

Міністерство освіти і науки України
Луцький національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)
Факультет транспорту та механічної інженерії
(повне найменування факультету)
Кафедра автомобілів і транспортних технологій
(повне найменування кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «МАГІСТР»
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОРГАНІЗАЦІЇ ПЕРЕВЕЗЕНЬ
БУДІВЕЛЬНИХ ВАНТАЖІВ

Спеціальність: 275 Транспортні технології (на
автомобільному транспорті)

Освітня програма: Транспортні технології (на
автомобільному транспорті)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ТТм-21
Віталій ФЕДИК

Керівник:
д.ф., доцент
Вікторія КОТЕНКО

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
„_____” _____ 2025 р.

к.т.н., доцент
Гарант освітньої програми:
Ігор МУРОВАННИЙ

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет транспорту та механічної інженерії

Кафедра автомобілів і транспортних технологій

Ступінь вищої освіти: магістр

Галузь знань: 27 Транспорт

Спеціальність: 275.03 Транспортні технології (на автомобільному транспорті)

Освітня програма: «Транспортні технології (на автомобільному транспорті)»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою автомобілів і
транспортних технологій

_____ В. ОНИЩУК

„_____” _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Федику Віталію Михайловичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Підвищення ефективності організації перевезень будівельних вантажів

Керівник роботи: д.ф., доцент Вікторія КОТЕНКО

затверджені наказом закладу вищої освіти від «26» листопада 2025 р. № 500/01-02.

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи «16» грудня 2025 року.

3. Вихідні дані до роботи: фінансова та внутрішня звітність ТОВ «ЖИТЛОБУД-2»

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що потрібно розробити):

Вступ

1. Дослідження організації перевезень ТОВ «ЖИТЛОБУД-2»

2. Організація транспортного процесу доставки будівельних вантажів

3. Розробка заходів щодо удосконалення перевезень будівельних вантажів

4. Економічна ефективність запропонованих заходів щодо підвищення ефективності перевезень будівельних вантажів

Загальні висновки

5. Перелік ілюстративного матеріалу:

Титульний аркуш, мета, об'єкт, предмет, завдання досліджень; основні результати досліджень, висновки

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання «04» лютого 2025 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Аналіз вихідних даних</i>	16.09.2025	
2.	<i>Аналіз діяльності підприємства</i>	30.09.2025	
3.	<i>Дослідження особливостей організації перевезення будівельних матеріалів як системи масового обслуговування</i>	07.10.2025	
4.	<i>Аналіз маршруту доставки будівельних вантажів ТОВ «ЖИТЛОБУД-2»;</i>	14.10.2025	
5.	<i>Статистичний аналіз роботи транспортних засобів та встановити закон розподілу інтервалів прибуття автомобілів під навантаження та закону розподілу часу</i>	28.10.2025	
6.	<i>Розрахунок раціональної вантажопідйомності транспортних засобів, задіяних у процесі перевезення будівельних матеріалів</i>	11.11.2025	
7.	<i>Визначення параметрів процесу перевезення піску як одноканальної та двоканальної системи масового обслуговування</i>	18.11.2025	
8.	<i>Встановлення оптимальної кількості транспортних засобів під час транспортування піску за критерієм мінімальної собівартості простой</i>	25.11.2025	
9.	<i>Перевірка кваліфікаційної роботи керівником</i>	02.12.2025	
10.	<i>Оформлення пояснювальної записки та ілюстративного матеріалу відповідно до вимог</i>	10.12.2025	
11.	<i>Захист кваліфікаційної роботи</i>	Згідно з графіком	

Здобувач вищої освіти

(підпис)

В. ФЕДИК

(прізвище, ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

(підпис)

В. КОТЕНКО

(прізвище, ініціали)

АНОТАЦІЯ

Федик В. М. Підвищення ефективності організації перевезень будівельних вантажів. Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра ОП «Транспортні технології (на автомобільному транспорті)» спеціальності 275.03 «Транспортні технології (на автомобільному транспорті)». Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2025.

Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків та переліку джерел посилання. Робота містить 71 сторінку основного тексту, 13 таблиць, 20 рисунків, 21 джерело посилань.

Ефективна організація перевезень будівельних матеріалів є важливою складовою безперебійної роботи будівельних підприємств, оскільки своєчасна доставка ресурсів впливає на ритмічність виконання робіт та собівартість будівництва. Одним із найбільш ефективних інструментів оптимізації є моделі систем масового обслуговування, що дозволяють оцінити та оптимізувати взаємодію транспортних засобів і навантажувальної техніки.

Метою кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності організації перевезень будівельних вантажів на матеріалів ТОВ «ЖИТЛОБУД-2». Об'єкт дослідження — процес організації перевезень будівельних матеріалів ТОВ «ЖИТЛОБУД-2». Предмет дослідження — теоретичні, методичні та прикладні основи підвищення ефективності організації перевезень будівельних матеріалів на підприємстві.

У роботі проаналізовано діяльність підприємства та структуру перевезень, досліджено роботу парку рухомого складу, виконано статистичний аналіз інтервалів прибуття автомобілів та тривалості навантаження, визначено раціональну вантажопідйомність транспортних засобів та параметри процесу перевезення піску як одноканальної та двоканальної систем масового обслуговування. Також встановлено оптимальну кількість транспортних засобів за критерієм мінімізації витрат простою.

Ключові слова: будівельні вантажі, транспортний процес, системи масового обслуговування, оптимізація перевезень, простої, ефективність транспортування.

ANNOTATION

Fedyk Vitalii. Improvement of the Transport Process for the Delivery of Packaged and Unitized Cargo. Manuscript.

Qualification work of the Master of Educational program "Transport technologies (on road transport)" specialty 275.03 "Transport technologies (on road transport)". Lutsk National Technical University. Lutsk, 2025.

The thesis consists of an introduction, four chapters, conclusions, a list of references. The work includes 78 pages of main text, 13 tables, 20 figures, and 21 reference sources.

Efficient organization of construction material transportation is a key component of the uninterrupted operation of construction enterprises, as timely delivery of resources affects the continuity of work and the overall cost of construction. One of the most effective optimization tools is the use of queuing system models, which make it possible to assess and optimize the interaction between vehicles and loading equipment.

The aim of the qualification thesis is to improve the efficiency of organizing the transportation of construction materials at LLC "ZHITLOBUD-2". The object of the study is the process of organizing the transportation of construction materials at LLC "ZHITLOBUD-2". The subject of the study comprises the theoretical, methodological, and applied foundations for improving the efficiency of construction material transportation at the enterprise.

The thesis analyzes the company's activities and transportation structure, examines the performance of the vehicle fleet, conducts statistical analysis of vehicle arrival intervals and loading durations, determines the rational carrying capacity of vehicles, and evaluates the parameters of sand transportation within single-channel and dual-channel queuing systems. The optimal number of vehicles is also identified based on the criterion of minimizing idle-time costs.

Keywords: construction materials, transportation process, queuing systems, transportation optimization, idle time, transportation efficiency.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 ДОСЛІДЖЕННЯ ОРГАНІЗАЦІЇ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ТОВ «ЖИТЛОБУД-2»	11
1.1 Загальна характеристика ТОВ «ЖИТЛОБУД-2».....	11
1.2 Аналіз основних напрямків перевезень ТОВ «ЖИТЛОБУД-2»	15
1.3 Аналіз основних вантажів ТОВ «ЖИТЛОБУД-2».....	16
1.4 Аналіз парку рухомого складу ТОВ «ЖИТЛОБУД-2»	17
Висновки до розділу 1	21
2 ОРГАНІЗАЦІЯ ТРАНСПОРТНОГО ПРОЦЕСУ ДОСТАВКИ БУДІВЕЛЬНИХ ВАНТАЖІВ.....	23
2.1 Організація перевезень будівельних вантажів як системи масового обслуговування.....	23
2.2 Аналіз організації перевезень будівельних вантажів	27
2.3 Аналіз навантажувальних робіт при здійсненні перевезень	31
Висновки до розділу 2	33
3 РОЗРОБКА ЗАХОДІВ ЩОДО УДОСКОНАЛЕННЯ ПЕРЕВЕЗЕНЬ БУДІВЕЛЬНИХ ВАНТАЖІВ.....	34
3.1. Визначення раціональної вантажопідйомності рухомого складу	34
3.2 Встановлення статистичних закономірностей інтервалів прибуття автомобілів та тривалості навантаження.....	37
3.3 Визначення оптимального співвідношення автомобілів та навантажувальних засобів.....	47
Висновки до розділу 3	53
4 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАПРОПОНОВАНИХ ЗАХОДІВ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРЕВЕЗЕНЬ БУДІВЕЛЬНИХ ВАНТАЖІВ	55
4.1 Оцінка оптимального варіанту організації роботи в пункті навантаження транспортних засобів.....	55
Висновки до розділу 4	60

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	62
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	65

ВСТУП

Актуальність теми. Ефективна організація транспортного процесу є важливим фактором стабільної роботи будівельної галузі, оскільки своєчасна доставка матеріалів прямо впливає на ритмічність виконання будівельно-монтажних робіт та загальну собівартість будівництва. Автомобільний транспорт, будучи найманевренішим та найпристосованішим до умов будівельного виробництва, забезпечує оперативне переміщення вантажів від підприємств-виробників безпосередньо на будівельні майданчики. Однак висока інтенсивність вантажопотоків, сезонність робіт, оперативні зміни у графіках будівництва та значна вартість простоїв формують потребу в науково обґрунтованому управлінні транспортними процесами.

Сучасні умови функціонування будівельних підприємств вимагають оптимізації роботи як транспортних засобів, так і навантажувально-розвантажувальних механізмів, адже саме їхня взаємодія визначає рівень ефективності всього логістичного циклу. З цієї точки зору зростає потреба у використанні математичних методів, які дозволяють оцінити, спрогнозувати та оптимізувати роботу транспортної системи.

Особливого значення набуває використання теорії систем масового обслуговування (СМО), яка дозволяє моделювати прибуття автомобілів, утворення черг та роботу навантажувальних механізмів. Завдяки цьому можна оцінити завантаження техніки, визначити закономірності виникнення простоїв і встановити оптимальне співвідношення між кількістю транспортних засобів та каналами обслуговування. Застосування СМО дає змогу мінімізувати витрати часу й коштів, пов'язані з простоями, що є важливим у будь-якій галузі.

Поряд з цим проблематика організації будівельних перевезень широко досліджувалася українськими науковцями, зокрема М. Босняком [1], М. Оліскевичем [2], О. Горяїновим О. М. [3], Ю. Жерновим [4], К. Ковцур [5]. Їхні напрацювання підтверджують важливість використання наукових методів,

включно з системами масового обслуговування, для підвищення економічної ефективності перевезень, зокрема будівельних вантажів.

Таким чином, актуальність теми визначається необхідністю забезпечення безперебійної роботи будівництва, зменшення витрат на транспортне обслуговування, а також доцільністю застосування моделей СМО як інструменту оптимізації взаємодії транспортних засобів та навантажувальної техніки в умовах високої інтенсивності потоків та зростання вимог до ефективності логістичних систем.

Метою *кваліфікаційної* роботи є підвищення ефективності організації перевезень будівельних вантажів на матеріалів ТОВ «ЖИТЛОБУД-2».

Відповідно до поставленої мети, було сформульовано наступні завдання:

- здійснити аналіз діяльності роботи ТОВ «ЖИТЛОБУД-2»;
- проаналізувати основні напрями та структуру, що транспортуються ТОВ «ЖИТЛОБУД-2»;
- провести аналіз парку рухомого складу підприємства;
- дослідити особливості організації перевезення будівельних матеріалів як системи масового обслуговування;
- проаналізувати актуальний маршрут доставки будівельних вантажів ТОВ «ЖИТЛОБУД-2»;
- виконати статистичний аналіз роботи транспортних засобів та встановити закон розподілу інтервалів прибуття автомобілів під навантаження та закону розподілу часу навантаження автомобілів ТОВ «ЖИТЛОБУД-2»;
- розрахувати раціональну вантажопідйомність транспортних засобів, задіяних у процесі перевезення будівельних матеріалів;
- визначити параметри процесу перевезення піску як одноканальної та двоканальної системи масового обслуговування;
- визначити оптимальну кількість транспортних засобів під час транспортування піску за критерієм мінімальної собівартості простоїв.

Об'єктом дослідження є процес організації перевезень будівельних матеріалів ТОВ «ЖИТЛОБУД-2».

Предметом дослідження є теоретичні, методичні та прикладні основи підвищення ефективності організації перевезень будівельних матеріалів на підприємстві.

Методи дослідження. У процесі дослідження було застосовано методи теоретичного узагальнення та системного аналізу, синтезу, а також статистичний аналіз та математичне моделювання тощо.

Інформаційною базою дослідження матеріали фахових періодичних видань, монографії, дисертації, наукові праці вітчизняних та зарубіжних вчених, методичні рекомендації, внутрішня звітність підприємства та електронні ресурси.

Наукова новизна отриманих результатів. У роботі визначено основні підходи для підвищення ефективності транспортування будівельних матеріалів, а також розроблено рекомендації щодо типу та кількості транспортних засобів у процесі доставки піску ТОВ «ЖИТЛОБУД-2».

Практичне значення одержаних результатів. Викладені в роботі розроблені заходи мають прикладне значення та можуть використовуватися в стратегічному та оперативному плануванні організації транспортного процесу доставки будівельних матеріалів ТОВ «ЖИТЛОБУД-2».

Апробація результатів роботи. Основні положення роботи були оприлюднені V студентській науково-технічній конференції факультету транспорту та механічної інженерії «Інноваційні технології в транспорті та механічній інженерії» (ЛНТУ, Луцьк).

За проведеними у роботі дослідженнями опубліковано 1 тези доповіді.

1 ДОСЛІДЖЕННЯ ОРГАНІЗАЦІЇ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ТОВ «ЖИТЛОБУД-2»

1.1 Загальна характеристика ТОВ «ЖИТЛОБУД-2»

ТОВ «ЖИТЛОБУД-2» (код ЄДРПОУ 01273714) є одним із провідних будівельних підприємств міста Луцька, що здійснює діяльність у сфері житлового та нежитлового будівництва з 1970-х років. Підприємство зареєстроване за адресою: 43023, м. Луцьк, вул. Конякіна, 16в. Основний напрям діяльності за класифікацією КВЕД — «41.20 Будівництво житлових і нежитлових будівель», що охоплює виконання повного циклу будівельно-монтажних робіт, включно з проектуванням, зведенням, оздобленням і здачею об'єктів «під ключ» [6].

Підприємство спеціалізується на будівництві житлових комплексів, адміністративних споруд, промислових приміщень, а також інфраструктурних об'єктів у Волинській області. Завдяки наявності власної виробничої бази ТОВ «ЖИТЛОБУД-2» здійснює виготовлення бетонних виробів, бруківки та залізобетонних конструкцій, що забезпечує високу якість і контроль на всіх етапах будівництва. Компанія активно впроваджує енергозберігаючі технології, сучасні матеріали та інноваційні методи проектування, що відповідає вимогам європейських стандартів у будівельній галузі.

ТОВ «ЖИТЛОБУД-2» пропонує комплексні послуги: зведення житлових будинків, благоустрій територій, виготовлення та монтаж залізобетонних елементів, будівництво об'єктів комерційного призначення. Виробничі потужності підприємства розташовані на вул. Мирослава Скорика (Вахтангова), 2, де розміщено цехи з виробництва бетонних та залізобетонних виробів, дільницю з виготовлення бруківки, а також транспортно-експедиційний відділ [7].

