівнювати режими тяги та вибігу з огляду на часовий резерв. За наявності обмеження швидкості або сигналу заборони графік переходить до другорядних критеріїв, а відповідні альтернативи відкидаються. Жодна затримка не є підставою формувати рекомендацію, яка суперечить правилам

безпеки. Завдяки такому поділу можливо перевіряти окремі функції системи та уникати некоректного узагальнення результатів моделювання.

Важливо розділяти логіку формування рекомендації та її реалізацію машиністом. У навчальному алгоритмі вихідним результатом є інформаційне повідомлення, а не команда безпосередньому виконавчому пристрою. Отже, відсутність реакції на повідомлення не може автоматично компенсуватися неконтрольованим втручанням програмного модуля. За потреби автоматичної дії необхідно окреме проєктування системи з функціями безпеки, її незалежна перевірка й погодження встановленого порядку взаємодії зі штатними локомотивними пристроями.

3.6 Вимоги до інтерфейсу та представлення рекомендацій

Інтерфейс СППР повинен забезпечувати сприйняття інформації без відволікання машиніста від основних обов’язків. Цей принцип означає відмову від складних таблиць на робочому екрані під час руху та використання коротких контекстних повідомлень, що відображають поточну проблему, рівень терміновості й рекомендовану дію.

Склад інформації на екрані доцільно обмежити найважливішими параметрами: швидкістю, відстанню до контрольного об’єкта, поточним класом ситуації, станом даних і рекомендованою дією. Детальні розрахунки можуть зберігатися в журналі та переглядатися після завершення рейсу або під час навчального аналізу.

Важливу роль відіграє відображення недостовірності інформації. Якщо датчик не надає актуальних даних або повідомлення суперечить іншому джерелу, інтерфейс повинен не приховувати цю обставину, а явно позначати статус обмеженої достовірності. Відсутність сигналу не може трактуватися як доказ відсутності небезпеки.

Для різних класів ситуацій доцільно використовувати кілька ступенів інтенсивності повідомлення. При штатному русі переважає спокійна інформаційна індикація, для підвищеної уваги – коротке попередження, а для критичної ситуації – пріоритетне попередження. Колір, звуковий сигнал і формулювання повинні узгоджуватися з нормативними вимогами до кабіни конкретного локомотива.

Запропонований інтерфейс розглядається як макет концепції, а не завершений промисловий зразок. Його придатність до експлуатації потребувала б ергономічного тестування за участю машиністів, перевірки читабельності за різного освітлення та оцінювання впливу повідомлень на виконання основних керуючих функцій.

Концептуальний вигляд інформаційного інтерфейсу наведено на рисунку 3.6.

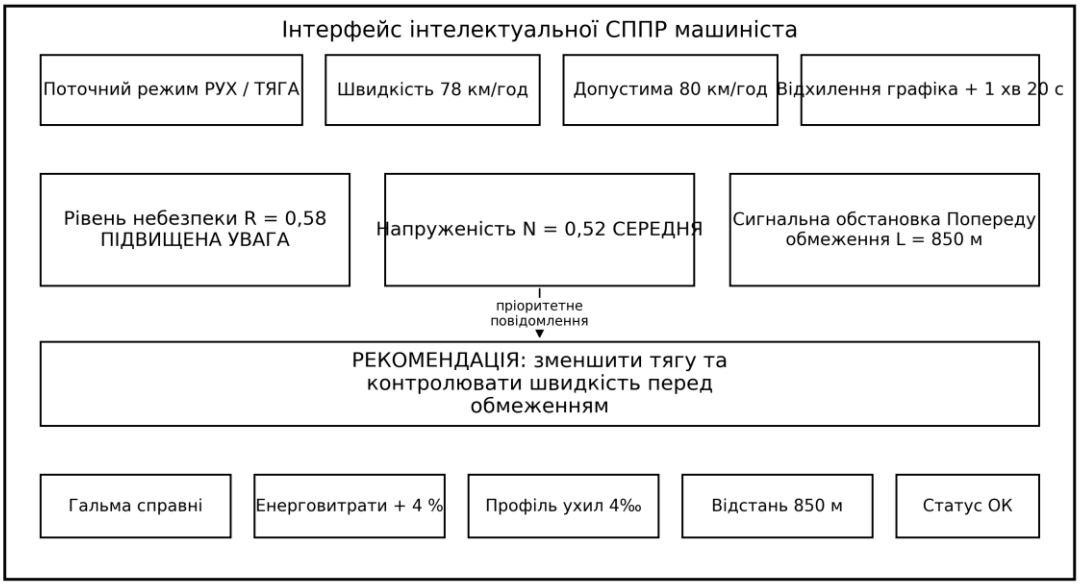


Рисунок 3.6 – Концепція інтерфейсу СППР машиніста

Звичайна інформація про економність не повинна конкурувати за увагу машиніста з критичним попередженням. Для цього потрібно використовувати ієрархію класів та правила придушення другорядних підказок у момент високої небезпеки. Візуальну й звукову індикацію необхідно перевірити за ергономічними вимогами. Це створює передумови для уточнення структури вхідних даних і перевірки відповідності рекомендацій реальній поїзній обстановці.

Під час розгляду питання «лаконічність мовних конструкцій» важливо відокремити фізичний механізм від логіки розрахунку. Текст рекомендації повинен називати дію та її причину без довгих формулювань і необов’язкових числових деталей. Наприклад, фраза «Гальмування: недостатній запас відстані» швидше пов’язується з конкретною загрозою, ніж розгорнуте пояснення багатокритеріального розрахунку. Детальні дані можуть бути доступні в окремому інформаційному вікні. Вказана обставина особливо важлива, коли змінюються декілька параметрів одночасно, а результат має бути представлений машиністу без затримки.

Особливе значення для обраного підходу має відображення достовірності даних. Машиністу важливо розрізняти підтверджену загрозу та стан, оцінений за неповним набором сигналів. Інтерфейс має однозначно повідомляти про відсутність критичних вимірювань або втрату зв’язку, не створюючи помилкової впевненості у правильності класифікації. Повідомлення про збій не повинно приховувати штатну інформацію про безпеку руху. Запропоноване тлумачення дозволяє виконати

порівняльний аналіз варіантів, не підміняючи нормативну вимогу умовним інтегральним показником.

Практична реалізація повинна враховувати зниження частоти зайвих попереджень. Постійне повторення другорядних повідомлень сприяє втраті уваги до інформаційного каналу. Для цього використовуються правила пріоритету, гістерезис класів і відображення лише нових або істотно змінених рекомендацій. Фільтрація не застосовується до подій, які потребують невідкладного реагування. На рівні програмної реалізації це означає необхідність зберігати вихідні параметри, проміжні стани та причину прийнятого рішення.

Для обґрунтування моделі розглянуто підтримка післярейсового аналізу. Окрім оперативної функції інтерфейс може забезпечувати доступ до журналу подій для підготовки персоналу та перевірки алгоритму. Після рейсу доцільно порівнювати фактичні параметри руху, попередження і реакцію локомотивної бригади. Результат такого аналізу не замінює процедури офіційного розслідування транспортних подій. Саме тому в математичному й алгоритмічному забезпеченні важливо встановлювати межі застосування прийнятих припущень.

При оцінюванні результатів доцільно виділити порядок впровадження. До використання в кабіні потрібні лабораторні, тренажерні та ергономічні випробування, а також перевірка сумісності з наявними пристроями. Фінальне оформлення інтерфейсу слід погоджувати з практикуючими машиністами та спеціалістами з безпеки руху. Наведена у роботі схема інтерфейсу є концептуальною, а не сертифікованим зразком. Завдяки такому поділу можливо перевіряти окремі функції системи та уникати некоректного узагальнення результатів моделювання.

Таблиця 3.5 – Структура повідомлень інтерфейсу

Клас	Призначення	Приклад тексту	Примітка
C1	Фоновий контроль	Режим руху без змін	Без зайвого сигналу
C2	Підвищення уваги	Попереду обмеження швидкості	Причина і параметр
C3	Небезпечний стан	Знизити швидкість: недостатній запас	Підвищений пріоритет
C4	Невідкладні дії	Небезпека попереду: гальмування	Найвищий пріоритет
Недостовірні дані	Обмеження функцій	Немає даних про стан гальм	Не маскувати збій

Висновки до розділу 3

Розроблено концептуальну архітектуру інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень, що охоплює збір і перевірку інформації, нормування, класифікацію поїзної ситуації, оцінку небезпеки й напруженості та формування рекомендації.

Запропоновано алгоритми розпізнавання ситуації та вибору керуючої дії з попереднім обмеженням множини альтернатив умовами безпеки. Обґрунтовано необхідність розділення функцій підтримки прийняття рішень і штатних засобів автоматичного захисту.

Сформульовано вимоги до інформаційного інтерфейсу, актуальності даних і пояснюваності рекомендацій. Подальший перехід до експлуатаційної реалізації потребує перевірки реальних затримок, надійності каналів, функціональної безпеки та ергономічної придатності.

4 Моделювання роботи системи та оцінювання ефективності

4.1 Постановка задачі й умови моделювання

Метою моделювання є перевірка логічної узгодженості запропонованої архітектури СППР на характерних поїзних ситуаціях. Зокрема, перевіряється здатність схеми відрізняти штатний рух від станів підвищеної уваги, небезпечних і критичних умов, а також формувати рекомендації, що не суперечать принципу пріоритету безпеки.

Об’єктом сценарної перевірки є алгоритмічна модель, яка використовує семикомпонентний вектор ознак і передбачає чотири класи ситуацій. Вихідні значення інтегральних показників для семи сценаріїв перенесено з наданої презентації. Оскільки вихідні виміряні часові ряди швидкості, гальмівного шляху, сигнальних станів та телеметрії не були надані, модель не слід ототожнювати з повномасштабним імітаційним експериментом руху конкретного поїзда. [12]

Для кожного сценарію задається словесна характеристика поїзної обстановки, відповідний клас C*, сценарний коефіцієнт небезпеки R і приклад повідомлення. Перевіряється відповідність повідомлення характеру ситуації: від підтримання режиму в штатних умовах до необхідності невідкладних дій при появі безпосередньої загрози.

Ключовою вимогою до алгоритму є незалежність критичних предметних правил від усередненого показника R. Наприклад, перешкода попереду в матеріалах сценарію має R = 0,77 і клас C_4, хоча це число менше показаного на слайді 12 контрольного прикладу $R \geq 0{,}8$. У моделі таке розходження пояснюється тим, що клас C_4 встановлюється окремою логічною умовою про безпосередню загрозу, а не тільки простим порогом R.

Також оцінюється обмеженість отриманих результатів: сценарії задано заздалегідь і вони не містять великої кількості повторних незалежних спостережень. Тому їх зіставлення може підтвердити несуперечливість проєктної логіки, але не дає статистичної оцінки точності розпізнавання в експлуатації.

$$M = \{X(t), C*(t), R(t), N(t), U\text{доп}(t), u*(t)\} \quad (4.1)$$

де M – сукупність основних змінних сценарної моделі; X(t) – ознаки; C* – клас ситуації; R, N – оцінки; Uдоп – допустимі дії; u* – рекомендація.

На концептуальному етапі моделювання перевіряється послідовність перетворення вхідних ознак у клас ситуації, числову оцінку та рекомендацію. Результати показують логічну узгодженість визначених правил на обраному наборі прикладів, а не статистичну точність промислової системи. Відсутність реального масиву телеметрії потребує чіткого позначення демонстраційних припущень. Це створює передумови для уточнення структури вхідних даних і перевірки відповідності рекомендацій реальній поїзній обстановці.

Під час розгляду питання «структура демонстраційного набору» важливо відокремити фізичний механізм від логіки розрахунку. Розглянуто сім сценаріїв: штатний рух, обмеження швидкості, відхилення від графіка, несприятлива погода, червоний сигнал на спуску, перешкода попереду та погіршення стану гальм. Цей перелік охоплює чотири класи ситуацій і різні типи факторів, що змінюють рішення. Сім прикладів не формують статистично репрезентативну базу для оцінювання ймовірності помилки. Вказана обставина особливо важлива, коли змінюються декілька параметрів одночасно, а результат має бути представлений машиністу без затримки.

Особливе значення для обраного підходу має фіксація вхідних припущень. Для кожного сценарію необхідно розділяти прийняте значення інтегрального індексу, логічні ознаки небезпеки та правило вибору рекомендованої дії. Наприклад, числовий індекс 0,77 для перешкоди попереду не суперечить класу невідкладних дій, якщо спрацьовує окреме критичне правило. Без такого розділення виникає хибне ототожнення R із єдиним класифікатором. Запропоноване тлумачення дозволяє виконати порівняльний аналіз варіантів, не підміняючи нормативну вимогу умовним інтегральним показником.

Практична реалізація повинна враховувати відтворюваність перевірки. Набір параметрів і очікуваний результат повинен бути записаний у таблиці, щоб інший дослідник міг повторити обчислення. Важливо зберігати значення вхідних ознак до і після нормування та версію прийнятих правил. У роботі наведено логічні перевірки концепції, а не звіт про повноцінне польове випробування. На рівні програмної реалізації це означає необхідність зберігати вихідні параметри, проміжні стани та причину прийнятого рішення.

Для обґрунтування моделі розглянуто критерії коректності. Для кожного прикладу оцінюються послідовність класу, відсутність заборонених рекомендацій, реакція на посилення небезпеки та форма повідомлення машиністу. Ці критерії дозволяють виявити внутрішні суперечності ще до розроблення апаратного

комплексу. Показники швидкодії, надійності та ймовірності хибних тривог мають визначатися окремо. Саме тому в математичному й алгоритмічному забезпеченні важливо встановлювати межі застосування прийнятих припущень.

