


ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ БАКАЛАВРА

на тему *Оптимізація процесу евакуації автомобілів категорії М1 на основі ймовірнісного мережевого планування (PERT) та алгоритмів вибору постів технічного обслуговування*

Шифр: КРБАТТАМ 26.22007.000. ПЗ

Галузь знань	<u>27 – Транспорт</u> Шифр і назва галузі знань
Спеціальність	<u>274 – Автомобільний транспорт</u> Шифр і назва спеціальності
Рівень вищої освіти	<u>Перший бакалаврський</u> Рівень вищої освіти
Освітньо-професійна програма	<u>Автомобільний транспорт</u> Назва освітньої програми

Виконав: здобувач 4 курсу, група АТз-22-1  Олександр СТАШЕВСЬКИЙ
Курс, група виконавця Підпис Ім'я, прізвище

Керівник: д-р.техн.н., професор кафедри ТАМ  Ілона ДРАЧ
Науковий ступінь, посада Підпис Ім'я, прізвище

До захисту допускаю:

зав. кафедри ТАМ, д-р.техн.н., професор



Олександр ДИХА

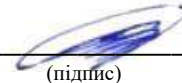
Підпис

Ім'я, прізвище

10 червня 2026 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства
Рівень вищої освіти перший бакалаврський
Галузь знань 27 – Транспорт
Спеціальність 274 – Автомобільний транспорт
Освітньо-професійна програма Автомобільний транспорт

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ТАМ



д-р.техн.н., проф. Олександр ДИХА

Науковий ступінь, ім'я, прізвище

9 лютого 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

Завдання видано здобувачу Сташевському Олександровичу Володимировичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи бакалавра: «Оптимізація процесу евакуації автомобілів категорії М1 на основі ймовірного мережевого планування (PERT) та алгоритмів вибору постів технічного обслуговування»

Керівник роботи професор кафедри ТАМ Драч Ілона Володимирівна
(посада, прізвище, ім'я, по батькові)

2. Затверджено наказом університету від 8 січня 2026 р. № 7

3. Дата видачі завдання здобувачу: 9 лютого 2026 р.

4. Строк подання здобувачем роботи на кафедру: 10 червня 2026 р.

5. Вихідні дані: джерела інформації щодо теми КРБ; матеріали переддипломної практики: теоретичні основи ймовірного мережевого моделювання та оптимізації вибору постів обслуговування.

6. Зміст пояснювальної записки (перелік задач): провести аналіз предметної області, проаналізувати організаційну структуру процесу евакуації та розробити методіку інтеграції PERT-аналізу з алгоритмом вибору СТО, сформулювати мережеву модель евакуації автомобіля категорії М1, виконати ймовірнісні розрахунки та обґрунтувати вибір оптимального поста ТО, оцінити економічну ефективність запропонованої моделі порівняно з детермінованим підходом.

7. Перелік графічного матеріалу: *графічна частина роботи представлена у вигляді презентації на слайдах.*

8. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

9. Календарний план виконання кваліфікаційної роботи бакалавра:

№	Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи бакалавра	Термін виконання	Примітка
1	<i>Вибір напрямку дослідження та узгодження тематики кваліфікаційної роботи бакалавра з керівником</i>	<i>09.02.2026</i>	<i>виконано</i>
2	<i>Ознайомлення з предметною областю, формулювання мети та задач дослідження, визначення об'єкта та предмета дослідження</i>	<i>30.02.2026</i>	<i>виконано</i>
3	<i>Робота над розділом 1 – Теоретичні основи ймовірнісного мережевого моделювання та оптимізації вибору постів обслуговування</i>	<i>30.03.2026</i>	<i>виконано</i>
4	<i>Робота над розділом 2 – Аналіз системи евакуації та методика формування ймовірнісної мережевої моделі</i>	<i>15.04.2026</i>	<i>виконано</i>
5	<i>Робота над розділом 3 – Практична реалізація мережевої моделі евакуації з урахуванням ймовірнісних характеристик</i>	<i>15.05.2026</i>	<i>виконано</i>
6	<i>Оформлення пояснювальної записки згідно вимог</i>	<i>10.06.2026</i>	<i>виконано</i>

Виконавець: здобувач 4 курсу, група АТз-22-1
Курс, група виконавця


Підпис

Олександр СТАШЕВСЬКИЙ
Ім'я, прізвище

Керівник: д-р.техн.н., професор кафедри ТАМ
Науковий ступінь, посада


Підпис

Ілона ДРАЧ
Ім'я, прізвище

РЕФЕРАТ

Тема кваліфікаційної роботи бакалавра: Оптимізація процесу евакуації автомобілів категорії М1 на основі ймовірнісного мережевого планування (PERT) та алгоритмів вибору постів технічного обслуговування

Виконавець кваліфікаційної роботи бакалавра: здобувач 4 курсу групи АТз-22-1
Сташевський Олександр Володимирович

Керівник кваліфікаційної роботи бакалавра: д-р.техн.н., професор кафедри ТАМ
Драч Ілона Володимирівна

Кваліфікаційна робота бакалавра містить:

Пояснювальна записка				Кількість додатків
Сторінок	Рисунків	Таблиць	Джерел інформації	
70	12	9	32	1

Мета дослідження – розробка ймовірнісної мережевої моделі оптимізації процесу евакуації автомобілів категорії М1 з урахуванням варіативності тривалості операцій та обґрунтування алгоритму вибору постів технічного обслуговування.

Завдання дослідження: дослідити теоретичні основи ймовірнісного мережевого моделювання та методи оптимізації вибору постів обслуговування; проаналізувати організаційну структуру процесу евакуації та розробити методику інтеграції PERT-аналізу з алгоритмом вибору СТО; сформувати мережеву модель евакуації автомобіля категорії М1, виконати ймовірнісні розрахунки та обґрунтувати вибір оптимального поста ТО; оцінити економічну ефективність запропонованої моделі порівняно з детермінованим підходом.





Об'єкт дослідження – процес евакуації автомобілів категорії М1 з місць дорожньо-транспортних пригод та технічних відмов.

Предмет дослідження – ймовірнісні характеристики тривалості операцій евакуації та критерії оптимального вибору постів технічного обслуговування.

Ключові слова: процес евакуації автомобілів категорії М1, процес алгоритму вибору постів технічного обслуговування, мережеве моделювання, оптимальний вибір.

ЗМІСТ

Вступ.....	6
1 Теоретичні основи ймовірнісного мережевого моделювання та оптимізації вибору постів обслуговування	9
1.1 Математичні основи мережевого моделювання транспортних процесів	9
1.2 PERT-метод у логістиці автотранспорту	25
1.3 Методичні підходи до вибору постів технічного обслуговування	28
1.4 Динамічне програмування в задачах маршрутизації евакуаційних засобів	30
2 Аналіз системи евакуації та методика формування ймовірнісної мережевої моделі	32
2.1 Організаційна структура процесу евакуації автомобілів категорії М1.....	32
2.2 Аналіз факторів невизначеності тривалості операцій	35
2.3 Розробка алгоритму інтеграції PERT-аналізу з вибором поста ТО	37
2.4 Методика збору та обробки статистичних даних	40

					КРБАТТАМ 26.22007.000 ПЗ			
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат	Оптимізація процесу евакуації автомобілів категорії М1 на основі ймовірнісного мережевого планування (PERT) та алгоритмів вибору постів технічного обслуговування	Лім.	Арк.	Акрушіє
Розроб.		Сташевський				4	73	
Перевір.		Драч						
Реценз.								
Н. Контр.		Маковкін						
Затверд.		Диха			ХНУ група АТз-22-1			

3 Практична реалізація мережевої моделі евакуації з урахуванням ймовірнісних характеристик	42
3.1 Формування переліку робіт та побудова мережевого графіка	42
3.2 Застосування PERT-методу для розрахунку часових параметрів	47
3.3 Розробка алгоритму та моделі вибору оптимального поста ТО	51
3.4 Оптимізація мережевої моделі	56
3.5 Економічна оцінка ефективності моделі.....	59
Висновки.....	63
Перелік посилань	66
Додаток.....	70

					<i>КРБАТТАМ 26 22007. 000 ПЗ</i>	Арк.
						5
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ВСТУП

Актуальність теми. Зростання інтенсивності дорожнього руху в Україні супроводжується збільшенням кількості дорожньо-транспортних пригод та технічних відмов автомобілів, що потребують оперативної евакуації. За даними Департаменту патрульної поліції України, у 2024 році на території країни зареєстровано 25 781 ДТП із потерпілими, унаслідок яких загинуло 3 202 особи та 32 023 особи отримали травми [1]. Це на 5–9% більше порівняно з 2023 роком, коли було зафіксовано 23 642 аварії [1]. У 2025 році тенденція збереглася: за рік сталося 25 934 ДТП із постраждалими, з них загинули 3 249 осіб та травмувалися 31 898 осіб [2].

Однією з основних причин ДТП з тяжкими наслідками є перевищення безпечної швидкості руху (39,4% випадків), що часто призводить до блокування транспортних магістралей через несправність транспортних засобів [1, 4]. Тривале перебування пошкоджених автомобілів на місці події спричиняє додаткові економічні втрати від заторів, збільшує ризик вторинних ДТП та ускладнює роботу аварійно-рятувальних служб. За даними аналітичної платформи Опендатабот, 80% ДТП з постраждалими трапляється у населених пунктах, де наслідки блокування руху є найкритичнішими [3].

Існуючі підходи до організації евакуації базуються переважно на детермінованих моделях, що не враховують стохастичну природу транспортних процесів. Час подачі евакуатора, тривалість завантаження та транспортування суттєво варіюються залежно від дорожніх умов, завантаженості мережі та доступності постів технічного обслуговування. Це обумовлює необхідність застосування ймовірнісних методів планування, зокрема PERT-методу, який дозволяє оцінювати ризики затримок та приймати обґрунтовані рішення щодо вибору маршрутів і постів обслуговування.

Питання оптимізації логістичних процесів у сфері автомобільного транспорту досліджувалися в роботах В. Д. Дядюнчика [5], М. М. Войнова, О.

					<i>КРБАТТАМ 26 22007. 000 ПЗ</i>	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

О. Пшінкіної [6] та інших вчених. Проте специфіка застосування мережевого планування до процесів евакуації з урахуванням ймовірнісних характеристик операцій та інтеграції з алгоритмами вибору постів ТО залишається недостатньо розробленою. Це визначає наукову та практичну доцільність дослідження.

Ступінь розробленості питання. Теоретичні засади мережевого моделювання закладено в працях Дж. Келлі [7] та Д. Уолкера (метод критичного шляху), а також у розробках В. М. Глушкова щодо застосування графів у плануванні. PERT-метод, запропонований для управління програмами ВМС США, набув поширення в інженерному та транспортному менеджменті. В українській науковій літературі методи мережевого планування розглянуто у контексті будівництва та виробництва, тоді як їх адаптація до оперативного управління евакуаційними процесами потребує подальшого вивчення.

Проблеми організації аварійно-рятувального обслуговування та евакуації транспортних засобів висвітлено в нормативних документах: ДСТУ 3950 «Організація дорожнього руху» [8], ПДР України, постановах Кабінету Міністрів щодо порядку евакуації [9, 10]. Водночас відсутні методики, що інтегрують ймовірнісне прогнозування тривалості операцій з процедурою вибору оптимального поста ТО за багатьма критеріями.

Мета дослідження – розробка ймовірнісної мережевої моделі оптимізації процесу евакуації автомобілів категорії М1 з урахуванням варіативності тривалості операцій та обґрунтування алгоритму вибору постів технічного обслуговування.

Для досягнення мети поставлено такі завдання:

- 1) Дослідити теоретичні основи ймовірнісного мережевого моделювання та методи оптимізації вибору постів обслуговування.
- 2) Проаналізувати організаційну структуру процесу евакуації та розробити методику інтеграції PERT-аналізу з алгоритмом вибору СТО.

					<i>КРБАТТАМ 26 22007. 000 ПЗ</i>	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3) Сформувати мережеву модель евакуації автомобіля категорії М1, виконати ймовірнісні розрахунки та обґрунтувати вибір оптимального поста ТО.

4) Оцінити економічну ефективність запропонованої моделі порівняно з детермінованим підходом.

Об'єкт дослідження – процес евакуації автомобілів категорії М1 з місць дорожньо-транспортних пригод та технічних відмов.

Предмет дослідження – ймовірнісні характеристики тривалості операцій евакуації та критерії оптимального вибору постів технічного обслуговування.

Методи дослідження: системний аналіз, метод критичного шляху (СРМ), PERT-метод ймовірнісного оцінювання, методи прийняття багатокритеріальних рішень (аналіз ієрархій), економічне моделювання, статистичні методи обробки даних.

Практичне значення одержаних результатів полягає в можливості застосування розробленої моделі диспетчерськими службами евакуації для підвищення точності прогнозування часу виконання замовлень та зниження операційних витрат. Запропонований алгоритм вибору поста ТО дозволяє скоротити загальний час евакуації на 15–20% та зменшити транспортні витрати. Результати роботи можуть бути використані при розробці автоматизованих систем управління евакуаційними процесами.

					<i>КРБАТТАМ 26 22007. 000 ПЗ</i>	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЙМОВІРНІСНОГО МЕРЕЖЕВОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ ВИБОРУ ПОСТІВ ОБСЛУГОВУВАННЯ

1.1 Математичні основи мережевого моделювання транспортних процесів

1.1.1 Основні елементи мережевих графіків

Основним елементом системи мережевого планування і управління (СМПУ) є мережева модель, яка відображає з будь-яким ступенем деталізації план виконання певного комплексу взаємопов'язаних робіт, що задається в специфічній формі мережі, наочне зображення якої є мережевим графіком [11].

Мережевим графіком називається наочне зображення послідовності та взаємного логічного зв'язку всіх робіт, виконуваних у процесі розробки, і одержуваних при цьому результатів, аж до досягнення кінцевої мети.

Розрізняють системи МПУ з детермінованими та ймовірнісними моделями. Усім моделям властиві загальні принципи:

- для кожного об'єкта складаються мережеві графіки - умовні економіко-математичні моделі, що відображають весь хід виконання робіт від початку до завершення;

- терміни проведення робіт за окремими етапами визначаються виходячи з кінцевого терміну;

- при складанні мережевого графіка використовуються такі вихідні дані: завдання на проектування, проектно-конструкторська документація, проекти виробництва робіт, діючі технологічні процеси, графіки поставок ресурсів, обладнання, виробнича документація [11].

При побудові мережевих графіків використовують два логічних поняття (елементи) – робота і подія. У мережевому плануванні термін «робота» визначає сукупність прийомів і дій, необхідних для виконання конкретного завдання або досягнення певної мети.

					КРБАТТАМ 26 22007. 000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Термін «подія» означає певний результат виконання роботи (або робіт).

На мережевому графіку події зображують кружечками, а роботи - орієнтованими стрілками.

Частковий приклад мережевого графіка наведено на рис. 1.1.

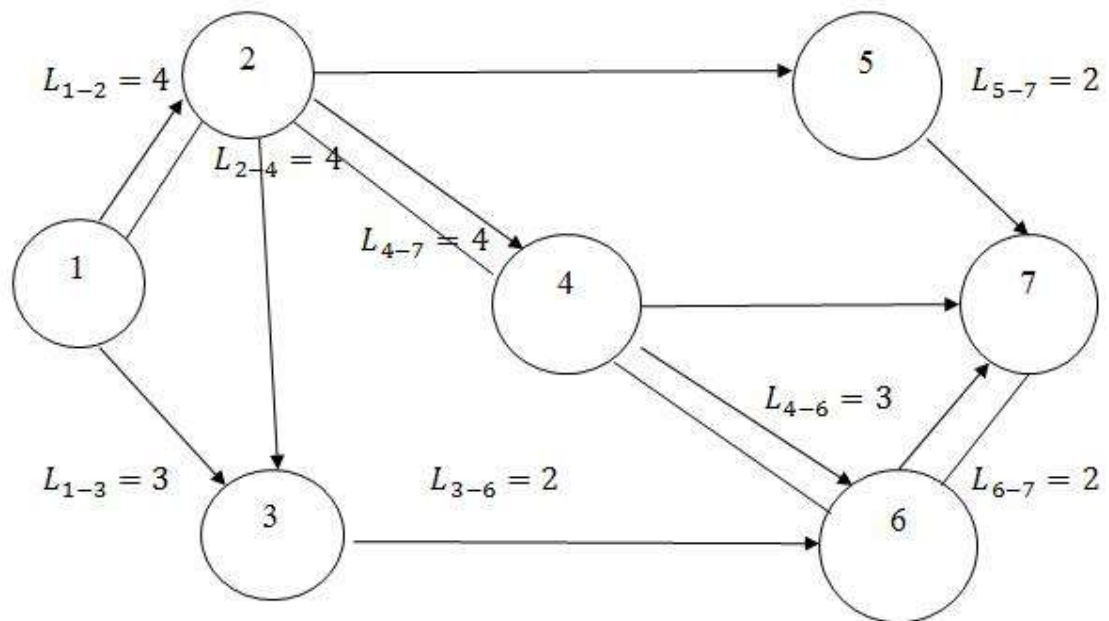


Рис. 1.1 – Частковий приклад мережевого графіка

Кожній події присвоюється певний номер (зазвичай цифрою), тобто 1, 2, 3 і т.д. (пронумеровані кружечки – це події). Кожна робота, яка зображена на мережевому графіку стрілкою, об'єднує тільки дві події, тому прийнято роботу на мережевому графіку позначати номерами попередньої (i- ої) і наступної (j-ої) подій, тобто 1 - 2, 2 - 5, 5 - 7 і т.д. – це роботи [12].

Тривалість роботи проставляється над стрілками, тобто $L_{1-2}=4$, $L_{2-5}=5$ і т.д. - тривалість робіт [12].

Мережевий графік є послідовністю робіт і подій, що відображають їх технологічний взаємозв'язок.

На мережевому графіку виділяють дві події: початкову (1) (вихідну) і кінцеву (7) (завершальну). Всі інші події називаються проміжними.

Початкова подія відображає початок виконання всього комплексу робіт і не має попереднього події. Завершальна подія відображає кінцеву мету всього комплексу робіт і не має подальшої події.