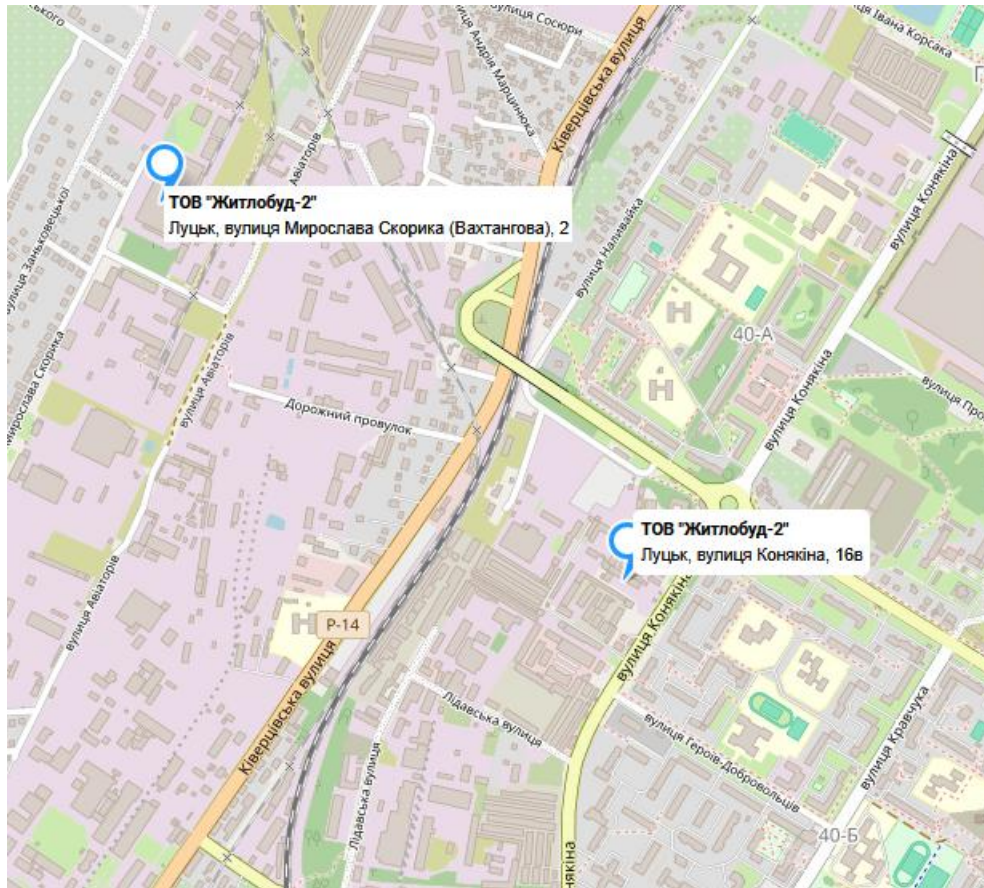


Рисунок 1.1 – Карта розташування ТОВ «ЖИТЛОБУД-2»

Окремим напрямом діяльності підприємства є вантажні перевезення. ТОВ «ЖИТЛОБУД-2» має власний парк рухомого складу, який включає самоскиди та бортові автомобілі для транспортування будівельних матеріалів, а також автобуси для перевезення персоналу до будівельних майданчиків. Власний автопарк дозволяє забезпечувати безперебійне постачання матеріалів на будівельні майданчики, оптимізувати логістику, скорочувати витрати часу й підвищувати ефективність виробничих процесів.

Крім того, підприємство постійно розширює географію своєї діяльності, бере участь у реалізації муніципальних та приватних проєктів, зокрема у сфері житлової забудови та соціальної інфраструктури міста.

Проведемо аналіз основних фінансово-економічних показників діяльності підприємства за п'ять років. За даними джерела [8] було сформовано Таблицю 1.1 та побудовано графіки динаміки цих показників (Рисунок 1.2 – 1.3).

Таблиця 1.1 – Показники діяльності ТОВ «ЖИТЛОБУД-2» за 2020 – 2024 роки

Показники	Роки				
	2019	2020	2021	2022	2023
Обсяг реалізованих послуг, тис. грн.	259408	211432	83509	298579	393493
Собівартість реалізованих послуг, тис. грн.	236936	191430	73380	275036	366821
Чистий прибуток, тис. грн.	14167	8863	633	15010	9593
Рентабельність підприємства, %	5,46	4,19	0,76	5,03	2,44

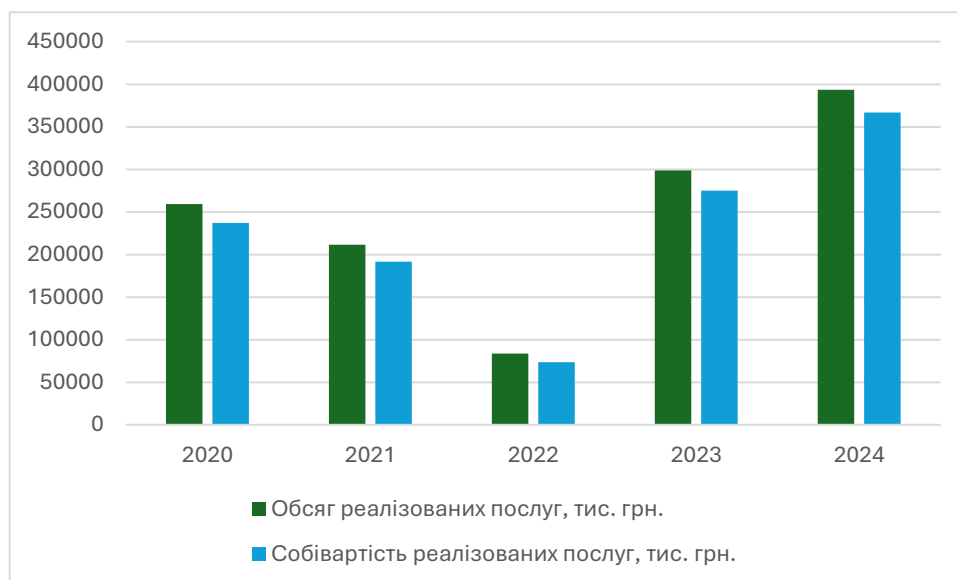


Рисунок 1.2 – Динаміка показників діяльності ТОВ «ЖИТЛОБУД-2» за 2020 – 2024 роки

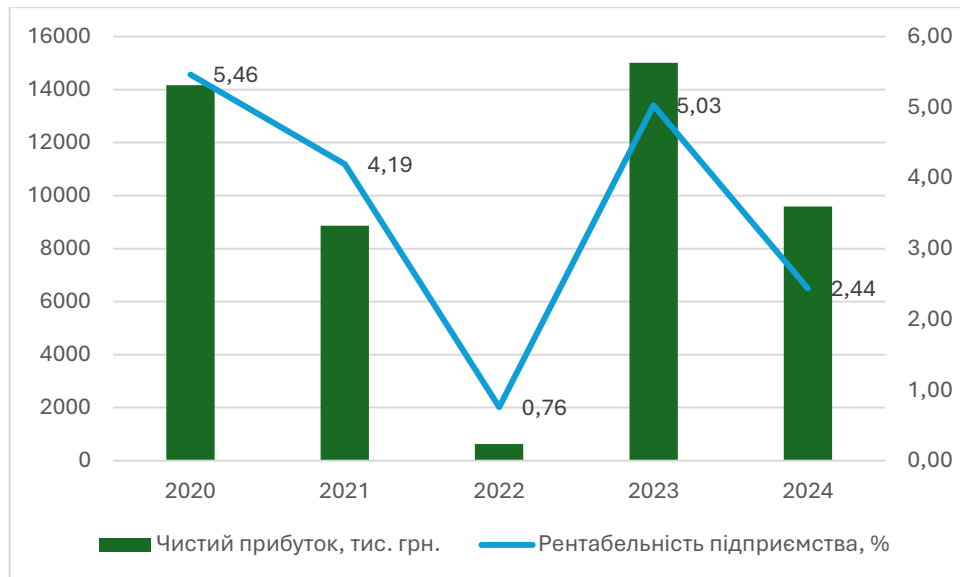


Рисунок 1.3 – Динаміка результатів діяльності ТОВ «ЖИТЛОБУД-2» за 2020 – 2024 роки

Отже, фінансові показники ТОВ «ЖИТЛОБУД-2» за 2020–2024 рр. свідчать про нестабільну, але загалом позитивну динаміку розвитку підприємства. У 2022 році спостерігається суттєве зниження обсягу реалізованих послуг (на понад 60 % порівняно з 2021 р.), що, можливо, пов'язано повномасштабним вторгненням та скороченням будівельної діяльності. Проте вже у 2023 році підприємство позитивну динаміку — обсяг реалізації зріс більш ніж у 3,5 раза, а чистий прибуток досяг 15 010 тис. грн. У 2024 році зберігається позитивна тенденція зростання обсягу реалізованих послуг (393 493 тис. грн.), хоча чистий прибуток зменшився до 9 593 тис. грн., що призвело до зниження рентабельності до 2,44 %. Це може бути зумовлено зростанням собівартості робіт, підвищенням цін на матеріали та електроенергію.

Отже, пошук шляхів оптимізації витрат є актуальною задачею для ТОВ «ЖИТЛОБУД-2».

1.2 Аналіз основних напрямків перевезень ТОВ «ЖИТЛОБУД-2»

ТОВ «ЖИТЛОБУД-2» здійснює перевезення будівельних вантажів, конструкцій та готових виробів, необхідних для реалізації власних будівельних проєктів та обслуговування партнерських організацій. Завдяки наявності власного автопарку підприємство забезпечує повний цикл логістичного супроводу будівництва — від доставки сировини до транспортування готових виробів на об'єкти.

Основні напрями перевезень охоплюють доставку вантажів у межах Волинської, а також Рівненської, Львівської та Тернопільської областей. Структуру перевезень ТОВ «ЖИТЛОБУД-2» представлено на Рисунку 1.4.

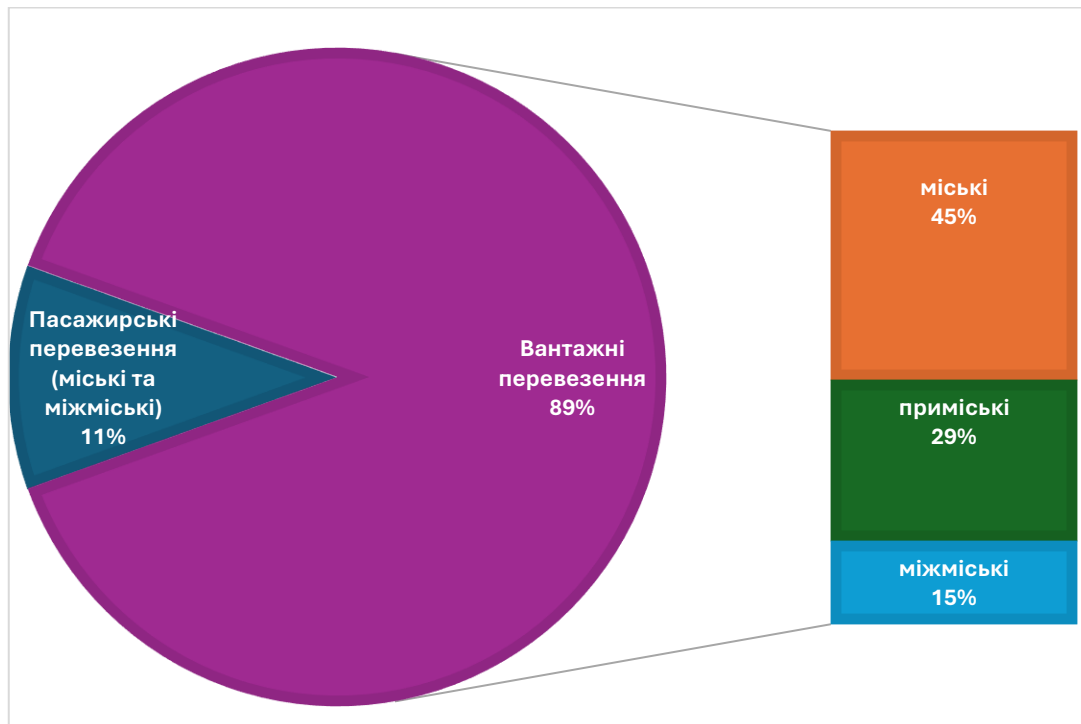


Рисунок 1.4 – Структура напрямків перевезень ТОВ «ЖИТЛОБУД-2»

Основні напрями перевезень включають:

1. Доставку будівельних матеріалів для житлових та промислових об'єктів. Підприємство транспортує бетон, цемент, щебінь, пісок, цеглу, металеві конструкції та інші матеріали, необхідні для спорудження житлових комплексів, адміністративних будівель і промислових споруд.

2. Перевезення залізобетонних виробів та бруківки. ТОВ «ЖИТЛОБУД-2» має спеціалізовану техніку для транспортування важких та

габаритних бетонних конструкцій, плит, фундаментних блоків, кільцевих елементів, а також готової бруківки.

3. Організацію перевезень працівників до будівельних майданчиків та виробничих ділянок. ТОВ «ЖИТЛОБУД-2» має у своєму автопарку пасажирські автобуси, за допомогою яких здійснюється доставка персоналу, що сприяє підвищенню ефективності робочого процесу.

1.3 Аналіз основних вантажів ТОВ «ЖИТЛОБУД-2»

Підприємство ТОВ «ЖИТЛОБУД-2» спеціалізується на транспортуванні будівельних вантажів, необхідних для виконання будівельно-монтажних робіт, благоустрою територій та забезпечення власного виробництва [7]. Основні типи вантажів включають:

1. Сипучі матеріали. До цієї групи належать пісок, щебінь, гравій і цемент. Перевезення здійснюється самоскидами або бортовими автомобілями із захисними тентами. Матеріали транспортуються насипом або в мішках (для цементу) з обов'язковим укладанням на піддони й фіксацією стрейч-плівкою.

2. Залізобетонні вироби. Підприємство транспортує залізобетонні плити, балки, блоки, кільця та інші конструкційні елементи, виготовлені на власному виробництві. Для габаритних вантажів даного виду підприємство використовує власний транспорт, який дозволяє зафіксувати вантаж та забезпечує цілісність конструкцій. Для негабаритних вантажів підприємство орендує спеціалізований рухомий склад.

3. Бруківка та тротуарні плити. Вироби фасуються на дерев'яні піддони з прокладками між рядами, після чого обгортаються стрейч-плівкою для запобігання механічним пошкодженням під час транспортування.

4. Металеві та дерев'яні конструкції. ТОВ «ЖИТЛОБУД-2» транспортує арматуру, труби, профільні елементи, дерев'яні балки, опалубку та інші конструкційні матеріали. Для перевезення використовуються бортові

автомобілі з фіксуєчими кріпленнями, що гарантують безпечне транспортування на довгі відстані.

5. Оздоблювальні матеріали. Перевозяться керамічна плитка, штукатурні суміші, теплоізоляційні матеріали, фарби та інші вироби, що потребують дбайливого транспортування. Вони пакуються в картонні коробки, відра або мішки, розміщуються на піддонах та можуть фіксуватися плівкою для запобігання розсипанню або протіканню.



Рисунок 1.5 – Структура основних вантажів ТОВ «ЖИТЛОБУД-2»

Отже, ТОВ «ЖИТЛОБУД-2» приділяє особливу увагу безпечному транспортуванню всіх вантажів, дотримуючись вимог охорони праці та стандартів з перевезення будівельних матеріалів.