При оцінюванні результатів доцільно виділити межі застосування моделей. У спрощених розрахунках не враховується повний комплекс поздовжньої динаміки поїзда, нестаціонарний коефіцієнт зчеплення та характеристики конкретного гальмівного обладнання. Отже, числові приклади використовуються для пояснення логіки СППР і порівняльного аналізу варіантів. Їх не можна використовувати як практичні інструкції для ведення реального поїзда. Завдяки такому поділу можливо перевіряти окремі функції системи та уникати некоректного узагальнення результатів моделювання.

Таблиця 4.1 – Критерії перевірки демонстраційної моделі

Перевірка	Запитання до алгоритму	Очікуваний результат
Вхідні дані	Чи всі критичні ознаки актуальні?	Контроль якості вектора
Клас	Чи відповідає стан правилам?	Однозначний C1–C4
Критична умова	Чи спрацьовує пряма заборона?	Клас підвищується незалежно від середнього R
Рекомендація	Чи не порушує дія обмеження?	Недопустиму альтернативу виключено
Інтерфейс	Чи зазначено причину?	Коротке пріоритетне пояснення
Післядія	Чи змінився стан?	Повторна оцінка

Для відтворення результатів кожен сценарій потрібно описувати набором вхідних умов, правил переходу до класу та очікуваною реакцією системи. Важливо розділити етап побудови сценарію й етап перевірки алгоритму: якщо очікуваний результат встановлюється вже після запуску програми, така перевірка втрачає незалежність. На концептуальній стадії достатньо сформувати таблицю з описом усіх семи ситуацій і перевірити відсутність суперечностей. Однак для статистичного висновку про точність розпізнавання необхідні значно ширші дані, включно з пограничними та нештатними випадками, які заздалегідь не використовувалися для формування правил.

Важливою умовою дослідження є коректне тлумачення коефіцієнтів небезпеки. Значення 0,18; 0,42; 0,36; 0,69; 0,57; 0,77 та 0,64 є прийнятими характеристиками відповідних демонстраційних сценаріїв. Вони не становлять експериментально встановлених імовірностей аварії або універсальних показників для всіх умов руху. Індекс використовується для порівняння ситуацій у межах обраної моделі. Отже,

перевірку потрібно будувати так, щоб найнебезпечніші нормативні ситуації не могли бути віднесені до безпечного класу внаслідок усереднення великої кількості невисоких часткових оцінок.

4.2 Формування сценаріїв поїзних ситуацій

Набір сценаріїв сформовано з урахуванням типових умов ведення поїзда, які охоплюють різні групи факторів. Перші три сценарії характеризують штатний рух і ситуації підвищеної уваги, пов’язані з обмеженнями швидкості й дотриманням графіка. Інші сценарії описують небезпечні умови: несприятливу погоду, рух до заборонного сигналу на спуску, перешкоду попереду та погіршення стану гальмівної системи.

Таке групування дозволяє перевірити, чи зберігається послідовність пріоритетів у рекомендаціях. Наприклад, при відхиленні від графіка й відсутності загрози безпеці система може рекомендувати раціональний режим тяги; при складній погоді вона повинна в першу чергу підтримувати безпечну швидкість, навіть за рахунок потенційного запізнення.

Сценарні оцінки в табличній формі дозволяють порівняти інтенсивність небезпеки, але не замінюють даних про ймовірність фактичної транспортної події. Параметр R у даному розділі є умовним безрозмірним показником пріоритетності ситуації; його зв’язок із статистичною ймовірністю відмови не встановлюється.

Для сценаріїв, що передбачають гальмування, практична рекомендація має залежати від фактичних швидкості, маси складу, ухилу та гарантованої гальмівної здатності. Без цих параметрів неможливо достовірно розрахувати необхідну відстань зупинки; відповідні демонстраційні повідомлення не є інструкціями для конкретної ділянки.

У першому сценарії передбачається відсутність обмежувальних подій і достатня дистанція до наступного контрольного об’єкта. Інтегральна оцінка 0,18 відповідає навчальному класу безпечної ситуації; доцільна рекомендація – зберігати допустимий режим. Система при цьому продовжує фоновий контроль даних та їхньої достовірності. Це створює передумови для уточнення структури вхідних даних і перевірки відповідності рекомендацій реальній поїзній обстановці.

Таблиця 4.2 – Вихідні сценарії оцінювання роботи СППР

№	Ситуація	Клас	R
1	Штатний рух	C_1	0,18
2	Обмеження швидкості	C_2	0,42
3	Відхилення від графіка	C_2	0,36
4	Несприятлива погода	C_3	0,69
5	Червоний сигнал на спуску	C_3	0,57
6	Перешкода попереду	C_4	0,77
7	Погіршення гальм	C_3	0,64

Розподіл інтегральних сценарних оцінок наведено на рисунку 4.1.

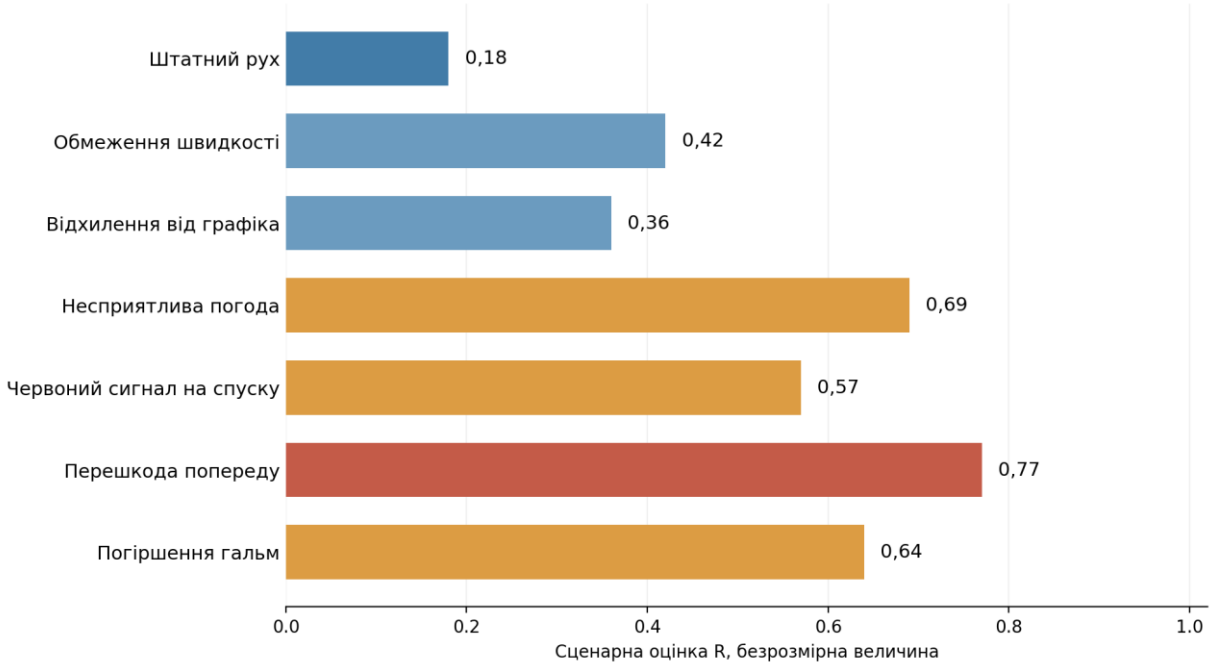


Рисунок 4.1 – Значення показника небезпеки для семи сценаріїв

Під час розгляду питання «наближення до обмеження швидкості» важливо відокремити фізичний механізм від логіки розрахунку. Другий сценарій описує необхідність підготовки до зменшення швидкості перед контрольним пунктом. Оцінка 0,42 у демонстраційному наборі відповідає підвищеній увазі; рекомендується зменшити тягу та перевірити запас дистанції. Вибір фактичного режиму гальмування потребує характеристик поїзда і чинних правил. Вказана обставина особливо важлива, коли змінюються декілька параметрів одночасно, а результат має бути представлений машиністу без затримки.

Особливе значення для обраного підходу має відхилення від графіка. Третій сценарій характеризує часовий дисбаланс за відсутності інших критичних ознак.

Значення 0,36 показує, що саме запізнення не повинно переводити систему до небезпечного режиму; можна рекомендувати раціональний вибір тяги. Неприпустимо компенсувати відхилення від графіка перевищенням швидкості. Запропоноване тлумачення дозволяє виконати порівняльний аналіз варіантів, не підміняючи нормативну вимогу умовним інтегральним показником.

Практична реалізація повинна враховувати погіршення погодних умов. Четвертий сценарій ураховує погіршення видимості та можливу невизначеність умов зчеплення. За прийнятого демонстраційного індексу 0,69 ситуація потребує підвищеної обережності та рекомендації щодо безпечного режиму швидкості. Висновок не є кількісним прогнозом реального коефіцієнта зчеплення. На рівні програмної реалізації це означає необхідність зберігати вихідні параметри, проміжні стани та причину прийнятого рішення.

Для обґрунтування моделі розглянуто червоний сигнал на спуску. У п’ятому сценарії сигнальна заборона поєднується з профілем, що може ускладнювати зупинку. Попри прийнятий індекс 0,57 клас ситуації визначається не тільки величиною R, а й критичною умовою; рекомендується дія відповідно до вимоги зупинки. Розрахунок реального гальмівного шляху повинен виконуватися за встановленими методиками. Саме тому в математичному й алгоритмічному забезпеченні важливо встановлювати межі застосування прийнятих припущень.

При оцінюванні результатів доцільно виділити перешкода попереду. Шостий сценарій має індекс 0,77 і окрему ознаку критичної загрози на колії. За умови підтвердженого порушення запасу зупинки алгоритм установлює клас невідкладних дій та формує пріоритетну рекомендацію про гальмування. Індекс не описує ймовірність зіткнення і не є результатом натурного спостереження. Завдяки такому поділу можливо перевіряти окремі функції системи та уникати некоректного узагальнення результатів моделювання.

Додаткової уваги потребує погіршення гальмівної системи. Сьомий сценарій демонструє ситуацію, коли достатня дистанція може перестати бути гарантованою через зміну гальмівних характеристик. Прийнятий індекс 0,64 відповідає небезпечному класу та потребі вибору консервативного режиму ведення. Алгоритм повинен спиратися на справжні параметри стану гальм, а не на один умовний коефіцієнт. Це створює передумови для уточнення структури вхідних даних і перевірки відповідності рекомендацій реальній поїзній обстановці.

Розглянемо додатковий навчальний розрахунок, що ілюструє чутливість безпекової оцінки до швидкості. Для умовного постійного уповільнення 0,6 м/с² і

затримки 2 с при швидкості 15 м/с повний розрахунковий шлях становить 217,5 м, при 20 м/с – 373,3 м, а при 25 м/с – 570,8 м. За тієї самої швидкості 20 м/с зменшення прийнятого уповільнення до 0,4 м/с² збільшує шлях до 540 м. Отже, параметри швидкості та гальмівної здатності мають спільно брати участь у формуванні ситуаційної оцінки.

Наведений приклад не є розрахунком для реального поїзда та не може застосовуватися як інструкція з гальмування. Його призначення полягає у перевірці фізичного напрямку змін: при збільшенні швидкості або погіршенні уповільнення потреба у запасі дистанції повинна зростати. Саме такі властивості доцільно використовувати як перевірочні умови математичної моделі, щоб виявляти помилки нормування, знаків і функцій штрафу.

Таблиця 4.3 – Розрахункові показники для ілюстрації гальмівного запасу

Швидкість, м/с	Уповільнення, м/с²	Затримка, с	Розрахунковий шлях, м
15	0,60	2	217,5
20	0,60	2	373,3
25	0,60	2	570,8
20	0,50	2	440,0
20	0,40	2	540,0
20	0,60	3	393,3

У наведених формулах v позначає швидкість у метрах за секунду, a – умовне стале уповільнення, τ – час до фактичного початку гальмування. Для навчального розрахунку шлях до зупинки складається зі шляху під час затримки і шляху гальмування за рівносповільненого руху. Зміна цих параметрів дає змогу перевірити фізичну обґрунтованість реакції моделі.

$$L\text{зуп} = v \cdot \tau + v^2 / (2a) \qquad (4.2)$$

де Lзуп – умовний шлях зупинки, м;

v – швидкість, м/с; τ – час затримки, с;

a – модуль сталого уповільнення, м/с².

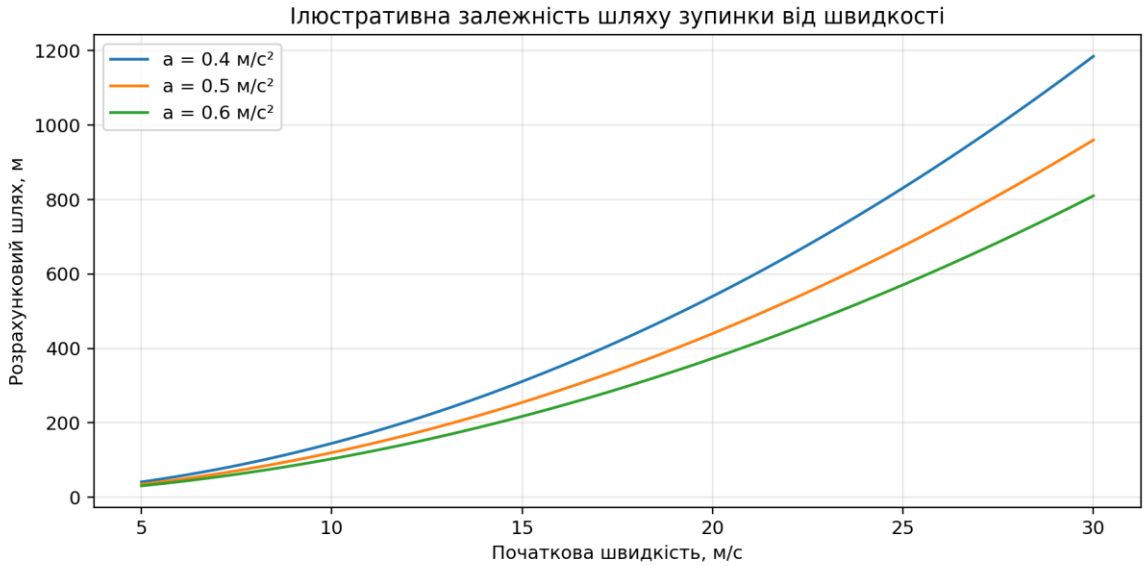


Рисунок 4.2 – Вплив швидкості та умовного уповільнення на розрахунковий шлях зупинки

У сценарії наближення до обмеження швидкості особливо важливо враховувати місце початку нового режиму. Сам факт того, що поточна швидкість перебуває в межах чинного обмеження, не означає відсутності потреби у підготовчих діях. Якщо до контрольної точки залишається невелика відстань, рішення щодо зменшення тяги або початку гальмування має бути сформоване завчасно. Для спрощеної моделі можна перевірити, що при незмінній доступній відстані збільшення швидкості не покращує оцінку запасу зупинки. Така монотонність є корисним внутрішнім тестом алгоритму.