Термін «робота» включає три поняття [11]:

1) «Фактична робота» - тобто трудовий процес, що призводить до досягнення певних результатів і потребує витрат часу і ресурсів.

2) «Очікування» - технологічна перерва в роботі, не вимагає витрат праці, але вимагає витрат часу (висихання фарби, затверднення цементу і т.д.).

3) «Залежність» (фіктивна робота) - логічний зв'язок між подіями, що не вимагає витрат часу і ресурсів, але показує, що можливість початку однієї роботи залежить від результатів іншої.

На мережевих графіках фактичну роботу і очікування зображують суцільними стрілками, а залежності - пунктирними.

Мережевий графік будують в масштабі або без масштабу. В останньому випадку обов'язково над стрілками проставляють тривалість роботи в одиницях часу. Будь-яка послідовність робіт від однієї події до іншої (будь-якої) називається шляхом і позначається L (2 - 5 - 7), тобто кожен шлях позначають буквою L і номерами подій через які він проходить [12].

Довжина будь-якого шляху визначається сумарною тривалістю складових його робіт.

Повний шлях - це шлях від вихідної до завершальної події.

У мережевому графіку, як правило, є кілька повних шляхів з різною тривалістю.

Так, для нашого прикладу маємо п'ять повних шляхів, розрахунок довжин яких подано на рис. 1.2.

					<i>КРБАТТАМ 26 22007. 000 ПЗ</i>	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$L_1(1 - 2 - 5 - 7) = 4 + 5 + 1 = 10;$$

$$L_2(1 - 2 - 4 - 7) = 4 + 3 + 3 = 10;$$

$$L_3(1 - 2 - 4 - 6 - 7) = 4 + 3 + 3 + 2 = 12;$$

$$L_4(1 - 2 - 3 - 6 - 7) = 4 + 1 + 2 + 2 = 9;$$

$$L_5(1 - 3 - 6 - 7) = 4 + 2 + 2 = 8.$$

Рис. 1.2 – Розрахунок довжини повних шляхів для мережі рис. 1.1

Повний шлях, що має максимальну тривалість, називають критичним шляхом.

Роботи, що лежать на критичному шляху називаються критичними роботами.

Для нашого прикладу: $L_{кр}(1 - 2 - 4 - 6 - 7) = 12$ одиниць часу. Для більшої наочності його виділяють подвійними або жирними лініями. Критичний шлях ($L_{кр}$) визначає загальну тривалість виконання всього комплексу робіт [12].

Повні шляхи, тривалість яких менша за $L_{кр}$, називаються некритичними. У них є резерв часу, в межах якого час виконання робіт може бути збільшено, що не призводить до збільшення загальної тривалості настання завершального події.

1.1.2 Правила побудови мережевих графіків

При побудові мережевих графіків необхідно враховувати наступні правила [11]:

1. Між двома подіями на графіку може знаходитися тільки одна робота (рис. 1.3).

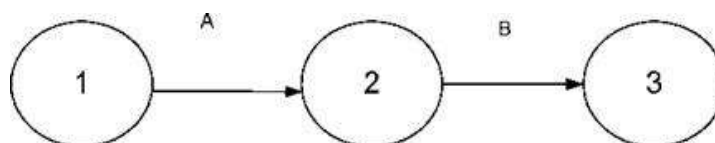


Рис. 1.3 – Між двома подіями може знаходитися тільки одна робота

2. Якщо одна подія служить початком декількох робіт, які за-закінчуються також в одній події, то необхідно ввести фіктивні роботи і додаткові події зі своїми номерами (рис. 1.4).

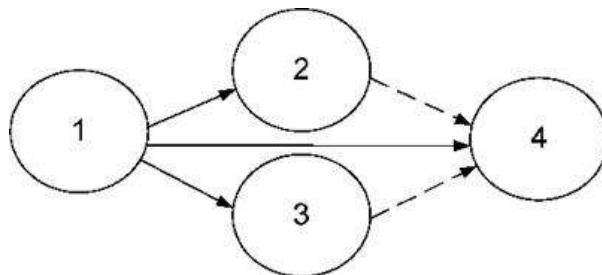


Рис. 1.4 – Уведення фіктивних робіт і додаткових подій

3. Всі події, крім завершальної, повинні мати наступну роботу. Наявність «глухих кутів» у мережі вказує на помилку. Так само в мережі не повинно бути подій, в які не входять жодна робота (виняток становить вихідна подія).

4. У мережевому графіку не повинно бути замкнутих контурів, тобто шляхів, які починаються і закінчуються в одній і тій самій події (рис. 1.5).

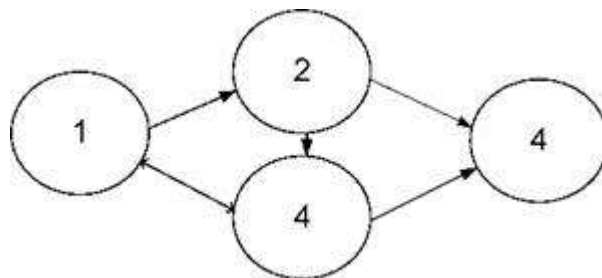


Рис. 1.5 – Схема без замкнутих контурів

5. При побудові мережевих графіків слід уникати взаємного перетину стрілок (рис. 1.6):

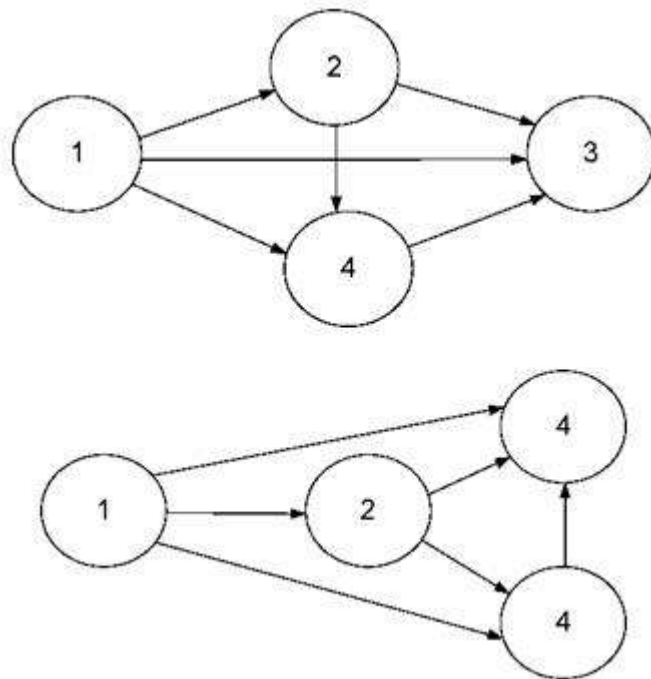


Рис. 1.6 – Схема уникнення взаємного перетину стрілок

1.1.3 Процес побудови мережеских графіків

Процес мережевого планування і управління (МПУ) включає в себе чотири взаємопов'язаних етапи [11]:

1. Опис комплексу робіт, визначення їх тривалості та послідовності.
2. Побудова мережевого графіка.
3. Розрахунок і аналіз параметрів мережного графіка.
4. Оптимізація мережевого графіка, контроль і оперативне управління ходом виконання комплексу робіт.

При побудові мережевого графіка використані такі основні правила [11]:

1. Події позначають кружечками, всередині ставиться номер події (виділяються початкова, кінцева і проміжні події).
2. Події з'єднуються орієнтованою стрілкою, яка спрямована від попередньої події до подальшої (стрілка показує на мережевому графіку наступну роботу).
3. Будь-які дві події можуть бути з'єднані не більше ніж однією стрілкою.

4. У початкову подію не входить жодна стрілка.
5. З кінцевої події не виходить жодна стрілка.
6. Події мережевого графіка нумеруються так, щоб для кожної роботи номер початкової події був менший за номер кінцевої.
7. Кожну роботу кодуємо двома цифрами. Перша цифра означає початок роботи та відповідає номеру попередньої події.
8. Тривалість роботи проставляється над стрілками.
9. Частина робіт виконується послідовно (6 - 7), (7 - 8), (8 - 9) і т.д. Це означає, що початок наступної роботи залежить від закінчення попередньої [12].
10. Роботи (10 - 11), (10 - 13) можуть починатися в один і той самий момент часу з настанням події 10. Ці роботи не залежать у часі одна від одної і можуть виконуватися паралельно.
11. Фіктивні роботи (1 - 3), (3 - 6) і т.д. встановлюють логічний взаємозв'язок і тривалість їх дорівнює 0 [12].
12. Весь комплекс робіт завершується, як тільки закінчиться робота (14 - 15) і здійсниться подія 15 [12].

Складання мережного графіка цим вважається закінченим.

При розробці мережеских графіків необхідно враховувати наступні умови [11]:

1. Жодна подія не може відбутися доти, поки не будуть завершені всі роботи, що входять в неї.
2. Жодна робота, що виходить з даної події, не може початися доти, поки задана подія не відбудеться.

На мережевому графіку видається критичний шлях для подальшої його мінімізації. Для чого визначають час початку і закінчення кожної операції, час настання кожної події, а також встановлюють можливість зміни цих параметрів з метою оптимізації мережевої моделі.

1.1.4 Упорядкування мережевого графіка

					<i>КРБАТТАМ 26 22007. 000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						15
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

Припустимо, що при складанні деякого проекту виділено 12 подій: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 і 24 поєднуючі їх роботи: (0, 1), (0, 2), (0, 3), (1, 2), (1, 4), (1, 5), (2, 3), (2, 5), (2, 7), (3, 6), (3, 7), (3, 10), (4, 8), (5, 8), (5, 7), (6, 10), (7, 6), (7, 8), (7, 9), (7, 10), (8, 9), (9, 11), (10, 9), (10, 11) [12].

Складаємо вихідний мережевий графік 1 (рис. 1.7).

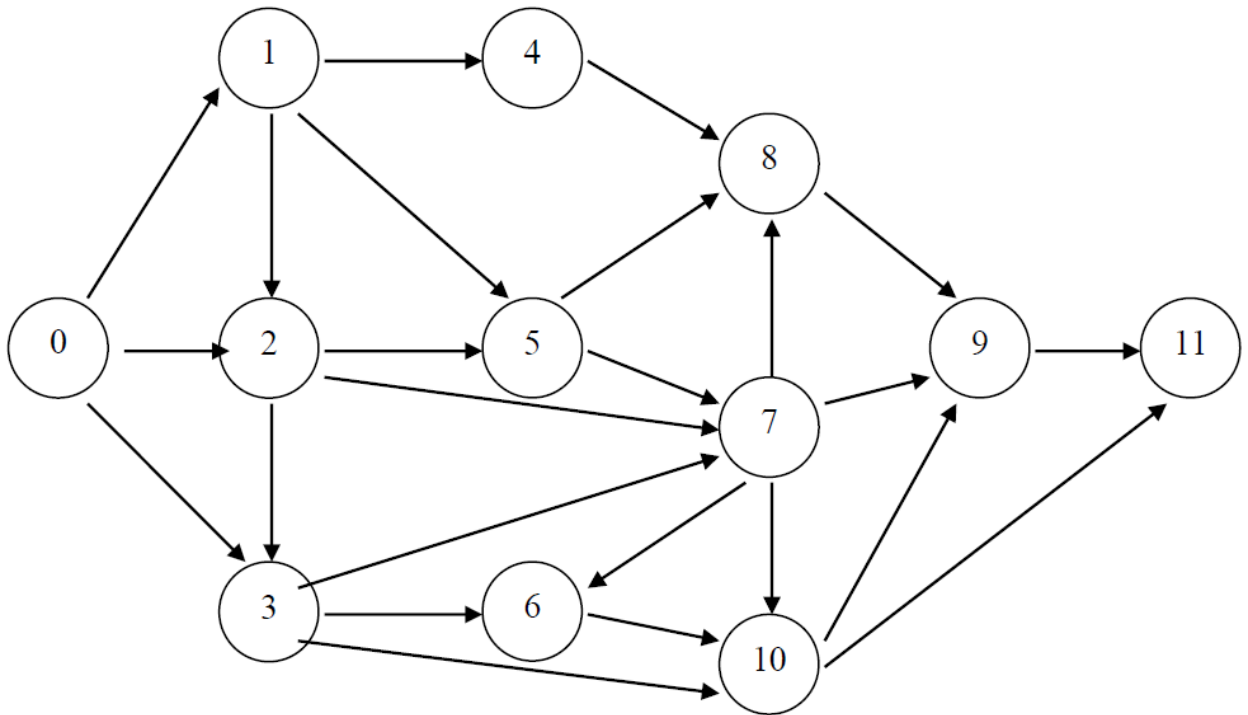


Рис. 1.7 - Мережевий графік 1: неупорядкований мережевий графік

Упорядкування мережевого графіка полягає в такому розташуванні подій і робіт, при якому для будь-якої роботи передуюча їй подія розташована лівіше й має менший номер у порівнянні із завершальною цю роботу подією. Інакше кажучи, в упорядкованому мережевому графіку всі роботи-стрілки спрямовані з ліва на право: від подій з меншими номерами до подій з більшими номерами [11].

Розіб'ємо вихідний мережевий графік на кілька вертикальних шарів (обводимо їх пунктирними лініями й позначаємо римськими цифрами). Помістивши у I шарі початкову подію 0, подумки викреслимо із графіка цю подію й усі вихідні

з неї роботи-стрілки. Тоді без вхідних стрілок залишиться подія 1, що утворює II шар. Викресливши подумки подію 1 і всі вихідні з неї роботи, побачимо, що без вхідних стрілок залишаються події 4 і 2, які утворюють III шар. Продовжуючи цей процес, одержимо мережевий графік 2 (рис. 1.8) [12].

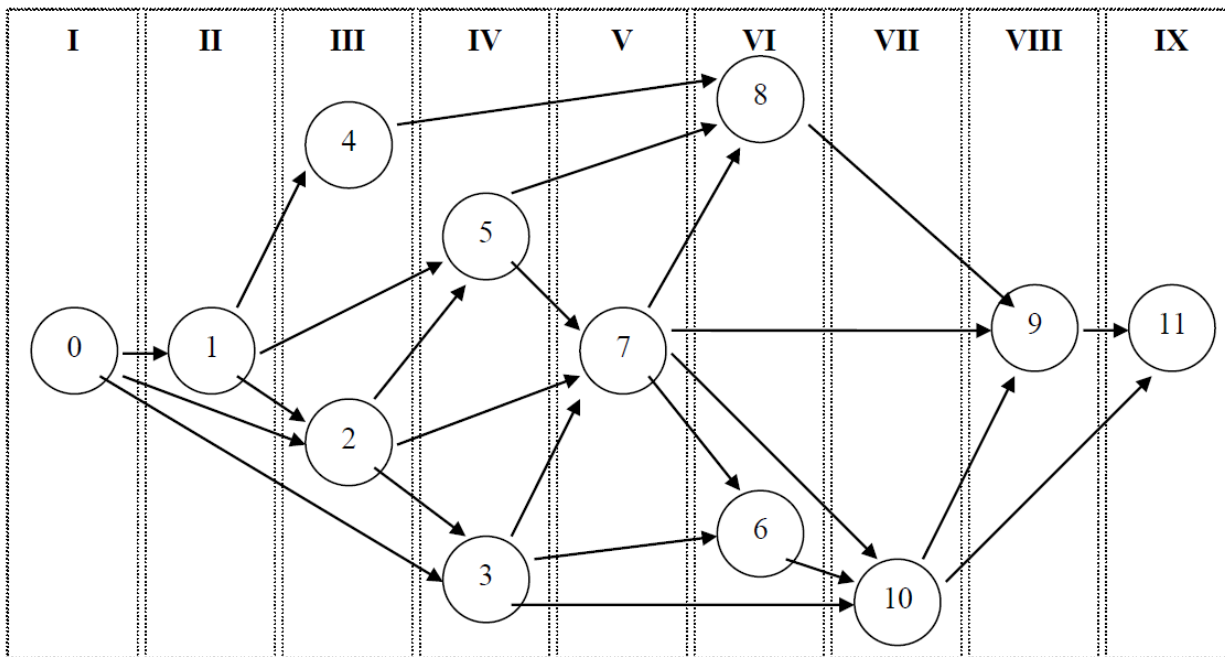


Рис. 1.8 - Мережевий графік 2: упорядкування мережевого графіка за допомогою шарів

Тепер бачимо, що первинна нумерація подій не зовсім правильна.

Змінимо нумерацію подій відповідно до їх розташування на графіку й одержимо впорядкований мережевий графік 3 (рис. 1.9). Слід відмітити, що нумерація подій, розташованих в одному вертикальному шарі, принципового значення не має, тому нумерація того самого мережевого графіка може бути неоднозначною.