1.4 Аналіз парку рухомого складу ТОВ «ЖИТЛОБУД-2»

Станом на 01.11.2025 року парк рухомого складу ТОВ «ЖИТЛОБУД-2» налічує 15 транспортних засобів.

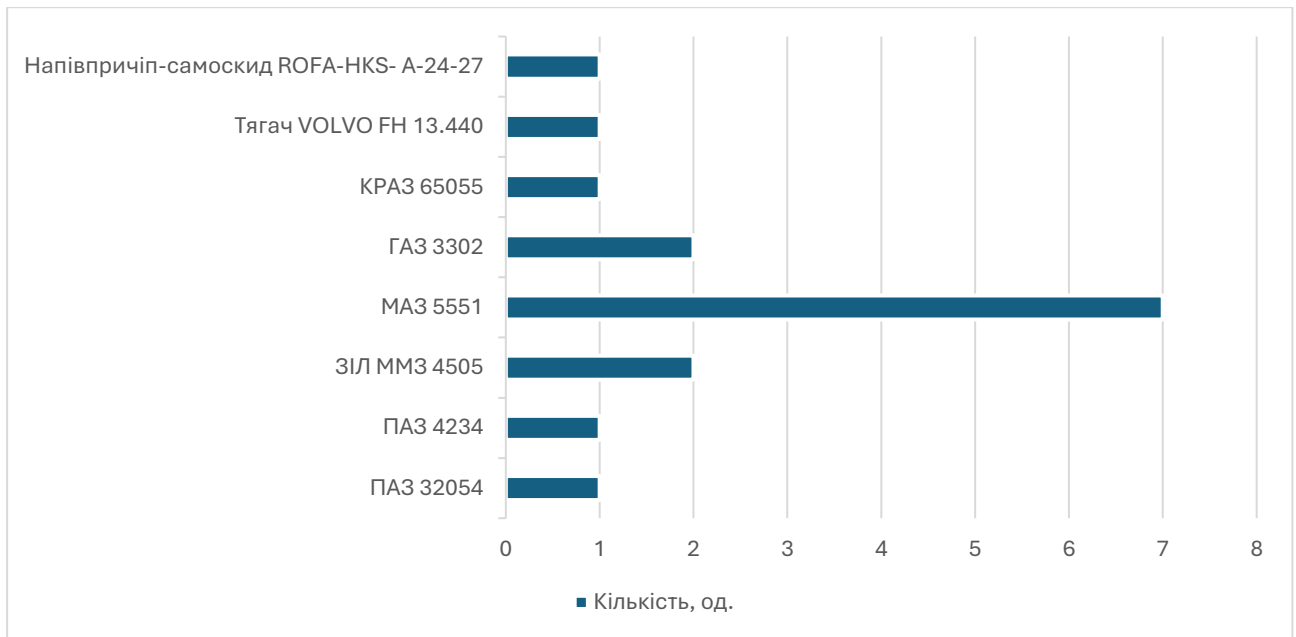


Рисунок 1.6 – Структура парку рухомого складу ТОВ «ЖИТЛОБУД-2» за марками та моделями

Найчисленнішою моделлю в автопарку є МАЗ 5551 — 7 одиниць, що становить майже половину всіх транспортних засобів. Це пояснюється їхньою придатністю до перевезень різних типів будівельних вантажів. Інші марки, представлені у менших кількостях, зокрема ЗІЛ ММЗ 4505 (2 од.), ГАЗ 3302 (2 од.), КРАЗ 65055 (1 од.), виконують допоміжні функції. Автобуси ПАЗ 32054 ПАЗ 4234 використовуються для перевезення працівників.

Проаналізуємо детальніше структуру парку рухомого складу за типом автомобіля. Структуру парку рухомого складу ТОВ «ЖИТЛОБУД-2» за видами транспортних засобів подано на Рисунку 1.7.

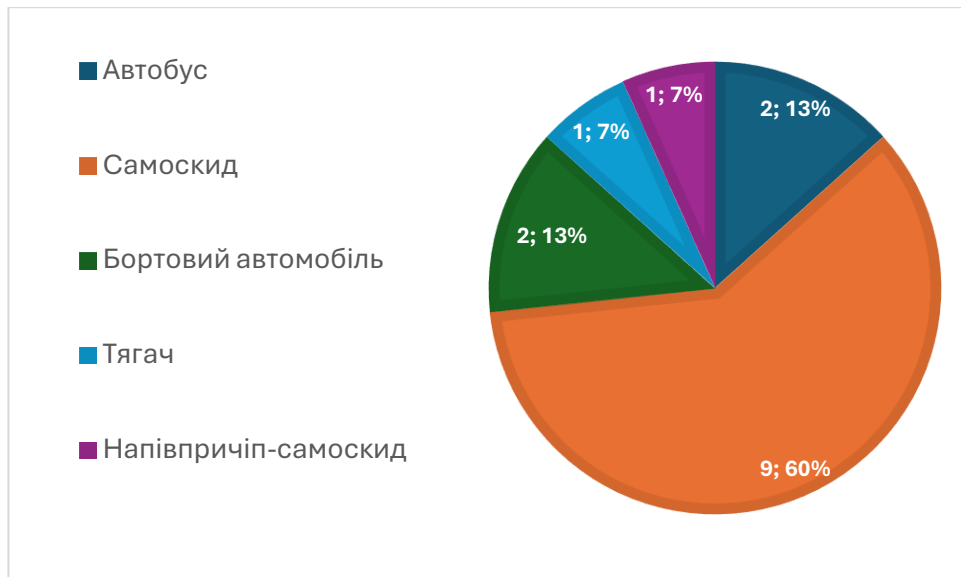


Рисунок 1.7 – Структура парку рухомого складу ТОВ «ЖИТЛОБУД-2» за видами транспортних засобів

Із Рисунку 1.7 спостерігаємо, що парк рухомого складу ТОВ «ЖИТЛОБУД-2» має переважно самоскиди, кількість яких становить 9 одиниць, або 60 % від загальної кількості транспортних засобів. До складу автопарку також входять 2 бортові автомобілі ГАЗ 3302, які використовуються для транспортування дрібних, що становить близько 13 % від загальної кількості. Крім того, у структурі наявні 2 автобуси (ПАЗ 32054 і ПАЗ 4234), які забезпечують перевезення працівників до будівельних майданчиків. Також парк рухомого складу налічує 1 тягач та 1 напівпричіп-самоскид, що забезпечує перевезення великих за обсягом вантажів переважно у міжміському сполученні.

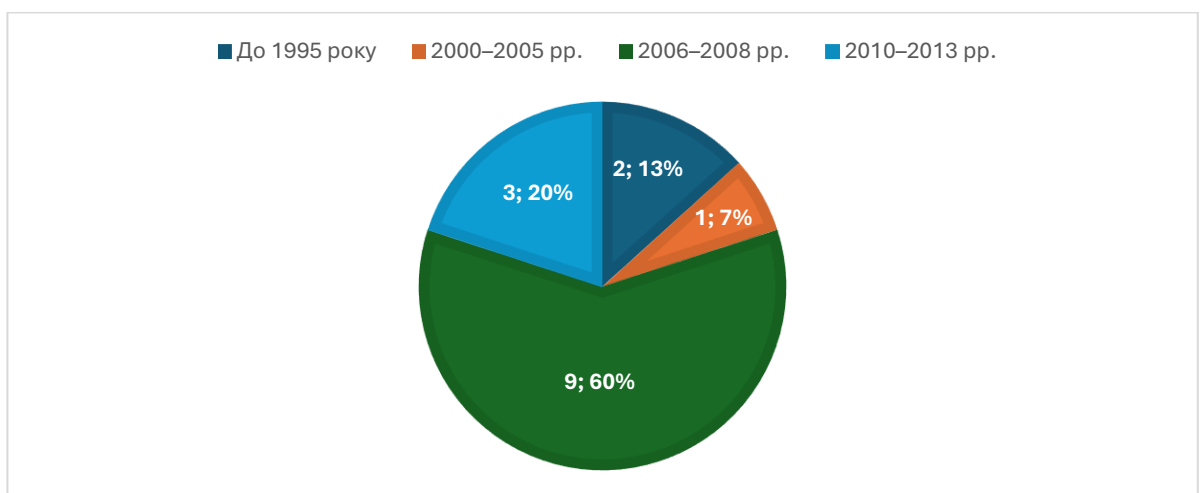


Рисунок 1.8 – Структура парку рухомого складу ТОВ «ЖИТЛОБУД-2» за віком

Проведений аналіз вікової структури автопарку показав, що найбільшу частку становлять транспортні засоби, виготовлені у 2006–2008 роках — 60 %, тобто більшість техніки експлуатується понад 15 років. Це свідчить про потребу в поступовому оновленні парку, адже значна частина машин уже має підвищений ступінь зносу. Близько 20 % транспортних засобів (3 одиниці) випущено у 2010–2013 роках. При цьому 13 % парку становлять автомобілі, виготовлені до 1995 року, зокрема старі моделі ЗІЛ, що також потребують модернізації або заміни. Таким чином, можна зробити висновок, що більшість техніки підприємства морально застаріла та потребує поступового оновлення.

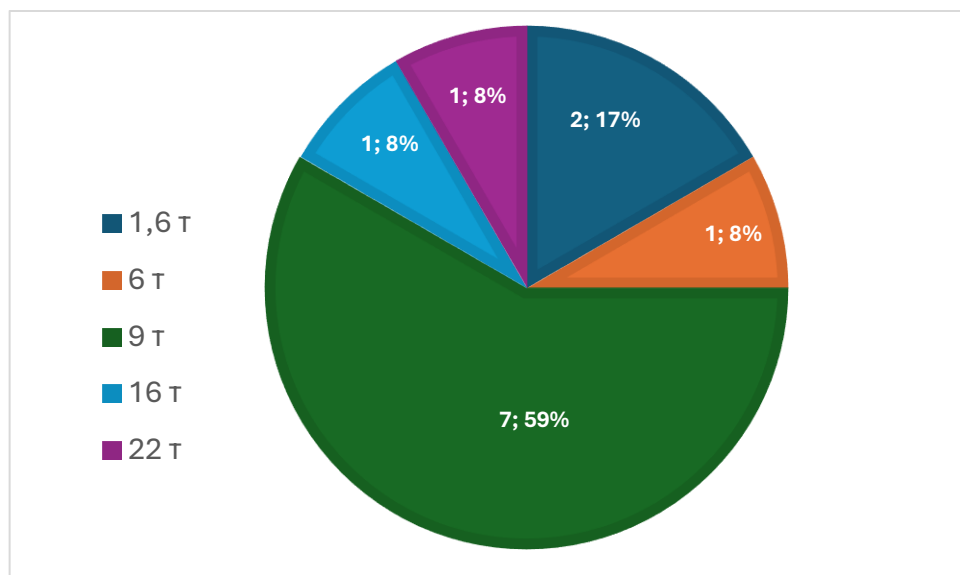


Рисунок 1.9 – Структура парку рухомого складу ТОВ «ЖИТЛОБУД-2» за вантажопідйомністю

За вантажопідйомністю транспортні засоби підприємства розподіляються нерівномірно. Основна група – самоскиди МАЗ 5551 із вантажопідйомністю 9 т, що становить понад 45 % автопарку. Таке співвідношення пояснюється універсальністю цих автомобілів у виконанні будівельних робіт.

Окрему частку становлять бортові автомобілі ГАЗ 3302 (вантажопідйомність 1,6 т), які використовуються для внутрішньомайданчикових перевезень. Важкі самоскиди КРАЗ 65055 із вантажопідйомністю 16 т забезпечують транспортування масивних вантажів і великогабаритних елементів будівель.

На сьогодні, обсяги будівництва, зокрема житлового, у місті та області зростають протягом останніх років, що зумовлює підвищення попиту на

транспортування будівельних вантажів. Це підтверджується статистикою підприємства ТОВ «ЖИТЛОБУД-2» щодо обсягів перевезень за останні роки. Аналіз відповідних даних подано на рис. 1.9

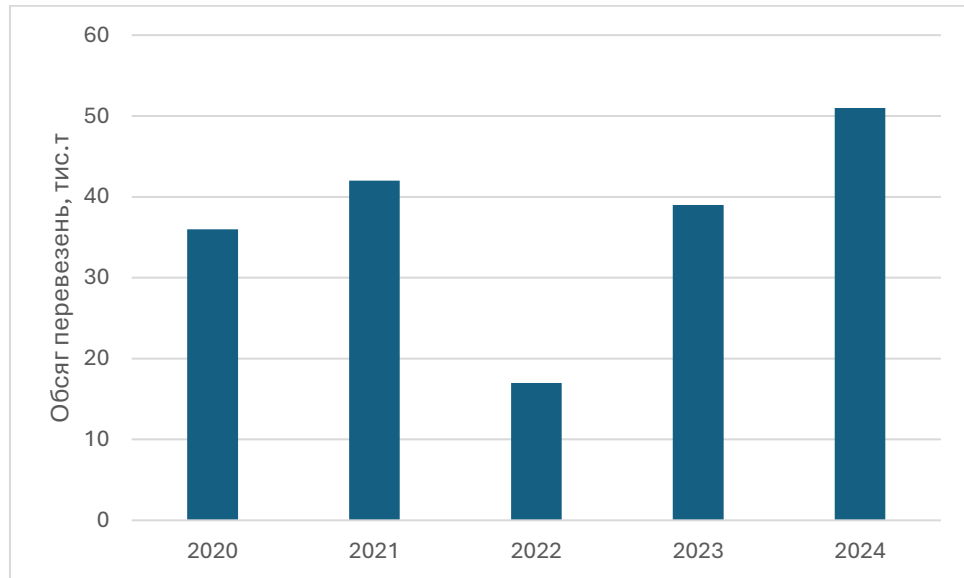


Рисунок 1.10 – Динаміка обсягів перевезень ТОВ «ЖИТЛОБУД-2»

Отже, парк рухомого складу ТОВ «ЖИТЛОБУД-2» має структуру, орієнтовану на доставку будівельних вантажів. Водночас значна частина автотранспорту експлуатується понад 15 років, що свідчить про необхідність поступового оновлення техніки для підвищення ефективності, безпеки та екологічності виробничих процесів.

Висновки до розділу 1

У першому розділі було здійснено комплексне дослідження організації перевезень ТОВ «ЖИТЛОБУД-2» – одного з найбільших будівельних підприємств міста Луцька, яке поєднує будівельно-монтажну діяльність із виконанням транспортно-логістичних операцій. Підприємство має багаторічний досвід роботи на ринку та сформувало власну виробничу базу, що охоплює

виготовлення бетонних і залізобетонних виробів, бруківки, а також організацію транспортного забезпечення будівництва.

У першому розділі проаналізовано основні напрямки транспортної діяльності підприємства, зокрема перевезення будівельних матеріалів, конструкцій та залізобетонних виробів, а також доставку працівників до будівельних об'єктів. При цьому напрями перевезень охоплюють Волинську, Рівненську, Львівську та Тернопільську області.

Здійснено аналіз фінансово-економічних показників за 2019–2024 рр., який показав нестабільну, але загалом позитивну динаміку розвитку. Після різкого спаду у 2021–2022 роках підприємству вдалося суттєво наростити обсяги реалізованих послуг у 2023–2024 роках. Разом із тим, зменшення чистого прибутку та рентабельності у 2024 році свідчить про необхідність пошуку шляхів оптимізації витрат, зокрема логістичних.

Окрему увагу приділено структурі основних вантажів, до яких належать сипучі матеріали, залізобетонні вироби, бруківка, металеві конструкції та оздоблювальні матеріали. Усі етапи транспортування організовано відповідно до вимог безпеки та з урахуванням специфіки кожного виду вантажу.