Ситуація відхилення від графіка є прикладом того, як економічні та організаційні цілі повинні залишатися другорядними порівняно з вимогами безпеки. У разі запізнення система може радити раціональніше використовувати дозволену тягу, але не має пропонувати перевищення швидкості. Якщо ж поїзд прибуває раніше встановленого часу, можливий перехід до більш економного режиму. Реальна оцінка таких рекомендацій потребує маршрутних даних, планового часу проходження контрольних точок і підтвердженої моделі тягової енергетики. У наявному демонстраційному наборі перевіряється насамперед відсутність суперечностей у логіці вибору дії.

4.3 Результати розпізнавання ситуацій і формування рекомендацій

У ході демонстраційного проходження сценаріїв кожному опису ситуації зіставлено визначений у вихідних матеріалах клас і приклад відповідної рекомендації. Для штатного руху з R = 0,18 встановлено клас C_1, рекомендацією є підтримання допустимого режиму. Для обмеження швидкості (R = 0,42) і відхилення від графіка (R = 0,36) використано клас C_2 з попереджувальною або економічною за змістом порадою.

Ситуації несприятливої погоди (R = 0,69), руху під червоний сигнал на спуску (R = 0,57) та погіршення гальмівної системи (R = 0,64) віднесено до C_3. Для них характерним є підвищення пріоритету безпеки, зниження допустимого ризику та відмова від оптимізації графіка на шкоду керованості поїзда.

У сценарії «перешкода попереду» показник R = 0,77 супроводжується класом C_4, тобто необхідністю невідкладної реакції. Вибір цього класу зумовлений предметною умовою безпосередньої небезпеки. Це демонструє потребу поєднувати числову оцінку з логічними правилами, а не застосовувати один універсальний поріг.

Рекомендації в таблиці відображають демонстраційну поведінку алгоритму. Наприклад, фраза «службове гальмування» є прийнятною лише тоді, коли фактична ситуація і діючі правила допускають такий режим. За недостатньої відстані зупинки або появи безпосередньої загрози фактичні дії визначаються нормативними вимогами, а не наведеною ілюстративною таблицею.

Сценарії узгоджуються з очікуваною логікою класифікації за всіма сімома заданими прикладами. Проте це не означає 100-відсоткової точності системи в реальному русі, оскільки в розрахунку не використовувалася незалежна тестова вибірка. Такий результат є перевіркою внутрішньої несуперечливості, а не оцінкою статистичної класифікаційної якості.

Для кожного сценарію очікувана дія визначається після присвоєння класу та перевірки допустимості альтернатив. У навчальному наборі штатний режим приводить до підтримання руху, обмеження швидкості – до зменшення тяги, а підтверджена критична загроза – до пріоритетного гальмування. Така відповідність підтверджує внутрішню логіку правил, але не доводить безпечності конкретної апаратної реалізації. Це створює передумови для уточнення структури вхідних даних і перевірки відповідності рекомендацій реальній поїзній обстановці.

Таблиця 4.4 – Приклади рекомендацій за розглянутими сценаріями

Сценарій	Рекомендація моделі	Пріоритет
Штатний рух	Підтримувати режим	Штатний контроль
Обмеження швидкості	Зменшити тягу	Штатний контроль
Відхилення від графіка	Раціональний режим	Штатний контроль
Несприятлива погода	Знизити швидкість	Безпека
Червоний сигнал на спуску	Службове гальмування	Безпека
Перешкода попереду	Невідкладні дії	Безпека
Погіршення гальм	Безпечний режим	Безпека

$$Рзб = nузг/nсц = 7/7 = 1{,}00 \quad (4.3)$$

де Рзб – частка узгоджених із заданими правилами демонстраційних сценаріїв;

nузг = 7 – число узгоджених прикладів;

nсц = 7 – кількість сценаріїв. Цей показник не є статистичною точністю класифікації.

Під час розгляду питання «порівняння небезпеки й напруженості» важливо відокремити фізичний механізм від логіки розрахунку. Для сценаріїв перешкоди, погоди та червоного сигналу значення можуть бути схожими за порядком величини, але означати різні умови роботи машиніста. Додатковий показник напруженості використовується для зміни терміновості та компактності повідомлення. Необхідно не допускати подвоєння ролі одного коефіцієнта в оцінках R і N без окремого обґрунтування. Вказана обставина особливо важлива, коли змінюються декілька параметрів одночасно, а результат має бути представлений машиністу без затримки.

Особливе значення для обраного підходу має пріоритет критичних правил. Результат для перешкоди попереду ілюструє, що клас С4 може встановлюватися за прямою критичною умовою досягнення загрози, навіть якщо R=0,77 менше демонстраційного порога 0,8. Такий механізм відокремлює нормативну вимогу від усередненого числового індексу. Відповідний алгоритм повинен відстежувати походження кожної критичної ознаки. Запропоноване тлумачення дозволяє виконати порівняльний аналіз варіантів, не підміняючи нормативну вимогу умовним інтегральним показником.

Практична реалізація повинна враховувати відмінність рекомендації від керуючої команди. Запропонована СППР надає машиністу допоміжну інформацію, а не безпосередньо виконує гальмування. Тому в таблиці результатів наведено

рекомендований тип дії, а не автоматичне спрацювання виконавчого механізму. Виконання рекомендації й результат руху потребують окремого дослідження за участю оператора. На рівні програмної реалізації це означає необхідність зберігати вихідні параметри, проміжні стани та причину прийнятого рішення.

Для обґрунтування моделі розглянуто перевірка узгодженості сценаріїв. Кожний приклад має містити клас небезпеки, числову оцінку та текстову рекомендацію, які не суперечать одне одному. Випадки, коли числова оцінка не відповідає класу за простим порогом, потрібно явно пояснювати додатковим логічним правилом. Інакше результати моделювання можуть бути помилково витлумачені як випадкове присвоєння класів. Саме тому в математичному й алгоритмічному забезпеченні важливо встановлювати межі застосування прийнятих припущень.

При оцінюванні результатів доцільно виділити вимоги до розширеної перевірки. Для оцінки реальної ефективності знадобляться сотні чи тисячі часових відліків, розмічені експертами небезпечні епізоди та порівняння з базовим алгоритмом. Окремо необхідно перевіряти хибні тривоги, пропущені критичні ситуації та вплив інтерфейсу на час реакції машиніста. Наявні сім прикладів таких статистичних показників не забезпечують. Завдяки такому поділу можливо перевіряти окремі функції системи та уникати некоректного узагальнення результатів моделювання.

Таблиця 4.5 – Матриця правил для семи демонстраційних сценаріїв

Сценарій	Індекс R	Умова-підстава	Клас
Штатний рух	0,18	Без критичних ознак	C1
Обмеження швидкості	0,42	Наближення до обмеження	C2
Відхилення графіка	0,36	Часове відхилення без заборони	C2
Погіршення погоди	0,69	Зниження доступних умов видимості	C3
Червоний сигнал	0,57	Нормативна заборона продовження руху	C3
Перешкода попереду	0,77	Критична умова невідкладного реагування	C4
Погіршення гальм	0,64	Обмеження гальмівної здатності	C3

Детальний аналіз результатів доцільно виконувати у двох площинах: відповідність класифікатора наперед встановленим правилам та відповідність рекомендації нормативно допустимому набору дій. У першому випадку

перевіряється, чи встановлено очікуваний клас; у другому – чи не запропоновано дію, що суперечить відомим обмеженням. Наприклад, за червоного сигналу на спуску система не повинна трактувати номінально невисоку швидкість як достатню підставу для продовження руху. Аналогічно за критичної перешкоди попереду клас невідкладних дій встановлюється за спеціальною умовою, а не через необхідність перевищення певного середнього індексу.

Окремо потрібно перевіряти зміну рекомендації після виконання дії. Якщо машиніст зменшив тягу й фактична швидкість почала знижуватися, оновлений вектор ознак має відобразити цей процес. Проте покращення одного параметра не гарантує повного усунення небезпеки: наприклад, відстань до контрольного об’єкта також скорочується. Тому коректна система повторно оцінює сумарний стан, а не механічно знімає попередження після появи ознаки гальмування. Для реального підтвердження цієї логіки потрібні часові записи руху, яких у розглянутому матеріалі немає.

4.4 Аналіз чутливості та обмежень запропонованого підходу

Результати роботи алгоритму залежать від повноти вхідної інформації, прийнятих ваг і правил віднесення ситуацій до класів. Для попереднього аналізу чутливості можна дослідити вплив зміни інтегральної оцінки на її наближення до демонстраційного порогу пріоритетного повідомлення. Така перевірка демонструє, що поблизу порогів незначні похибки датчиків або зміна ваг можуть змінювати ступінь інформування машиніста.

На рисунку 4.3 показано умовну зміну значення R навколо 0,69 у діапазоні ±0,15. Якщо використовувати просте порогове правило $R \geq 0{,}60$, діапазон від 0,54 до 0,84 охоплює як значення нижче порога, так і значення вище нього. У реальній системі це може призводити до частого перемикання індикації за нестійких вимірювань.

Для запобігання надмірному перемиканню рівнів уваги необхідно застосовувати контроль достовірності, фільтрацію шумів і, за потреби, гістерезис порогів. Застосування гістерезису не допускається до критичних імперативних вимог, для яких рішення має визначатися безпечним регламентованим станом. Його доречно використовувати лише для допоміжного ранжування повідомлень.

Суттєвим обмеженням дослідження є відсутність реальних рейсових даних і результатів полігонних або експлуатаційних випробувань. Відповідно, немає підстав оцінювати ймовірності помилок класифікації, фактичне скорочення часу реагування чи статистично достовірне зниження транспортних подій. Для цього необхідні попередньо визначений протокол експерименту, контрольна група і достатня кількість спостережень.

Ще одним обмеженням є недостатня визначеність фізичної моделі гальмування для конкретного складу. Інформаційна СППР може попереджати про недостатній запас відстані лише за наявності обґрунтованої розрахункової моделі, погоджених параметрів гальм і достовірного визначення положення поїзда. У даній роботі цей компонент віднесено до вимог подальшої деталізації.

$$\Delta R = R' - R_0 \qquad (4.4)$$

де ΔR – зміна інтегральної оцінки; R′ – оцінка після варіювання вхідних параметрів; R_0 – базове значення для сценарію.

Умовну чутливість показника наведено на рисунку 4.3.

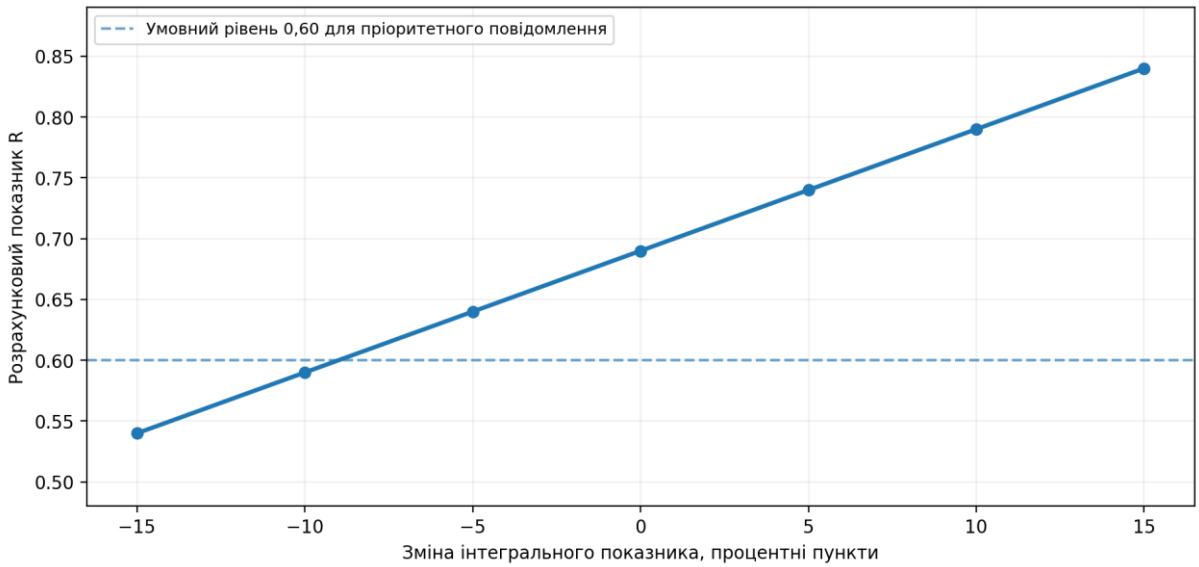


Рисунок 4.3 – Ілюстративний аналіз чутливості показника небезпеки

Потрібно по черзі змінювати кожну неперервну ознаку при фіксованих інших умовах та спостерігати реакцію індексу й класу. Такий аналіз дозволяє виявити некоректні знаки, різкі зміни та неочікуване покращення оцінки безпеки при погіршенні фізичних умов. Чутливість залежить від вихідної точки і не може бути універсальною для всього простору станів. Це створює передумови для уточнення

структури вхідних даних і перевірки відповідності рекомендацій реальній поїзній обстановці.