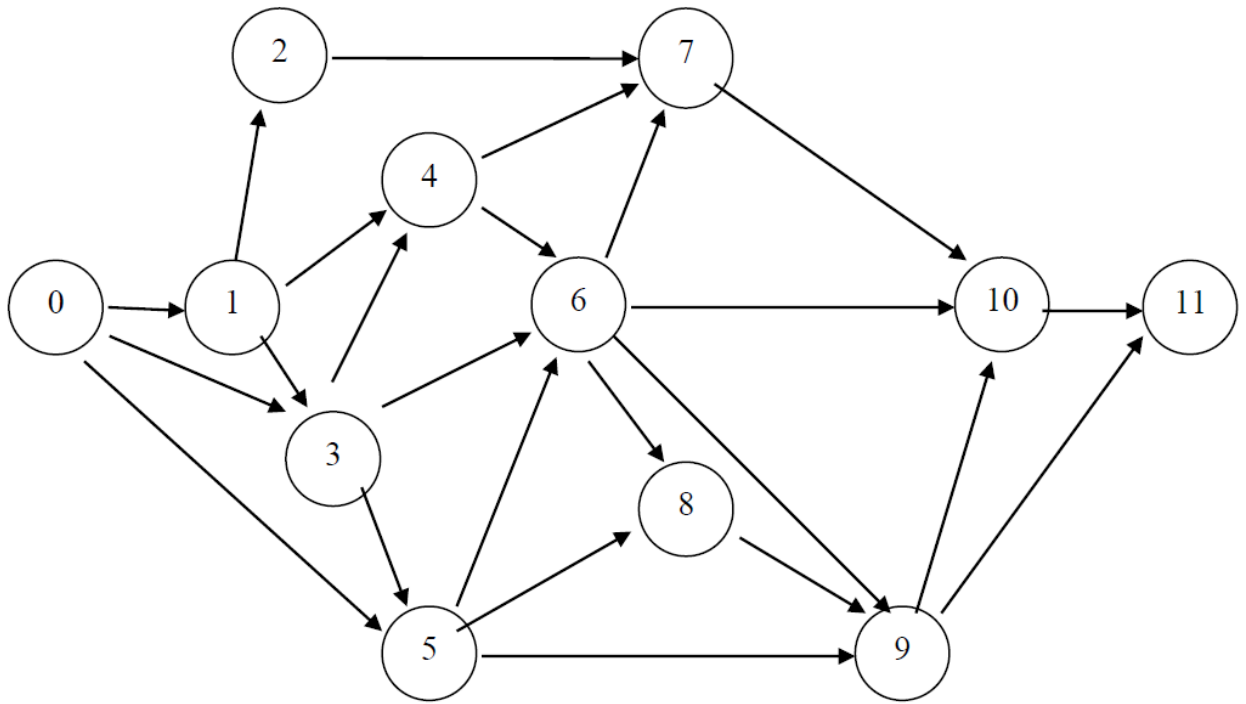


Рис. 1.9 - Мережевий графік 3: упорядкований мережевий графік

1.1.5 Розрахунок параметрів мережевої моделі

Розрахунок параметрів мережевої моделі проводиться для повних шляхів, подій і робіт [11].

При розрахунках визначають наступні параметри:

А) для повних шляхів мережного графіка:

- $t(L_i)$ - тривалість будь-якого повного шляху;
- $t(L_{кр})$ - тривалість критичного шляху;
- $R(L_i)$ - повний резерв часу шляху.

Б) для подій:

- $T_i^{(p)}$, $T_i^{(n)}$ - ранній і пізній терміни здійснення події;
- R_i - резерв часу події.

В) для робіт:

- $t_{ij}^{(pp)}$, $t_{ij}^{(pz)}$ - ранній термін початку та закінчення робіт;
- $t_{ij}^{(np)}$, $t_{ij}^{(nz)}$ - пізній термін початку та закінчення робіт;

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

- $r_{ij}^{(n)}$, $r_{ij}^{(b)}$ - повний і вільний резерв часу роботи.

При розрахунку цих параметрів використовують графічний і табличний методи.

1.1.6 Розрахунок тривалості повного шляху

1) Розрахунок тривалості будь-якого повного шляху здійснюється за формулою [11]

$$t(L_i) = \sum^{L_i} t_{ij}. \quad (1.1)$$

2) $t(L_h) = \max \sum^{L_i} t_{ij}$ – довжина критичного шляху (у нашому випадку це шлях 1).

3) Повний резерв часу шляху [11]

$$R(L_i) = t(L_{кр}) - t(L_i). \quad (1.2)$$

Збільшення сумарної тривалості всіх робіт, що лежать на шляху L_i , на величину $R(L_i)$ не збільшує час настання завершальної операції.

1.1.7 Розрахунок часу настання подій

При графічному методі запис розрахункових параметрів здійснюється безпосередньо на мережевому графіку.

Для цього кожен вузол мережевого графіка ділимо на чотири частини (сектори), в цих секторах записуються такі дані [11]:

- верхній - призначений для запису номера події - i ;
- правий - для запису раннього терміну звернення події - T^p_i ;
- лівий – для запису пізнього терміну здійснення події - T^l_i ;
- нижній – для запису резерву часу події - R_i .

					<i>КРБАТТАМ 26 22007. 000 ПЗ</i>	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. Найбільш ранній термін надходження і-ої події в мережі T_i^p , де $i = 1, 2, \dots, n$; i - одна з подій мережі.

T_i^p - мінімально необхідний час між настанням початкової та даної події.

Для початкової події $T_i^p = 0$ - найбільш ранній термін дорівнює 0. При розрахунку T_i^p послідовно переходять від початкової події до події більш віддаленої від неї. Тоді для будь-якої іншої події j цей показник визначається за формулою [11]:

$$T_j^p = \max[T_i^p + t_{ij}], \quad (1.3)$$

де T_i^p - найбільш ранній термін появи події i , що передує події j ;

t_{ij} - тривалість роботи ($i - j$).

Для кінцевої події мережного графіка найбільш ранній термін надходження її дорівнює тривалості критичного шляху і називається критичним часом мережевого графіка.

2. Найбільш пізній термін настання події в мережі T_i^n .

Цей показник розраховуємо від кінця мережевого графіка до початку, тобто в напрямку, зворотному щодо визначення найбільш раннього терміну настання подій. Для кінцевої події (k) робимо припущення, що найбільш ранній термін його настання дорівнює найбільш пізнього терміну, тобто [11]:

$$T_k^p = T_k^n. \quad (1.4)$$

Для критичного шляху також вірна рівність:

$$T_{кр}^p = T_{кр}^n. \quad (1.5)$$

Тоді для початкової – $T_1^n = 0$.

Для інших подій мережевого графіка T_i^n визначається за формулою [11]:

					<i>КРБАТТАМ 26 22007. 000 ПЗ</i>	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$T_i^n = \min[T_j^n - t_{ij}] , \quad (1.6)$$

де T_j^n - найбільш пізній термін настання подальшої події j;
 t_{ij} - тривалість роботи (i-j).

Цей показник визначає найбільш допустимий час настання події, який не потребує збільшення часу на здійснення всього комплексу робіт.

Допустимий термін настання події – T_i^d [11]:

$$T_j^p \leq T_j^d \leq T_j^n . \quad (1.7)$$

Ця нерівність показує, що допустимий термін настання події повинен знаходитися в діапазоні зміни від найбільш раннього терміну настання до найбільш пізнього терміну настання цієї події.

Для критичних подій маємо [11]:

$$T_{крс}^p = T_{крс}^d = T_{крс}^n . \quad (1.8)$$

3. Резерв часу подій R_i . Розрахувавши ранні та пізні терміни настання кожної події, можна визначити резерви часу подій за формулою [11]:

$$R_i = T_i^n - T_i^p .$$

Резерви часу всіх критичних подій дорівнюють 0:

$$R_{ікр} = 0.$$

1.1.8 Розрахунок часу виконання робіт

Розрахунок часу виконання робіт проводять після того, як визначені T_i^p і T_i^n для всіх подій [11]:

					<i>КРБАТТАМ 26 22007. 000 ПЗ</i>	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

а) ранній термін початку робіт ($t_{ij}^{p.n.}$) дорівнює ранньому терміну настання події, з якої впливає дана робота (рис. 1.10), тобто:

$$t_{ij}^{p.n.} = T_i^p \quad (1.9)$$

Якщо цю оцінку виразити через характеристики робіт, то можемо записати [11]:

$$t_{jk}^{p.n.} = t_{ij}^{p.n.} + t_{ij} \quad (1.10)$$

де t_{ij} - попередня робота;

t_{jk} - подальша робота.

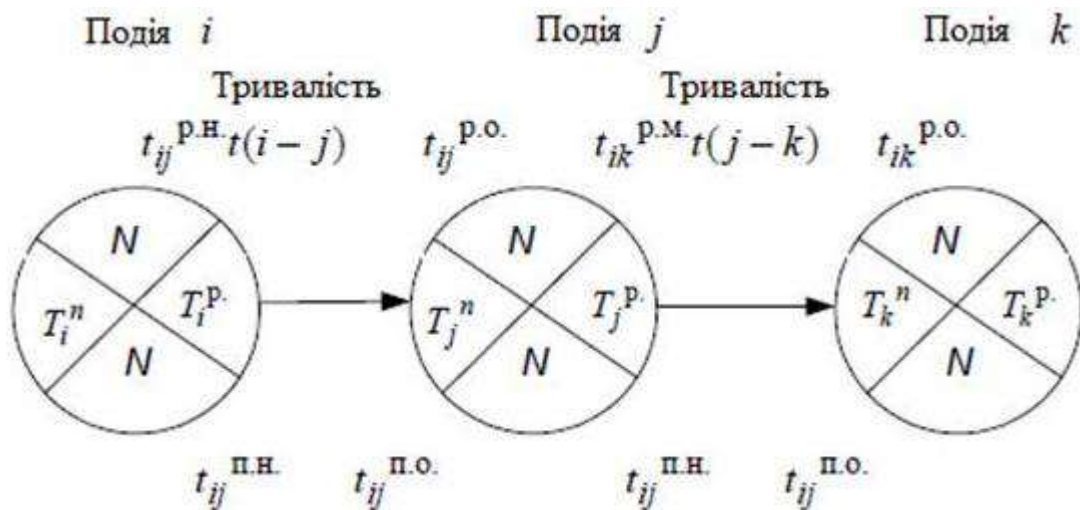


Рис. 1.10 – Фрагмент мережевого графіка [11]

б) ранній термін закінчення роботи визначається шляхом додавання до раннього терміну початку роботи тривалості самої роботи [11]:

$$t_{ij}^{p.o.} = T_i^p + t_{ij} \quad \text{або} \quad t_{ij}^{p.o.} = t_{ij}^{p.n.} + t_{ij} \quad (1.11)$$

в) пізній термін закінчення роботи дорівнює пізньому терміну настання подальшої події [11]:

$$t_{ij}^{п.о} = T_i^n \quad \text{або} \quad t_{ij}^{п.о} = t_{jk}^{п.о} - t_{ij}. \quad (1.12)$$

г) пізній термін початку роботи знаходимо шляхом віднімання тривалості роботи від пізнього терміну настання подальшої події, тобто [11]:

$$t_{ij}^{п.н} = T_j^n - t_{ij} \quad \text{або} \quad t_{ij}^{п.н} = t_{ij}^{п.о} - t_{ij}. \quad (1.13)$$

д) повний резерв часу роботи показує час, на який можна перенести початок даної роботи (або збільшити її тривалість), не змінюючи при цьому довжини критичного шляху, і визначається за формулами [11]:

$$r_{ij}^n = T_{ij}^{п.н} - t_{ij}^{п.н} \quad \text{або} \quad r_{ij}^n = T_j^n - T_i^p - t_{ij}. \quad (1.14)$$

Для всіх робіт, що лежать на критичному шляху:

$$r_{крит\ ij}^п = 0. \quad (1.15)$$

е) вільний резерв часу роботи - частина повного резерву часу роботи, яка зберігається у неї за умови, що початкова подія роботи виконається в найпізніший термін, а кінцева - в найранній термін, і визначається за формулами [11]:

$$r_{ij}^{св} = r_{ij}^n - R_i - R_j \quad \text{або} \quad r_{ij}^{св} = T_i^p - T_i^n - t_{ij}. \quad (1.16)$$

					<i>КРБАТТАМ 26 22007. 000 ПЗ</i>	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.1.9 Аналіз та оптимізація мережевих моделей

Після побудови мережевого графіка та визначення його параметрів необхідно оцінити отримані результати. Якщо тривалість критичного шляху перевищує заданий термін, проводиться оптимізація за часом, яка передбачає його скорочення шляхом паралелізації робіт і залучення додаткових ресурсів. Якщо ж графік відповідає встановленим обмеженням, він вважається прийнятним.

Після часової оптимізації виконується оптимізація за ресурсами, оскільки на практиці їх доступність обмежена. Загалом оптимізація спрямована на узгодження графіка з реальними можливостями виконання проєкту.

Розрізняють часткову оптимізацію (мінімізація часу або вартості при фіксованих умовах) і комплексну, яка враховує співвідношення між тривалістю та витратами.

Аналіз графіка починається з перевірки його структури та правильності побудови. Далі роботи групують за резервами часу, однак для точнішої оцінки використовується коефіцієнт напруженості, який показує складність виконання робіт. За цим показником роботи поділяють на критичні, підкритичні та резервні.

Оптимізація передбачає скорочення тривалості критичних робіт за рахунок перерозподілу ресурсів, зміни структури графіка, паралельного виконання завдань і вдосконалення технологій. При цьому критичний шлях може змінюватися, тому процес повторюється до досягнення прийнятного результату.

Важливим є також урахування вартості: прискорення виконання робіт зазвичай збільшує витрати, тому необхідно знаходити оптимальний баланс між часом і ресурсами. Для цього використовують метод «час–вартість» і моделювання різних варіантів графіка.

					<i>КРБАТТАМ 26 22007. 000 ПЗ</i>	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На практиці спочатку оптимізують графік за часом, а потім – за ресурсами. У разі лінійної залежності між тривалістю і вартістю задача може бути розв’язана методами лінійного програмування.

1.2 PERT-метод (Program Evaluation and Review Technique) у логістиці автотранспорту

PERT-метод (метод оцінки та перегляду програм) був розроблений у 1958 році в рамках проекту «Поларіс» (флот балістичних ракет США) для управління складними програмами з високим рівнем невизначеності та інноваційністю виконуваних робіт. На відміну від детермінованого методу критичного шляху (CPM), який оперує жорстко фіксованими тривалостями операцій, PERT базується на ймовірнісному підході до оцінювання часу виконання робіт, що робить його особливо придатним для логістичних систем автотранспорту, зокрема процесів евакуації автомобілів, де тривалість окремих етапів суттєво варіюється залежно від зовнішніх факторів [14].

Сутність PERT-методу полягає у застосуванні триочінкової оцінки тривалості кожної роботи (операції) у мережевому графіку: оптимістичної (t_o), що відповідає мінімально можливому часу виконання за сприятливих умов без урахування форс-мажорів; найвірогіднішої (t_m), яка відображає найбільш імовірний час виконання за нормальних умов з урахуванням типових перешкод; та песимістичної (t_p), яка визначає максимально можливий час за несприятливих обставин (затори, погані погодні умови, технічні ускладнення), виключаючи катастрофічні події. На основі цих оцінок розраховується очікуваний час виконання роботи за формулою $t_{exp}=(t_o+4t_m+t_p)/6$, яка базується на бета-розподілі ймовірностей та надає більшу вагу найвірогідній оцінці. Дисперсія (варіація) тривалості роботи визначається як $\sigma^2 = \left(\frac{t_p-t_o}{6}\right)^2$, а середньоквадратичне

					<i>КРБАТТАМ 26 22007. 000 ПЗ</i>	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відхилення – $\sigma = \frac{t_p - t_o}{6}$, що дозволяє кількісно оцінити ступінь невизначеності та ризику затримки конкретної операції [15].

У контексті логістики автомобільного транспорту та, зокрема, організації евакуації транспортних засобів категорії М1, застосування PERT-методу набуває особливого значення через стохастичну природу транспортних процесів. Тривалість подачі евакуатора на місце ДТП або поломки залежить від багатьох випадкових факторів: завантаженості дорожньої мережі у конкретний час доби (пікові години vs нічний час), метеорологічних умов (дощ, сніг, ожеледь суттєво знижують середню швидкість руху), відстані до найближчого вільного евакуатора та оперативності обробки виклику диспетчером. Аналогічно, час завантаження автомобіля на евакуатор варіюється залежно від типу пошкоджень (порушення геометрії кузова вимагає використання лебідки або крана, що збільшує тривалість операції), доступності авто (перекидання, з'їзд у кювет), кваліфікації екіпажу та наявності необхідного обладнання. Транспортування до поста технічного обслуговування також характеризується випадковими коливаннями швидкості руху залежно від дорожніх умов та інтенсивності руху на маршруті [16].

Використання детермінованих моделей у таких умовах призводить до значних похибок планування та невиправданих очікувань щодо часу завершення евакуації. PERT-метод дозволяє перейти від точкових оцінок до інтервальних, формуючи реалістичний прогноз із зазначенням ймовірності досягнення заданого терміну. При цьому критичний шлях у мережевій моделі визначається не лише як послідовність робіт із максимальною сумарною тривалістю, але й як траєкторія з найбільшим сумарним ризиком затримки. Дисперсія критичного шляху ($\sigma_{кр}^2$) розраховується як сума дисперсій окремих робіт, що належать до цього шляху ($\sigma_{кр}^2 = \sum \sigma_i^2$), що дозволяє оцінити стабільність плану та визначити події (роботи), які потребують найбільшої уваги управлінця з точки зору ризик-менеджменту [15].

					<i>КРБАТТАМ 26 22007. 000 ПЗ</i>	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ключовою перевагою PERT-методу в логістиці автотранспорту є можливість розрахунку ймовірності виконання комплексу робіт евакуації у заданий директивний термін ($T_{\text{план}}$). За умови, що сумарна тривалість робіт на критичному шляху підпорядковується нормальному закону розподілу (що випливає з центральної граничної теореми при достатній кількості операцій), розраховується статистичний коефіцієнт $Z = (T_{\text{план}} - T_{\text{exp}}) / \sigma_{\text{кр}}$, де T_{exp} – сумарне очікуване час критичного шляху. За таблицями стандартного нормального розподілу визначається ймовірність $P(Z)$ завершення процесу евакуації не пізніше запланованого терміну. Це дає диспетчерським службам інструментарій для обґрунтованого управління очікуваннями клієнтів та оптимального розподілу ресурсів: замість декларативного «евакуація займе 60 хвилин» можна надати інтервальну оцінку «евакуація завершиться протягом 60 хвилин із ймовірністю 85%», що суттєво підвищує якість сервісу та дозволяє обґрунтовано планувати завантаженість постів ТО [15].

Однак застосування PERT-методу має певні методичні обмеження. Метод передбачає незалежність тривалостей окремих робіт та їхній бета-розподіл, що в умовах транспортної логістики може бути спрощенням (наприклад, погані погодні умови одночасно збільшують тривалість усіх транспортних операцій). Крім того, для отримання достовірних ймовірнісних оцінок необхідна наявність статистичних даних щодо частоти настання оптимістичних та песимістичних сценаріїв, що потребує накопичення історичних даних службами евакуації. Незважаючи на ці обмеження, інтеграція PERT-методу з процедурами вибору постів технічного обслуговування дозволяє створити адаптивну систему планування, яка враховує реальну варіативність транспортних процесів та забезпечує кількісну оцінку ризиків затримок на кожному етапі евакуації автомобіля [16].