Важливою складовою діяльності підприємства є його парк рухомого складу, що складається з 15 транспортних засобів різних типів: самоскидів, бортових автомобілів, автобусів, тягача та напівпричепа-самоскида. Найчисленнішою моделлю є МАЗ 5551, які підходять для перевезення основних видів будівельних вантажів. Разом із тим аналіз вікової структури автопарку показав, що понад 60 % автомобілів експлуатуються більше 15 років, що вказує на потребу оновлення техніки для підвищення ефективності та зниження експлуатаційних витрат.

Динаміка перевезень за останні роки підтверджує зростання обсягів робіт, що зумовлено розширенням будівельної діяльності у регіоні. Це підсилює актуальність модернізації транспортної системи підприємства та впровадження заходів з оптимізації логістичних процесів.

2 ОРГАНІЗАЦІЯ ТРАНСПОРТНОГО ПРОЦЕСУ ДОСТАВКИ БУДІВЕЛЬНИХ ВАНТАЖІВ

2.1 Організація перевезень будівельних вантажів як системи масового обслуговування

Організація ефективного процесу доставки будівельних вантажів є важливим чинником забезпечення безперебійної роботи будівельних підприємств, ритмічності виробництва та своєчасного виконання будівельно-монтажних робіт. У сучасних умовах значного обсягу транспортних потоків і високої вартості простоїв транспортних засобів особливої актуальності набувають питання оптимізації процесів обслуговування транспортних потоків на основі математичного моделювання. Одним із найбільш універсальних інструментів для цього є теорія систем масового обслуговування (СМО), що дозволяє моделювати процеси прибуття, очікування та обслуговування транспортних засобів у пунктах навантаження й розвантаження.

Основною метою СМО є математичне формалізування процесів обслуговування великої кількості запитів [9]. Вона дає змогу за допомогою аналітичних методів моделювати, досліджувати та прогнозувати поведінку систем масового обслуговування, що дозволяє глибше зрозуміти їхню роботу та приймати більш ефективні управлінські рішення. Під терміном «обслуговування» розуміють задоволення певної потреби, а визначення «масове» означає, що розглядається не окремий випадок, а сукупність однотипних об'єктів, які мають спільну потребу у виконанні послуги.

Математична модель системи масового обслуговування – це сукупність виразів, що описують процес надходження заявок (транспортних засобів або партій вантажу), їх очікування в черзі та обслуговування певною кількістю каналів (постів, механізмів, операторів). У транспортній сфері СМО дозволяє

аналізувати роботу навантажувально-розвантажувальних майданчиків, пунктів приймання вантажів, складів, елеваторів, терміналів, кар'єрів тощо [10].

Моделювання за допомогою СМО дозволяє розрахувати оптимальну кількість постів обслуговування, щоб уникнути перевантажень і простоїв. Застосування багатоканальної системи особливо актуальне для транспортних вузлів, де інтенсивність прибуття транспортних засобів є змінною величиною, як, наприклад, на будівельних майданчиках або кар'єрах.

Особливістю СМО є імовірнісний характер опису процесів — усі події (надходження запитів, тривалість обслуговування тощо) розглядаються як випадкові величини [9].

Системи масового обслуговування вивчають процеси, у яких виникають черги — тобто накопичення вимог, що очікують на обслуговування. Причинами утворення черг є випадковий характер надходження запитів і варіації часу, необхідного для їх виконання. Загальна модель системи масового обслуговування зображена на Рисунку 2.1, де показано основні елементи:

- систему, що обслуговується, яка включає джерела вимог та вхідний потік запитів;
- обслуговуючу систему, що складається з накопичувача та механізму обслуговування.

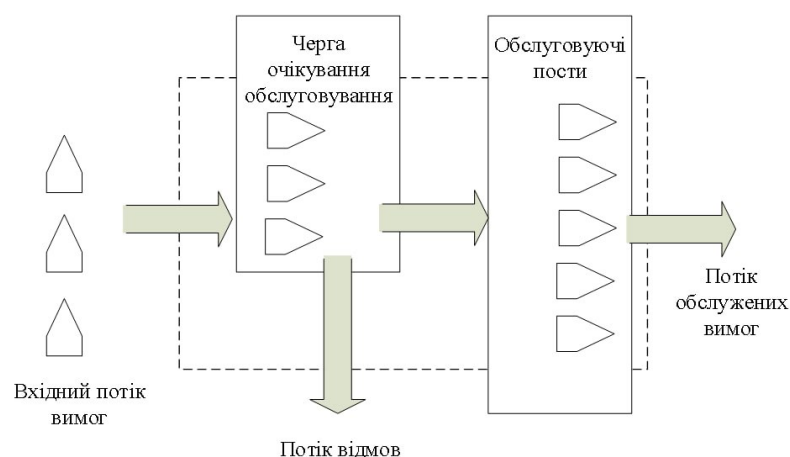


Рисунок 2.1 – Модель системи масового обслуговування

Кожна вимога — це окремий запит на виконання роботи або послуги (наприклад, транспортний засіб, який потребує навантаження чи розвантаження).

Сукупність усіх таких вимог утворює вхідний потік. Вони надходять до накопичувача, де очікують своєї черги, або одразу потрапляють до механізму обслуговування, який складається з кількох обслуговуючих апаратів. Кожен апарат може одночасно виконувати лише одну операцію, після чого вимога залишає систему, формуючи вихідний потік.

Здійснюючи спостереження за роботою системи, можна визначити закони розподілу вхідного потоку вимог, часу прибуття транспортних засобів, тривалості обслуговування, часу очікування у черзі, а також простоїв обслуговуючих апаратів. На основі цих даних оцінюють можливі витрати від простою транспортних засобів і персоналу. Якщо втрати є значними, проводиться оптимізація організації процесу, наприклад — збільшується кількість постів, змінюється тип рухомого складу чи алгоритм черговості обслуговування.

При проектуванні ефективної системи навантаження або розвантаження транспортних засобів потрібно враховувати не лише середнє завантаження системи, а й дотримання умови [10]:

$$\rho = \frac{\lambda}{m\mu} < 1, \quad (2.1)$$

де λ — середня інтенсивність надходження вимог;

μ — інтенсивність обслуговування однією установкою;

m — кількість обслуговуючих апаратів;

ρ — коефіцієнт використання системи.

Якщо коефіцієнт ρ перевищує 1, система не справляється з потоком заявок, і черга зростає безмежно.

СМО також дозволяє кількісно оцінювати показники ефективності транспортного процесу — середній час очікування, довжину черги, коефіцієнт завантаження постів, імовірність простою та пропускну здатність пункту обслуговування. Застосування цих моделей у транспортній логістиці будівельних вантажів сприяє зменшенню витрат, скороченню тривалості доставки й підвищенню надійності перевезень.

Будівельні вантажі характеризуються великими обсягами, різноманітністю фізико-хімічних властивостей та підвищеними вимогами до збереження якості під час транспортування. У багатьох випадках доставка таких вантажів здійснюється на відстань до 300 км і виконується спеціалізованим транспортом – самоскидами, цементовозами, контейнеровозами тощо.

Процес перевезення супроводжується низкою факторів, що впливають на ефективність: нерівномірністю прибуття транспортних засобів, простоям у черзі, технічними затримками під час навантаження чи розвантаження, погодними умовами, обмеженою пропускною здатністю під'їзних шляхів. Крім того, важливою умовою є синхронна робота транспортних засобів із навантажувально-розвантажувальними механізмами, оскільки порушення цієї взаємодії зумовлює додаткові простой і збільшує собівартість перевезення.

Завдяки цим факторам виникає необхідність застосування СМО як моделі, що дає змогу оцінити параметри системи, виявити «вузькі місця» та знайти оптимальні рішення щодо кількості транспортних засобів, постів та тривалості обслуговування.

У моделі доставки будівельних матеріалів кожен пункт навантаження або розвантаження можна представити як багатоканальну систему масового обслуговування, у якій транспортні засоби – це заявки, а навантажувальні механізми – канали обслуговування.

Для аналізу використовується набір ключових показників: середня довжина черги; середній час очікування транспортного засобу в черзі; середній час перебування у системі; імовірність простою та зайнятості каналів .

На основі цих параметрів можна визначити оптимальну кількість каналів та автомобілів, щоб мінімізувати простой без надмірних капітальних витрат.

Застосування СМО в управлінні транспортними потоками будівельних матеріалів дозволяє [11]:

- прогнозувати середній час обслуговування транспортних засобів;
- скоротити час очікування в черзі на навантаження;

- визначити оптимальну кількість техніки для забезпечення безперервного процесу;
- збалансувати навантаження між пунктами відправлення та прибуття.

На практиці використання СМО сприяє раціоналізації роботи транспортного парку та навантажувально-розвантажувальних пунктів. Зокрема, результати моделювання можуть бути інтегровані у логістичні системи управління (GPS-моніторинг, IoT-платформи) для автоматичного розподілу черг та регулювання потоків транспортних засобів.

Серед ключових переваг використання СМО для організації перевезень будівельних вантажів [11]:

- зниження простоїв транспортних засобів;
- підвищення коефіцієнта експлуатації парку рухомого складу;
- оптимізація кількості навантажувально-розвантажувальних механізмів;
- зменшення витрат на паливо, технічне обслуговування та персонал;
- підвищення надійності та ритмічності поставок.

Отже, організація процесу доставки будівельних вантажів на основі теорії систем масового обслуговування дозволяє комплексно оцінити ефективність функціонування транспортного процесу, виявити резерви підвищення продуктивності та зменшення простоїв. Математичні моделі СМО забезпечують обґрунтований вибір кількості транспортних засобів, постів обслуговування й персоналу, що сприяє стабільності та економічній ефективності будівельних перевезень.

2.2 Аналіз організації перевезень будівельних вантажів

ТОВ «ЖИТЛОБУД-2» забезпечує доставку будівельних вантажів до власних будівельних майданчиків. Проаналізуємо процес перевезення піску із площадки за адресою вул. Веселкова, 50 до вул. Рівненської, 113, м.Луцька. Доставка даного вантажу здійснюється маятниковим маршрутом із зворотнім порожнім пробігом. Для організації перевезень ТОВ «ЖИТЛОБУД-2»

використовує два самоскиди: ЗІЛ-ММЗ 4505 та МАЗ 5551 номінальною вантажопідйомністю 6 т та 9 т відповідно.

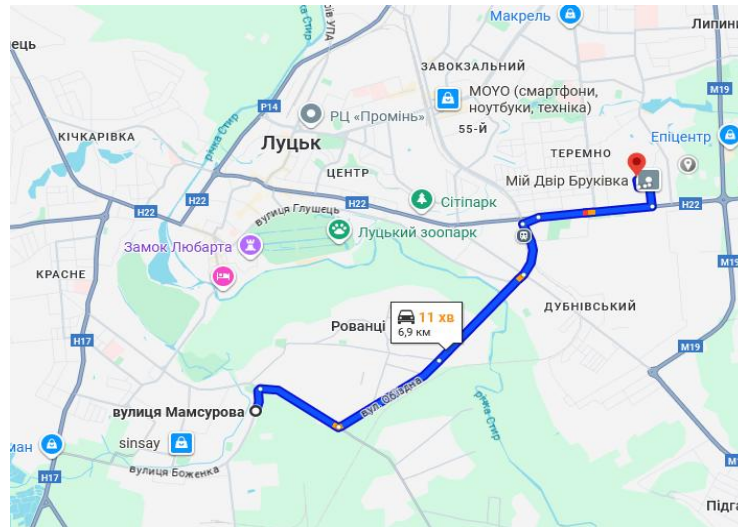


Рисунок 2.2 – Маршрут перевезення піску «вул. Веселкова, 50 – вул. Рівненська, 113, м.Луцьк»

Розрахуємо основні показники роботи цього рухомого складу на зазначеному маршруті (Рисунок 2.2) за методикою [12]:

- 1) довжина маршруту за 1 оберт, $l_{об} = 6,9 \times 2 = 13,8$ км;
- 2) відстань навантаженого пробігу за 1 оберт – $l_B = 6,9$ км;
- 3) коефіцієнт використання пробігу:

$$\beta = \frac{l_B}{l_{об}}, \quad (2.2)$$

$$\beta = \frac{6,9}{13,8} = 0,5$$

- 4) коефіцієнт використання вантажопідйомності автомобілів:

$$\gamma_c = \frac{q}{q_n}, \quad (2.3)$$

де q – обсяг 1 партії вантажу, що транспортується автомобілем;

q_n – номінальна вантажопідйомність автомобіля; згідно з технічними даними $q_{n1} = 6$ т для ЗІЛ-ММЗ 4505 та $q_{n2} = 9$ т МАЗ 5551.

Середній розмір партії вантажу для автомобіля ЗІЛ-ММЗ 4505 дорівнює:

$$\gamma_{c1} = \frac{5,5}{6} = 0,92$$

Середній розмір партії вантажу для автомобіля МАЗ 5551 дорівнює:

$$\gamma_{c2} = \frac{8,4}{9} = 0,93$$

5) час оборту автомобіля на заданому маршруті, год.:

$$t_{об} = \frac{l_{об}}{\bar{v}_T} + q(t_H + t_P) + t_{пз}, \quad (2.4)$$

де $l_{об}$ - довжина обороту, км;

$\bar{v}_T$ - середня технічна швидкість, км/год;

$$\bar{v}_T = \frac{l_{об}}{\left(\frac{l_B}{v_B}\right) + \left(\frac{l_{II}}{v_{II}}\right)}, \quad (2.5)$$

v_B - швидкість руху автомобіля з вантажем, км/год; $v_B = 23$ км/год;

v_{II} - швидкість руху автомобіля без вантажу, км/год; $v_{II} = 25$ км/год.

$$\bar{v}_T = \frac{13,8}{\left(\frac{6,9}{23}\right) + \left(\frac{6,9}{25}\right)} = 23,95 = 24 \text{ км/год}$$

t_H, t_P - час навантаження та розвантаження відповідно, год;

За даними хронометражу ТОВ «ЖИТЛОБУД-2» середній час навантаження 1 тонни піску близько $t_H = 55$ с. Час розвантаження кузова становить 1,5 хв для ЗІЛ-ММЗ 4505 та 2,0 хв для МАЗ 5551.