Під час розгляду питання «двопараметричні сценарії» важливо відокремити фізичний механізм від логіки розрахунку. Спільна зміна швидкості й доступної відстані є змістовнішою за незалежну зміну лише однієї з цих ознак. За інших рівних умов зростання швидкості повинно підвищувати потребу у запасі гальмівного шляху, а зменшення відстані – підвищувати небезпеку. Числове моделювання має враховувати фізичні межі для обох змінних. Вказана обставина особливо важлива, коли змінюються декілька параметрів одночасно, а результат має бути представлений машиністу без затримки.

Особливе значення для обраного підходу має невизначеність гальмівного уповільнення. Під час оцінювання запасу зупинки номінальний параметр уповільнення може відрізнятися від фактичного через стан колії та обладнання. Аналіз кількох консервативних значень дозволяє побачити, наскільки швидко змінюється розрахунковий шлях зупинки. Не можна переносити навчальні значення уповільнення на конкретні поїзди без нормативного обґрунтування. Запропоноване тлумачення дозволяє виконати порівняльний аналіз варіантів, не підміняючи нормативну вимогу умовним інтегральним показником.

Практична реалізація повинна враховувати вплив порогу класифікації. Невелика зміна демонстраційного порога може перевести близьку ситуацію з класу С2 до С3 або навпаки. Потрібно перевіряти не лише кількість таких переходів, але й їхній практичний зміст і допустимість відповідних рекомендацій. Поріг не повинен замінювати критичні правила, пов’язані із заборонним сигналом. На рівні програмної реалізації це означає необхідність зберігати вихідні параметри, проміжні стани та причину прийнятого рішення.

Для обґрунтування моделі розглянуто вплив ваг багатокритеріальної оцінки. Якщо для двох безпечних альтернатив інтегральний критерій близький, невелика зміна ваг може змінити їхнє ранжування. Важливо відстежувати стійкість обраної дії та надавати машиністу консервативне рішення за значної невизначеності. Безпековий фільтр повинен зберігатися незалежно від цих змін. Саме тому в математичному й алгоритмічному забезпеченні важливо встановлювати межі застосування прийнятих припущень.

При оцінюванні результатів доцільно виділити неповні й застарілі дані. Окремий вид перевірки становить зникнення критичної ознаки, помилкова часова мітка або несумісність сигналів. Очікуваною поведінкою є повідомлення про

обмежену достовірність і заборона необґрунтованих висновків про безпечність. Цю перевірку важливо включити в програмні тести ще до тренажерних випробувань. Завдяки такому поділу можливо перевіряти окремі функції системи та уникати некоректного узагальнення результатів моделювання.

Показник чутливості може визначатися як відношення приросту вихідної оцінки до малої зміни вхідного параметра. Для безрозмірного нормованого показника зручно використовувати відносні прирости, але при наближенні значень до нуля така операція стає нестійкою. Тому в практичних сценаріях слід встановлювати діапазони зміни ознак, спосіб нормування та критерій істотності реакції класифікатора. За критичних предметних правил можливий дискретний перехід класу – він не є помилкою гладкості моделі, якщо логічно обґрунтований обмеженнями безпеки.

$$S_{\text{i}} = \Delta R \,/\, \Delta x_{\text{i}} \tag{4.5}$$

де S_i – локальний показник чутливості індексу небезпеки до і-ї нормованої ознаки;

ΔR – зміна вихідної оцінки;

Δx_i – зміна ознаки за фіксованих інших умов.

Особливе значення має комплексне варіювання параметрів. Якщо швидкість і відстань розглядати незалежно, можна отримати фізично несумісні сполучення. Для випробування доцільно створювати узгоджені часові послідовності, у яких відстань змінюється відповідно до швидкості руху, а уповільнення – до прикладеного режиму гальмування. Це дозволяє перевірити не лише локальну математичну чутливість, а й стійкість переходів класів за реалістичного порядку зміни ознак. Водночас складні динамічні моделі потребують експлуатаційних параметрів конкретного рухомого складу та окремого підтвердження.

До пограничних випадків належить спрацювання критичного правила за інтегрального індексу, який не досяг максимального порога. Така поведінка є очікуваною, якщо правило відображає обов’язкову нормативну умову. Для перевірки алгоритму необхідно задати декілька тестів по обидва боки порога і окремо – тест із критичною ознакою, що має пріоритет над індексом. Результат доцільно реєструвати як трійку «вхідні параметри – умова переходу – повідомлення». Така форма допомагає виявляти порушення причинно-наслідкового зв’язку між фактором і рекомендацією.

4.5 Оцінювання функціональної ефективності системи

Функціональна ефективність СППР визначається її здатністю надавати корисну інформаційну підтримку без порушення штатних процедур керування. Для комплексної перевірки доцільно використовувати показники коректності класу ситуації, своєчасності повідомлення, частки непотрібних попереджень, здатності працювати за часткової втрати інформації та зрозумілості рекомендованої дії для машиніста.

За результатами демонстраційного аналізу семи сценаріїв логіка формування повідомлень відповідає заданій класифікації. При цьому обмеження безпеки враховано як попередню умову допустимості альтернатив, що унеможливлює обґрунтування небезпечної дії лише перевагою енергоефективності чи виконання графіка. Це є методичною перевагою запропонованої схеми.

Для кількісного доведення експлуатаційної ефективності необхідно організувати незалежні випробування з реальними або достовірно відтвореними часовими рядами параметрів. Після цього можуть бути визначені частки правильних і помилкових попереджень, час затримки формування рекомендації, коефіцієнт готовності модулів і вплив інтерфейсу на роботу машиніста.

На етапі передпроєктного оцінювання також важливо відрізняти функціональні результати від економічних. Сценарне моделювання показує логічну узгодженість системи, але не підтверджує безпосередньо заявленої економії енергії. Прогноз витрат та очікуваного річного економічного ефекту розглядається окремо в п’ятому розділі й потребує подальшого уточнення за експлуатаційними вимірюваннями.

Таким чином, виконаний аналіз підтверджує доцільність продовження розроблення концепції та її тестування на розширеній базі сценаріїв. Для практичного впровадження слід передбачити перевірку сумісності з бортовими системами, оцінку ризиків інтеграції, надійності інформаційних каналів і належне підтвердження виконання нормативних вимог безпеки.

Таблиця 4.6 – Показники для подальшої перевірки ефективності СППР

Показник	Спосіб визначення	Статус у роботі
Точність розпізнавання	Незалежна тестова вибірка	Не виміряна
Час формування рекомендації	Вимірювання на обладнанні	Не виміряний

Показник	Спосіб визначення	Статус у роботі
Стійкість до пропусків даних	Серія спеціальних випробувань	Якісно обґрунтована
Зрозумілість повідомлення	Ергономічні випробування	Вимога до реалізації
Сценарна несуперечливість	7 демонстраційних ситуацій	Перевірена у заданих прикладах

Показник характеризує відповідність результатів алгоритму наперед визначеним правилам на скінченному наборі прикладів. У цій роботі можна перевіряти наявність узгодженої рекомендації для семи сценаріїв, але не слід називати це точністю промислового класифікатора. Для статистичної оцінки потрібна незалежна тестова вибірка. Це створює передумови для уточнення структури вхідних даних і перевірки відповідності рекомендацій реальній поїзній обстановці.

Під час розгляду питання «відсутність небезпечних рекомендацій» важливо відокремити фізичний механізм від логіки розрахунку. Окремим критерієм є перевірка, що система не пропонує збільшувати тягу або ігнорувати обмеження в критичній ситуації. Цей критерій важливіший за оптимізацію дрібних економічних переваг, оскільки помилкова рекомендація може погіршити експлуатаційний ризик. Перевірка має спиратися на формалізовані вимоги до безпеки. Вказана обставина особливо важлива, коли змінюються декілька параметрів одночасно, а результат має бути представлений машиністу без затримки.

Особливе значення для обраного підходу має результативність інформаційного інтерфейсу. Коротке попередження може бути корисним лише тоді, коли машиніст його вчасно сприймає і правильно розуміє. Потрібні дослідження часу ознайомлення, частоти неправильного тлумачення та суб’єктивного навантаження на тренажері. Тільки програмне моделювання без участі людини не дає таких результатів. Запропоноване тлумачення дозволяє виконати порівняльний аналіз варіантів, не підміняючи нормативну вимогу умовним інтегральним показником.

Практична реалізація повинна враховувати надійність обробки даних. Систему необхідно тестувати на пропуски сигналів, неправильні діапазони, шум та розриви зв’язку, а також перевіряти відновлення після збою. Результатом мають бути чіткі стани працездатності й передбачуване повідомлення про невизначеність. Наявний макет не підтверджує показників відмовостійкості у реальній експлуатації. На рівні програмної реалізації це означає необхідність зберігати вихідні параметри, проміжні стани та причину прийнятого рішення.

Для обґрунтування моделі розглянуто енергоефективність як вторинний ефект. У штатних умовах підказки щодо тяги, вибігу й гальмування потенційно можуть зменшувати зайве споживання енергії. Для кількісного підтвердження потрібне порівняння рейсів з однаковою масою, профілем і погодними умовами або коректне моделювання енергоспоживання. Грошову економію в розділі 5 подано як прогнозну передумову, а не як виміряний результат експерименту. Саме тому в математичному й алгоритмічному забезпеченні важливо встановлювати межі застосування прийнятих припущень.

При оцінюванні результатів доцільно виділити план наступних випробувань. Подальша робота повинна включати збір реальних записів руху, експертне маркування подій, тестування класів, перевірку інтерфейсу та аналіз економії енергії. Це дозволить перейти від логічної перевірки прототипу до кількісних показників безпеки й ефективності. Промислове застосування можливе лише після виконання необхідних технічних та нормативних процедур. Завдяки такому поділу можливо перевіряти окремі функції системи та уникати некоректного узагальнення результатів моделювання.

Для змістовної інтерпретації семи сценарних прикладів потрібно відділити перевірку внутрішньої узгодженості від статистичної ефективності. Якщо алгоритм видає очікувану рекомендацію у всіх семи заздалегідь сформованих випадках, це підтверджує проходження відповідних функціональних тестів. Однак відсоток проходження таких тестів не дорівнює точності розпізнавання реальних транспортних ситуацій. Для цього потрібні незалежна вибірка, аналіз класового дисбалансу та реальні оцінки помилкових попереджень і пропущених загроз.

Таблиця 4.7 – Програма наступних випробувань

Етап	Об’єкт перевірки	Ознака завершення
Модульні тести	Обчислення і правила	Відсутність внутрішніх суперечностей
Імітація відмов	Пропуски та шум даних	Передбачувана реакція
Сценарний стенд	Послідовності подій	Узгоджені рекомендації
Локомотивний тренажер	Сприйняття машиністом	Виміряний час реакції
Польові випробування	Телеметрія реальних рейсів	Порівняльні показники
Економічна перевірка	Енергія та ремонтні витрати	Фактична економія

Оцінка функціональної ефективності має ґрунтуватися на заздалегідь установлених показниках. Для класифікації це частка правильно віднесених ситуацій до класів, повнота виявлення критичних подій та частота хибних попереджень. Для модуля рекомендацій це відсутність недопустимих дій і відповідність повідомлення

встановленому класу. Для інформаційної взаємодії це актуальність даних, стійкість до пропусків і логічна узгодженість часових міток. Тільки сукупність таких результатів може обґрунтувати висновок про працездатність прототипу.

Для оцінювання участі машиніста потрібне окреме тренажерне дослідження. У ньому можна порівнювати час розпізнавання ситуації, кількість помилкових дій та суб'єктивне навантаження за наявності й відсутності інформаційної підтримки. Необхідно забезпечити однакову складність завдань, визначити критерії відбору учасників і порядок проведення повторних спроб. У даній роботі таких експериментів не виконано, тому не наводяться вигадані відсотки скорочення часу реагування або зменшення числа транспортних подій. Ці показники сформульовано як предмет подальшої верифікації.

Завершальне порівняння семи сценаріїв дозволяє встановити, що функціональна схема має забезпечувати два незалежні механізми визначення необхідної реакції. Перший механізм формує числовий індекс для ситуаційного оцінювання; другий безпосередньо враховує критичні предметні правила. У протилежному випадку числове усереднення може занижувати терміновість попередження. Розділення цих механізмів створює можливість окремої перевірки правильності математичних обчислень та правильності виконання нормативно значущих умов. Такий підхід особливо важливий для сценаріїв із перешкодою попереду або заборонним сигналом.

Для переходу до наступного етапу експериментального дослідження слід підготувати часові послідовності параметрів, а не тільки одиничні набори стану. У кожній послідовності має відображатися виникнення загрози, розвиток ситуації, поява рекомендації та подальша зміна вхідних ознак. Це дасть змогу перевіряти стійкість повідомлень, затримку їх формування та коректність зниження класу небезпеки після усунення її причин. За відсутності таких даних не можна кількісно підтвердити швидкість реагування або частку попереджених помилок.

Особливу увагу в майбутніх випробуваннях доцільно приділити несумісним або застарілим сигналам. Якщо система одночасно отримує суперечливі дані про швидкість і пройдену відстань, коректною реакцією є повідомлення про обмеження достовірності, а не довільний вибір одного джерела. Аналогічно втрата відомостей про гальмівну здатність не може інтерпретуватися як її достатність. Логіка відмовобезпечної поведінки має бути задокументована й перевірена до використання системи на реальному локомотиві.