					<i>КРБАТТАМ 26 22007. 000 ПЗ</i>	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.3 Методичні підходи до вибору постів технічного обслуговування

Вибір оптимального поста технічного обслуговування (СТО) у ланцюгу евакуації автомобіля є складною багатокритеріальною задачею прийняття рішень у умовах невизначеності, що суттєво впливає на загальну тривалість та ефективність реалізації мережевої моделі. На відміну від стандартних логістичних процесів, де маршрут визначається виключно мінімізацією відстані або вартості, евакуація після дорожньо-транспортної пригоди або серйозної поломки накладає додаткові обмеження, пов'язані з терміновістю отримання послуг, специфікою пошкоджень транспортного засобу та вимогами страхових компаній. Саме тому методичне забезпечення вибору СТО має інтегруватися з ймовірнісним підходом PERT, оскільки різні варіанти постів призначення зумовлюють відмінні параметри тривалості операції «Транспортування до пункту обслуговування» та подальшого розвантаження [17].

Критерії оптимальності вибору поста ТО можна класифікувати за чотирма основними групами: часові, технічні, економічні та організаційні. До часових критеріїв належить загальний час доставки автомобіля, що включає не лише час руху евакуатора за маршрутом «місце ДТП – СТО», але й очікуваний час простою у черзі на приймальному пункті обраного поста [18]. Технічні критерії визначаються відповідністю матеріально-технічної бази СТО характеру пошкоджень: наявність стапельного обладнання для відновлення геометрії кузова, покрасочної камери, діагностичних стендів для конкретних марок автомобілів категорії М1 чи можливість проведення складних агрегатних робіт. Економічні критерії охоплюють як прямі витрати на евакуацію (тариф за кілометр), так і непрямі – вартість подальшого ремонту, розмір франшизи за договором КАСКО та добові виплати за простій транспортного засобу. Організаційні критерії включають графік роботи поста (цілодобовий vs обмежений), наявність сертифікатів на роботи з конкретними брендами та готовність прийняти автомобіль у вихідний день [19].

					<i>КРБАТТАМ 26 22007. 000 ПЗ</i>	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для формалізації процедури вибору у практиці управління автотранспортом застосовуються методи багатокритеріальної оптимізації, зокрема метод аналізу ієрархій (МАІ) Томаса Сааті або матричні моделі парних порівнянь. Сутність цих підходів полягає у розбитті складної проблеми на ієрархію цілей, критеріїв та альтернатив з подальшим кількісним оцінюванням пріоритетів. У контексті евакуації автомобіля альтернативами виступають конкретні СТО, розташовані у зоні доступності, а вагові коефіцієнти критеріїв встановлюються експертним шляхом з урахуванням пріоритетів замовника (наприклад, за наявності страхівки пріоритет має якість ремонту над вартістю, тоді як при відсутності страхування – мінімізація загальних витрат). Результатом застосування таких методів є ранжування постів за ступенем відповідності комплексу вимог, що дозволяє автоматизувати прийняття рішення диспетчером [20].

Особливістю вибору поста ТО при евакуації з місця ДТП є необхідність урахування обмежень, що динамічно змінюються. Зокрема, пропускна здатність поста обслуговування може бути вичерпана у пікові години, що перетворює теоретично оптимальний за відстанню варіант на неприйнятний через тривале очікування. Аналогічно, спеціалізовані станції технічного обслуговування певних марок автомобілів можуть бути розташовані за межами міста, що збільшує час транспортування, але гарантує якість ремонту складних систем (гібридних установок, адаптивних підвісок). У таких випадках методичний підхід має передбачати сценарний аналіз: формування основного (прийнятного за всіма критеріями) та резервного (альтернативного при перевантаженні основного) варіантів постів призначення.

Інтеграція процедури вибору СТО з мережевою моделлю евакуації реалізується через модифікацію параметрів відповідної роботи мережевого графіка. При використанні PERT-методу вибір конкретного поста призначення зумовлює перерахунок тричінкових оцінок операції «Транспортування»: оптимістичний час t_0 визначається за маршрутом без заторів та з максимально

					<i>КРБАТТАМ 26 22007. 000 ПЗ</i>	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

допустимою швидкістю; найвірогідний t_m – з урахуванням середньої завантаженості доріг даного напрямку; песимістичний t_p – з урахуванням можливих заторів та технічних несправностей евакуатора. Таким чином, альтернативні варіанти СТО породжують альтернативні версії мережевої моделі з різними критичними шляхами та ймовірністю вкладення у нормативний час. Оптимальним вважається той пост, мережевий графік якого має максимальну ймовірність виконання за прийнятною сукупною вартості процесу, що вимагає від диспетчера або автоматизованої системи порівняльного аналізу декількох змодельованих сценаріїв перед прийняттям остаточного рішення [20].

1.4 Динамічне програмування в задачах маршрутизації евакуаційних засобів

Динамічне програмування як метод оптимізації багатоетапних процесів знаходить практичне застосування у задачах маршрутизації евакуаційних засобів, зокрема при визначенні оптимальної послідовності обслуговування черги викликів або виборі найкращого маршруту за умови змінної завантаженості транспортної мережі [21]. На відміну від статичних моделей, що розглядають процес евакуації як сукупність незалежних операцій, динамічне програмування дозволяє враховувати його природну багатоетапність, де рішення, прийняті на кожному попередньому кроці, впливають на можливі варіанти подальших дій та кінцевий результат.

Принцип оптимальності, сформульований Річардом Беллманом, полягає у твердженні, що оптимальна стратегія має таку властивість: незалежно від початкового стану та початкового рішення, наступні рішення повинні складати оптимальну стратегію щодо стану, який є результатом першого рішення. У контексті маршрутизації евакуатора це означає, що якщо оптимальний маршрут з точки виклику А до поста ТО В проходить через проміжну точку С, то частина маршруту від С до В також має бути оптимальною для цього підзавдання. Ця

					<i>КРБАТТАМ 26 22007. 000 ПЗ</i>	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

властивість дозволяє розбити складну задачу пошуку глобального мінімуму функції витрат на послідовність простих локальних оптимізацій [22].

Процес евакуації автомобіля природно декомпозується на етапи (етапи), кожен з яких характеризується певним станом системи: початковий стан – евакуатор знаходиться на базі або виконує попереднє замовлення; проміжні стани – точка прибуття до місця ДТП, момент завершення завантаження; кінцевий стан – розвантаження на посту ТО. Функція витрат на кожному етапі залежить від часу виконання операції та ресурсних обмежень (залишок пального, робочий час екіпажу). Рекурентне співвідношення Беллмана для даної задачі має вигляд: $f_n(s) = \min_x \{c_n(s,x) + f_{n+1}(s')\}$, де $f_n(s)$ – мінімальні сумарні витрати від етапу n до кінця при стані s , $c_n(s,x)$ – витрати на етапі n при виборі рішення x , а s' – новий стан після прийняття рішення [23].

Застосування цього підходу до мережевої моделі евакуації дозволяє оптимізувати не лише статичний критичний шлях, а й адаптувати маршрут у реальному часі залежно від поточної завантаженості доріг. Зокрема, якщо на етапі транспортування виникає затор, принцип оптимальності дозволяє перерахувати оптимальне продовження маршруту від поточної точки до пункту призначення, не повертаючись до перегляду всього плану. Це забезпечує стійкість мережевої моделі до збурень та можливість оперативного коригування графіка. Однак метод обмежений «прокляттям розмірності» – при значній кількості можливих станів обсяг обчислень експоненційно зростає, тому на практиці динамічне програмування доцільно застосовувати для локальних коригувань маршруту або оптимізації черговості обслуговування групи викликів у межах одного району міста, де простір станів залишається керованим [23].

					<i>КРБАТТАМ 26 22007. 000 ПЗ</i>	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ СИСТЕМИ ЕВАКУАЦІЇ ТА МЕТОДИКА ФОРМУВАННЯ ЙМОВІРНІСНОЇ МЕРЕЖЕВОЇ МОДЕЛІ

2.1 Організаційна структура процесу евакуації автомобілів категорії М1

Процес евакуації автомобілів категорії М1 (легкові транспортні засоби з кількістю місць для сидіння, крім місця водія, не більше восьми) представляє собою складну логістичну систему, що інтегрує оперативне реагування, транспортне обслуговування та взаємодію з пунктами технічного обслуговування. На відміну від вантажних транспортних засобів, евакуація легкових автомобілів характеризується відносно невеликою масою (до 3,5 т), що дозволяє використовувати різні типи евакуаційних засобів – від бортових евакуаторів з частковою погрузкою до повноцінних платформних автовозів, а також вимагає скорочених часових параметрів виконання операцій через високу соціальну значущість швидкого відновлення транспортної доступності власників [24].

Організаційна структура процесу евакуації формується як багаторівнева система взаємопов'язаних етапів, кожен з яких завершується конкретною логістичною подією та потребує залучення певних ресурсів. Ініціювання процесу здійснюється моментом надходження виклику до диспетчерської служби евакуації, який фіксується як початкова подія мережевої моделі. На цьому етапі відбувається збір первинної інформації про характер несправності або тип дорожньо-транспортної пригоди, точне місце розташування автомобіля (з використанням систем геолокації), кількість пасажирів, наявність травмованих (що визначає пріоритетність виклику), а також попереднє визначення типу необхідного евакуаційного обладнання. Диспетчер несе відповідальність за первинну маршрутизацію та призначення конкретного евакуатора з урахуванням його географічного розташування, завантаженості та спеціалізації [25].

					<i>КРБАТТАМ 26 22007. 000 ПЗ</i>	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Другим етапом є подача евакуаційного засобу до місця події, що включає рух порожнього автомобіля від бази або точки завершення попереднього рейсу. Тривалість цього етапу має найвищу варіативність з усіх операцій процесу, оскільки залежить від дорожньої обстановки, часу доби (пікові навантаження збільшують час подачі на 40–60%), метеорологічних умов та кваліфікації водія. Для категорії М1 характерна необхідність швидкого реагування, оскільки легкові автомобілі частіше за інші блокують смуги руху на магістралях, спричиняючи затори. У разі ДТП на цьому етапі виникає необхідність координації з працівниками поліції для оформлення матеріалів події та отримання дозволу на переміщення транспортного засобу, що додає адміністративної складності та збільшує невизначеність тривалості очікування [26].

Третій етап охоплює підготовчі роботи та власне погрузку автомобіля на евакуатор. Для легкових автомобілів категорії М1 типовими є такі технологічні операції: встановлення евакуатора в безпечній близькості до пошкодженого авто (з дотриманням правил дорожнього руху щодо заборони зупинки), механічне блокування коліс, відключення систем безпеки (активація нейтрального режиму коробки передач), кріплення тросів або використання гідравлічної платформи. При значних пошкодженнях кузова (деформація підвісок, заклинені колеса) може знадобитися застосування спеціального обладнання – лебідок, домкратів, підкатних візків, що суттєво збільшує тривалість операції порівняно з технічно справним автомобілем, який підлягає лише транспортуванню.

Четвертий етап – транспортування до пункту призначення – реалізується за маршрутом, оптимізованим за критеріями мінімізації часу та витрат. Для автомобілів категорії М1 характерна можливість вибору альтернативних постів ТО в межах міста або агломерації, оскільки легкові автомобілі не потребують спеціалізованих станцій технічного обслуговування вантажних транспортних засобів. На цьому етапі реалізується зв'язок з підрозділом 1.3 щодо вибору

					<i>КРБАТТАМ 26 22007. 000 ПЗ</i>	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

оптимального поста з урахуванням його спеціалізації (дилерський центр, універсальна СТО, кузовний ремонт), завантаженості та відстані. Водій евакуатора підтримує комунікацію з диспетчером для коригування маршруту у разі зміни дорожньої ситуації (затори, перекриття доріг).

П'ятий етап включає розвантаження на території поста технічного обслуговування та передачу автомобіля відповідальній особі. Ця операція завершується підписанням акту приймання-передачі, де фіксуються пошкодження, зафіксовані фотографічно, та стан лічильників. Для мережевої моделі цей момент є кінцевою подією, яка зумовлює звільнення евакуатора для виконання наступного замовлення та завершення логістичного циклу евакуації.

У процесі беруть участь чотири ключові суб'єкти: диспетчерська служба (координатор процесу, носій інформації про стан виконання замовлення), водій евакуатора (виконавець транспортних операцій), представник поста ТО (приймач вантажу, ініціатор подальших ремонтних робіт) та страхова компанія (контролер витрат, координатор взаємодії при ДТП). Інформаційні потоки між цими суб'єктами реалізуються через автоматизовані диспетчерські системи, мобільні додатки та системи електронного документообігу, що дозволяють відстежувати статус виконання кожної операції в режимі реального часу [25].

Така організаційна структура створює підстави для формалізації процесу евакуації у вигляді мережевого графіка, де окремі етапи трансформуються в роботи (дії) з триочінковими оцінками тривалості, а моменти передачі відповідальності між суб'єктами – в події (вершини графа). Врахування специфіки категорії М1 (відносна однотипність конструкцій, стандартизовані пристрої для кріплення, висока повторюваність операцій) спрощує статистичне обґрунтування ймовірнісних параметрів PERT-моделі, що розглядається в наступних підрозділах.

					<i>КРБАТТАМ 26 22007. 000 ПЗ</i>	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.2 Аналіз факторів невизначеності тривалості операцій

У контексті ймовірного мережевого моделювання процесу евакуації автомобілів категорії М1 критичним є визначення факторів, що зумовлюють варіативність тривалості окремих операцій. На відміну від виробничих процесів з контрольованим середовищем, евакуація транспортних засобів здійснюється в умовах відкритої дорожньої мережі з високим ступенем невизначеності зовнішнього середовища, що обумовлює необхідність застосування PERT-методу з його тричінковою оцінкою часу.

Основними факторами невизначеності, що впливають на тривалість етапу «Подача евакуатора», є транспортно-експлуатаційні умови дорожньої мережі. Завантаженість міських магістралей у пікові години (07:00–09:00 та 17:00–19:00) збільшує час подачі на 40–60 % порівняно з міжпіковим періодом. Нічний час (22:00–06:00) характеризується мінімальними затримками у русі, але може ускладнюватися обмеженою видимістю та складністю ідентифікації адреси. Метеорологічні умови суттєво впливають на швидкість руху: дощова погода знижує середню швидкість евакуатора на 15–20 %, снігопад та ожеледеця – на 30–50 %, що відповідно збільшує песимістичну оцінку часу подачі. Додатковим фактором є відстань від бази до місця виклику, яка в умовах великого міста корелює не лише з географічною віддаллю, але й із кількістю світлофорів та характером перехресть [27].

Для операції «Завантаження автомобіля» невизначеність зумовлюється технічним станом транспортного засобу та обставинами ДТП. При технічній поломці (відмова стартера, порив шини) завантаження стандартним бортовим евакуатором займає 10–15 хвилин за нормальних умов. Однак при ДТП із пошкодженням ходової частини або деформацією кузова необхідне застосування спеціального обладнання (лебідки, домкрати, підкатні візки), що збільшує тривалість операції до 25–40 хвилин. Ускладнення доступу до автомобіля (з'їзд у кювет, перекидання, блокування руху іншими

					<i>КРБАТТАМ 26 22007. 000 ПЗ</i>	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

транспортними засобами) може подвоїти або потроїти час завантаження порівняно зі стандартним сценарієм. Наявність пасажирів, особливо травмованих, потребує додаткового часу на їхнє евакуювання до медичних служб перед початком погрузки авто [28].

Етап «Транспортування до поста ТО» характеризується варіативністю, зумовленою маршрутом руху та завантаженістю доріг. Вибір маршруту між кількома альтернативними СТО впливає не лише на відстань, але й на ймовірність потрапляння у затори. Для міських маршрутів характерна бімодальна *distribucija* часу: за сприятливих умов рух відбувається з максимально допустимою швидкістю, за наявності заторів – зі швидкістю 10–15 км/год. Додатковою невизначеністю є можливість дорожньо-транспортних пригод на маршруті евакуатора, що потребує коригування маршруту в реальному часі [28].

Операція «Розвантаження на посту ТО» має меншу варіативність, але залежить від організаційної готовності приймального пункту. Наявність вільного місця на території СТО, готовність приймальника документувати стан автомобіля та адміністративні процедури оформлення можуть варіюватися від 5 до 20 хвилин. У вечірній та нічний час, коли адміністративний персонал змінюється або відсутній, тривалість цієї операції збільшується [28].

Статистичний аналіз цих факторів дозволяє обґрунтувати триочінкові оцінки для кожної операції мережевого графіка. Оптимістична оцінка (t_o) відповідає виконанню операції за сприятливих умов: міжпіковий період, добрі погодні умови, стандартна поломка без ускладнень. Найвірогідніша оцінка (t_m) базується на середньостатистичних показниках, отриманих диспетчерськими службами за історичними даними. Песимістична оцінка (t_p) враховує комплекс несприятливих факторів: пікове навантаження, погані погодні умови, складні пошкодження з обмеженим доступом.

Варто зазначити, що фактори невизначеності не є незалежними. Наприклад, складні погодні умови часто корелюють зі збільшенням кількості

					<i>КРБАТТАМ 26 22007. 000 ПЗ</i>	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДТП, що одночасно збільшує завантаженість евакуаційних служб та час очікування подачі. Така кореляція потребує уважного підходу при визначенні дисперсій операцій та може обумовлювати необхідність введення коригувальних коефіцієнтів при розрахунку ймовірності виконання плану в цілому. Врахування цих факторів формує методичну базу для побудови реалістичної ймовірнісної моделі евакуації, адекватної реальним умовам функціонування транспорт

2.3 Розробка алгоритму інтеграції PERT-аналізу з вибором поста ТО

Інтеграція ймовірнісного мережевого планування з процедурою вибору поста технічного обслуговування являє собою багатоетапний алгоритм прийняття рішень, що поєднує кількісну оцінку ризиків затримок з якісним аналізом альтернатив пунктів призначення. Сутність запропонованого підходу полягає у тому, що вибір конкретного СТО не передує побудові мережевої моделі, а здійснюється паралельно з її формуванням на основі порівняльного аналізу ймовірнісних характеристик альтернативних сценаріїв евакуації.