$t_{пз}$ - час на підготовчо-заклучні операції, $t_{пз} = 0,25$ год

$$t_{об1} = \frac{13,6}{24} + 6 \cdot \frac{55}{3600} + \frac{1,5}{60} + 0,25 = 0,93 \text{ год}$$

$$t_{об2} = \frac{13,6}{24} + 9 \cdot \frac{55}{3600} + \frac{2,0}{60} + 0,25 = 0,98 \text{ год}$$

6) кількість обертів за день визначимо за формулою, $T_{зм} = 9$ год:

$$n_{об} = \frac{T_{зм}}{t_{об}}, \quad (2.6)$$

$$n_{об1} = 9,0 / 0,93 = 9,67 \approx 9$$

$$n_{об2} = 9,0 / 0,98 = 9,18 \approx 9$$

Заокруглюємо $n_{об}$ до цілого меншого значення ($n'_{об}$). $n'_{об} = 9$

7) уточнений час роботи автомобіля на маршруті та час перебування в наряді:

$$T'_м = n'_{об} \cdot t_{об}, \quad (2.7)$$

$$T'_{м1} = 0,93 \cdot 9 = 8,4 \text{ год}$$

$$T'_{м2} = 0,98 \cdot 9 = 8,8 \text{ год}$$

8) добовий обсяг перевезення, т:

$$Q_d = n_{об} q, \quad (2.8)$$

$$Q_{д1} = 9 \cdot 5,5 = 49,5 \text{ т}$$

$$Q_{д2} = 9 \cdot 8,4 = 75,6 \text{ т}$$

9) вантажообіг автомобілів на маршруті за 1 їздку, ткм:

$$W = q_n \cdot \gamma \cdot l_b = q \cdot l_b, \quad (2.9)$$

$$W_1 = 5,5 \cdot 6,9 = 37,95 \text{ ткм}$$

$$W_2 = 8,4 \cdot 6,9 = 57,96 \text{ ткм}$$

Результати проведених розрахунків наведено у Таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Основні показники роботи транспортних засобів на маршруті

Показник	Значення	
	ЗІЛ-ММЗ 4505	МАЗ 5551
Довжина обороту, $l_{об}$, км	13,8	
Відстань вантажного пробігу за один оберт, l_b , км	6,9	
Коефіцієнт використання пробігу, β	0,5	
Коефіцієнт використання вантажопідйомності, γ , т	0,92	0,93
Тривалість оберт, $t_{об}$, год	0,93	0,98
Кількість обертів за день, n	9	
Добовий обсяг перевезення, Q_d , т	49,5	75,6
Вантажообіг за одну їздку, W , т·км	37,95	57,96

Отже, проаналізовано техніко-експлуатаційні показники роботи автомобілів ЗІЛ-ММЗ 4505 та МАЗ 5551 на маятниковому маршруті зі зворотнім порожнім пробігом. За результатами розрахунків встановлено, що довжина обороту — 13,8 км, а відстань вантажного пробігу за один оберт становить 6,9 км. Коефіцієнти використання вантажопідйомності є високими й становлять 0,92 для ЗІЛ-ММЗ 4505 та 0,93 для МАЗ 5551. Тривалість одного обороту становить 0,93 год для ЗІЛ-ММЗ 4505 та 0,98 год для МАЗ 5551.

Кількість обертів за день дорівнює 9, а добовий обсяг перевезення становить: для ЗІЛ-ММЗ 4505 — 49,5 т, для МАЗ 5551 — 75,6 т. Вантажообіг за одну їзду також є більшим у МАЗ 5551 і становить 57,96 т·км, тоді як ЗІЛ-ММЗ 4505 забезпечує 37,95 т·км. Таким чином, МАЗ 5551 демонструє вищу продуктивність за добовим обсягом перевезення та вантажообігом, що зумовлює його більш ефективне використання на даному маршруті.

2.3 Аналіз навантажувальних робіт при здійсненні перевезень

На місці навантаження є два фронтальні навантажувачі CASE 421В. Розглянемо детальніше технічну характеристику даної моделі навантажувача (Рисунок 2.3) та визначимо тривалість автомобілів ЗІЛ-ММЗ 4505 та МАЗ 5551.



Рисунок 2.3 – Фронтальний навантажувач CASE 421В

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики Case 421В [13]

Показник	Значення
Маса	6,7 т
Максимальне навантаження	0,9 т
Об'єм ковша	1,3 м ³
Розміри:	
Ширина	2,05 м
Висота	2,85 м
Довжина	5,78 м
Виробник двигуна	Perkins
Потужність	63 кВт

Розрахуємо кількість ковшів навантажувача Case 421В, що вміщуються в кузов автомобілів ЗІЛ-ММЗ 4505 та МАЗ 5551 за наступною формулою:

$$n_{ki} = \frac{q_{ai}}{\gamma_k \cdot V_k} \quad (2.10)$$

де q_{ai} – вантажопідйомність i -го автомобіля, т;

γ_k – об'ємна маса піску, т/м³, для кар'єрного піску становить $\gamma_k = 0,71$ т/м³;

V_k – об'єм ковша навантажувача, м³

$$n_{k1} = \frac{6}{0,71 \cdot 1,3} = 6,5 = 6$$

$$n_{k2} = \frac{9}{0,71 \cdot 1,3} = 9,75 = 9$$

Тривалість завантаження кузова автомобілів, хв:

$$t_3 = n_k \cdot \frac{T_{\text{ц}}}{60}, \quad (2.11)$$

де $T_{\text{ц}}$ – тривалість виконання 1 циклу навантаження за хронометражем, с,

$T_{\text{ц}} = 55$ с.

$$t_{31} = 6 \cdot \frac{55}{60} = 5,5 \text{ хв}$$

$$t_{32} = 9 \cdot \frac{55}{60} = 8,3 \text{ хв}$$

Отже, даний навантажувач завантажує 1 самоскид ЗІЛ-ММЗ 4505 за 5,5 хв та 1 самоскид МАЗ 5551 за 8,3 хв.

Висновки до розділу 2

У другому розділі розглянуто організацію транспортного процесу доставки будівельних вантажів як системи масового обслуговування, у якій транспортні засоби виступають вимогами, а навантажувально-розвантажувальні механізми – каналами обслуговування. Використання апарату СМО дозволило формалізувати процеси прибуття автомобілів, очікування в черзі, обслуговування та простоїв, а також оцінити показники ефективності функціонування системи.

Проведений аналіз організації перевезень піску на маятниковому маршруті «вул. Веселкова, 50 – вул. Рівненська, 113, м. Луцьк» із використанням автомобілів ЗІЛ-ММЗ 4505 та МАЗ 5551 дозволив оцінити основні техніко-експлуатаційні показники їх роботи. Встановлено, що за довжини обороту 13,8 км та відстані вантажного пробігу 6,9 км коефіцієнти використання вантажопідйомності є високими й становлять 0,92 для ЗІЛ-ММЗ 4505 та 0,93 для МАЗ 5551. За однакової кількості обертів (9 за зміну) добовий обсяг перевезень для МАЗ 5551 становить 75,6 т проти 49,5 т для ЗІЛ-ММЗ 4505, а вантажообіг за їзду – 57,96 т·км проти 37,95 т·км відповідно. Це свідчить про вищу продуктивність і доцільність пріоритетного використання автомобіля МАЗ 5551 на даному маршруті.

У розділі також проаналізовано роботу фронтального навантажувача CASE 421В під час навантаження самоскидів. Визначено, що для завантаження автомобіля ЗІЛ-ММЗ 4505 необхідно в середньому 6 ковшів, а МАЗ 5551 – 9 ковшів, що відповідає тривалості навантаження 5,5 хв та 8,3 хв відповідно. Отримані результати дозволяють врахувати реальний час навантаження при розрахунку тривалості обороту автомобілів, їхньої продуктивності та при побудові моделей СМО.

3 РОЗРОБКА ЗАХОДІВ ЩОДО УДОСКОНАЛЕННЯ ПЕРЕВЕЗЕНЬ БУДІВЕЛЬНИХ ВАНТАЖІВ

3.1. Визначення раціональної вантажопідйомності рухомого складу

Одним із ключових чинників, що визначають ефективність транспортного процесу, є вантажопідйомність автомобіля. Тому під час оцінювання провізної здатності транспортної системи важливо встановити раціональну вантажопідйомність рухомої одиниці, яка забезпечуватиме перевезення конкретного виду вантажу.

Під час вибору оптимального типу рухомого складу основними критеріями виступають максимальна продуктивність та мінімальна собівартість перевезень. Для цього порівнюють продуктивність та витрати на транспортування різних автомобілів, що виконують однаковий обсяг транспортної роботи у певних експлуатаційних умовах [14].

Раціональна вантажопідйомність автомобіля визначається за умови досягнення мінімальних витрат на транспортування вантажу. У цьому випадку собівартість роботи автомобіля за одну годину (без урахування витрат на навантажувально-розвантажувальні операції) розраховують за таким виразом:

$$C_a = C_{зм} + C_n \quad , \quad (3.1)$$

де $C_{зм}$ – змінні витрати, грн.;

C_n – витрати, що припадають на один кілометр пробігу автомобіля, грн.

В свою чергу, змінні витрати визначаються:

$$C_{зм} = \frac{1}{\beta} \times q \times L \times z_e \times C'_{зм}, \quad (3.2)$$

де β – коефіцієнт використання пробігу автомобіля;

q – вантажопідйомність автомобіля, т.;

L – відстань навантаженої їздки, км;

z_e – кількість їздок із вантажем за одну годину роботи автомобіля;

$C'_{зм}$ – витрати, що припадають на один кілометр пробігу однієї тонни вантажопідйомності автомобіля, грн./км т.

Постійні витрати розраховуються за виразом:

$$C_n = \frac{1}{\beta} \times L \times z_e \times C'_n, \quad (3.3)$$

де C'_n – витрати, що припадають на один кілометр пробігу автомобіля, грн./км.

Собівартість перевезення однієї тонни вантажу визначається:

$$S = \frac{C_{зм} + C_n}{N_a}, \quad (3.4)$$

де N_a – продуктивність автомобіля, т/год.

Враховуючи, що зі зміною вантажопідйомності автомобіля змінюється час простою під навантажувально-розвантажувальними операціями, прийнято:

$$t_{np} = t' + t'' \times q, \quad (3.5)$$

де t' – постійна величина, що складає нормативний час простою під навантажувально-розвантажувальними операціями, год;

t'' – час простою під навантажувально-розвантажувальними операціями, що припадає на одну тонну вантажопідйомності автомобіля, год/т.

Продуктивність автомобіля при цьому визначається за формулою:

$$N_a = \frac{q \times \gamma \times \beta \times v_T}{L + \beta \times v_T \times (t' + t'' \times q)}, \quad (3.6)$$

де γ – коефіцієнт використання вантажопідйомності;

v_T – технічна швидкість автомобіля, км/год.

Собівартість перевезень однієї тонни вантажу складає:

$$S = \frac{\frac{1}{\beta} \times L \times z_e \times (q \times C'_{nep} + C'_n) \times [L + \beta \times v_T \times (t' + t'' \times q)]}{q \times \gamma \times \beta \times v_T}. \quad (3.7)$$

Для визначення раціональної вантажопідйомності автомобіля візьмемо першу похідну від виразу собівартості перевезення та прирівняємо її до нуля. У результаті отримаємо формулу, що дає можливість знайти таку вантажопідйомність, за якої собівартість транспортування буде мінімальною:

$$q_{on} = \sqrt{\frac{(L + \beta \times v_T \times t') \times C'_n}{\beta \times v_T \times t'' \times C'_{nep}}}. \quad (3.8)$$

Результати досліджень, проведених низкою авторів [15], свідчать, що під час перевезення навальних вантажів маятниковими маршрутами на відстань до 20 км виконується співвідношення $\frac{C'_n}{C'_{3м}} = 0,18 \times q$. а таких умов раціональна вантажопідйомність автомобіля визначається спрощеним виразом:

$$q_{on} = \frac{0,18 \times (L + \beta \times v_T \times t')}{\beta \times v_T \times t''}. \quad (3.9)$$

Значення величин t' та t'' , які характеризують нормативи часу на підготовчо-заклучні операції, а також на навантаження та розвантаження для автомобілів-самоскидів використовуємо із проведеного хронометражу: $t' = 0,25$ год та $t'' = 0,0167$ год.

Отримані формули свідчать, що раціональна вантажопідйомність залежить від дальності перевезення, способу виконання навантажувально-розвантажувальних операцій та технічної швидкості руху автомобіля.

Використовуючи наведені формули, визначимо оптимальну вантажопідйомність автомобіля-самоскида для перевезення піску транспортними засобами ТОВ «ЖИТЛОБУД-2»:

$$q_{on} = \frac{0,18 \times (6,9 + 0,5 \times 24 \times 0,25)}{0,5 \times 24 \times 0,0167} = 8,89 \approx 9 \text{ т.}$$

Отже, можна стверджувати, що найбільш ефективним для транспортування інертних матеріалів є використання автомобіля-самоскида з вантажопідйомністю, близькою до 9 т. На підприємстві вже експлуатуються автомобілі-самоскиди МАЗ 5551 вантажопідйомністю 9 т у кількості 7 одиниць.

Після визначення раціональної вантажопідйомності самоскида для перевезення інертних матеріалів рухомим складом підприємства необхідно встановити потребу в кількості таких транспортних засобів. Розрахунок кількості автомобілів-самоскидів здійснюється відповідно до методики [15]:

$$A = \frac{P}{P_{доб} \times D \times \alpha_{вип}}, \quad (3.10)$$

де P – обсяг перевезень, т;

$P_{доб}$ – добова продуктивність МАЗ 5551, т/добу;

D – число робочих днів автомобіля у періоді, що розглядається;

$\alpha_{\text{вип}}$ – коефіцієнт використання парку автомобілів.

Добова продуктивність автомобіля-самоскида МАЗ 5551 становитиме:

$$P_{\text{доб}} = \frac{q \times \gamma \times v_T \times \beta \times T_H}{L + v_T \times \beta \times t_{\text{нр}}} \quad (3.11)$$

де T_H – час перебування автомобіля у наряді, год;

$t_{\text{нр}}$ – час простою автомобіля під навантаженням-розвантаженням,

$$t_{\text{нр}} = 0,02 \times 9 \times 1 + 0,25 = 0,43 \text{ год.}$$

$$P_{\text{доб}} = \frac{9 \times 1 \times 24 \times 0,5 \times 9}{13,8 + 24 \times 0,5 \times 0,43} = 51,3 \text{ т/добу.}$$

Звідси необхідна кількість автомобілів становитиме:

$$A = \frac{1070}{51,3 \times 5 \times 0,7} = 5,96 \approx 6.$$

3.2 Встановлення статистичних закономірностей інтервалів прибуття автомобілів та тривалості навантаження

Оскільки рухомий склад автомобільного транспорту та обладнання для навантажувально-розвантажувальних робіт досить часто використовуються нерівномірно та не завжди ефективно, то частка непродуктивних простоїв техніки може становити 30–50 % робочого часу, і значна їх частина припадає саме на очікування початку навантажувально-розвантажувальних операцій. Виникнення таких простоїв зумовлене тим, що робота як транспортних засобів, так і механізмів навантаження та розвантаження залежить від низки факторів випадкового, тобто ймовірного характеру.

Щоб зменшити втрати, пов'язані з простоюванням автомобілів у черзі під навантаження чи розвантаження, необхідно визначити закон розподілу інтервалів прибуття автомобілів-самоскидів, які здійснюють перевезення інертних матеріалів. Аналіз цієї проблеми базується на використанні такого показника, як математичне очікування довжини черги транспортних засобів. Для проведення математичної обробки статистичних даних щодо прибуття автомобілів під

навантаження та встановлення відповідних законів розподілу інтервалів прибуття і тривалості часу навантаження застосовували методи теорії ймовірностей і математичної статистики.

У результаті фотографії робочого дня, під час якої фіксували моменти прибуття автомобілів-самоскидів до вантажовідправника та тривалість навантажувальних робіт, були отримані дані про інтервали між надходженнями транспортних засобів. Зібрана інформація була згрупована за хвилинними інтервалами.