Отже, функціональну ефективність запропонованого алгоритму на цій стадії коректно характеризувати як відповідність встановленим сценарним вимогам. Результати підтверджують можливість узгодженого формування класів і рекомендацій у межах навчальної моделі, але не є доказом експлуатаційної надійності, скорочення числа транспортних подій чи зниження витрат енергії. Для отримання зазначених показників потрібні незалежні вимірювання, статистично достатня вибірка, участь машиністів і проведення технічних випробувань.

Висновки до розділу 4

На основі семи типових сценаріїв виконано демонстраційну перевірку концептуальної логіки розпізнавання ситуацій і формування рекомендацій машиністу. Показники небезпеки в сценаріях змінюються від 0,18 до 0,77, що дозволяє розглянути штатні, попереджувальні та критичні умови.

Показано, що класифікація має поєднувати числову оцінку з предметними правилами. Зокрема, ситуація з перешкодою попереду класифікується як C_4 за критичною логічною умовою навіть за $R = 0{,}77$. Виконано ілюстративний аналіз чутливості й визначено вимоги до контролю достовірності даних.

Результати свідчать про внутрішню узгодженість запропонованої концепції на заданих прикладах, але не становлять доказу експлуатаційної точності чи підтвердженої економії. Для остаточної оцінки потрібні незалежні вимірювання та випробування.

5 Техніко-економічне обґрунтування впровадження інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень

5.1 Передумови економічної оцінки

Запропонована інтелектуальна система підтримки прийняття рішень (СППР) розглядається як додатковий інформаційно-аналітичний контур, призначений для підвищення обґрунтованості вибору керуючих дій машиніста. Економічна оцінка її застосування повинна охоплювати витрати на оснащення локомотива та очікувані вигоди від раціональніших режимів ведення поїзда, зменшення зношування обладнання, зниження ризику помилкових дій і дотримання графіка руху.

Оцінювання проведено для умовного оснащення одного локомотива. Числові вихідні дані витрат і ефектів узгоджено з матеріалами презентації кваліфікаційної роботи. Оскільки в наявних матеріалах відсутні акти впровадження, виміряні витрати енергії до і після встановлення системи, тарифні параметри та статистика ремонтів, наведені показники мають статус прогнозного розрахунку, а не підтвердженого експлуатаційного результату. [12]

У розрахунку використано зіставні річні грошові потоки без дисконтування як базову схему попередньої оцінки. До складу початкових витрат включено обладнання, програмне забезпечення, монтаж, налагодження, підготовку персоналу та передбачену кошторисом складову обслуговування. Перед практичним упровадженням необхідно уточнити строки служби обладнання, повторювані витрати на технічне обслуговування, індексацію цін і можливі витрати на інтеграцію із сертифікованими бортовими системами.

Поглиблений аналіз окремих умов і методичних обмежень

Додаткової уваги потребує призначення економічного дослідження. Попереднє техніко-економічне обґрунтування порівнює початкові витрати на оснащення одного локомотива з очікуваними щорічними заощадженнями. Воно допомагає визначити, які складові мають найбільший вплив на окупність і які вихідні параметри потрібно підтвердити перед закупівлею. Показники прогнозного розрахунку не є підтвердженими даними конкретного депо. Це створює передумови для уточнення структури вхідних даних і перевірки відповідності рекомендацій реальній поїзній обстановці.

Під час розгляду питання «межі розрахункового об’єкта» важливо відокремити фізичний механізм від логіки розрахунку. Один локомотив розглядається як окрема одиниця впровадження, для якої обліковуються апаратні засоби, програмне забезпечення, монтаж та підготовка персоналу. Такий підхід дозволяє обчислити простий термін окупності, але не відображає всіх витрат на централізовану інфраструктуру або масштабування на парк. Для повного інвестиційного рішення необхідно уточнити склад загальних і розподілених витрат. Вказана обставина особливо важлива, коли змінюються декілька параметрів одночасно, а результат має бути представлений машиністу без затримки.

Особливе значення для обраного підходу має безпековий та економічний результат. Зниження впливу людського фактора має передусім експлуатаційне значення, а фінансова оцінка можливих уникнених втрат є допоміжною. Не можна підмінювати нормативні вимоги до безпеки розрахунком прибутковості або включати непідтверджені вигоди як гарантований грошовий потік. Детальніша оцінка потребує статистики транспортних подій та вартості їхніх наслідків. Запропоноване тлумачення дозволяє виконати порівняльний аналіз варіантів, не підміняючи нормативну вимогу умовним інтегральним показником.

Практична реалізація повинна враховувати порівнянність базового та нового режиму. Оцінка річного ефекту має ґрунтуватися на зіставних обсягах роботи, типах поїздів, профілях маршрутів та часових інтервалах. Без контролю зазначених факторів різниця енергоспоживання може відображати зміну умов перевезень, а не вплив СППР. У попередній роботі використано прогнозні суми, що вимагають наступної перевірки. На рівні програмної реалізації це означає необхідність зберігати вихідні параметри, проміжні стани та причину прийнятого рішення.

Для обґрунтування моделі розглянуто розподіл витрат за життєвим циклом. Одноразові капітальні витрати і регулярні платежі за технічну підтримку мають різні економічні наслідки. У моделі необхідно розділяти придбання, установлення, навчання, технічне обслуговування, оновлення й заміну елементів. Показник простого строку окупності не враховує автоматично всіх витрат життєвого циклу. Саме тому в математичному й алгоритмічному забезпеченні важливо встановлювати межі застосування прийнятих припущень.

При оцінюванні результатів доцільно виділити принцип обережного прогнозування. За невизначеності економії доцільно використовувати базовий, песимістичний та оптимістичний сценарії і показувати їхні відмінності. Такий підхід допомагає виявити критичні припущення, за яких інвестиція перестає окупатися

протягом обраного часу. Це не є ймовірнісним прогнозом без окремих даних про розподіл ризиків. Завдяки такому поділу можливо перевіряти окремі функції системи та уникати некоректного узагальнення результатів моделювання.

5.2 Визначення витрат на впровадження

Капітальні та супутні витрати на встановлення СППР охоплюють компоненти апаратного і програмного забезпечення, допоміжні засоби та роботи з введення системи в дію. Загальна величина початкових витрат розраховується як сума окремих статей кошторису

$$C\Sigma = C\text{ЕОМ} + C\text{інт} + C\text{дат} + C\text{доп} + C\text{ПЗ} + C\text{мон} + C\text{навч} \quad (5.1)$$

де СΣ – загальні витрати на впровадження, грн;

СЕОМ – витрати на бортову ЕОМ;

Сінт – інтерфейсну частину;

Сдат – датчики;

Сдоп – допоміжні елементи;

СПЗ – програмне забезпечення;

Смон – монтаж і налагодження;

Снавч – навчання та початкове обслуговування.

Таблиця 5.1 – Кошторис витрат на впровадження СППР на одному локомотиві

Стаття витрат	Вартість, грн	Частка, %
Бортова електронно-обчислювальна машина	13 000	21,0
Інтерфейсна частина	3 350	5,4
Датчики	21 000	34,0
Допоміжні елементи	2 500	4,0
Програмне забезпечення	7 000	11,3
Монтаж і налагодження	11 000	17,8
Навчання персоналу та початкове обслуговування	4 000	6,5
Разом	61 850	100,0

За результатами підсумовування 13 000 + 3 350 + 21 000 + 2 500 + 7 000 + 11 000 + 4 000 початкові витрати становлять 61 850 грн. Найбільша частка припадає на датчики (21 000 грн), що відповідає приблизно 34 % бюджету. Витрати на бортову ЕОМ і монтажно-налагоджувальні роботи становлять відповідно 13 000 грн і 11 000 грн. Складова програмного забезпечення є окремою статтею, що дозволяє враховувати витрати на адаптацію інтерфейсів обробки даних і реалізацію рекомендаційної логіки.

Наведений кошторис є укрупненим. Він придатний для порівняння з очікуваним економічним результатом, але не замінює проєктно-кошторисну документацію. Остаточна вартість упровадження залежатиме від типу локомотива, сумісності апаратури, необхідності резервування каналів, вимог кібербезпеки, обсягу перевірок і процедури допуску до експлуатації.

До цієї статті віднесено апаратний засіб, здатний приймати потоки телеметрії й виконувати алгоритми в реальному часі. У кошторисі для нього прийнято 13 000 грн; значення слід розглядати як попередню оцінку без конкретної комерційної пропозиції. Під час закупівлі потрібна перевірка промислового виконання, сумісності та гарантійного забезпечення. Це створює передумови для уточнення структури вхідних даних і перевірки відповідності рекомендацій реальній поїзній обстановці.

Під час розгляду питання «комплекс датчиків» важливо відокремити фізичний механізм від логіки розрахунку. Найбільша окрема стаття витрат – 21 000 грн – пов’язана з отриманням необхідних вимірювань і їхнім підключенням. При реальному оснащенні частина даних може бути доступною з наявних бортових пристроїв, що змінить структуру бюджету. Необхідно уникати дублювання штатних систем і враховувати вимоги до точності й діагностування. Вказана обставина особливо важлива, коли змінюються декілька параметрів одночасно, а результат має бути представлений машиністу без затримки.

Особливе значення для обраного підходу має інтерфейсна частина. На засоби відображення та взаємодії з оператором у попередній моделі передбачено 3 350 грн. Однак вибір типу індикатора повинен визначатися ергономікою, читабельністю, умовами освітлення та стійкістю до вібрації, а не лише мінімальною ціною. Концептуальний інтерфейс не є готовим промисловим виробом. Запропоноване тлумачення дозволяє виконати порівняльний аналіз варіантів, не підміняючи нормативну вимогу умовним інтегральним показником.

Практична реалізація повинна враховувати програмне забезпечення. У кошторисі прийнято 7 000 грн для реалізації модулів обробки ознак, класифікації та

рекомендацій. Оцінка не включає доведену вартість повного життєвого циклу розробки безпекового програмного забезпечення або сертифікаційних процедур. Це підкреслює попередній характер кошторису. На рівні програмної реалізації це означає необхідність зберігати вихідні параметри, проміжні стани та причину прийнятого рішення.

Для обґрунтування моделі розглянуто монтаж і налагодження. Для підключення, перевірки каналів даних та початкового тестування прийнято 11 000 грн. На практиці ці роботи потребують погоджених схем підключення, перевірки електромагнітної сумісності та документування результатів. Без відомостей про конкретну серію локомотива трудомісткість є орієнтовною. Саме тому в математичному й алгоритмічному забезпеченні важливо встановлювати межі застосування прийнятих припущень.

При оцінюванні результатів доцільно виділити допоміжні елементи та підготовка персоналу. Вартість допоміжних елементів складає 2 500 грн, а навчання та початкове обслуговування – 4 000 грн. Ці витрати забезпечують фізичну інтеграцію обладнання й підготовку користувачів, без яких номінально працездатна програма може бути неефективною. Регулярні щорічні витрати на підтримку потрібно оцінювати окремо. Завдяки такому поділу можливо перевіряти окремі функції системи та уникати некоректного узагальнення результатів моделювання.

Таблиця 5.2 – Групування витрат за їх економічною природою

Група	Статті базового кошторису	Сума, грн
Обчислення та інтерфейс	ЕОМ 13 000 + інтерфейс 3 350	16 350
Вимірювання	Датчики	21 000
Інженерна інтеграція	Допоміжні елементи 2 500 + монтаж 11 000	13 500
Програмні роботи	Програмне забезпечення	7 000
Початкова підготовка	Навчання та початкове обслуговування	4 000
Разом	Одноразові витрати	61 850

Реальна структура початкових витрат залежатиме від того, які дані вже доступні на локомотиві і як організовано їхнє зчитування. Якщо частина сигналів може бути отримана зі штатної телеметрії без додаткових датчиків, вартість апаратного комплекту потенційно зменшиться. Водночас вимоги до промислового виконання, резервування, контролю достовірності та електромагнітної сумісності здатні збільшувати витрати порівняно з демонстраційним кошторисом. Тому сума 61 850

грн має використовуватися як вихідна модель для попереднього порівняння, а не як гарантована ціна повного впровадження.

В укрупненому бюджеті необхідно також оцінити, які види витрат не враховані явно. До них можуть належати розроблення детальної документації, перевірка програмного забезпечення, ремонт або заміна компонентів після завершення гарантії, інформаційна безпека та експлуатаційні оновлення. Ці статті мають різний характер: частина припадає на момент запуску, інша виникає регулярно. За відсутності їхніх підтверджених сум доцільно відокремлювати їх як невизначеність інвестиційного рішення та виконувати аналіз чутливості за загальними витратами.

5.3 Джерела формування річного економічного ефекту

Економічний ефект функціонування СППР формується внаслідок зменшення витрат на виконання перевізної роботи та скорочення непродуктивних втрат. Його складові доцільно розглядати роздільно, оскільки вони мають різну фізичну природу, різні методи вимірювання та відрізняються за надійністю прогнозування.

Основним джерелом очікуваної економії є оптимізація використання енергоресурсів. Запропонована система, аналізуючи швидкість, профіль ділянки, сигнальну обстановку та відхилення від графіка руху, може рекомендувати раціональніші моменти переходу між режимами тяги, вибігу й гальмування. За наявності вимірювальних даних річна економія за цією статтею визначається добутком зменшення річних витрат енергії на відповідну тарифну ціну

$$Ее = (Wб - WСППР) \cdot се \qquad (5.2)$$

де Wб і WСППР – річні витрати енергії за базового та рекомендованого режимів відповідно, кВт·год;

се – розрахункова ціна одиниці енергії, грн/(кВт·год).

Для прогнозної моделі прийнято значення економії енергоресурсів 26 000 грн на рік, що потребує підтвердження експлуатаційними вимірюваннями і фактичними тарифами.