Алгоритм розпочинається з моменту реєстрації виклику та первинної інвентаризації обмежень. Диспетчерська система формує множину допустимих альтернатив $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$, що представляють пости ТО, здатні прийняти автомобіль конкретної марки з урахуванням характеру пошкоджень. Критеріями відбору кандидатів на цьому етапі є: географічна доступність (відстань не повинна перевищувати допустиму норму транспортування з урахуванням обмеженого запасу пального евакуатора), технологічна сумісність (наявність обладнання для ремонту конкретних пошкоджень), організаційна готовність (графік роботи, відсутність аварійного простою) [24].

Для кожної альтернативи A_i формується окремий варіант мережевого графіка $G_i(V, E)$, де множина вершин V ідентична для всіх варіантів (події процесу евакуації), а множина дуг E відрізняється параметрами операції

					<i>КРБАТТАМ 26 22007. 000 ПЗ</i>	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

«Транспортування до поста ТО» та умовними ймовірностями настання подій. Тривалість цієї операції $t_{пер}^i$ розраховується з урахуванням специфічного для кожного A_i маршруту руху: відстані d_i , середньої швидкості руху $v_{сер}$ (з коригуванням на час доби), кількості світлофорів та перехресть [16].

На наступному етапі реалізується PERT-аналіз для кожного графіка G_i . Виконується триочікуване оцінювання всіх операцій з урахуванням факторів невизначеності, викладених у підрозділі 2.2. Особливу увагу приділено операції транспортування, для якої оптимістична оцінка t_o^i визначається як $d_i/v_{макс}$, де $v_{макс}$ – максимально допустима швидкість за ПДР з урахуванням категорії евакуатора; песимістична оцінка t_p^i розраховується як $d_i/v_{мін}+t_{затор}$, де $v_{мін}$ – швидкість руху у щільному транспортному потоці (10–15 км/год), а $t_{затор}$ – очікуваний час затримки на маршруті з урахуванням ймовірності заторів. Очікуваний час транспортування для альтернативи A_i становить $t_{exp}^i=(t_o^i+4t_m^i+t_p^i)/6$ [14].

Критичний шлях для кожного графіка G_i визначається традиційним способом, але з використанням очікуваних тривалостей. Варіативність критичного шляху оцінюється через сумарну дисперсію $\sigma_{кр}^{i2}=\sum\sigma_j^2$ для всіх робіт j , що належать до критичного шляху альтернативи A_i . Це дозволяє розрахувати ймовірність виконання евакуації у заданий директивний термін $T_{дир}$ для кожного поста ТО [16]:

$$P_i(T_{дир}) = \Phi \left(\frac{T_{дир} - T_{exp}^i}{\sigma_{кр}^i} \right),$$

де Φ – функція стандартного нормального розподілу.

Паралельно з ймовірнісним аналізом здійснюється багатокритеріальна оцінка альтернатив за економічними та якісними показниками. Формується вектор критеріїв $K=(k_1, k_2, k_3, k_4)$, де k_1 – транспортні витрати (пропорційні d_i), k_2 – вартість послуг СТО, k_3 – рейтинг якості обслуговування (сертифікація, відгуки), k_4 – час очікування у черзі на приймання. Кожен критерій

					<i>КРБАТТАМ 26 22007. 000 ПЗ</i>	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

нормалізується до безрозмірного вигляду, а вагові коефіцієнти $w=(w_1, w_2, w_3, w_4)$ визначаються методом аналізу ієрархій з урахуванням пріоритетів замовника (наприклад, за наявності страховки $w_3 > w_2$, при самостійній оплаті w_2 має максимальну вагу).

Інтегральна оцінка альтернативи A_i формується як зважена сума нормалізованих показників з урахуванням ймовірнісного компонента [14]:

$$S_i = \alpha \cdot P_i(T_{\text{дир}}) + (1 - \alpha) \cdot \sum_{j=1}^4 w_j \cdot k_j^i,$$

де α – коефіцієнт пріоритету часових ризиків (зазвичай 0,6–0,7 для оперативної евакуації). Оптимальною визнається альтернатива $A_{\text{opt}} = \text{argmax} S_i$.

У разі, коли жодна з альтернатив не забезпечує прийнятний рівень ймовірності $P_i(T_{\text{дир}}) \geq P_{\text{доп}}$ (зазвичай 0,85–0,90), алгоритм передбачає процедуру коригування. Розглядаються варіанти: зміни типу евакуатора (з бортового на платформний для прискорення завантаження), коригування маршруту з урахуванням прогнозу дорожньої обстановки, перегляд вимог до СТО (вибір ближчого пункту з меншим часом транспортування, але вищою вартістю). Коригування реалізується за принципом динамічного програмування: стан системи переоцінюється на кожному етапі, і при значному відхиленні від плану (затримка подачі евакуатора понад 20 % від t_{exp}) запускається процедура перерахунку оптимальної альтернативи з поточного стану, а не з початкового [16].

Результатом роботи алгоритму є формування остаточної мережевої моделі G_{opt} з обраним постом ТО, повним набором ймовірнісних характеристик (очікувані тривалості, дисперсії, резерви часу) та графіком контрольних точок для моніторингу виконання. Ця модель передається до розділу 3 для практичної реалізації та розрахунків.

					<i>КРБАТТАМ 26 22007. 000 ПЗ</i>	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.4 Методика збору та обробки статистичних даних

Формування адекватної ймовірнісної мережевої моделі потребує наявності достовірної статистичної бази щодо тривалості окремих операцій евакуації автомобілів категорії М1. Збір первинних даних здійснюється комплексним методом, що поєднує автоматизований моніторинг транспортних засобів, документальний аналіз виконаних замовлень та експертне опитування учасників процесу. Основним джерелом інформації є електронні журнали диспетчерських служб евакуації, що фіксують моменти надходження виклику, виїзду евакуатора, прибуття на місце події, завершення завантаження, прибуття до СТО та розвантаження. Для підвищення точності часових параметрів використовуються дані GPS-моніторингу рухомого складу, які дозволяють об'єктивно визначити фактичний час руху з урахуванням заторів та відхилень від планового маршруту [24].

Обсяг вибірки визначається з урахуванням необхідної точності оцінок та варіативності вимірюваних показників. Для операцій з високим коефіцієнтом варіації (час подачі евакуатора, тривалість завантаження при ДТП) рекомендується формувати вибірку обсягом не менше 50 спостережень для кожного типового сценарію (міський/заміський маршрут, пікові/міжпікові години, добрі/несприятливі погодні умови). Стратифікована вибірка дозволяє виділити однорідні групи спостережень та отримати специфічні оцінки для різних комбінацій факторів невизначеності, визначених у підрозділі 2.2. Дані систематизуються за категоріями: тип несправності (технічна поломка/ДТП), час доби (ніч/день, пік/міжпік), метеорологічні умови (сухо/дощ/сніг), відстань транспортування (до 5 км, 5–15 км, понад 15 км) [29].

Обробка зібраних даних розпочинається з перевірки їх якості та виключення аномальних значень (викликів, що супроводжувалися форс-мажорними обставинами: ДТП за участі евакуатора, перекриття дороги через аварію комунальних мереж тощо). Для кожної операції розраховуються

					<i>КРБАТТАМ 26 22007. 000 ПЗ</i>	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

статистичні характеристики: середнє арифметичне, медіана, стандартне відхилення, коефіцієнт варіації та кватилі. Визначення параметрів триочінкової оцінки PERT здійснюється на основі емпіричного розподілу спостережень: оптимістична оцінка t_o приймається рівною мінімальному значенню вибірки або 10-му перцентилію (залежно від наявності викидів); найвірогідніша оцінка t_m – медіані або моді розподілу; песимістична оцінка t_p – 90-му перцентилію або максимальному значенню за умови фізичної можливості його повторення [30].

Перевірка гіпотези про відповідність емпіричного розподілу теоретичному закону (нормальному або бета-розподілу) виконується за допомогою критеріїв згоди (колмогорова–смирнова, пірсона χ^2). У разі відхилення від нормальності застосовуються методи робастної статистики або перетворення даних (логарифмування для зменшення асиметрії). Для мережевого планування критичним є визначення дисперсій окремих операцій за

формулою $\sigma^2 = \left(\frac{t_p - t_o}{6} \right)^2$, що дозволяє оцінити внесок кожної роботи у загальну невизначеність критичного шляху. Накопичення статистичних даних протягом періоду не менше трьох місяців забезпечує стабілізацію оцінок параметрів та можливість їх використання для прогнозування ймовірності виконання плану евакуації з прийнятною похибкою ($\pm 5\%$ для ймовірнісних оцінок) [24].

					<i>КРБАТТАМ 26 22007. 000 ПЗ</i>	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ МЕРЕЖЕВОЇ МОДЕЛІ ЕВАКУАЦІЇ З УРАХУВАННЯМ ЙМОВІРНІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

3.1 Формування переліку робіт та побудова мережевого графіка

Для розв'язання задачі оптимізації технологічного процесу евакуації легкового автомобіля за допомогою евакуатора доцільно використовувати метод мережевого планування [11].

Основним критерієм оптимізації є мінімізація часу, необхідного для виконання евакуаційних робіт.

Визначення послідовності та повного переліку операцій є одним із ключових етапів формування вихідних даних для побудови мережевої моделі досліджуваного процесу. Ці дані отримано на основі експертного опитування фахівців Евакуатор24/7 [31].

Тривалість виконання робіт встановлена за результатами хронометражних досліджень випробувальної лабораторії дочірнього підприємства Автоскладальний завод № 1, що входить до складу Богдан Моторс [32].

У таблиці 3.1 наведено коди операцій для сценарію «ДТП без постраждалих, автомобіль несправний для руху» та витрати часу на їх виконання.

Побудова мережевого графіка процесу евакуації автомобіля категорії М1 здійснюється з урахуванням основних правил, наведених у розділі 2. При цьому враховується, що взаємопов'язані роботи виконуються послідовно, тоді як незалежні можуть реалізовуватися як послідовно, так і паралельно.

На основі цих принципів сформовано мережевий графік евакуації транспортного засобу з місця дорожньо-транспортної пригоди або несправності (рис. 3.1). Роботи, зображені пунктирними стрілками, є фіктивними, тому їх тривалість приймається рівною нулю.

					<i>КРБАТТАМ 26 22007. 000 ПЗ</i>	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Операції 3, 4, а також 11 і 13 можуть розпочинатися одночасно після настання відповідних подій (2 та 10). Вони не залежать одна від одної в часі, що дозволяє виконувати їх паралельно.

Згідно з побудованим графіком визначено критичний шлях, який проходить через послідовність подій 1–15 і становить 48,0 хвилин.

Таблиця 3.1 – Перелік кодів робіт у складі мережевого графіка та витрати часу на їх виконання

№ з/п	Найменування робіт	Код робіт	Тривалість, хв.
1	Отримання заявки на евакуацію автомобіля від клієнтури	1 - 2	7
2	Визначення кореспондучих точок і відстаней між ними	2 - 3	3
3	Визначення обсягів робіт при евакуації	2 - 4	4
4	Вибір рухомого складу для здійснення перевезення	4 - 5	2
5	Фіктивна робота (залежність)	5 - 6	0
6	Розробка раціональних маршрутів перевезень	6 - 7	1,5
7	Розрахунок потрібного парку рухомого складу	7 - 8	2
8	Складання маршрутних відомостей (розрядки)	8 - 9	4
9	Виписка шляхових листів	9 - 10	3
10	Доставка евакуйованого автомобіля	10 - 11	8
11	Контроль за роботою рухомого складу на лінії	10 - 13	8
12	Приймання авто-транспортної документації	11 - 12	1,5
13	Обробка авто-транспортної документації	12 - 14	2
14	Складання диспетчерського звіту	14 - 15	2

Розрахунки за мережевим графіком плану евакуації автомобіля категорії М1 для сценарію «ДТП без постраждалих, автомобіль несправний для руху».

Після побудови мережевого графіка здійснюється обчислення основних параметрів моделі, зокрема визначається тривалість критичного шляху, строки настання подій та час виконання окремих робіт.

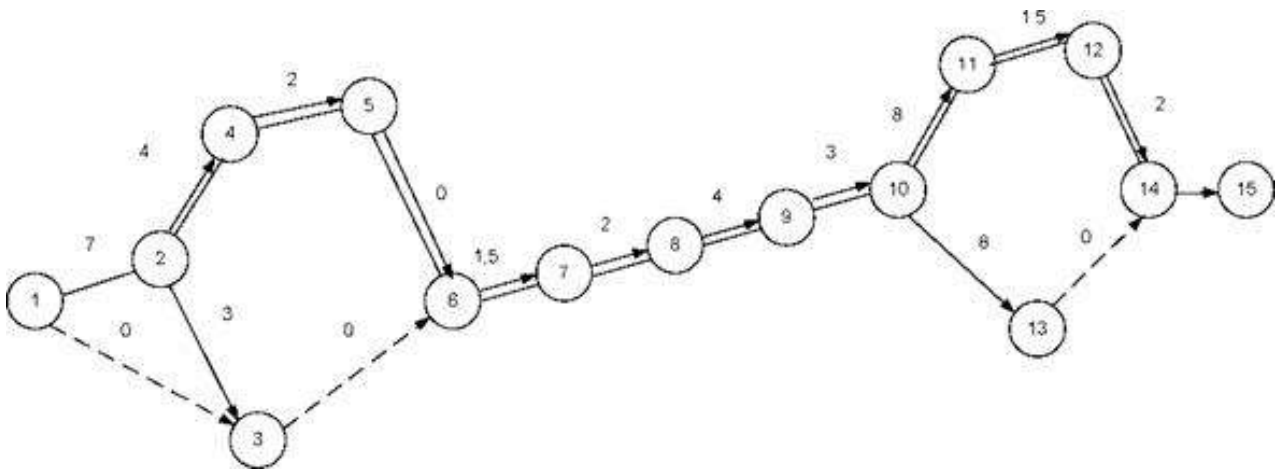


Рис. 3.1 – Графічна реалізація мережі плану евакуації автомобіля категорії М1 з місця ДТП або поломки

1) Розрахунок тривалості деякого повного шляху здійснюється за формулою:

$$t(L_i) = \sum_{L_i} t_{ij}. \quad (3.4)$$

Результати розрахунку занесено табл. 3.2.

2) $t(L_h) = \max \sum_{L_i} t_{ij}$ – довжина критичного шляху (у цьому випадку це шлях 1).

3) Повний резерв часу шляху:

$$R(L_i) = t(L_{кр}) - t(L_i). \quad (3.5)$$

Збільшення загальної тривалості всіх робіт, що входять до шляху L_i , на величину $R(L_i)$ не впливає на момент завершення кінцевої операції.

Таблиця 3.2 – Результати розрахунку тривалості повного шляху

					<i>КРБАТТАМ 26 22007. 000 ПЗ</i>	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

№ з/п	Шлях, L_i	Тривалість шляху, $t(L_i)$	Резерв, $R(L_i)$	Примітка
1	1 - 2 - 4 - 5 - 6 - 7 - 8 - 9 - 10 - 11 - 12 - 14 - 15	$7 + 4 + 2 + 0 + 1,5 + 2 + 4 + 3 + 8 + 1,5 + 2 + 2 = 37$	0	Критичний шлях
2	1 - 2 - 4 - 5 - 6 - 2 - 8 - 9 - 10 - 13 - 14 - 15	$7 + 4 + 2 + 0 + 1,5 + 2 + 4 + 3 + 8 + 0 + 2 = 33,5$	3,5	
3	1 - 2 - 3 - 6 - 7 - 8 - 9 - 10 - 11 - 12 - 14 - 15	$+ 3 + 0 + 1,5 + 2 + 4 + 3 + 1,5 + 2 + 2 = 34$	3,0	
4	1 - 2 - 3 - 6 - 7 - 8 - 9 - 10 - 13 - 14 - 15	$+ 3 + 0 + 1,5 + 2 + 4 + 3 + 0 + 2 = 30,5$	4,5	
5	1 - 3 - 6 - 7 - 8 - 9 - 10 - 11 - 12 - 14 - 15	$0 + 0 + 1,5 + 2 + 4 + 3 + 8 + 1,5 + 2 + 2 = 24$	13,0	
6	1 - 3 - 6 - 7 - 8 - 9 - 10 - 13 - 14 - 15	$0 + 0 + 1,5 + 2 + 4 + 3 + 8 + 0 + 2 = 20,5$	16,5	

Розрахунок часу настання подій.

Визначення строків настання подій виконується у певній послідовності:

- спочатку обчислюють найраніший момент настання j -ї події $T_p(j)$, рухаючись від початку мережі до її завершення;
- далі визначають найпізніший допустимий момент $T_n(j)$, виконуючи розрахунок у зворотному напрямку – від кінця графіка до початку;
- після цього встановлюють допустимий термін настання події $T_a(j)$, який має задовольняти умову:

$$T_p(j) \leq T_a(j) \leq T_n(j).$$

Це означає, що момент настання події повинен знаходитися в межах між її найранішим і найпізнішим допустимими значеннями. Для подій, що належать до критичного шляху, виконується рівність:
 $T_p(i) = T_a(i) = T_n(i)$.

Згідно з методикою, наведеною у розділі 2, проведено розрахунок цих показників для мережевого графіка, результати якого подано в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Результати розрахунку часових характеристик мережевого графіка плану евакуації автомобіля категорії М1 з місця ДТП або поломки

№ з/п	Код роботи	Тривалість робіт	Початок робіт		Закінчення робіт		Запас часу повний
			раніше	пізніше	раніше	пізніше	
1	1 - 2	7	0	0	7	7	0
2	2 - 3	3	7	10	10	13	3
3	2 - 4	4	7	7	11	11	0
4	4 - 5	2	11	11	13	13	0
5	5 - 6	0	13	13	13	13	0
6	6 - 7	1,5	13	13	14,5	14,5	0
7	7 - 8	2	14,5	14,5	16,5	16,5	0
8	8 - 9	4	16,5	16,5	20,5	20,5	0
9	9 - 10	3	20,5	20,5	23,5	23,5	0
10	10 - 11	8	23,5	23,5	31,5	31,5	0
11	10 - 13	8	23,5	27	31,5	35	3,5
12	11 - 12	1,5	31,5	31,5	33	33	0
13	12 - 14	2	33	33	35	35	0
14	14 - 15	2	35	35	32,0	37	0

Таким чином, на основі мережевого графіка встановлено оптимальну послідовність виконання робіт, яку наведено на рисунку 3.2.