Для подальшої статистичної обробки даних необхідно було здійснити їх апроксимацію одним із теоретичних законів розподілу. Довжину інтервалу групування визначали за відповідною формулою:

$$\frac{\theta_{max} - \theta_{min}}{1 + 3,32 \times \lg N}$$

де $\theta_{max}, \theta_{min}$ – максимальне та мінімальне значення вибірки

N – загальна кількість замірів;

$$\frac{4176-1}{1+3,32 \times \lg 72} = \frac{4175}{7} = 596,4 \text{ с} = 9,94 \text{ хв}$$

Кількість інтервалів для обробки статистичних даних становить 7, а довжина кожного інтервалу дорівнює 9,94 хв, що можна округлити до 10 хвилин. За допомогою підрахунку визначають кількість спостережень, які потрапляють у кожний інтервал групування. Якщо окреме значення припадає на межу двох інтервалів, його розподіляють порівну між ними. У таблиці 2.2 наведено результати угруповання та узагальнені дані виконаних подальших обчислень. Після цього обчислюють середнє арифметичне, дисперсію та середньоквадратичне відхилення за фактичними даними відповідно до таких формул [16]:

$$\bar{\theta} = \frac{\sum \frac{\theta_i - b}{\Delta \theta} \times N_i}{N} \times \Delta \theta + b; \quad (3.12)$$

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{\sum \left(\frac{\theta_i - b}{\Delta \theta} \right)^2 \times N_i}{N} \times (\Delta \theta)^2 - \left(\bar{\theta} - b \right)^2, \quad (3.13)$$

де θ_i – середина i -того інтервалу групування;

N_i – число замірів у i -тому інтервалі (частота).

Для безперервних розподілів величина $\Delta\theta$ відповідає довжині інтервалів групування, а величина b є сталим значенням, що визначає середину інтервалу, який ділить усі спостереження на дві приблизно рівні частини (так званий «медіанний інтервал»). У нашому випадку $\Delta\theta = 15$, а $b = 10$.

На основі даних Таблиці 3.1. визначимо середнє арифметичне:

$$\bar{\theta} = \frac{4}{72} \times 10 + 15 = 15,55 \text{ хв.}$$

Дисперсія становитиме:

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{124}{72} \times 10^2 - (15,55 - 15)^2 = 171,92 \text{ хв}^2, \sigma = 13,11 \text{ хв.}$$

Отримані результати слугують оцінками математичного очікування та дисперсії теоретичного закону розподілу. Оскільки значення математичного очікування майже збігається зі стандартним відхиленням, доцільно використовувати для апроксимації експоненційний закон розподілу. Після цього емпіричний розподіл необхідно привести до експоненційної кривої.

Таблиця 3.1 – Апроксимація даних щодо прибуття автомобілів під навантаження експоненційним законом розподілу

Інтервали угруповання, хв	Середина інтервалів, θ_i , хв.	Частота, N_i	$\frac{\theta_i - 15}{10}$	$\frac{\theta_i - 15}{10} \times N_i$	$\left(\frac{\theta_i - 15}{10}\right)^2 \times N_i$	Розрахунок з використанням величини, оберненої середній арифметичній ($\lambda = 0,064$)		
						$\lg N_{Ti}$	N_{Ti}	$\frac{(N_i - N_{Ti})^2}{N_{Ti}}$
0 – 10	5	32	-1	-32	32	1,5246	33,4682	0,0644
10 – 20	15	21	0	0	0	1,2469	17,6552	0,6337
20 – 30	25	9	1	9	9	0,9691	9,3135	0,0106
30 – 40	35	6	2	12	24	0,6914	4,9131	0,2405
40 – 50	45	2	3	6	18	0,4136	2,5917	0,1351
50 – 60	55	1	4	4	16	0,1358	1,3672	0,0986
60 – 70	65	1	5	5	25	-0,1419	0,7212	0,1078
Разом	245	72		4	124		70,0301	1,2906

Експоненційний закон допускає чотири основні способи оцінювання параметра λ [17]:

- 1) величина, обернена середньому арифметичному фактичних даних;
- 2) графічний метод;
- 3) метод середніх;
- 4) метод найменших квадратів.

Найбільш практичним та зручним вважається підхід, у якому параметр визначається як величина, обернена середньому арифметичному. Для проведених розрахунків значення λ визначається як:

$$\lambda = \frac{1}{\bar{\theta}} = \frac{1}{15,55} = 0,064 \text{ вимог/хв.}$$

Записуємо експоненційний закон наближено в такому вигляді:

$$\frac{N_i}{N} \approx \lambda \times e^{\lambda \times \theta} \times \Delta \theta. \quad (3.14)$$

Логарифмуємо та отримуємо наступну формулу:

$$\lg N_i = \lg N + \lg \lambda - \lambda \times \theta_i \times \lg e + \lg \Delta \theta. \quad (3.15)$$

Підставляємо фактичні дані:

$$\lg N_{Ti} = \lg 72 + \lg 0,064 - 0,064 \times 0,434 \times \theta_i + \lg 10;$$

$$\lg N_{Ti} = 1,857 - 1,1938 - 0,0277 \times \theta_i + 1,0 = 1,6632 - 0,277 \times \theta_i,$$

де N_{Ti} – теоретична частота i -того інтервалу.

З формули 2.18:

$$N_i = N \lambda \Delta \theta e^{-\lambda \times \theta_i}$$

$$N \lambda \Delta \theta = 72 \times 0,064 \times 10 = 46,08$$

$$N_i = 46,08 e^{-0,064 \theta_i}$$

На основі даних, поданих у табл. 3.1, будуємо графік емпіричного розподілу та порівнюємо його за зовнішнім виглядом із відомими теоретичними

законами розподілу (рис. 3.1). Аналіз показує, що форма емпіричного розподілу найбільш схожа на експоненційний (показовий) закон розподілу.

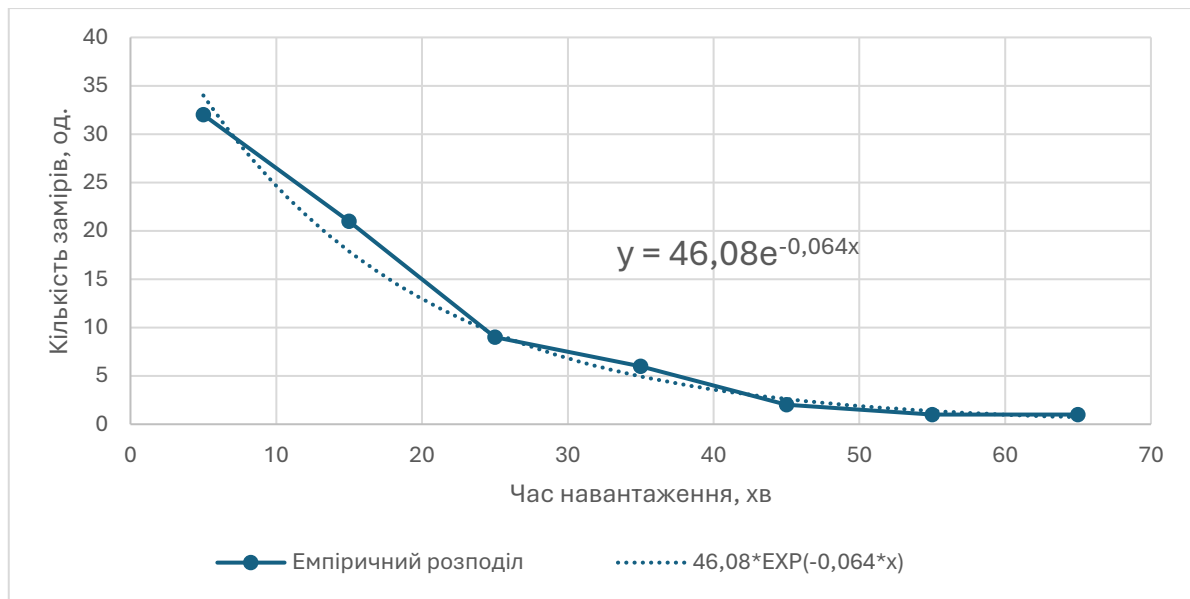


Рисунок 3.1 – Розподіл інтервалів прибуття автомобілів-самоскидів під навантаження МАЗ 5551

Перевірити, наскільки емпіричний розподіл відповідає теоретичному, можна за допомогою одного з критеріїв узгодженості, що застосовуються в математичній статистиці. Найзручнішим у цьому випадку є критерій Романовського, оскільки він не потребує використання спеціальних таблиць. Згідно з цим критерієм, відхилення між емпіричним і теоретичним розподілами вважається випадковим, якщо виконується умова [16]:

$$\frac{|\chi^2 - \tau|}{\sqrt{2 + \tau}} < 3, \quad (3.16)$$

$$\chi^2 = \sum \frac{(N_i - N_{Ti})^2}{N_{Ti}}, \quad (3.17)$$

де τ — кількість ступенів свободи, яка дорівнює числу груп емпіричного розподілу за мінусом кількості зв'язків, накладених на частоти під час формування теоретичного розподілу. Для експоненційного закону розподілу таких зв'язків є дві.

У математичній статистиці для коректного обчислення критерію Романовського χ^2 рекомендується об'єднувати малочисельні групи. Тому останні три групи (табл. 3.1) були об'єднані в одну. Для цієї об'єднаної групи: $\theta_i = 55$, $N_i = 4$, $\Delta\theta_i = 30$. Звідси:

$$\lg N_{Ti} = \lg 72 + \lg 0,064 + \lg 30 - 0,064 \times 0,434 \times 55;$$

$$\lg N_{Ti} = 1,857 - 1,1938 + 1,4771 - 1,5277 = 0,6126;$$

$$N_{Ti} = 4,1;$$

$$\chi^2 = 0,0644 + 0,6337 + 0,0106 + 0,2405 + 0,6126 = 1,5618;$$

$$\tau = 5 - 2 = 3.$$

$$\text{Звідси, } \frac{|1,56-3|}{\sqrt{6}} = \frac{1,44}{2,45} = 0,59 < 3.$$

Це свідчить про те, що застосування експоненційного закону розподілу для апроксимації інтервалів прибуття автомобілів-самоскидів є обґрунтованим. Функція щільності ймовірності в цьому випадку має вигляд [16]:

$$f(\theta) = 0,064 \times e^{-0,064 \theta}$$

Після визначення закону розподілу інтервалів прибуття автомобілів під навантаження переходимо до встановлення закону розподілу тривалості навантажувальних операцій. Для цього застосовується описана вище методика, обравши для порівняння теоретичного та емпіричного розподілів закон Пуассона та використовуючи відповідні таблиці Пуассона для виконання розрахунків. Порядок угруповання вихідних даних щодо тривалості навантаження автомобілів-самоскидів, отриманих у результаті фотографії робочого дня, наведено в таблиці 2.2.

$$\frac{\theta_{max} - \theta_{min}}{1 + 3,32 \times \lg N} = \frac{53 - 4}{1 + 3,32 \times \lg 360} = \frac{49}{10} = 4,9 \text{ хв}$$

Таблиця 3.2 – Апроксимація часу навантаження законом розподілу Пуассона

Інтервали угруповання, хв	Середина інтервалів, θ_i , хв	Довжина інтервалів, $\Delta\theta_i$, хв	Частота, N_i	$\frac{\theta_i - 12,5}{5}$	$\frac{\theta_i - 12,5}{5}$ $\times N_i$	$\left(\frac{\theta_i - 12,5}{5}\right)^2$ $\times N_i$	Розрахунок з використанням величини, оберненої середній арифметичній ($V=0,05$)		
							$\Delta\theta_i \times f(\theta_i)$	N_{Ti}	$\frac{(N_i - N_{Ti})^2}{N_{Ti}}$
0-5	2,5	5	5	-2	-10	20	0,036244	13,04776	4,9638
5-10	7,5	5	61	-1	-61	61	0,154083	55,46992	0,5513
10-15	12,5	5	78	0	0	0	0,202177	72,7837	0,3738
15-20	17,5	5	54	1	54	54	0,187183	67,38595	2,6591
20-25	22,5	5	63	2	126	252	0,146162	52,61838	2,0483
25-30	27,5	5	40	3	120	360	0,103137	37,12931	0,2219
30-35	32,5	5	19	4	76	304	0,068045	24,49613	1,2332
35-40	37,5	5	21	5	105	525	0,042793	15,40538	2,0317
40-45	42,5	5	8	6	48	288	0,025964	9,346883	0,1941
45-50	47,5	5	7	7	49	343	0,01532	5,515125	0,3998
51-55	52,5	5	4	8	32	256	0,00884	3,182481	0,2100
Разом			360		539	2463		356.4	14.89

Розрахуємо середнє арифметичне, дисперсію, стандартне відхилення та порядок закону розподілу:

$$\begin{aligned}\bar{\theta} &= \frac{539}{360} \times 5 + 12,5 = 19,98 \text{ хв} \\ \sigma^2 &= \frac{2463}{360} \times 5^2 - (19,98 - 12,5)^2 = 115,09 \text{ хв}^2 \\ \sigma &= \sqrt{115,1} = 10,73 \text{ хв} \\ k &= \frac{(19,98)^2}{(10,73)^2} = 3,5; \quad \nu = \frac{1}{\theta} = \frac{1}{19,98} = 0,05 \text{ вимог/хв.}\end{aligned}$$

Отже, фактичні дані будемо апроксимувати законом Пуассона.

$$f_k(\theta) = \nu \times k \times P(k-1; \nu k \theta). \quad (3.18)$$

Визначаємо щільність імовірності в середині i -того інтервалу за формулою (2.12), а теоретичну частоту – за виразом:

$$N_{Ti} = f_k(\theta_i \Delta \theta_i). \quad (3.19)$$

Для визначення $P(k-1; \nu k \theta_i)$ використовуються таблиці розподілу Пуассона або формула:

Позначимо $\nu k \theta_i$ як аргумент z_i :

$$z_i = \nu \cdot k \cdot \theta_i,$$

Тоді ймовірність за законом Пуассона визначаємо за наступною формулою:

$$P(k-1; z_i) = \frac{z_i^{k-1}}{(k-1)!} e^{-z_i},$$

Щільність імовірності $f_k(\theta_i)$ дорівнюватиме:

$$f_k(\theta_i) = \nu \cdot k \cdot P(k-1; z_i),$$

Теоретична частота в інтервалі обчислюється за формулою:

$$N_{Ti} = \Delta \theta_i f_k(\theta_i) \cdot N,$$

Результати розрахунків наведено в таблиці 3.2.

Перевіримо узгодження теоретичних та емпіричних даних за критерієм Романовського:

$$\chi^2 = 14,89; \quad \tau = 11 - 2 = 9; \quad \frac{14,89-9}{\sqrt{18}} = 1,39 < 3.$$

Перевірка узгодженості за критерієм Романовського не дозволяє зробити повністю однозначний позитивний висновок щодо повної відповідності розподілів. Проте аналіз згрупованих інтервалів (Таблиця 3.2) показує, що крайні групи мають мінімальний вплив на загальний результат.

Іншими словами, їхня участь у формуванні підсумкових показників є незначною. Тому апроксимацію часу навантаження за законом Пуассона можна вважати допустимою та достатньо точною.

Додаткове підтвердження відповідності теоретичного та емпіричного розподілів дає графік (рис. 3.2), побудований на основі даних табл. 3.2.