Другою складовою є скорочення витрат на ремонт унаслідок зниження частоти різких переходів між режимами тяги й гальмування та зменшення нераціональних навантажень на тягове і гальмівне обладнання. Річна економія за цією статтею визначається різницею витрат на технічне обслуговування та ремонт у базовому і порівнюваному режимах. У розрахунку прийнято прогнозний показник 5 500 грн.

Третя складова пов’язана зі зменшенням втрат від помилкових дій, спричинених недооцінкою небезпеки або недостатньою оперативністю реагування. У грошовій оцінці її слід обчислювати за очікуваним скороченням частоти й вартості небажаних подій. У межах попереднього кошторису прийнято 4 900 грн на рік. Ця величина не є оцінкою вартості безпеки як такої та не повинна використовуватися як підстава для послаблення нормативних вимог.

Четвертою складовою є ефект від точнішого дотримання графіка руху, який може виявлятися у скороченні непродуктивного часу, стабілізації експлуатаційних режимів і зменшенні пов’язаних витрат. Для попереднього розрахунку прийнято 2 650 грн на рік. Під час подальших досліджень необхідно уникати подвійного врахування економії енергоресурсів і часових витрат, якщо вони виникають від однієї й тієї самої зміни режиму руху.

Поглиблений аналіз окремих умов і методичних обмежень

Додаткової уваги потребує джерело економії енергії. Рекомендації щодо режимів тяги, вибігу та гальмування потенційно дають можливість зменшити надлишкову витрату енергоресурсів. У базовій прогнозній моделі прийнято 26 000 грн на рік; цей показник є найбільшою часткою річного ефекту. Для підтвердження потрібні рейсові показники енерговитрат, тарифи та порівнянні умови руху. Це створює передумови для уточнення структури вхідних даних і перевірки відповідності рекомендацій реальній поїзній обстановці.

Під час розгляду питання «економія на ремонті» важливо відокремити фізичний механізм від логіки розрахунку. Плавніше ведення може зменшувати кількість небажаних режимів навантаження окремих вузлів рухомого складу. У прогнозі прийнято 5 500 грн на рік, але причинний зв’язок між рекомендаціями і ремонтними витратами не перевірявся на статистиці відмов. Тому сума повинна бути уточнена за матеріалами експлуатаційного обліку. Вказана обставина особливо важлива, коли змінюються декілька параметрів одночасно, а результат має бути представлений машиністу без затримки.

Особливе значення для обраного підходу має зменшення очікуваних втрат. У кошторисі окремо наведено 4 900 грн на рік як умовну економічну оцінку зменшення

впливу людського фактору. Вона не дорівнює гарантованому зниженню кількості транспортних подій і не повинна використовуватися для оцінки людського життя. Розрахунок реального очікуваного збитку потребує подій, частот, наслідків та методологічних обмежень. Запропоноване тлумачення дозволяє виконати порівняльний аналіз варіантів, не підміняючи нормативну вимогу умовним інтегральним показником.

Практична реалізація повинна враховувати поліпшення графіка. Підказки з раціонального режиму руху можуть зменшувати неефективні зупинки та відхилення від плану за збереження вимог безпеки. Прогнозна сума 2 650 грн на рік потребує підтвердження окремими операційними показниками й уникнення подвійного обліку економії енергії. Саме запізнення не повинно виправдовувати небезпечних керуючих дій. На рівні програмної реалізації це означає необхідність зберігати вихідні параметри, проміжні стани та причину прийнятого рішення.

Для обґрунтування моделі розглянуто адитивність складових. Сумарний ефект може обчислюватися додаванням окремих сум лише за відсутності їхнього суттєвого перекриття. Наприклад, одна зміна режиму тяги може одночасно впливати на час руху та споживання енергії, тому їхні грошові наслідки потрібно розвести за різними статтями. Без такої перевірки загальна економія може бути завищена. Саме тому в математичному й алгоритмічному забезпеченні важливо встановлювати межі застосування прийнятих припущень.

При оцінюванні результатів доцільно виділити залежність від річного пробігу. Енергетичний та ремонтний ефекти можуть змінюватися залежно від обсягу експлуатаційної роботи локомотива. Для масштабування до іншого пробігу потрібний питомий ефект на одиницю транспортної роботи, а не пряме перенесення прогнозної річної суми. Питомі характеристики можна встановити після отримання рейсової статистики. Завдяки такому поділу можливо перевіряти окремі функції системи та уникати некоректного узагальнення результатів моделювання.

Для енергетичної складової важливим є фізичний обсяг економії. Якщо фактична ціна електроенергії змінюється, однакова економія кВт·год дає інший грошовий результат. Отже, під час пілотного впровадження потрібно зберігати обидва показники – обсяг зекономленої енергії та її розрахункову вартість. Для порівнянності рейсів слід враховувати масу поїзда, маршрут, кількість зупинок, обмеження швидкості та зовнішні умови. Без такої нормалізації різниця в енерговитратах не може однозначно пов’язуватися з рекомендаціями СППР.

Оцінювання економічного ефекту від зменшення впливу людського фактору є методично складнішим. Потрібно встановити вихідну частоту конкретних видів подій, ймовірну зміну частоти після впровадження й економічні наслідки без подвійного врахування ремонту або затримок. Поки такі дані відсутні, 4 900 грн слід інтерпретувати як умовну складову сценарного прогнозу. Для обережної перевірки доцільно окремо розраховувати окупність без цієї складової. Такий варіант не означає, що підвищення безпеки не має цінності; він лише відокремлює виміряну грошову економію від очікуваної користі.

5.4 Розрахунок річного економічного ефекту

Сумарний очікуваний річний економічний ефект визначається додаванням ефектів за окремими напрямами. Для одного локомотива він може бути записаний у вигляді

$$Ер = Ее + Ерем + Елф + Егр \quad (5.3)$$

де Ер – річний економічний ефект, грн/рік;

Ее – економія енергоресурсів;

Ерем – зниження ремонтних витрат;

Елф – зменшення очікуваних втрат від впливу людського фактору;

Егр – ефект від поліпшення виконання графіка руху.

Таблиця 5.3 – Структура очікуваного річного економічного ефекту

Стаття економічного ефекту	Сума, грн/рік	Частка, %
Економія енергоресурсів	26 000	66,6
Скорочення витрат на ремонт	5 500	14,1
Зменшення очікуваних втрат від людського фактору	4 900	12,5
Поліпшення виконання графіка руху	2 650	6,8
Разом	39 050	100,0

Розрахункова величина ефекту дорівнює 26 000 + 5 500 + 4 900 + 2 650 = 39 050 грн на рік. Із загальної суми близько двох третин припадає на скорочення витрат енергоресурсів. Відносно невеликі за абсолютними сумами показники ремонтної й

організаційної економії важливі для багатокритеріального характеру пропонованої системи, оскільки її призначення не обмежується лише енергозбереженням.

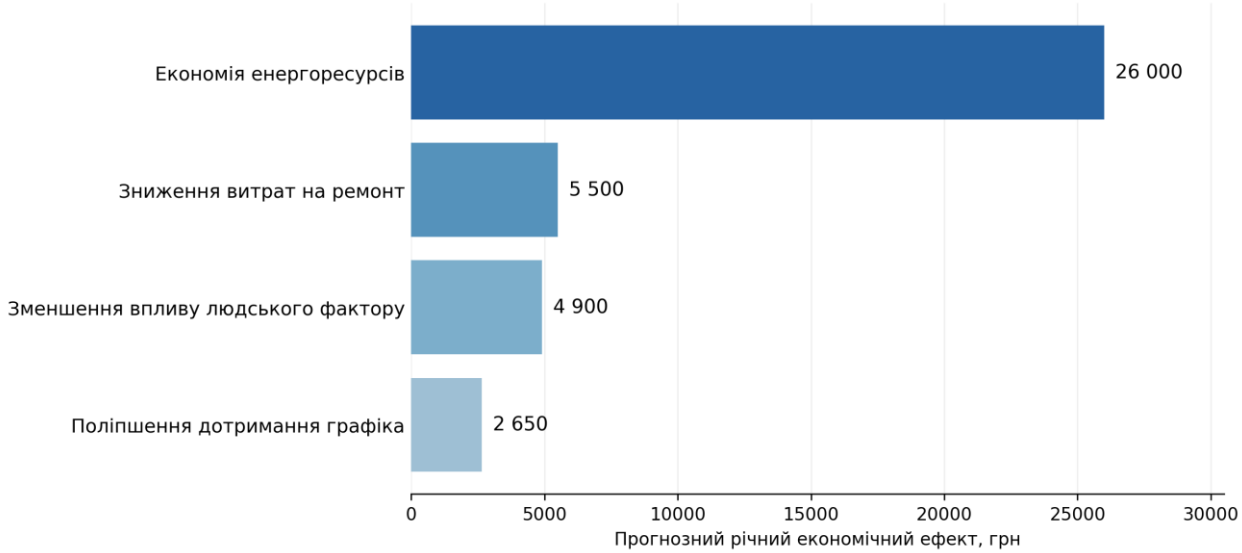


Рисунок 5.1 – Структура прогнозного річного економічного ефекту СППР

Графічне представлення структури річного ефекту на рисунку 5.1 показує домінування енергетичної складової. Під час проєктування реального впровадження доцільно проводити облік спожитої електроенергії за порівнюваними рейсами, відокремлювати вплив маси поїзда, профілю колії, погодних умов і встановленого графіка. Для ремонтної складової потрібні дані про фактичні цикли обслуговування, а для ефекту від підвищення безпеки – статистично обґрунтовані й етично прийнятні методи оцінювання зниження очікуваних втрат.

Річна прогнозна економія визначається сумою 26 000, 5 500, 4 900 і 2 650 грн. Додавання дає 39 050 грн, а частки складових становлять приблизно 66,58 %, 14,08 %, 12,55 % та 6,79 % відповідно. Вихідні суми є сценарними припущеннями, а правильність арифметики не означає їхньої експлуатаційної підтвердженості. Це створює передумови для уточнення структури вхідних даних і перевірки відповідності рекомендацій реальній поїзній обстановці.

Під час розгляду питання «річна та питома економія» важливо відокремити фізичний механізм від логіки розрахунку. Для зіставлення локомотивів з різною інтенсивністю роботи суму економії доцільно поділити на пробіг або транспортну роботу. У розрахунковому прикладі за умовного пробігу 100 тис. км питомий річний ефект дорівнював би 0,3905 грн/км. Зазначений пробіг введено лише для ілюстрації методу та не є вимірюванням. Вказана обставина особливо важлива, коли змінюються

декілька параметрів одночасно, а результат має бути представлений машиністу без затримки.

Особливе значення для обраного підходу має облік податкових та тарифних умов. Зміна ціни енергоресурсів впливає на грошову величину економії за незмінної фізичної кількості зекономленої енергії. Тому доцільно відокремлювати кількісний ефект у кВт·год від тарифного множника і виконувати чутливість за ціною. У базовій таблиці конкретний енергетичний тариф не визначено. Запропоноване тлумачення дозволяє виконати порівняльний аналіз варіантів, не підміняючи нормативну вимогу умовним інтегральним показником.

Практична реалізація повинна враховувати регулярні витрати на підтримку. Якщо прогноз 39 050 грн є валовим, щорічні витрати на технічну підтримку та оновлення треба відняти до розрахунку чистого ефекту. Наприклад, додаткові експлуатаційні витрати 4 500 грн/рік зменшили б чистий результат до 34 550 грн/рік. Такий сценарій слугує перевіркою стійкості, а не підтвердженим кошторисом підтримки. На рівні програмної реалізації це означає необхідність зберігати вихідні параметри, проміжні стани та причину прийнятого рішення.

Для обґрунтування моделі розглянуто відокремлення одноразових витрат. Початкові 61 850 грн не потрібно повторно віднімати від кожного річного ефекту – вони утворюють інвестиційний грошовий потік на нульовому кроці. Надалі враховуються річні чисті надходження та за необхідності витрати на підтримку, заміну й оновлення. Розподіл капітальних і поточних витрат є необхідним для коректного NPV. Саме тому в математичному й алгоритмічному забезпеченні важливо встановлювати межі застосування прийнятих припущень.

При оцінюванні результатів доцільно виділити порівняння з базовим режимом. Економічний ефект означає різницю витрат між двома порівнюваними режимами за однакової виконаної роботи. Без реальних парних рейсів або валідованої імітаційної моделі неможливо встановити, яка частина відхилення спричинена саме СППР. Тому наведена калькуляція описує очікуваний, а не виміряний результат. Завдяки такому поділу можливо перевіряти окремі функції системи та уникати некоректного узагальнення результатів моделювання.

У базовій моделі грошова структура ефекту є саме прогнозом, який не повинен видаватися за наслідок проведеного експлуатаційного експерименту. Енергетичну складову можна підтвердити вимірюванням витрат енергії на зіставних рейсах; ремонтну – даними обліку обслуговувань і відмов; графікову – операційними показниками. Особливо обережного підходу потребує економічне оцінювання

людського фактору: без частоти подій та надійного способу грошової оцінки зменшення ризику сума 4 900 грн залишається умовною. Тому інвестиційне рішення доцільно перевіряти також у сценарії, де цей ефект не враховується.

Таблиця 5.4 – Ілюстративна оцінка питомої економії

Умовний річний пробіг, км	Річний ефект, грн	Питомий ефект, грн/км
50 000	39 050	0,7810
75 000	39 050	0,5207
100 000	39 050	0,3905
125 000	39 050	0,3124

Сценарій повної відсутності очікуваної економії на енергії є особливо показовим. У цьому випадку в базовій структурі залишається 5 500 + 4 900 + 2 650 = 13 050 грн на рік, а простий термін окупності збільшується до 61 850 / 13 050 = 4,74 року. Натомість часткове підтвердження енергетичного ефекту, наприклад на 50 % від прогнозних 26 000 грн, дало б сумарні 26 050 грн/рік та окупність приблизно 2,37 року. Це доводить, що підсумковий результат є чутливим до одного ключового припущення, яке необхідно перевіряти насамперед.