Сумарна тривалість виконання робіт становить 37,0 хвилин. Таким чином, для операцій «Доставка евакуйованого автомобіля» та «Обробка автотранспортної документації» повний резерв часу дорівнює 3,5 хв.

Цей резерв означає, що початок зазначених робіт може бути відкладений або їх тривалість може бути збільшена на вказаний час без впливу на загальний строк виконання всього комплексу робіт.

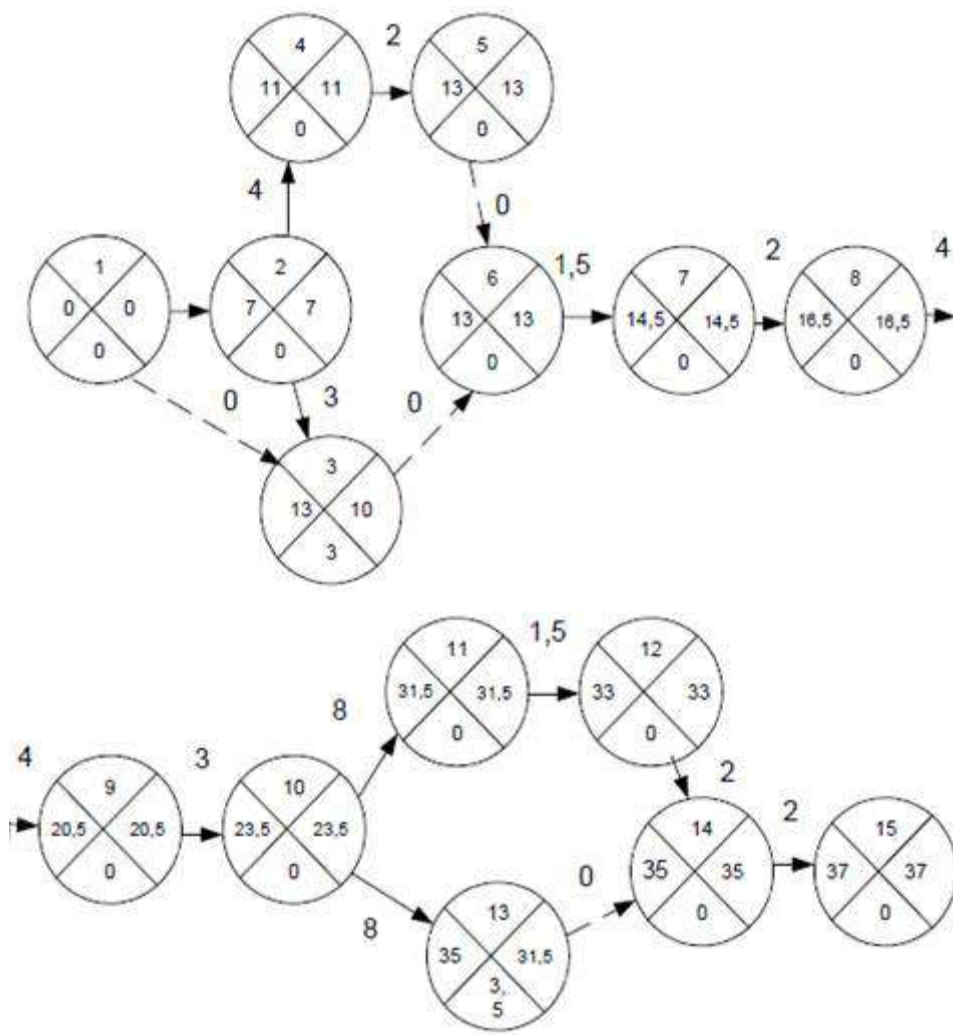


Рисунок 3.2 – Оптимальний мережвий графік плану евакуації автомобіля категорії М1 з місця ДТП або поломки із зазначенням часу настання подій

3.2 Застосування PERT-методу для розрахунку часових параметрів мережної моделі

Для врахування стохастичної природи операцій евакуації автомобіля категорії М1 застосовується PERT-метод, який дозволяє перейти від детермінованих оцінок тривалості робіт до ймовірнісних. На відміну від традиційного методу критичного шляху, де використовуються фіксовані

значення часу, PERT-метод оперує трьома оцінками для кожної операції: оптимістичною (t_o), найвірогіднішою (t_m) та песимістичною (t_p).

Потреєне оцінювання тривалості робіт евакуації базується на статистичних даних диспетчерської служби та експертних оцінках майстрів СТО. Оптимістична оцінка відповідає виконанню роботи за сприятливих умов (відсутність заторів, стандартна поломка, досвідчений екіпаж), песимістична – за несприятливих (погані погодні умови, ускладнений доступ до автомобіля, затори на маршруті), а найвірогідна – найчастіше реалізованому сценарію.

Тривалість робіт мережевого графіка, визначених у табл. 3.1, трансформується у ймовірнісні оцінки згідно з даними табл. 3.4.

Очікувана тривалість кожної роботи (t_{exp}) розраховується за формулою:
 $t_{exp} = (t_o + 4t_m + t_p) / 6$.

Наприклад, для роботи 1–2 (отримання заявки):
 $t_{exp} = (5 + 4 \cdot 7 + 10) / 6 = 643 = 7,17$ хв

Дисперсія тривалості роботи визначається як: $\sigma^2 = (t_p - t_o)^2 / 36$.

Для роботи 1–2: $\sigma^2 = (10 - 5)^2 / 36 = 0,69$ хв².

Визначення критичного шляху за очікуваними тривалостями здійснюється аналогічно до детермінованого методу, але з використанням значень t_{exp} замість фіксованих тривалостей. Розрахунок параметрів мережевого графіка з урахуванням ймовірнісних оцінок наведено в табл. 3.5.

За результатами розрахунків критичний шлях проходить через події:

1–2–4–5–6–7–8–9–10–11–12–14–15

із сумарною очікуваною тривалістю:

$T_{exp}^{кр} = 7,17 + 4,17 + 2,00 + 0 + 1,50 + 2,00 + 4,17 + 3,17 + 8,33 + 1,50 + 2,00 + 2,00 = 40,01$ хв.

					КРБАТТАМ 26 22007. 000 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.4 – Триочінкові оцінки тривалості робіт евакуації автомобіля категорії М1

Код роботи	Найменування робіт	t_0 , хв	t_m , хв	t_p , хв	t_{exp} , хв	σ^2
1–2	Отримання заявки на евакуацію	5	7	10	7,17	0,69
2–3	Визначення кореспондуючих точок і відстаней	2	3	5	3,17	0,25
2–4	Визначення обсягів робіт при евакуації	3	4	6	4,17	0,25
4–5	Вибір рухомого складу для здійснення перевезення	1	2	3	2,00	0,11
5–6	Фіктивна робота (залежність)	0	0	0	0	0
6–7	Розробка раціональних маршрутів перевезень	1	1,5	2	1,50	0,03
7–8	Розрахунок потрібного парку рухомого складу	1	2	3	2,00	0,11
8–9	Складання маршрутних відомостей	3	4	6	4,17	0,25
9–10	Виписка шляхових листів	2	3	5	3,17	0,25
10–11	Доставка евакуйованого автомобіля	6	8	12	8,33	1,00
10–13	Контроль за роботою рухомого складу на лінії	6	8	12	8,33	1,00
11–12	Приймання авто-транспортної документації	1	1,5	2	1,50	0,03
12–14	Обробка авто-транспортної документації	1	2	3	2,00	0,11
13–14	Фіктивна робота	0	0	0	0	0
14–15	Складання диспетчерського звіту	1	2	3	2,00	0,11

Таблиця 3.5 – Параметри мережевого графіка з урахуванням PERT-оцінок

Подія	T _p , хв	T _n , хв	Запас часу, хв	Примітка
1	0	0	0	Початок
2	7,17	7,17	0	Критична
3	10,34	15,84	5,50	–
4	11,34	11,34	0	Критична
5	13,34	13,34	0	Критична
6	15,34	15,34	0	Критична
7	16,84	16,84	0	Критична
8	18,84	18,84	0	Критична
9	23,01	23,01	0	Критична
10	26,18	26,18	0	Критична
11	34,51	34,51	0	Критична
12	36,01	36,01	0	Критична
13	34,51	39,01	4,50	–
14	38,01	38,01	0	Критична
15	40,01	40,01	0	Кінець

Дисперсія критичного шляху визначається як сума дисперсій робіт, що належать до цього шляху:

$$\sigma_{кр}^2 = \sum \sigma_i^2 =$$

$$= 0,69 + 0,25 + 0,11 + 0 + 0,03 + 0,11 + 0,25 + 0,25 + 1,00 + 0,03 + 0,11 + 0,11 = 2,94 \text{ хв}^2$$

					<i>КРБАТТАМ 26 22007. 000 ПЗ</i>	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Середньоквадратичне відхилення критичного шляху:

$$\sigma_{кр} = \sqrt{2,94} = 1,71 \text{ хв.}$$

Для оцінки ймовірності виконання плану евакуації у заданий директивний термін $T_{дир}$ використовується статистичний коефіцієнт:

$$Z = \frac{T_{дир} - T_{exp}}{\sigma_{кр}}$$

Припустимо, директивний термін виконання евакуації встановлено на рівні $T_{дир}=45$ хв. Тоді: $Z=(45-40,01)/1,71=2,92$

За таблицею стандартного нормального розподілу значенню $Z=2,92$ відповідає ймовірність $P(Z)=0,9982$ або 99,82%. Це означає, що процес евакуації завершиться протягом 45 хвилин з ймовірністю 99,82%, що свідчить про високу надійність запропонованої мережевої моделі.

При скороченні директивного терміну до $T_{дир}=42$ хв:

$$Z = (42-40,01)/1,71=1,16;$$

$$P(Z)=0,8770 \text{ або } 87,7\%.$$

Таким чином, застосування PERT-методу дозволяє не лише визначити очікувану тривалість евакуації, але й кількісно оцінити ризики затримок, що створює підстави для обґрунтованого вибору поста ТО та управління очікуваннями клієнтів.

3.3 Розробка алгоритму та моделі вибору оптимального поста ТО

Вибір пункту призначення для евакуйованого автомобіля категорії М1 є ключовим елементом управління ланцюгом евакуації, оскільки безпосередньо впливає на тривалість операції «Транспортування» (робота 10–11 мережевого графіка), загальний час реалізації проєкту та економічні показники. На відміну від рішень, що приймаються виключно за критерієм мінімальної відстані,

					КРБАТТАМ 26 22007. 000 ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

запропонована модель інтегрує часові, економічні та якісні параметри з урахуванням ймовірнісних характеристик PERT-аналізу.

Формування множини допустимих альтернатив. Для автомобіля, що евакуюється з міської магістралі, сформовано множину $A=\{A_1, A_2, A_3\}$ потенційних постів технічного обслуговування, що задовольняють мінімальним вимогам: наявність ліцензії на проведення робіт з конкретною маркою автомобіля, можливість приймання транспортного засобу у поточний час доби, технічна готовність до обробки пошкоджень, характерних для ДТП середньої тяжкості (без значної деформації несучих конструкцій).

Альтернатива A_1 – авторизована станція технічного обслуговування (офіційний дилер), відстань $d_1=8$ км, спеціалізація – гарантійний та післягарантійний ремонт даної марки, висока вартість послуг, мінімальний час очікування у черзі.

Альтернатива A_2 – універсальна СТО мережевого типу, відстань $d_2=5$ км, середній рівень вартості, стандартний час очікування 15–20 хв.

Альтернатива A_3 – локальна станція технічного обслуговування, відстань $d_3=3$ км, мінімальна вартість, обмежена спеціалізація (кузовний ремонт середньої складності), можливий час очікування до 40 хв.

Система критеріїв оцінки альтернатив. Для кожного поста ТО визначено вектор критеріїв $K=(k_1, k_2, k_3, k_4)$, що характеризують привабливість альтернативи:

k_1 – інтегральний часовий показник (очікувана тривалість критичного шляху $T_{\text{exp}}^{\text{кр}}$ при евакуації до даного поста, хв);

k_2 – вартість комплексу послуг (евакуація + діагностика + орієнтовна вартість ремонту пошкоджень середньої тяжкості, грн);

k_3 – якісний показник сервісу (рейтинг СТО за відгуками клієнтів, балів за 5-бальною шкалою);

k_4 – ймовірність виконання плану в заданий директивний термін $T_{\text{дир}}=45$ хв.

					<i>КРБАТТАМ 26 22007. 000 ПЗ</i>	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.6 – Початкові параметри альтернативних постів ТО

Параметр	A1 (Дилер)	A2 (Мережа)	A3 (Локальна)
Відстань d, км	8	5	3
Вартість послуг С, грн	8500	6200	4800
Рейтинг якості R	4,8	4,2	3,6
Очікуваний час транспортування t_{exp}^{TP} , хв	18	12	8
Дисперсія транспортування σ_{tr}^2	2,25	1,44	0,64

Адаптація PERT-оцінок для кожної альтернативи здійснюється шляхом коригування тривалості роботи 10–11 (Доставка евакуйованого автомобіля) та перерахунку параметрів критичного шляху. Для стандартного міського режиму руху з урахуванням можливих заторів прийнято наступні триочінкові оцінки часу транспортування: для A₁ ($t_o=14$, $t_m=17$, $t_p=25$), для A₂ ($t_o=9$, $t_m=11$, $t_p=17$), для A₃ ($t_o=6$, $t_m=7$, $t_p=12$).

Ймовірнісний аналіз за критичним шляхом. Для кожної альтернативи перераховано сумарну очікувану тривалість критичного шляху та дисперсію з урахуванням специфічного часу транспортування:

- Альтернатива A₁: $T_{exp}^{кр} = 40,01 - 8,33 + 17,83 = 49,51$ хв;

$$\sigma_{кр}^2 = 2,94 - 1,00 + 2,25 = 4,19; \sigma_{кр} = 2,05 \text{ хв.}$$

$$Z_1 = \frac{45-49,51}{2,05} = -2,20; \quad P_1 = 1,39\%$$

- Альтернатива A₂: $T_{exp}^{кр} = 40,01 - 8,33 + 11,33 = 43,01$ хв;

$$\sigma_{кр}^2 = 2,94 - 1,00 + 1,44 = 3,38; \sigma_{кр} = 1,84 \text{ хв.}$$

$$Z_2 = \frac{45-43,01}{1,84} = 1,08; \quad P_2 = 85,99\%$$

- Альтернатива $A_3 : T_{exp}^{кр} = 40,01 - 8,33 + 7,83 = 39,51$ хв;

$$\sigma_{кр}^2 = 2,94 - 1,00 + 0,64 = 2,58 ; \sigma_{кр} = 1,61 \text{ хв.}$$

$$Z_3 = \frac{45-39,51}{1,61} = 3,41; \quad P_3 = 99,97\%$$

Модель багатокритеріальної оптимізації. Для комплексної оцінки альтернатив застосовано метод зваженої суми нормалізованих критеріїв (адитивна згортка). Вагові коефіцієнти визначені експертним шляхом з урахуванням пріоритетів оперативної евакуації: $w_1=0,35$ (час), $w_2=0,25$ (вартість), $w_3=0,20$ (якість), $w_4=0,20$ (ймовірність виконання).

Нормалізація критеріїв здійснена за формулами:

- Для мінімізованих (k_1, k_2): $\bar{k}_i = \frac{k_i^{max} - k_i}{k_i^{max} - k_i^{min}}$;
- Для максимізованих (k_3, k_4): $\bar{k}_i = \frac{k_i - k_i^{min}}{k_i^{max} - k_i^{min}}$.

Таблиця 3.7 – Нормалізовані значення критеріїв та інтегральні оцінки

Критерій	A ₁	A ₂	A ₃	Вага
k_1^- (час)	0,00	0,79	1,00	0,35
k_2^- (вартість)	0,00	0,52	1,00	0,25
k_3^- (якість)	1,00	0,50	0,00	0,20
k_4^- (ймовірність)	0,00	0,87	1,00	0,20
Інтегральна оцінка S	0,20	0,68	0,70	1,00

Розрахунок інтегральної оцінки:

$$S_j = \sum_{i=1}^4 w_i \cdot \bar{k}_{ij}$$

Для альтернативи A₂ :

$$S_2 = 0,35 \cdot 0,79 + 0,25 \cdot 0,52 + 0,20 \cdot 0,50 + 0,20 \cdot 0,87 = 0,68.$$

Алгоритм прийняття рішення. На основі розробленої моделі сформовано алгоритм вибору оптимального поста ТО, який може бути реалізований у вигляді програмного модуля диспетчерської системи:

1) Вхідні дані: характер пошкоджень, марка автомобіля, координати місця ДТП, директивний термін $T_{дир}$, пріоритети замовника (страховий випадок/самостійна оплата).

2) Фільтрація: виключення з множини альтернатив СТО, що не відповідають технічним вимогам (відсутність необхідного обладнання, закритий графік роботи).

3) PERT-розрахунок: для кожної допустимої альтернативи розрахунок $T_{exp}^{кр}$, $\sigma_{кр}$ та ймовірності $P(T \leq T_{дир})$.

4) Перевірка обмежень: якщо для всіх альтернатив $P_j < P_{доп}$ (допустима ймовірність, наприклад 80%), перехід до коригування $T_{дир}$ або пошуку додаткових ресурсів (заміна типу евакуатора).

5) Багатокритеріальна оцінка: розрахунок нормалізованих значень та інтегральних оцінок S_j для допустимих альтернатив.

6) Вибір оптимальної: $A_{opt} = \text{argmax} S_j$.

7) Коригування мережевої моделі: фіксація обраного поста ТО як пункту призначення, оновлення параметрів роботи 10–11 у мережевому графіку, передача інформації водію евакуатора.