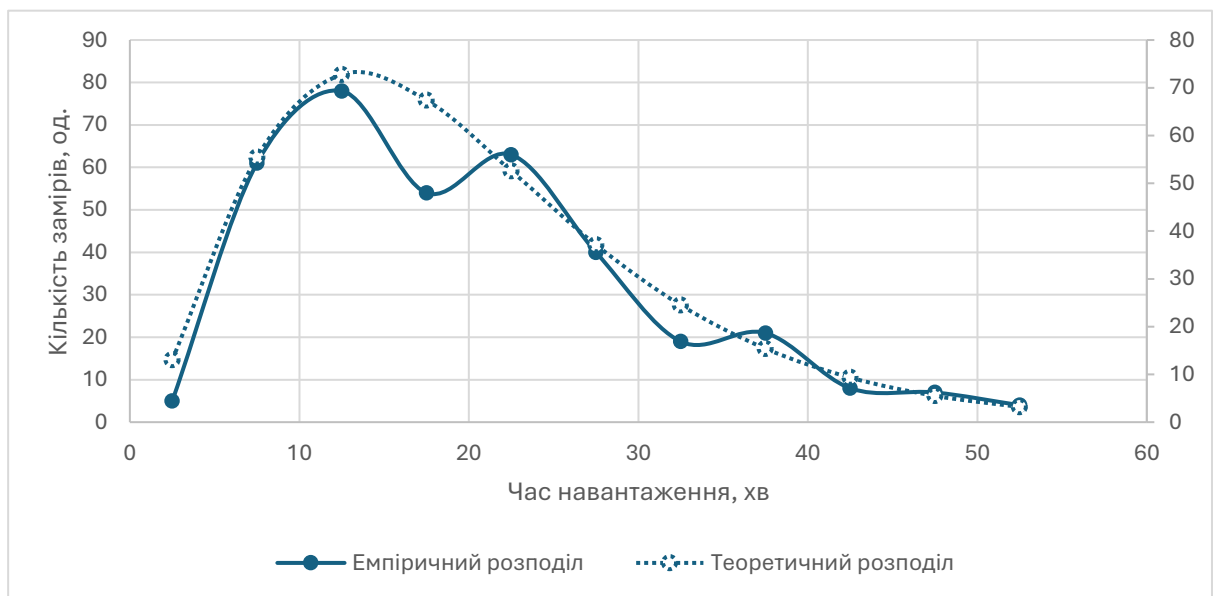


Рисунок 3.2 – Розподіл часу навантаження

Встановлено, що інтервали прибуття автомобілів-самоскидів під навантаження та розвантаження відповідають експоненційному закону розподілу, а тривалість навантажувальних операцій може бути адекватно описана законом Пуассона. Це створює підґрунтя для використання методів теорії масового обслуговування та її математичного апарату з метою визначення оптимального співвідношення між кількістю автомобілів і навантажувально-розвантажувальних механізмів.

3.3 Визначення оптимального співвідношення автомобілів та навантажувальних засобів

Як зазначалося раніше, основними показниками ефективності роботи замкнутих систем є коефіцієнт простою вимоги, що обслуговується, A_H/C , та коефіцієнт простою обслуговуючого апарату A_C/s . Прикладом такої системи може слугувати організація роботи навантажувального пункту, коли певна кількість автомобілів здійснює вивезення вантажу за маятниковими маршрутами та проходить завантаження лише в одному напрямку. Розглянемо відповідні характеристики системи для нашого випадку перевезень.

За результатами попередніх обчислень середня тривалість навантаження одного автомобіля становить 19,98 хв. Середній час від завершення навантаження до моменту наступного повернення автомобіля під навантаження дорівнює 49 хв. З огляду на літературні джерела, присвячені використанню математичних методів у плануванні та організації вантажних автомобільних перевезень [18], приймається, що годинні витрати простою навантажувально-розвантажувального механізму є удвічі вищими, ніж простою автомобіля.

Таким чином, розглядаємо замкнуту систему масового обслуговування, ефективність якої може бути оцінена за такою формулою:

$$A_H + 2A_C \rightarrow \min \quad (3.20)$$

При цьому собівартість однієї години простою автомобіля приймається за одиницю. Для системи з одним обслуговуючим апаратом основними характеристиками її роботи є [19]:

- імовірність того, що всі обслуговуючі апарати вільні — P_0 ;
- імовірність того, що в системі обслуговування перебуває рівно n вимог — P_n ;
- середня кількість вимог у накопичувачі — A_H ;
- середня кількість вільних обслуговуючих апаратів — A_C .

Ці показники обчислюються за формулами:

$$P_0 = \frac{1}{1 + 0,23 \times C + \sum_{n=2}^C \frac{C!}{(C-n)!} \times 0,41^n}, \quad (3.21)$$

$$A_H = \sum_{n=2}^C \frac{(n-1) \times C!}{(C-n)!} \times 0,41^n \times P_0, \quad (3.22)$$

$$A_C = P_0. \quad (3.23)$$

Величина 0,41 отримана як відношення $(1/49)/(1/19,98) = 0,41$.

Результати розрахунків для різної кількості джерел вимог C наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Показники функціонування замкнутої пуассонівської системи з одним обслуговуючим апаратом для різної кількості джерел вимог

Кількість джерел вимог C	$P_0(A_C)$	A_H	$A_H + 2A_C$
1	0,7092	0,0000	1,4184
2	0,5030	0,0846	1,0905
3	0,3567	0,2291	0,9425
4	0,2530	0,4161	0,9221
5	0,1794	0,6333	0,9922
6	0,1273	0,8719	1,1265

Із таблиці видно, що мінімальні витрати, пов'язані з простоєм навантажувального механізму та автомобілів, досягаються тоді, коли на один навантажувальний механізм припадає чотири автомобілі. Графічна залежність собівартості простою навантажувального обладнання та транспортних засобів від їх кількості подана на рис. 3.3.

Оскільки на практиці кількість автомобілів, що прибувають під навантаження, зазвичай перевищує чотири (у нашому випадку передбачено роботу шести автомобілів), необхідно додатково виконати розрахунок показників функціонування замкнутої пуассонівської системи та собівартості простою для варіанта з двома навантажувальними механізмами.

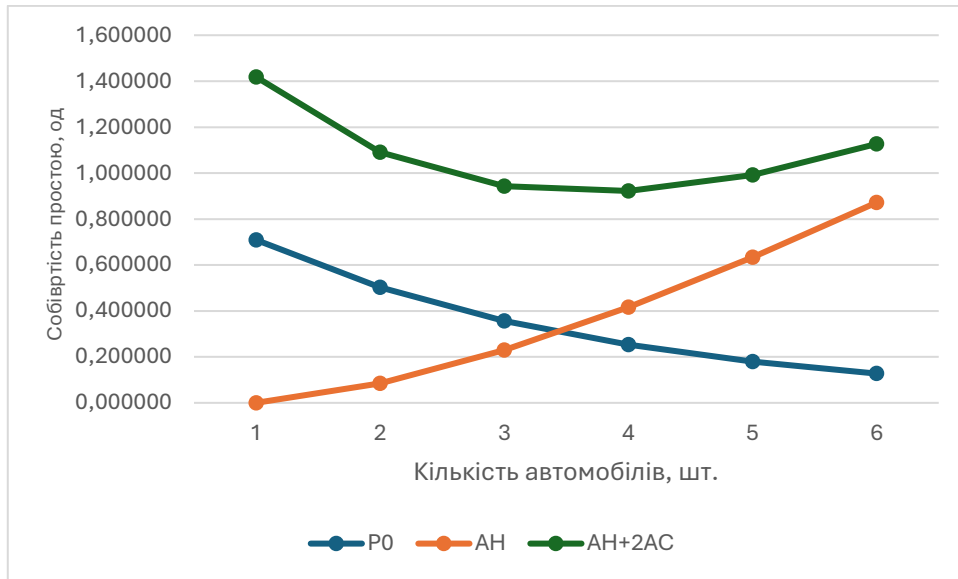


Рисунок 3.3 – Графік зміни собівартості простою одного навантажувального механізму та автомобілів залежно від їх кількості

Отримані результати для системи з двома обслуговуючими апаратами наведено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Характеристики роботи замкнутої пуассонівської системи з двома обслуговуючими апаратами для різної кількості джерел вимог ($n=6$)

n	$\frac{P_n}{P_0}$	P_n	A_H	A_C
0	1	0,100513092	-	0,201026
1	2,46	0,247262207	-	0,247262
2	2,5215	0,253443762	0	0
3	2,06763	0,207823885	0,207824	-
4	1,271592	0,127811689	0,255623	-
5	0,521353	0,052402793	0,157208	-
6	0,106877	0,010742572	0,04297	-
Σ	9,948953		0,663626	0,448288

Визначимо співвідношення P_n/P_0 за формулою:

$$\frac{P_n}{P_0} = \frac{C!}{n! \times (C-n)!} \times 0,41, \quad \text{де } n = 1,2$$

$$\frac{P_n}{P_0} = \frac{C!}{2^{n-2} \times 2! \times (C-n)!} \times 0,41^n, \quad \text{де } n = 3,4 \dots C. \quad (3.24)$$

Звідси, підсумовуючи співвідношення P_n/P_0 та враховуючи, що $\sum_{n=0}^6 P_n = 1$, отримуємо:

$$\sum_{n=0}^6 \frac{P_n}{P_0} = \frac{1}{P_0} \sum_{n=0}^6 P_n = \frac{1}{P_0} = 9,948953,$$

тоді $P_0=0,2411$. Якщо помножити значення другого стовпчика на P_0 , отримаємо ймовірності P_n , які показують, що в системі перебуває рівно n вимог (автомобілів). Середня кількість вимог у накопичувачі визначається за формулою:

$$A_H = \sum_{n=2}^6 (n - 2) \times P_n \quad (3.25)$$

Результати обчислень подані в четвертому стовпчику таблиці 3.4, а в п'ятому стовпчику наведено кількість вільних обслуговуючих апаратів, розраховану за формулою:

$$A_C = \sum_{n=2}^6 (2 - n) \times P_n. \quad (3.26)$$

Таким чином, при наявності 6 автомобілів, що потребують навантаження, система з двома навантажувальними механізмами має середню кількість автомобілів у черзі $0,6636 (\approx 1)$, а середню кількість механізмів, які простоюють, — $0,4483$. Собівартість простою автомобілів і навантажувальних механізмів становить:

$$0,6636 + 2 \cdot 0,4483 = 1,5602$$

Аналогічні розрахунки виконуємо для різної кількості автомобілів, закріплених за пунктом навантаження. Підсумкові результати наведено в таблицях 3.5–3.9.

Таблиця 3.5 – Показники роботи замкнутої пуассонівської системи з двома обслуговуючими апаратами для різної кількості джерел вимог (при $C = 5$)

n	$\frac{P_n}{P_0}$	P_n	A_H	A_C
0	1	0,159348042	-	0,318696
1	2,05	0,326663486	-	0,326663
2	1,681	0,267864059	0	0
3	1,033815	0,164736396	0,164736	-
4	0,423864	0,067541922	0,135084	-
5	0,086892	0,013846094	0,041538	-
Σ	6,275571		0,341359	0,64536

Таблиця 3.6 – Показники роботи замкнутої пуассонівської системи з двома обслуговуючими апаратами для різної кількості джерел вимог (при $C = 4$)

n	$\frac{P_n}{P_0}$	P_n	A_H	A_C
0	1	0,241144055	-	0,482288
1	1,64	0,39547625	-	0,395476
2	1,0086	0,243217894	0	0
3	0,413526	0,099719337	0,099719	-
4	0,084773	0,020442464	0,040885	-
Σ	4,146899		0,140604	0,877764

Таблиця 3.7 – Показники функціонування замкнутої Пуассонівської системи із двома обслуговуючими апаратами для різної кількості джерел вимог ($n=3$)

n	$\frac{P_n}{P_0}$	P_n	A_H	A_C
0	1	0,352400366	-	0,704801
1	1,23	0,433452451	-	0,433452
2	0,5043	0,177715505	0	0
3	0,103382	0,036431678	0,036432	-
Σ	2,837682		0,036432	1,138253

Таблиця 3.8 – Показники функціонування замкнутої Пуассонівської системи із двома обслуговуючими апаратами для різної кількості джерел вимог ($n=7$)

n	$\frac{P_n}{P_0}$	P_n	A_H	A_C
0	1	0,059838148	-	0,119676
1	2,87	0,171735485	-	0,171735
2	3,5301	0,211234647	0	0
3	3,618353	0,216515513	0,216516	-
4	2,967049	0,177542721	0,355085	-
5	1,824735	0,109188773	0,327566	-
6	0,748141	0,044767397	0,17907	-
7	0,153369	0,009177316	0,045887	
Σ	16,71175		1,124123	0,291412

Таблиця 3.9 – Собівартість простою автомобілів та навантажувальних механізмів у системі з двома обслуговуючими апаратами для різної кількості джерел вимог

Кількість автомобілів (n)	A_H	$P_0(A_C)$	$A_H + 2A_C$
3	1,138253	0,036432	2,312938
4	0,877764	0,140604	1,896133
5	0,645360	0,341359	1,632078
6	0,448288	0,663626	1,560203
7	0,291412	1,124123	1,706947
6	0,127258	0,871939	1,126455

У таблиці 3.9 наведено результати розрахунку собівартості простою автомобілів і навантажувальних механізмів для різної кількості автомобілів та навантажувальних апаратів у замкнутій системі масового обслуговування. Аналіз отриманих даних свідчить, що зі збільшенням кількості автомобілів (n) за сталої кількості навантажувачів ($r = 2$) показник A_n зменшується, тоді як значення $P_0(A_C)$ та загальна собівартість простою мають мінімум при певному співвідношенні ресурсів. Найменше значення собівартості простою при використанні двох навантажувачів спостерігається для $n = 6$ автомобілів, де $= 1,560203$, що відповідає оптимальному поєднанню коефіцієнтів простою автомобілів ($A_n = 0,448288$) та навантажувальних механізмів ($= 0,663626$). Подальше збільшення кількості автомобілів (до $n = 7$) спричиняє зростання собівартості через накопичення черги та збільшення навантаження на обслуговуючі апарати. Таким чином, оптимальним режимом роботи системи є конфігурація 6 автомобілів та 2 навантажувальні механізми, яка забезпечує мінімальну собівартість простою та найефективніше використання обладнання й рухомого складу.

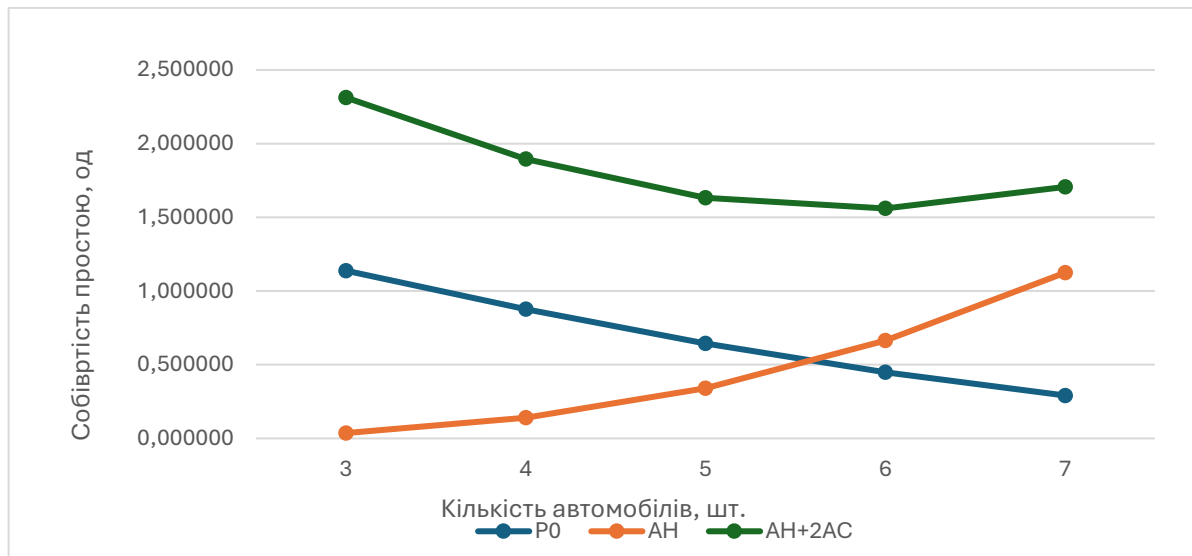


Рисунок 3.4 – Графік зміни собівартості простою двох навантажувальних механізмів та автомобілів залежно від їх кількості

Отже, застосування математичних методів системи масового обслуговування дає змогу визначити оптимальне співвідношення між транспортними засобами та навантажувально-розвантажувальним обладнанням, використовуючи як критерій ефективності їх спільної роботи собівартість простою автомобілів і навантажувально-розвантажувальних механізмів.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі було розроблено комплекс заходів щодо удосконалення перевезень будівельних вантажів ТОВ «ЖИТЛОБУД-2» на основі раціонального вибору вантажопідйомності рухомого складу та оптимізації взаємодії автомобілів із навантажувально-розвантажувальними механізмами. Показано, що ключовим критерієм ефективності є мінімізація собівартості перевезень і простоїв як транспортних засобів, так і навантажувальної техніки.