Для порівняння різних обсягів роботи можна використовувати питомі грошові показники, але їх слід тлумачити обережно. Якщо річна економія залишається сталою, збільшення умовного пробігу математично зменшуватиме її величину на один кілометр; на практиці економія зазвичай теж залежить від пробігу. Тому таблиця питомого ефекту має суто ілюстративний характер. У наступних дослідженнях потрібна регресійна або фізична модель залежності економії від транспортної роботи, інтенсивності експлуатації й розподілу режимів руху.

5.5 Визначення терміну окупності

Одним з найбільш наочних показників економічної доцільності впровадження є простий термін окупності. За умови сталого річного економічного ефекту та одноразових початкових витрат він дорівнює відношенню вартості впровадження до величини річної економії

$$Tок = C\Sigma / Eр \quad (5.4)$$

Підставлення прийнятих числових значень дає Ток = 61 850 / 39 050 = 1,58 року. Після округлення отримуємо термін окупності близько 1,6 року, що означає повернення початкових витрат протягом другого року експлуатації за умови досягнення прогнозного ефекту.

Для додаткової оцінки можна використати накопичений недисконтований грошовий результат, що визначається різницею між річними ефектами за весь період та одноразовими витратами

$$S(t) = t \cdot Eр - C\Sigma \quad (5.5)$$

де t – кількість повних років експлуатації,

S(t) – накопичений економічний результат, грн.

Таблиця 5.5 – Прогноз накопиченого економічного результату

Період	Накопичений ефект, грн	Витрати на впровадження, грн	Накопичений результат, грн
1 рік	39 050	61 850	−22 800
2 роки	78 100	61 850	16 250
3 роки	117 150	61 850	55 300
4 роки	156 200	61 850	94 350
5 років	195 250	61 850	133 400

Результати таблиці 5.5 показують, що після першого року початкові витрати ще не компенсовані. За підсумками другого року розрахунковий накопичений результат становить 16 250 грн, а після трьох років – 55 300 грн. У таблиці не враховано можливих повторних витрат на експлуатацію, заміну компонентів, оновлення програмного забезпечення та вплив часу на вартість грошей. Тому наведені величини слід розглядати як базовий сценарій для попередньої оцінки.

Простий термін окупності показує, скільки років потрібно для компенсації початкових витрат за умови незмінної річної економії. Відношення 61 850 / 39 050 дає 1,58 року, тобто базовий розрахунок передбачає повернення витрат упродовж другого року. Показник не враховує часову вартість грошей та нерівномірність потоків. Це створює передумови для уточнення структури вхідних даних і перевірки відповідності рекомендацій реальній поїзній обстановці.

Під час розгляду питання «накопичення результату за роками» важливо відокремити фізичний механізм від логіки розрахунку. Після першого року накопичений недисконтований результат становить мінус 22 800 грн, після другого – плюс 16 250 грн. Позитивне значення наприкінці другого року підтверджує інтерпретацію простого терміну окупності. У таблиці прийнято сталий річний ефект і відсутність додаткових платежів. Вказана обставина особливо важлива, коли змінюються декілька параметрів одночасно, а результат має бути представлений машиністу без затримки.

Особливе значення для обраного підходу має вплив річних експлуатаційних витрат. Якщо щорічна підтримка вартістю 4 500 грн не була включена у прогнозну економію, чистий ефект знижується до 34 550 грн. Тоді простий термін окупності дорівнює приблизно 1,79 року, що довше за базові 1,58 року. Це ілюструє необхідність уточнення структури грошового потоку. Запропоноване тлумачення дозволяє виконати порівняльний аналіз варіантів, не підміняючи нормативну вимогу умовним інтегральним показником.

Практична реалізація повинна враховувати період розрахунку та строк служби. Обраний горизонт інвестиційного оцінювання має відповідати очікуваному терміну служби обладнання і політиці його оновлення. Для ілюстрації можна застосувати п’ятирічний період, але фактичний строк експлуатації системи повинен бути технічно обґрунтований. Після закінчення періоду можуть виникати витрати на модернізацію або заміну компонентів. На рівні програмної реалізації це означає необхідність зберігати вихідні параметри, проміжні стани та причину прийнятого рішення.

Для обґрунтування моделі розглянуто дисконтований підхід. Для врахування вартості грошей у часі майбутні річні потоки приводяться до початкового моменту за визначеною ставкою дисконту. За навчальної ставки 12 % і сталого ефекту можна розрахувати чисту поточну вартість NPV на п’ятирічному горизонті. Ставка в прикладі є припущенням, а не підтвердженою вартістю капіталу конкретного підприємства. Саме тому в математичному й алгоритмічному забезпеченні важливо встановлювати межі застосування прийнятих припущень.

При оцінюванні результатів доцільно виділити неповний рік окупності. За рівномірного надходження ефекту впродовж року можна інтерполювати момент, коли накопичена економія зрівнюється з капітальними витратами. Проте реальний грошовий результат може мати сезонний характер і залежати від фактичного обсягу перевезень. Тому 1,58 року є розрахунковим середнім, а не датою фактичного

повернення коштів. Завдяки такому поділу можливо перевіряти окремі функції системи та уникати некоректного узагальнення результатів моделювання.

Для прикладного врахування вартості грошей у часі прийнято виключно навчальну ставку дисконту 12 % і горизонт п’ять років. За припущення незмінних чистих надходжень 39 050 грн наприкінці кожного року приведені потоки визначаються діленням річної економії на (1+0,12) у степені відповідного року. Чиста поточна вартість обчислюється як сума цих потоків за вирахуванням початкових 61 850 грн. Даний результат залежить від того, чи вже враховані регулярні витрати підтримки у річній економії, і тому не є остаточною інвестиційною оцінкою.

Таблиця 5.6 – Дисконтовані потоки за навчальної ставки 12 %

Рік	**Недисконтований потік, грн**	**Дисконтний множник**	**Приведений потік, грн**
1	39 050	0,8929	34 866,07
2	39 050	0,7972	31 130,42
3	39 050	0,7118	27 795,02
4	39 050	0,6355	24 816,98
5	39 050	0,5674	22 158,02

$$NPV = -C\Sigma + \Sigma_{t=1}^{5} E_t / (1 + r)^t \quad (5.6)$$

де NPV – чиста поточна вартість, грн;

CΣ – початкові інвестиції;

E_t – чистий потік у році t;

r – ставка дисконту.

За умовними r=12 % та E_t=39 050 грн отримано NPV = 78 917 грн.

Показник чистої поточної вартості дозволяє порівнювати майбутні грошові потоки з початковим вкладенням, проте його висновок залежить від ставки дисконту. За нульової ставки розрахунок переходить до простої суми надходжень; за позитивної ставки подальші роки мають меншу приведену вартість. Це особливо важливо за короткого строку роботи обладнання, коли значна частина заощаджень очікується після першого року. У цьому дослідженні ставка 12 % використана лише для демонстрації алгоритму, без прив’язки до фінансової політики певного підприємства.

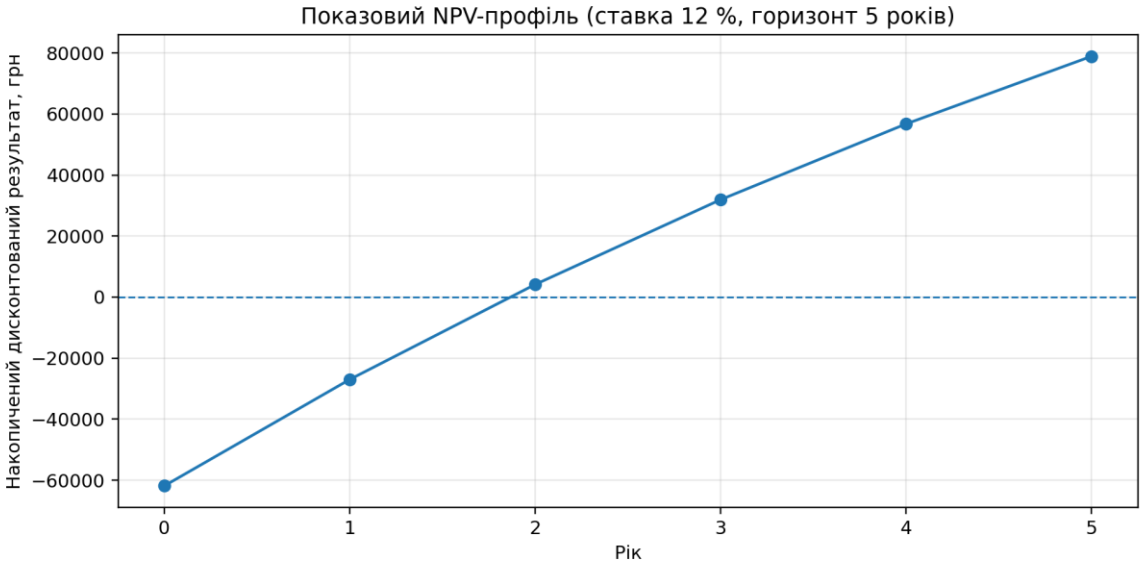


Рисунок 5.2 – Накопичений дисконтований результат за навчального сценарію

Під час подальшого розрахунку доцільно враховувати нерівномірність потоку. Економія енергії може змінюватися залежно від сезонності та обсягу перевезень, ремонтна складова – від графіка технічного обслуговування, а вартість програмної підтримки – від умов договору. Отже, припущення сталих 39 050 грн на рік спрощує задачу й дозволяє пояснити метод, але не підміняє повноцінного бізнес-плану. Для остаточної оцінки необхідно сформувати календар надходжень і витрат та обґрунтувати тривалість використання апаратно-програмного комплексу.

5.6 Оцінювання економічної доцільності впровадження

Надійність висновку про економічну доцільність значною мірою залежить від фактично досягнутого річного ефекту. Доцільно перевірити, як змінюється термін окупності за відхилення економії від базового прогнозу. Для цього в розрахунку розглянуто три сценарії: зменшення очікуваного ефекту на 20 %, базове значення та його збільшення на 20 %. Така зміна є виключно аналітичною перевіркою чутливості моделі й не становить прогноз імовірності реалізації відповідного сценарію.

Таблиця 5.7 – Оцінка чутливості терміну окупності

Сценарій	Річний ефект, грн	Термін окупності, року
Консервативний (−20 %)	31 240	1,98
Базовий	39 050	1,58
Оптимістичний (+20 %)	46 860	1,32

За консервативного сценарію простий термін окупності збільшується приблизно до 1,98 року. За оптимістичного сценарію він скорочується до 1,32 року. Таким чином, навіть за умов прийнятого зменшення ефекту на 20 % базова модель вказує на окупність орієнтовно протягом двох років. Водночас до остаточного рішення щодо впровадження необхідно виконати розрахунок дисконтованих грошових потоків, оцінити ризики та встановити технічні й нормативні передумови експлуатації.

Техніко-економічний ефект не повинен оцінюватися ізольовано від вимог безпеки. Основне призначення СППР полягає у формуванні коректних, зрозумілих і своєчасних рекомендацій для машиніста. Будь-яка запропонована дія повинна проходити перевірку допустимості за обмеженнями швидкості, сигналізації, гальмівного шляху й технічних режимів. Тільки після підтвердження безпечності функціонування можлива оцінка економічного результату такого рішення.

Проведений розрахунок свідчить про потенційну економічну привабливість упровадження інтелектуальної СППР. При одноразових витратах 61 850 грн і прийнятому прогнозному річному ефекті 39 050 грн очікуваний простий термін окупності становить 1,58 року. Одержані результати доцільно використовувати на етапі техніко-економічного попереднього обґрунтування, а для промислової реалізації необхідно доповнити їх експериментальними даними, уточненими тарифами та підтвердженими показниками надійності й безпеки.

Важливо оцінити, як змінюється термін окупності за коливання загального річного ефекту та початкових витрат. За зниження економії на 20 % до 31 240 грн термін становить близько 1,98 року, а за зростання до 46 860 грн – 1,32 року. Такі межі не мають імовірнісного змісту без даних про можливі відхилення. Це створює передумови для уточнення структури вхідних даних і перевірки відповідності рекомендацій реальній поїзній обстановці.

Під час розгляду питання «чутливість до енергетичної складової» важливо відокремити фізичний механізм від логіки розрахунку. Оскільки на енергію припадає понад дві третини базового ефекту, помилка в її прогнозі суттєво впливає на

інвестиційний результат. За нульової енергетичної економії залишковий очікуваний ефект становив би тільки 13 050 грн/рік, а проста окупність – приблизно 4,74 року. Це вказує на необхідність насамперед перевіряти енергетичну складову. Вказана обставина особливо важлива, коли змінюються декілька параметрів одночасно, а результат має бути представлений машиністу без затримки.

Особливе значення для обраного підходу має подорожчання впровадження. Фактичний монтаж та адаптація можуть виявитися дорожчими за початковий укрупнений кошторис. За додаткових 10 000 грн капітальних витрат база підвищується до 71 850 грн, а проста окупність за незмінного ефекту – до 1,84 року. Проєктна документація й комерційні пропозиції повинні уточнювати цю невизначеність. Запропоноване тлумачення дозволяє виконати порівняльний аналіз варіантів, не підміняючи нормативну вимогу умовним інтегральним показником.

Практична реалізація повинна враховувати сценарій з експлуатаційною підтримкою. При валовому ефекті 39 050 грн/рік і умовних витратах підтримки 4 500 грн/рік чиста економія становить 34 550 грн. П’ятий рік такого сценарію приносить менший накопичений результат, але у спрощеному підході окупність залишається меншою двох років. Висновок діє лише за припущення про сталі суми й відсутність інших витрат. На рівні програмної реалізації це означає необхідність зберігати вихідні параметри, проміжні стани та причину прийнятого рішення.