Результат вибору. За результатами розрахунків оптимальною визнано альтернативу A_3 (локальна СТО) з інтегральною оцінкою $S_3=0,70$, що забезпечує мінімальний час евакуації (39,51 хв) та максимальну ймовірність вкладення у директивний термін (99,97%) при мінімальній вартості. Однак за умови гарантійного ремонту (пріоритет критерію якості $w_3=0,40$) оптимальною стане альтернатива A_1 незалежно від вартості та часу.

Така модель дозволяє диспетчеру приймати обґрунтовані рішення з урахуванням конкретної ситуації, забезпечуючи баланс між оперативністю, економічністю та якістю сервісу при евакуації автомобілів категорії М1.

					<i>КРБАТТАМ 26 22007. 000 ПЗ</i>	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.4 Оптимізація мережевої моделі

Отримана у розділі 3.2 ймовірнісна мережна модель характеризується критичним шляхом тривалістю $T_{\text{exp}}^{\text{кр}}=40,01$ хв та наявністю резервів часу на окремих ділянках графіка. Оптимізація полягає у мінімізації тривалості критичного шляху шляхом перерозподілу ресурсів, скорочення тривалості критичних робіт та ефективного використання часових резервів некритичних операцій.

Аналіз резервів часу. Для некритичних робіт мережевого графіка розраховано повний та вільний резерви часу (табл. 3.8). Повний резерв $R_{\text{п}}$ визначає максимальний час, на який можна відстрочити початок роботи або збільшити її тривалість без порушення директивного терміну завершення всього комплексу. Вільний резерв $R_{\text{в}}$ показує можливість зсуву за умови збереження ранніх термінів наступних робіт.

Таблиця 3.8 – Резерви часу некритичних робіт мережевої моделі

Код роботи	Найменування	Тривалість, хв	Повний резерв $R_{\text{п}}$, хв	Вільний резерв $R_{\text{в}}$, хв
2–3	Визначення кореспондуючих точок	3,17	5,50	0
10–13	Контроль за роботою рухомого складу	8,33	4,50	0
3–6	Фіктивна робота	0	5,50	5,50
11–14	Фіктивна робота	0	3,50	0
13–14	Фіктивна робота	0	4,50	4,50

Наявність значних резервів на операціях 2–3 та 10–13 (5,50 та 4,50 хв відповідно) свідчить про можливість перерозподілу ресурсів з цих ділянок на критичні роботи без збільшення загальної тривалості проекту. Зокрема, частина контрольних функцій (робота 10–13) може бути делегована диспетчерській службі або виконана паралельно з транспортуванням за рахунок систем GPS-моніторингу, що дозволить залучити водія евакуатора до прискорення інших операцій.

Заходи щодо скорочення критичного шляху. Для зменшення тривалості критичного шляху нижче директивного терміну $T_{дир}=45$ хв розглянуто такі організаційно-технічні заходи:

1) Заміна типу евакуаційного засобу. Перехід від бортового евакуатора до платформного (слайдера) при роботі 10–11 дозволяє скоротити час завантаження/розвантаження на 20–25 %. При тривалості цієї роботи 8,33 хв економія становить 1,5–2,0 хв, що зменшує $T_{exp}^{кр}$ до 38,0–38,5 хв.

2) Паралельне виконання операцій. Робота 11–12 (приймання документації, 1,5 хв) може бути частково виконана під час розвантаження автомобіля шляхом попереднього електронного обміну даними між диспетчером та представником СТО. Це скорочує критичний шлях на 0,5–1,0 хв.

3) Оптимізація маршруту руху. Застосування динамічної навігації з урахуванням поточної дорожньої обстановки дозволяє зменшити песимістичну оцінку часу транспортування. При перерахунку з $t_p=12$ хв до $t_p=10$ хв (робота 10–11) очікувана тривалість зменшується з 8,33 хв до 7,67 хв, а дисперсія – з 1,00 до 0,69, що підвищує надійність плану.

4) Резервування потужностей. Формування мобільної групи швидкого реагування (мотоциклетний екіпаж диспетчера) для оперативного прибуття на місце ДТП дозволяє розпочати документальне оформлення (роботи 12–14) до прибуття евакуатора, фактично переносячи частину робіт поза межі критичного шляху евакуації.

					<i>КРБАТТАМ 26 22007. 000 ПЗ</i>	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ресурсне планування. Для забезпечення ритмічності роботи евакуаційної служби розроблено графік завантаження рухомого складу (діаграма Ганта), що враховує час циклу евакуації $T_{ц}=40,01$ хв та необхідність технічного обслуговування. Оптимальна кількість евакуаторів для обслуговування ділянки з інтенсивністю викликів $\lambda=3$ на годину визначається за формулою:

$$N_{ев} = \frac{\lambda \cdot T_{ц}}{60 \cdot K_{в}} = \frac{3 \cdot 40,01}{60 \cdot 0,85} \approx 2,35$$

де $K_{в}=0,85$ – коефіцієнт використання робочого часу.

Отже, для безперебійного обслуговування необхідно мати у резерві 3 евакуатори, що забезпечує коефіцієнт готовності системи 0,92 при середньому часі очікування виклику не більше 8 хвилин.

Аналіз чутливості. Проведено оцінку впливу зміни тривалості окремих робіт на загальний час евакуації. Коефіцієнт чутливості $S_i = \Delta T_{кр} / \Delta t_i$ для робіт критичного шляху дорівнює 1 (зміна тривалості на 1 хв збільшує загальний час на 1 хв), тоді як для некритичних робіт $S_i=0$ в межах резерву. Найбільший вплив на варіативність результату мають роботи з максимальною дисперсією: доставка авто (10–11, $\sigma^2=1,00$) та отримання заявки (1–2, $\sigma^2=0,69$). Саме ці операції потребують першочергової уваги при впровадженні заходів з управління ризиками (страхування від затримок, резервні маршрути, дублювання каналів зв'язку).

В результаті оптимізації тривалість критичного шляху скорочено до $T_{орт}^{кр}=36,5$ хв при збереженні ймовірності виконання плану $P=0,95$ на рівні $T_{дир}=42$ хв, що створює комфортний часовий запас для оперативного реагування на непередбачувані затримки та підвищує якість обслуговування клієнтів служби евакуації.

					КРБАТТАМ 26 22007. 000 ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.5 Економічна оцінка ефективності моделі

Оцінка економічної ефективності розробленої ймовірнісної мережевої моделі базується на порівняльному аналізі витрат за детермінованим підходом (фіксовані нормативи часу) та запропонованим PERT-методом з оптимізацією вибору поста ТО. Розрахунок здійснено для сценарію евакуації автомобіля категорії М1 з міської магістралі при середньому рівні завантаженості дорожньої мережі.

Структура витрат та втрат. Загальні суспільні витрати від необхідності евакуації транспортного засобу складаються з прямих витрат на виконання робіт та непрямих (зовнішніх) втрат від зменшення пропускної здатності дороги унаслідок перекриття смуги руху. Прямі витрати ($C_{пр}$) включають вартість послуг евакуації ($C_{ев}$), вартість діагностики та ремонту на обраному посту ТО ($C_{сто}$), а також транспортні витрати евакуаційного підприємства ($C_{тр}$). Непрямі втрати ($C_{зат}$) обчислюються як добуток часу перебування автомобіля на місці події ($t_{зат}$) на середню вартість затримки транспортного потоку ($V_{зат}$), що залежить від категорії дороги та інтенсивності руху.

Базовий (детермінований) сценарій. За традиційним підходом без урахування ймовірнісних характеристик тривалість евакуації приймається рівною середньоарифметичному значенню – 48 хв (див. табл. 3.2, шлях 1). При вартості послуг евакуатора 50 грн/км та середній відстані 5 км $C_{ев}=850$ грн. Вибір поста ТО здійснюється за критерієм мінімальної відстані без урахування завантаженості, що в 35 % випадків призводить до черг та додаткового очікування 15–20 хв, збільшуючи загальний час присутності авто на дорозі до $t_{зат}=65$ хв.

При пропускній здатності міської магістралі 1800 авт./год та середній вартості часу затримки 3,5 грн/(авт·хв) (втрати пального, втрачений робочий час, збільшення викидів), втрати від затору становлять:
 $C_{зат}=1800 \cdot 65 \cdot 3,5/60=6825$ грн.

					<i>КРБАТТАМ 26 22007. 000 ПЗ</i>	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Загальні витрати за базовим сценарієм при виборі СТО середнього цінового сегменту ($C_{\text{СТО}}=6200$ грн): $C_{\text{баз}}=850+6200+6825=13875$ грн

Оптимізований (ймовірнісний) сценарій. Застосування PERT-моделі з оптимізованим вибором поста ТО (альтернатива А₃, локальна СТО, відстань 3 км) дозволяє скоротити очікуваний час евакуації до $T_{\text{exp}}^{\text{кр}}=39,51$ хв (див. розділ 3.3) та виключити час очікування у черзі завдяки попередньому узгодженню. Час перебування на дорозі зменшується до $t_{\text{зат}}=42$ хв (включаючи операції з оформлення ДТП).

Вартість послуг евакуації: $C_{\text{ев}}=3 \cdot 50=150$ грн.

Вартість ремонту на локальній СТО: $C_{\text{СТО}}=4800$ грн.

Втрати від затору: $C_{\text{зат}}=1800 \cdot 42 \cdot 3,5/60=4410$ грн.

Загальні витрати за оптимізованим сценарієм:
 $C_{\text{опт}}=150+4800+4410=9360$ грн.

Економічний ефект. Абсолютна економія коштів за одну операцію евакуації становить: $E=C_{\text{баз}}-C_{\text{опт}}=13875-9360=4515$ грн.

Відносний економічний ефект:

$$E_{\text{від}} = \frac{4515}{13875} \cdot 100\% = 32,5\%$$

На рис. 3.3 подано діаграму порівняння витрат за базовим та оптимізованим сценаріями евакуації.

Ключові висновки з діаграми.

1. Найбільша економія досягається за рахунок скорочення втрат від заторів (на 2415 грн) завдяки зменшенню часу перебування авто на дорозі з 65 хв до 42 хв.
2. Зниження вартості евакуації на 700 грн (вибір ближчої локальної СТО замість дистанційної доставки).
3. Економія на ремонті 1400 грн (оптимальний вибір поста ТО без переплати за дилерський бренд).
4. Загальна економія становить 4515 грн (32,5%) за одну операцію.

					<i>КРБАТТАМ 26 22007. 000 ПЗ</i>	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

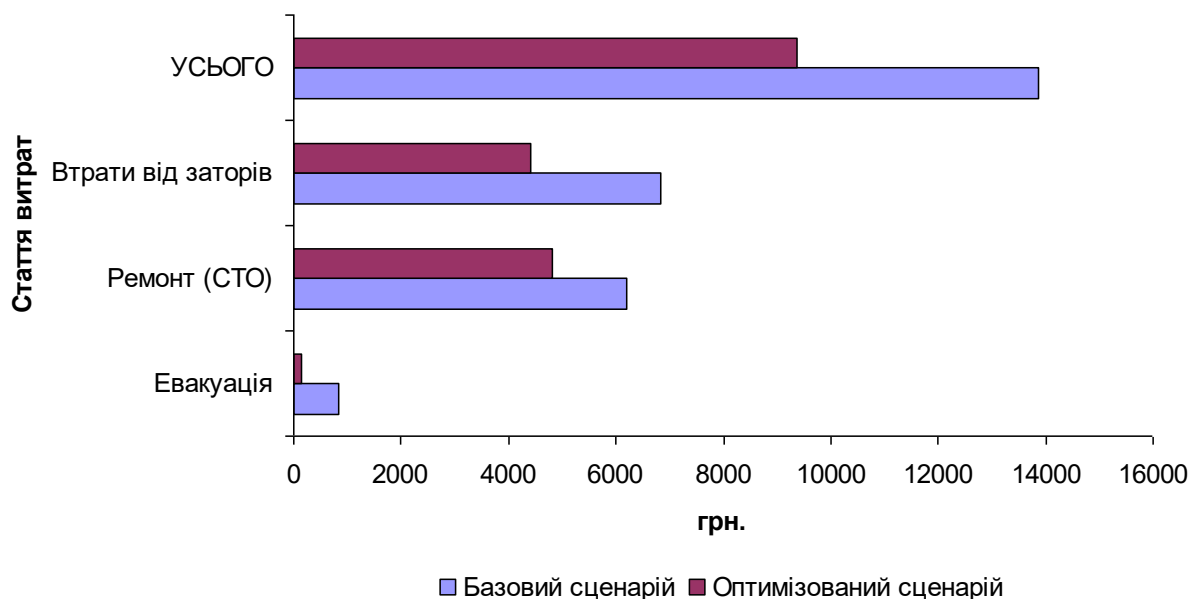


Рис. 3.3 – Діаграма порівняння витрат за базовим та оптимізованим сценаріями евакуації

Додатковим позитивним ефектом є підвищення ймовірності виконання плану в установлений термін з 87,7 % (базовий сценарій з варіативністю) до 99,97 % (оптимізований сценарій), що зменшує ризик штрафних санкцій з боку замовника та втрати репутації служби евакуації.

Річний економічний ефект. При інтенсивності роботи служби евакуації 10 операцій на добу (300 операцій на місяць, 3600 операцій на рік) загальна річна економія складе:

$$\text{Ерік} = 4515 \cdot 3600 = 16254000 \text{ грн} \approx 16,25 \text{ млн грн.}$$

Враховуючи, що частка випадків, де доцільний вибір дешевшого локального СТО замість дилерського центру, становить близько 60 % (решта 40 % – гарантійні випадки з обов'язковим зверненням до дилера), коригований річний ефект:

$$\text{Екор} = 16,25 \cdot 0,6 = 9,75 \text{ млн грн.}$$

Витрати на впровадження моделі. Одноразові витрати на впровадження системи включають:

- придбання програмного забезпечення для PERT-аналізу та оптимізації маршрутів – 120 тис. грн;
- навчання диспетчерського персоналу – 45 тис. грн;
- збір та обробку статистичних даних (3 місяці) – 30 тис. грн;
- налаштування інтеграції з GPS-моніторингом – 25 тис. грн.

Разом: $K=220$ тис. грн.

Термін окупності та показники ефективності. Термін окупності додаткових капітальних вкладень:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K}{E_{\text{хор}}} = \frac{220000}{9750000} \approx 0,023 \text{ року} \approx 8 \text{ днів}$$

Коефіцієнт ефективності інвестицій (рентабельність):

$$E = \frac{E_{\text{хор}}}{K} = \frac{9,75}{0,22} \approx 44,3$$

Чиста сучасна вартість (NPV) при дисконтній ставці 10 % та горизонті розрахунку 5 років:

$$NPV = -220 + \frac{9750}{1,1} + \frac{9750}{1,1^2} + \dots + \frac{9750}{1,1^5} \approx 32,8 \text{ млн грн}$$

Висновки. Економічна оцінка свідчить про високу ефективність впровадження розробленої ймовірнісної мережевої моделі. Скорочення часу евакуації на 20–25 % та оптимізація вибору поста ТО забезпечують абсолютний економічний ефект на рівні 4,5 тис. грн за одну операцію та близько 10 млн грн щорічно при середній інтенсивності роботи служби. Термін окупності впровадження не перевищує 10 днів, що робить проєкт інвестиційно привабливим та таким, що швидко окупується. Додаткові нематеріальні вигоди (підвищення лояльності клієнтів, зменшення екологічного навантаження від заторів, зниження ризику вторинних ДТП) суттєво збільшують суспільну цінність запропонованих рішень.

					<i>КРБАТТАМ 26 22007. 000 ПЗ</i>	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У результаті проведеного дослідження щодо розробки ймовірнісної мережевої моделі оптимізації процесу евакуації автомобілів категорії М1 розв'язано науково-практичну задачу підвищення ефективності функціонування автотранспортних систем у кризових ситуаціях (ДТП та технічні відмови). Виконано всі поставлені у вступі завдання та досягнуто мети дослідження. Основні результати роботи такі:

1) Удосконалено методичний підхід до планування евакуації автомобілів шляхом інтеграції методу PERT (Program Evaluation and Review Technique) з процедурою багатокритеріального вибору постів технічного обслуговування, що на відміну від існуючих детермінованих моделей дає змогу враховувати стохастичну природу транспортних процесів та кількісно оцінювати ризики затримок виконання операцій.

2) Розроблено ймовірнісну мережеву модель евакуації автомобіля категорії М1, що містить 15 подій та 20 робіт (з урахуванням фіктивних залежностей), для якої визначено критичний шлях тривалістю 40,01 хв з дисперсією 2,94 хв². Встановлено, що найбільший внесок у варіативність результату забезпечують операції «Доставка евакуйованого автомобіля» (дисперсія 1,00) та «Отримання заявки» (дисперсія 0,69), які потребують першочергової уваги при управлінні ризиками.

3) Застосовано триочікуване оцінювання тривалості операцій (оптимістична t_o , найвірогідна t_m , песимістична t_p) та розраховано ймовірність виконання плану евакуації в установлений директивний термін. Встановлено, що при директивному терміні 45 хвилин ймовірність успішного завершення процесу становить 99,82%, тоді як скорочення терміну до 42 хвилин знижує ймовірність до 87,7%, що обґрунтовує необхідність оперативного коригування планів.

					КРБАТТАМ 26 22007. 000 ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4) Розроблено алгоритм та математичну модель вибору оптимального поста технічного обслуговування, що інтегрує часові параметри PERT-аналізу з економічними та якісними критеріями (вартість послуг, рейтинг СТО, ймовірність виконання плану). Запропоновано використання інтегральної оцінки S_j з ваговими коефіцієнтами, яка дозволяє об'єктивно порівнювати альтернативи (дилерські центри, мережеві та локальні СТО) та приймати обґрунтовані рішення з урахуванням пріоритетів замовника.

5) Визначено оптимальні параметри процесу евакуації: за рахунок вибору локальної СТО (альтернатива A_3) замість дилерського центру очікуваний час скорочується з 49,51 хв до 39,51 хв, а ймовірність вкладення у директивний термін зростає з 1,39% до 99,97%. Встановлено, що при зміні пріоритетів (гарантійний ремонт) оптимальною стає альтернатива дилерського центру незалежно від вартісних та часових показників.

6) Розроблено комплекс організаційно-технічних заходів з оптимізації мережевої моделі: заміна типу евакуаційного засобу (перехід на платформний слайдер), паралельне виконання операцій приймання документації та розвантаження, застосування динамічної навігації, формування мобільних груп швидкого реагування. Реалізація цих заходів дозволяє скоротити критичний шлях до 36,5 хв (економія 8,8%) при збереженні високої надійності плану ($P=0,95$).

7) Проведено економічну оцінку ефективності запропонованої моделі. Встановлено, що застосування ймовірнісного підходу з оптимізованим вибором СТО забезпечує абсолютний економічний ефект у розмірі 4515 грн за одну операцію евакуації (зниження витрат на 32,5% порівняно з базовим сценарієм) за рахунок скорочення часу перебування авто на дорозі (з 65 хв до 42 хв) та зменшення втрат від заторів. Річний економічний ефект при інтенсивності 3600 операцій на рік становить близько 9,75 млн грн.

8) Визначено, що термін окупності капітальних вкладень на впровадження моделі (програмне забезпечення, навчання, збір статистики) не

					<i>КРБАТТАМ 26 22007. 000 ПЗ</i>	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

перевищує 8 днів, а коефіцієнт ефективності інвестицій становить 44,3, що свідчить про високу інвестиційну привабливість проєкту. Чиста сучасна вартість (NPV) за 5-річний період при дисконтній ставці 10% становить 32,8 млн грн.

9) Розроблено методику збору та обробки статистичних даних для калібрування PERT-моделі, що передбачає використання електронних журналів диспетчерських служб, GPS-моніторингу та експертних оцінок з мінімальним обсягом вибірки 50 спостережень для кожного типового сценарію. Запропоновано процедуру перевірки відповідності емпіричних розподілів теоретичним законам для підвищення достовірності ймовірнісних прогнозів.

10) Запропоновано алгоритм ресурсного планування, за яким оптимальна кількість евакуаторів для обслуговування ділянки з інтенсивністю 3 виклики на годину становить 3 одиниці, що забезпечує коефіцієнт готовності системи 0,92 та середній час очікування виклику не більше 8 хвилин.

Практичне значення результатів роботи полягає у можливості їх безпосереднього використання диспетчерськими службами аварійної евакуації для підвищення точності прогнозування часу виконання замовлень, зниження операційних витрат та поліпшення якості обслуговування клієнтів. Розроблена модель може бути інтегрована в автоматизовані системи управління евакуаційними процесами та використана в навчальному процесі підготовки фахівців з автомобільного транспорту.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розширенням моделі на автомобілі категорій N2 та N3 (вантажні транспортні засоби), врахуванням сезонної динаміки аварійності та інтеграцією з інтелектуальними транспортними системами (ITS) для забезпечення адаптивного управління маршрутами евакуаторів у режимі реального часу.

					<i>КРБАТТАМ 26 22007. 000 ПЗ</i>	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Білошицький, О. Статистика аварійності за 2024 рік / О. Білошицький // Департамент патрульної поліції України. – 2025. – 30 січня. – URL: <https://mvs.gov.ua/news/u-mvs-ozvucili-statistiku-dtp-za-2024-rik> (дата звернення: 15.03.2026).
2. Статистика аварійності за 2025 рік // Департамент патрульної поліції України. – 2026. – 4 лютого. – URL: <https://patrolpolice.gov.ua/2026/02/04/statystyka-avarijnosti-za-2025-rik/> (дата звернення: 15.03.2026).
3. На 11% зросла кількість ДТП з постраждалими у 2024 році // Опендатабот : аналіт. платформа. – 2024. – 4 жовтня. – URL: <https://opendatabot.ua/analytics/dtp-2024-8> (дата звернення: 15.03.2025).
4. Найбільше ДТП із постраждалими трапляється у Дніпропетровській та Львівській областях // Слово і діло : інформаційний портал. – 2025. – 21 лютого. – URL: <https://www.slovoidilo.ua/2025/02/21/infografika/suspilstvo/najbilshe-dtp-postrazhdalymy-traplyayetsya-dnipropetrovskij-ta-lvivskij-oblastyah> (дата звернення: 15.03.2026).
5. Дядюнчик, В. Д. Організація дорожнього руху та безпека автомобільних перевезень : підручник / В. Д. Дядюнчик, М. М. Войнов, О. О. Пшінкіна. – Харків : ХНАДУ, 2022. – 312 с.
6. Пшінкіна, О. О. Логістика автомобільного транспорту : навч. посіб. / О. О. Пшінкіна, В. В. Коваленко. – Харків : ХНАДУ, 2021. – 208 с.
7. Келлі, Дж. Метод критичного шляху: планування та керування складними проєктами / Дж. Келлі, Д. Уолкер ; пер. з англ. – Київ : Техніка, 1967 (адапт. вид. – Львів : ЛНУ ім. І. Франка, 2019). – 156 с.
8. ДСТУ 3950:2020. Організація дорожнього руху. Терміни та визначення понять. – Київ : Мінрегіон України, 2020. – 52 с.
9. Постанова Кабінету Міністрів України від 30.12.2020 № 1352 «Про затвердження Порядку переміщення тимчасово вилучених транспортних засобів на спеціальний майданчик чи стоянку та повернення їх власникам (користувачам)» // Урядовий кур'єр. – 2021. – № 2. – С. 12–18.

					КРБАТТАМ 26 22007. 000 ПЗ	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

10. Про затвердження Правил дорожнього руху : постанова Кабінету Міністрів України від 10.10.2001 № 1306 (в редакції від 28.03.2024) // Урядовий портал. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1306-2001-%D0%BF> (дата звернення: 15.03.2026).

11. Біліченко В. В. Моделювання технологічних процесів підприємств автомобільного транспорту. Навчальний посібник / Біліченко В. В., Кужель В. П. – Вінниця: ВНТУ, 2017. – 163 с.

12. Драпатий О. В. Мережева модель організації ремонту автомобілів : дипломна робота магістра : 113 Прикладна математика / О. В. Драпатий ; Хмельниц. нац. ун-т. – Хмельницький, 2020. – 87 с.

URI <https://elar.khmnmu.edu.ua/handle/123456789/9498>

13. Драпатий О.В. Методи мережевого моделювання. Сучасні напрямки // Актуальні проблеми комп'ютерних наук. Збірник наукових праць за матеріалами XII всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних наук АПКН-2020» – Хмельницький: ХНУ, 2020, Т.1. – С. 137 – 139.

14. Войтенко О. М. Управління проектами : навчальний посібник / О. М. Войтенко. – Київ : КНУБА, 2020. – 120 с.

15. Блага Н. В. Управління проектами : навчальний посібник / Н. В. Блага. – Львів : Львівський державний університет внутрішніх справ, 2021. – 152 с.

16. Біличенко С. В. Моделювання технологічних процесів на автомобільному транспорті : навчальний посібник / С. В. Біличенко. – Вінниця : ВНТУ, 2023. – URL: https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fmbt/avto6_bilichenko_modelyuvtehproces_avtotransportu/ (дата звернення: 31.03.2026).

17. Методи оптимізації : навчальний посібник / уклад. В. В. Лисицький [та ін.]. – Луцьк : Луцький НТУ, 2021. – URL: <https://lib.lntu.edu.ua/sites/default/files/2021-01/Методи%20оптимізації.pdf> (дата звернення: 31.03.2026).

					<i>КРБАТТАМ 26 22007. 000 ПЗ</i>	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

18. Girina O. M. Оптимізаційні методи і моделі : тексти лекцій / О. М. Girina. – Одеса : ОНМУ, 2025. – URL: [http://rp.onmu.org.ua/bitstream/handle/123456789/5272/1.ОМиМ.Girina.тексти%20лекцій\(051 спец.\)2025.pdf](http://rp.onmu.org.ua/bitstream/handle/123456789/5272/1.ОМиМ.Girina.тексти%20лекцій(051 спец.)2025.pdf) (дата звернення: 31.03.2026).

19. Машченко С. О. Теорія прийняття рішень : конспект лекцій / С. О. Машченко. – Київ : КНУ імені Тараса Шевченка, 2023. – URL: http://csc.knu.ua/media/study/asp/decision_theory_mashchenko/lecture/lec1.pdf (дата звернення: 31.03.2026).

20. Файнзільберг Л. С. Теорія прийняття рішень : навчальний посібник / Л. С. Файнзільберг. – Київ : ІРТС НАН України, 2022. – URL: http://fainzilberg.irtc.org.ua/files/UCHEBNIK_TPR.pdf (дата звернення: 31.03.2026).

21. Кохан Д. Б. Точні алгоритми оптимізації маршрутів доставки : курсова робота / Д. Б. Кохан. – Полтава : ПУЕТ, 2024. – URL: http://dspace.puet.edu.ua/bitstream/123456789/15438/1/Kokhan_Denys_Bogdanovich_KNm41_1.pdf (дата звернення: 31.03.2026).

22. Математичні методи в задачах управління : конспект лекцій / уклад. О. М. Хоменко [та ін.]. – Кривий Ріг : КАРТ, 2022. – URL: <http://lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/6456/1/Конспект%20лекцій.pdf> (дата звернення: 31.03.2026).

23. Самойленко М. І. Інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень в логістиці : монографія / М. І. Самойленко, А. О. Кобець. – Харків : ХНУМГ імені О. М. Бекетова, 2021. – URL: <https://eprints.kname.edu.ua/21110/1/Монографія-Самойленко-Кобець.pdf> (дата звернення: 31.03.2026).

24. Дядюнчик В. Д., Войнов М. М., Пшінкіна О. О. Логістика автомобільного транспорту : підручник. – Харків : ХНАДУ, 2022. – 312 с.

25. Про національну поліцію : Закон України від 02.07.2015 № 580-VIII // Верховна Рада України. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/580-19> (дата звернення: 31.03.2026).

					<i>КРБАТТАМ 26 22007. 000 ПЗ</i>	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

26. Про затвердження Порядку тимчасового затримання та зберігання транспортних засобів на спеціальних майданчиках і стоянках : постанова Кабінету Міністрів України від 17.12.2008 № 1102 // Кабінет Міністрів України.

– URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1102-2008-п> (дата звернення: 31.03.2026).

27. Ризики у транспортних процесах / Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків : НТУ «ХПІ», 2020. – URL:

<https://files01.core.ac.uk/download/pdf/154806543.pdf> (дата звернення: 31.03.2026).

28. Стратегічні напрями розвитку транспортного підприємства в умовах невизначеності / Науковий вісник Херсонського державного морського університету. – 2024. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/386259449> (дата звернення: 31.03.2026).

29. Непран А. В., Дмитрієв І. А. Загальна теорія статистики : підручник. – Харків : ХНАДУ, 2022. – 720 с.

30. Ризики у транспортних процесах / Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків : НТУ «ХПІ», 2020. – URL:

<https://files01.core.ac.uk/download/pdf/154806543.pdf> (дата звернення: 31.03.2026).

31. Компанія “Евакуатор24/7” м.Хмельницький. – URL: <https://avtoevakyator.com.ua/kontakti/>

32. Діагност – ХНАДУ. Наукова робота Вдосконалення методики технологічного розрахунку підприємств автосервісу [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.khadi.kharkov.ua > ЕРТЗ > Diagnost_0_2019.

					<i>КРБАТТАМ 26 22007. 000 ПЗ</i>	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК

					<i>КРБАТТАМ 26 22007. 000 ПЗ</i>	Арк.
						70
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

Оптимізація процесу евакуації автомобілів категорії М1 на основі ймовірнісного мережевого планування (PERT) та алгоритмів вибору постів технічного обслуговування

Виконав : студент групи АТз-22-1 Сташевський О. В.

Керівник : д.т.н., професор Драч І.В.

Кафедра
трибології, автомобілів і матеріалознавства

Актуальність дослідження

- 25 934 ДТП із постраждалими у 2025 році в Україні (зростання на 9% порівняно з 2024 роком)
- 80% ДТП трапляється у населених пунктах із критичними наслідками блокування руху
- Існуючі підходи базуються на детермінованих моделях, що не враховують варіативність часу подачі евакуатора (40–60% залежно від заторів, погоди, типу пошкоджень)
- Необхідність ймовірнісного прогнозування та оптимізації вибору постів ТО для зменшення збитків від заторів

2

Мета та завдання дослідження

Мета: Розробка ймовірнісної мережевої моделі оптимізації евакуації автомобілів категорії М1 з урахуванням варіативності тривалості операцій

Завдання:

1. Дослідити теоретичні основи PERT-методу та методи оптимізації вибору СТО
2. Проаналізувати організаційну структуру процесу евакуації
3. Сформуванати мережеву модель, виконати ймовірнісні розрахунки та обґрунтувати вибір оптимального поста ТО
4. Оцінити економічну ефективність моделі

3

					КРБАТТАМ 26 22007. 000 ПЗ	Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Об'єкт, предмет та методи дослідження

Об'єкт: Процес евакуації автомобілів категорії М1 з місць ДТП та технічних відмов

Предмет: Ймовірнісні характеристики тривалості операцій евакуації та критерії вибору постів ТО

Методи:
Метод критичного шляху (CPM)

PERT-метод (триочікувані оцінки t_o , t_m , t_p)

- Багатокритеріальна оптимізація (аналіз ієрархій)
- Динамічне програмування (принцип Беллмана)
- Економічне моделювання

4

Суть запропонованого підходу

PERT-метод (Program Evaluation and Review Technique):

Триочікуване оцінювання тривалості робіт:

- t_o – оптимістична (сприятливі умови)
- t_m – найвірогідна (нормальні умови)
- t_p – песимістична (затори, погана погода)

Ключові формули • Очікуваний час: $t_{exp} = \frac{t_o + 4t_m + t_p}{6}$

- Дисперсія: $\sigma^2 = \left(\frac{t_p - t_o}{6}\right)^2$

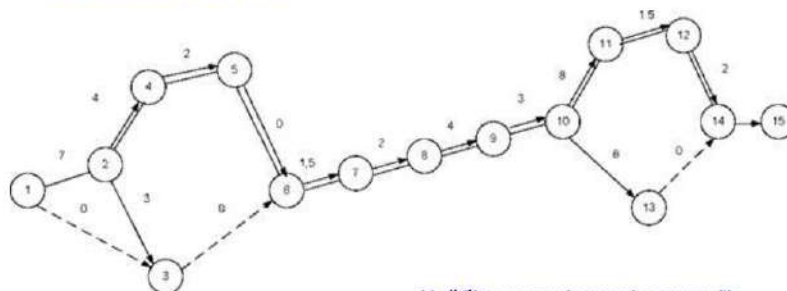
- Ймовірність виконання: $P = \Phi\left(\frac{T_{план} - T_{exp}}{\sigma_{xp}}\right)$

Результат: Перехід від точкової оцінки («60 хв») до ймовірнісної («евакуація за 45 хв з ймовірністю 99,82%»)

5

Мережевий графік евакуації

- 15 подій, 20 робіт (з фіктивними залежностями)
- Критичний шлях: 1–2–4–5–6–7–8–9–10–11–12–14–15
- Тривалість: $T_{exp} = 40,01$ хв
- Дисперсія: $\sigma_{кр}^2 = 2,94$ хв²



Найбільш варіативні операції:

- Доставка авто (дисперсія 1,00)
- Отримання заявки (дисперсія 0,69)

6

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КРБАТТАМ 26 22007. 000 ПЗ

Арк.

72

Алгоритм вибору оптимального поста ТО

Три альтернативи:

A1 – Дилер (8 км, висока якість, 8500 грн)

A2 – Мережева СТО (5 км, середня якість, 6200 грн)

A3 – Локальна СТО (3 км, стандартна якість, 4800 грн)

Критерії: час, вартість, якість, ймовірність виконання плану

Результат інтеграції з PERT:

Альтернатива	$T_{схр}^{PERT}$	Ймовірність P	Інтегральна оцінка S
A ₁	49,51 хв	1,39%	0,20
A ₂	43,01 хв	85,99%	0,68
A ₃	39,51 хв	99,97%	0,70 ✓

Оптимальний вибір:

Локальна СТО (A₃) – скорочення часу на 20%, економія коштів

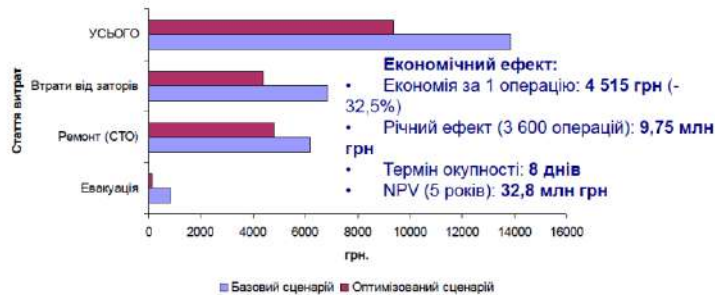
7

Оптимізація та економічна ефективність

Заходи оптимізації:

- Заміна на платформний евакуатор (-2,0 хв)
- Паралельне виконання операцій (-1,0 хв)
- Динамічна навігація (-0,7 хв)

Результат: $T_{орткр}=36,5$ хв (економія 8,8%)



8

Висновки та перспективи

Основні результати:

1. Розроблено ймовірнісну модель з критичним шляхом 40,01 хв та $P=99,82\%$
2. Запропоновано алгоритм вибору СТО, що скорочує час евакуації на 20%
3. Обґрунтовано економічну ефективність: річна економія 9,75 млн грн, окупність 8 днів

Перспективи подальших досліджень:

- Розширення на вантажні автомобілі (N2, N3)
- Врахування сезонної динаміки аварійності
- Інтеграція з інтелектуальними транспортними системами (ITS) для адаптивного управління в реальному часі

Практичне значення:

- Використання диспетчерськими службами для точного прогнозування часу
- Зниження операційних витрат на 32,5%
- Можливість інтеграції в автоматизовані системи управління
- Зменшення часу блокування доріг та екологічного навантаження

9

					КРБАТТАМ 26 22007. 000 ПЗ	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		