Для обґрунтування моделі розглянуто економічні та безпекові межі. Позитивний фінансовий показник не підтверджує відповідність системи вимогам безпеки руху. Промислова інтеграція потребує окремих функціональних, ергономічних, електротехнічних та нормативних перевірок. Економічне обґрунтування має розглядатися як доповнення до технічного, а не його заміна. Саме тому в математичному й алгоритмічному забезпеченні важливо встановлювати межі застосування прийнятих припущень.

При оцінюванні результатів доцільно виділити умови масштабування на парк. Для кількох локомотивів можуть виникати спільні витрати на серверні засоби, централізоване навчання, розроблення та підтримку. Середня вартість на одиницю обладнання тоді не дорівнюватиме простому множенню кошторису одного локомотива. Для оцінки парку потрібна окрема модель капітальних і поточних витрат. Завдяки такому поділу можливо перевіряти окремі функції системи та уникати некоректного узагальнення результатів моделювання.

Найбільш суттєвим джерелом невизначеності для базового прогнозу є економія енергії, що формує приблизно дві третини від суми 39 050 грн. Якщо її не буде

підтверджено, інші три компоненти забезпечуватимуть лише 13 050 грн на рік, і проста окупність перевищить чотири роки. Отже, перед розгортанням системи доцільно провести пілотну перевірку саме зміни енерговитрат на зіставних рейсах, а після цього уточнити вартість обладнання, регулярні платежі та показники експлуатаційної надійності.

Таблиця 5.8 – Додаткові варіанти чутливості інвестиційного рішення

Умова	Чистий ефект, грн/рік	Початкові витрати, грн	Проста окупність, року
Базова оцінка	39 050	61 850	1,58
Підтримка 4 500 грн/рік	34 550	61 850	1,79
Відсутня енергетична складова	13 050	61 850	4,74
Подорожчання монтажу +10 000	39 050	71 850	1,84
Менший річний ефект на 20 %	31 240	61 850	1,98
Більший річний ефект на 20 %	46 860	61 850	1,32

$$Т\text{ок,ч} = C\Sigma / (E\text{р} - C\text{обсл}) \quad (5.7)$$

де Собсл – додаткові регулярні витрати на обслуговування, якщо вони не враховані при визначенні річного ефекту.

За Собсл = 4 500 грн/рік Ток,ч = 61 850 / 34 550 ≈ 1,79 року.

Для ухвалення рішення щодо оснащення локомотивів недостатньо одного показника простої окупності. Доцільно розглядати разом базовий і консервативний сценарії, граничну величину початкових витрат, необхідний мінімальний річний ефект і технічні ризики інтеграції. Наприклад, для окупності за два роки за одноразових витрат 61 850 грн середній чистий річний ефект повинен становити не менше 30 925 грн. Базова прогнозна сума 39 050 грн перевищує цей поріг, однак значення стане підтвердженим лише після перевірки фактичної економії й витрат підтримки.

Важливо, що навіть економічно вигідний варіант не може застосовуватися, якщо його інформаційні повідомлення ненадійні або суперечать установленим вимогам безпеки руху. Тому завершальним етапом інвестиційної підготовки мають стати тренажерні та технічні випробування, узгодження принципів взаємодії зі штатними засобами контролю, визначення відповідальності персоналу й перевірка

експлуатаційної підтримки. Лише після цього фінансові показники можна використовувати як один з аргументів промислового впровадження.

Для визначення мінімальної результативності, необхідної для повернення інвестицій у заданий строк, можна використати відношення початкових витрат до прийнятного горизонту окупності. Якщо граничним орієнтиром є два роки, мінімальний середній чистий ефект становить 61 850 / 2 = 30 925 грн на рік. При цьому базовий прогноз 39 050 грн перевищує поріг на 8 125 грн. Якщо частина цієї суми повинна спрямовуватися на регулярне обслуговування або повторні перевірки, запас економічної стійкості відповідно зменшується. Таким чином, оцінка потребує не тільки номінальної суми, але й детального складу чистого потоку.

При подальшій інвестиційній оцінці необхідно окремо визначати ризик зміни ціни електроенергії та ризик недосягнення фізичної економії. Перший змінює грошовий результат за однакових заощаджених кВт·год, другий – сам обсяг технічного ефекту. Аналогічно ремонтна складова залежить від стану обладнання та фактичного пробігу, а не лише від факту встановлення СППР. Отже, сукупна сума економії 39 050 грн має бути розкладена на перевірювані технічні та економічні припущення, для кожного з яких можлива власна процедура підтвердження.

Важливим є також вибір способу впровадження. Пілотне оснащення одного локомотива дозволяє перевірити прийняті витрати на інтеграцію, достовірність вимірювань та реальний характер рекомендацій без негайного масштабування на весь парк. Після отримання результатів можна уточнити трудомісткість монтажу, необхідність додаткових датчиків та витрати на підтримку програмного забезпечення. Тільки на цьому етапі доцільно формувати бюджет для групи локомотивів з урахуванням спільних витрат на навчання, супровід і серверну інфраструктуру.

Отримані економічні показники повинні розглядатися в сукупності з технічними результатами. Навіть за позитивної чистої поточної вартості система не може бути рекомендована до промислового застосування без перевірки функціональної безпеки, достовірності вхідної інформації та ергономічної прийнятності повідомлень для машиніста. Фінансовий розрахунок підтверджує потенціал інвестиції лише за прийнятих припущень. Остаточне рішення має ґрунтуватися на експлуатаційних випробуваннях та документально підтвердженій економії.

Висновки до розділу 5

У розділі виконано укрупнене прогнозне техніко-економічне оцінювання впровадження інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень на одному локомотиві. Визначено кошторис початкових витрат у сумі 61 850 грн, причому основними складовими є датчики, бортова ЕОМ і монтажно-налагоджувальні роботи.

Розглянуто чотири джерела очікуваного річного ефекту, сумарне значення якого становить 39 050 грн. Частка економії енергоресурсів у загальному результаті дорівнює приблизно 66,6 %. Простий розрахунковий термін окупності становить близько 1,6 року.

Показано, що за умов зменшення прогнозного ефекту на 20 % термін окупності підвищується орієнтовно до 1,98 року. Висновок про економічну доцільність має попередній характер і потребує підтвердження результатами вимірювань, обліком експлуатаційних витрат та перевіркою можливості безпечної інтеграції СППР у бортове обладнання.

Висновки

1. У кваліфікаційній роботі проаналізовано процес прийняття рішень машиністом у межах ергатичної системи «поїзд – машиніст – середовище». Показано, що значна кількість взаємопов’язаних параметрів, обмеження часу та зміна зовнішніх умов створюють необхідність додаткової інформаційної підтримки. У використаній у роботі вибірці причин транспортних подій частка людського фактору становить 72,5 %, технічних причин – 23,5 %, інших – 4 %. Ці значення обґрунтовують актуальність теми, але не можуть використовуватися як прогноз конкретного зниження аварійності після впровадження СППР.

2. Сформовано математичне забезпечення оцінки поточної поїзної ситуації, що охоплює сім інформативних ознак: швидкість, відстань до сигналу або перешкоди, сигнальну обстановку, стан гальмівної системи, енерговитрати, відхилення від графіка та профіль колії. Запропоновано нормування параметрів і поділ ситуацій на чотири класи: безпечна, підвищеної уваги, небезпечна та така, що потребує невідкладних дій. При цьому класифікацію необхідно здійснювати не лише за інтегральним коефіцієнтом, а й за критичними предметними правилами безпеки.

3. Розроблено комплексний критерій оцінювання альтернативних керуючих дій за чотирма складовими: безпека, енергоефективність, дотримання графіка та технічна надійність. Запропоновано визначати вагові коефіцієнти методом Сааті й враховувати зміну пріоритетів залежно від поїзної ситуації. Важливою властивістю алгоритму є попереднє виключення дій, що порушують обов’язкові технічні та нормативні обмеження безпеки, незалежно від їхньої економічної переваги.

4. Запропоновано функціональну структуру інтелектуальної СППР, яка містить збір і перевірку даних, нормування, розпізнавання ситуації, визначення оцінок небезпеки й напруженості та формування рекомендації машиністу. Для демонстраційних складних ситуацій використано коефіцієнти 0,77 для перешкоди попереду, 0,69 для несприятливих погодних умов і 0,57 для червоного сигналу на спуску. На семи заданих сценаріях показано узгодженість логіки рекомендацій; отримані приклади не замінюють експлуатаційних випробувань і статистичного підтвердження надійності.

5. Виконано попередню техніко-економічну оцінку можливого впровадження СППР на одному локомотиві. Укрупнені витрати становлять 61 850 грн, прогнозний річний ефект – 39 050 грн, з яких 26 000 грн припадає на енергоресурси, 5 500 грн – на ремонт, 4 900 грн – на зменшення очікуваних втрат від людського фактору й 2 650

грн – на дотримання графіка. Простий розрахунковий строк окупності дорівнює 61 850 / 39 050 = 1,58 року, або приблизно 1,6 року. Наведена економічна оцінка має прогнозний характер і потребує підтвердження фактичними тарифами, вимірюваннями та додатковими розрахунками для конкретного типу локомотива.

Список використаних джерел

1. Неведров О. В. Розвиток теоретичних основ інтелектуальних систем керування локомотивом : дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 273 «Залізничний транспорт». Київ : Державний університет інфраструктури та технологій, 2023.

2. Gorobchenko O., Nevedrov O. Development of the structure of an intelligent locomotive DSS and assessment of its effectiveness. Archives of Transport. 2020. Vol. 56, No. 4. P. 47–58. DOI: 10.5604/01.3001.0014.5517.

3. Неведров О. Розвиток теоретичних основ оптимізації та оцінки якості управління тяговим рухомим складом. Транспортні системи і технології. 2020. № 36. С. 24–32. DOI: 10.32703/2617-9040-2020-36-3.

4. Горобченко О., Слободянюк М., Неведров О. Формалізація поїзних ситуацій при керуванні локомотивом на основі методів нечіткої логіки. Транспортні системи і технології. 2019. № 34. С. 65–70. DOI: 10.32703/2617-9040-2019-34-1-5.

5. Горобченко О., Неведров О., Незліна О., Ткаченко В. Розробка методу кластеризації поїзних ситуацій. Транспортні системи і технології. 2021. № 37. С. 187–195. DOI: 10.32703/2617-9040-2021-37-18.

6. Бабанін О. Б., Горобченко О. М. Моделювання дій локомотивних бригад в ергатичній системі «машиніст-поїзд» за допомогою логіки предикатів. Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту. 2014. № 39. С. 100–107.

7. Горбунова К. М., Літвінчук С. Б., Тайхриб К. А. Інженерна психологія : курс лекцій. Миколаїв : МНАУ, 2016. 203 с.

8. Нерубацький В. П. Моделювання алгоритмів централізованого керування рухом поїздів систем автоведення : методичні вказівки до лабораторної роботи. Харків : УкрДУЗТ, 2016. 34 с.

9. Dong H., Ning B., Cai B., Hou Z. Automatic train control system development and simulation for high-speed railways. IEEE Circuits and Systems Magazine. 2010. Vol. 10, No. 2. P. 6–18.

10. Wang X. Research on Locomotive Energy-saving Control System. Proceedings of ICEEECS. 2018. P. 534–537.

11. Saaty T. L. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation. New York : McGraw-Hill, 1980. 287 p.

12. Scheepmaker G. M., Goverde R. M. P., Kroon L. G. Review of energy-efficient train control and timetabling. European Journal of Operational Research. 2017. Vol. 257, no. 2. P. 355–376. DOI: 10.1016/j.ejor.2016.09.044.

13. Dong H., Zhu H., Gao S. An Approach for Energy-Efficient and Punctual Train Operation via Driver Advisory System. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine. 2018. Vol. 10, no. 3. P. 57–67. DOI: 10.1109/MITS.2018.2842030.

14. Kyriakidis M., Majumdar A., Ochieng W. Y. The human performance railway operational index–a novel approach to assess human performance for railway operations. Reliability Engineering & System Safety. 2018. Vol. 170. P. 226–243. DOI: 10.1016/j.ress.2017.10.012.

15. Verstappen V. J. M. P., Pikaar E. N., Zon R. G. D. Assessing the impact of driver advisory systems on train driver workload, attention allocation and safety performance. Applied Ergonomics. 2022. Vol. 100. Art. 103645. DOI: 10.1016/j.apergo.2021.103645.

16. Ogawa T., Yokouchi T., Takeuchi Y., Saito T. Verifying the Energy-saving Effect of a Driver Advisory System using Speed Estimation for Freight Trains. IEEJ Journal of Industry Applications. 2024. Vol. 13, no. 6. P. 754–760. DOI: 10.1541/ieejjia.23002413.

17. Schnücker G. N., Salge J., Onnasch L. Exploring the influence of job characteristics on the adoption of driver advisory systems for energy-efficient driving: Insights from a longitudinal field study in rail operations. Applied Ergonomics. 2025. Vol. 129. Art. 104597. DOI: 10.1016/j.apergo.2025.104597.

Додаток А

АКТ

перевірки кваліфікаційної роботи магістра на наявність ознак академічного плагіату

Відповідно до даних сервісу Strikeplagiarism.com кваліфікаційна робота магістра на тему: «Розроблення інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень машиністом під час керування рухом поїзда» автора: Вдовича Дмитра Сергійовича містить 0,79% запозичень. Ознаки академічного плагіату – відсутні.

Перевірку виконав
Інженер Центру забезпечення
Якості освіти _____ Олександр ОБОЗНИЙ
(підпис)

15.06.2026 р.