На основі аналітичних залежностей було визначено раціональну вантажопідйомність автомобіля-самоскида для перевезення піску. Враховуючи відстань перевезення, технічну швидкість, коефіцієнти використання пробігу й вантажопідйомності, а також нормативи часу на навантажувально-розвантажувальні операції, встановлено, що оптимальна вантажопідйомність становить близько 9 т. Це підтверджує доцільність використання на підприємстві автомобілів-самоскидів МАЗ 5551 вантажопідйомністю 9 т, які вже наявні в автопарку. Розрахунок добової продуктивності дав змогу обґрунтувати потребу в шести таких автомобілях для забезпечення заданого обсягу перевезень.

У розділі також встановлено закони розподілу інтервалів прибуття автомобілів під навантаження та тривалості навантажувальних операцій. На основі угруповання фактичних даних, обчислення середнього, дисперсії та перевірки за критерієм Романовського показано, що інтервали прибуття автомобілів-самоскидів під навантаження доцільно описувати експоненційним законом, а тривалість навантаження – законом Пуассона. Це забезпечує можливість застосування апарату теорії масового обслуговування при плануванні роботи транспортних засобів і навантажувальних механізмів.

Подальший аналіз системи масового обслуговування дав змогу визначити оптимальне співвідношення між кількістю автомобілів та навантажувально-розвантажувальних засобів. На основі розрахунків імовірностей станів системи, середньої кількості вимог у накопичувачі та кількості вільних обслуговуючих апаратів, а також собівартості простою встановлено, що мінімальні витрати досягаються за умови одночасної роботи шести автомобілів і двох навантажувальних механізмів. При цьому встановлено, що мінімальні витрати, пов'язані з простоєм одного навантажувального механізму та автомобілів, досягаються тоді, коли на один навантажувальний механізм припадає чотири автомобілі. Збільшення кількості автомобілів понад цей рівень призводить до зростання собівартості через накопичення черг для обох систем.

4 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАПРОПОНОВАНИХ ЗАХОДІВ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРЕВЕЗЕНЬ БУДІВЕЛЬНИХ ВАНТАЖІВ

4.1 Оцінка оптимального варіанту організації роботи в пункті навантаження транспортних засобів

Важливе місце в організації ефективного процесу перевезення вантажів на будівельні об'єкти займають задачі, пов'язані з економічною оцінкою спільної роботи транспортних засобів і навантажувально-розвантажувальних механізмів. Такі оцінки будуються на аналізі вартісних показників, що застосовуються як критерії оптимальності. Їх вирішення вимагає проведення багатоваріантних розрахунків із використанням математичних методів та моделей.

Для економічного аналізу роботи автомобілів і навантажувальних механізмів на будівництві можуть застосовуватися такі критерії [1-5]:

- мінімізація витрат, пов'язаних із простоем автомобілів у чергах на завантаження чи розвантаження;
- мінімізація витрат від простою навантажувально-розвантажувальних механізмів як на будівельному майданчику, так і на підприємствах, що відвантажують будівельні матеріали.

Підвищення ефективності транспортного обслуговування будівництва значною мірою залежить від удосконалення системи планування та управління транспортними процесами. Використання інструментарію теорії масового обслуговування дає змогу більш раціонально організувати взаємодію транспортних і навантажувальних засобів [16].

Крім того, математичний апарат теорії масового обслуговування дозволяє визначити можливі шляхи скорочення часу очікування в чергах, а також

вирішувати задачі оптимізації процесу обслуговування транспортних засобів у пунктах завантаження й розвантаження [20].

Для зменшення витрат, пов'язаних із непродуктивними простоями транспортних засобів і навантажувальних механізмів під час виконання завантажувальних операцій у вантажовідправника, визначимо оптимальний варіант організації роботи навантажувального пункту.

На основі проведених розрахунків можна визначити собівартість простою автомобілів та навантажувальних механізмів у системі з двома обслуговуючими апаратами для різної кількості транспортних засобів. У таблиці 3.9 подано результати, які дозволяють встановити оптимальне співвідношення між кількістю автомобілів і навантажувальними засобами.

Аналізуючи дані Таблиці 3.9, що містить розраховані у попередньому розділі значення собівартості простою автомобілів і навантажувальних механізмів, можна встановити мінімальне значення цього показника та визначити оптимальну кількість автомобілів для забезпечення ефективної роботи з двома навантажувальними механізмами. За значенням мінімальної собівартості апарат теорії масового обслуговування дає можливість розрахувати коефіцієнти простою транспортних і навантажувальних засобів [21].

Отже, оптимальний варіант організації роботи відповідає мініимальному значенню собівартості простою автомобілів та навантажувально-розвантажувальних механізмів.

Коефіцієнт простою автомобіля визначається за формулою:

$$K_A = \frac{A_H}{C}, \quad (4.1)$$

де A_H — середня кількість вимог (автомобілів), що перебувають у накопичувачі;

C — загальна кількість автомобілів, які обслуговуються системою.

Коефіцієнт простою навантажувального механізму обчислюється так:

$$K_{HM} = \frac{A_C}{S}, \quad (4.2)$$

де A_c — середня кількість вільних обслуговуючих апаратів;

S — кількість навантажувальних механізмів.

Результати проведених обчислень подано в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Результати розрахунку коефіцієнтів простою автомобілів та простою навантажувального механізму

Кількість автомобілів (n)	Кількість навантажувачів (r)	Собівартість простою автомобілів та навантажувальних механізмів	Коефіцієнт простою автомобіля	Коефіцієнт простою навантажувального механізму
1	2	1,090538705	0,07753332	0,46123334
1	3	0,942537888	0,24303841	0,37848079
1	4	0,92212586	0,45126414	0,27436793
1	5	0,992202335	0,63831193	0,18084404
1	6	1,126455054	0,77405567	0,11297217
2	3	2,312938045	0,015751256	0,492124372
2	4	1,896132986	0,074153166	0,462923417
2	5	1,632077665	0,209155808	0,395422096
2	6	1,560202713	0,425345966	0,287327017
2	7	1,706947006	0,658557904	0,170721048

Порівняльний аналіз роботи системи з одним та двома навантажувачами показує, що обидва варіанти мають різні режими ефективності залежно від кількості автомобілів, які одночасно потребують навантаження. Зміна кількості навантажувачів істотно впливає на рівень простоїв як автомобілів, так і навантажувальних механізмів, а також на загальну собівартість простою.

Для системи з двома навантажувачами ($r = 2$) спостерігається мінімальна собівартість простою для $n = 6$ автомобілів, що пов'язано зі зменшенням коефіцієнта простою навантажувальних механізмів. Після досягнення цього значення система починає перевантажуватися, що спричиняє зростання простоїв автомобілів і відповідне збільшення загальної собівартості.

У випадку роботи з одним навантажувачем ($r = 1$) мінімальна собівартість простою спостерігається при $n = 3-4$ автомобілях (0,9425–0,9221). Проте

подальше збільшення кількості автомобілів призводить до підвищення коефіцієнта простою автомобілів (до 0,774 при $n = 6$), що свідчить про зростання навантаження для навантажувального механізму та зниження ефективності системи. Відповідно, після $n = 4$ собівартість простою починає збільшуватися.

Такий варіант є оптимальним лише серед конфігурацій із двома навантажувачами, однак не є найбільш економічно вигідним у порівнянні з одноканальною системою. Порівняння двох систем показує (Рисунок 4.1), що навіть при збільшенні кількості автомобілів до шести собівартість системи з одним навантажувачем залишається нижчою (1,1265 проти 1,5602). Звідси, можна стверджувати, що система з двома навантажувачами та 6 автомобілями має вищу продуктивність, проте є менш економічно вигідною у порівнянні з системою з 1 навантажувачем та 6 автомобілями.

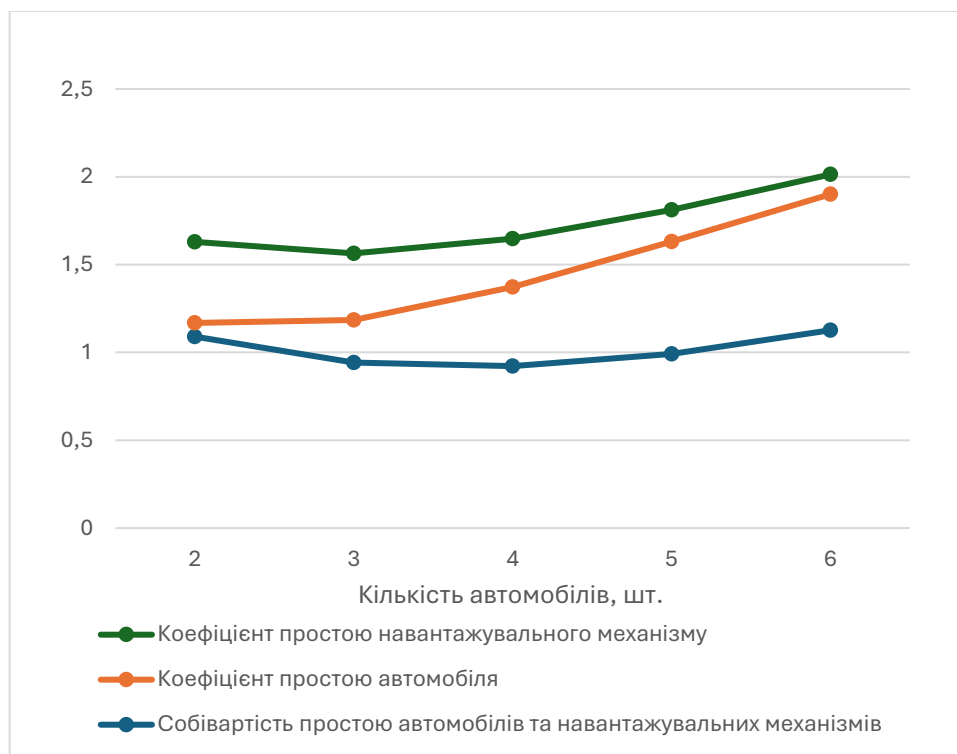


Рисунок 4.1 – Графік зміни собівартості простою автомобілів та коефіцієнтів простою від кількості автомобілів у системі із одним навантажувачем

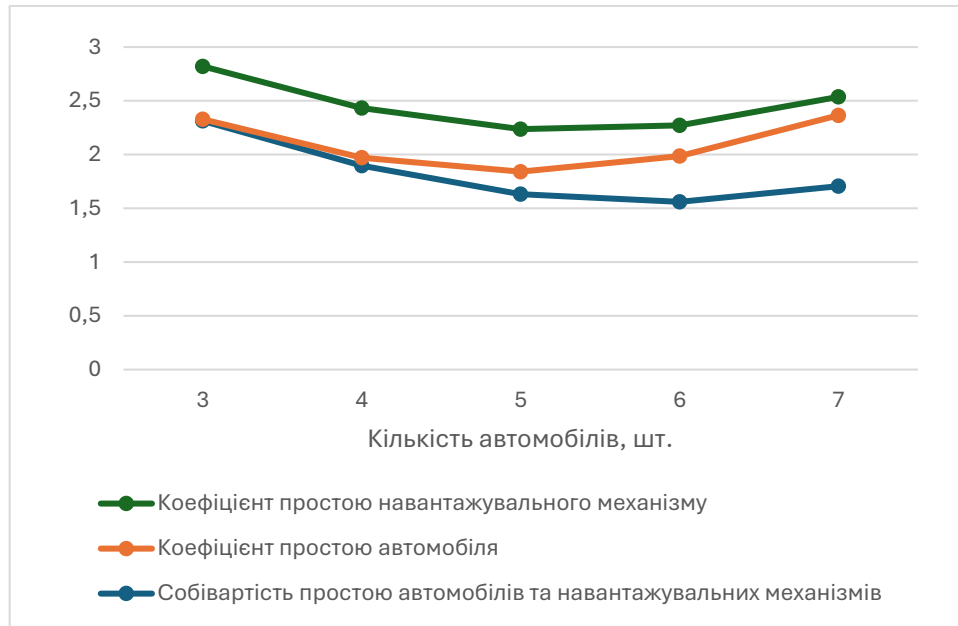


Рисунок 4.2 – Графік зміни собівартості простого автомобілів та коефіцієнтів простого від кількості автомобілів у системі із двома навантажувачами

На Рисунку 4.3 наведений графік залежності собівартості простого автомобілів та навантажувальних механізмів від кількості автомобілів у системі з двома обслуговуючими апаратами.

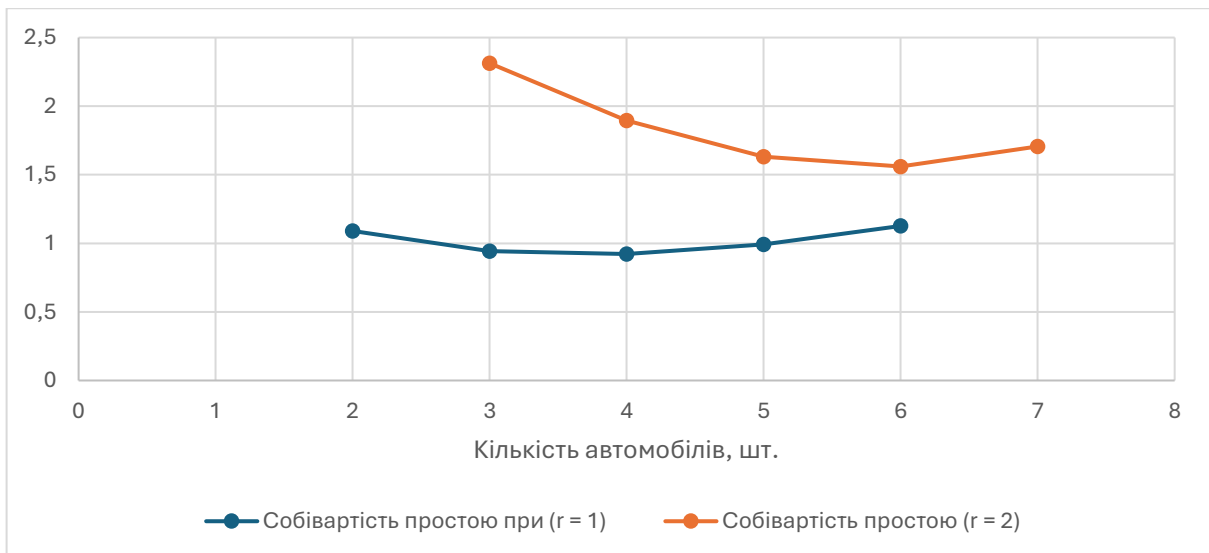


Рисунок 4.3 – Графік зміни собівартості простого автомобілів від кількості автомобілів у системах з одним ($r=1$) та двома навантажувачами ($r=2$)

Для забезпечення ефективної роботи за більшої кількості транспортних засобів можна рекомендувати коригування графіків виходу автомобілів з транспортного підприємства до пункту навантаження.

Варто підкреслити, що аналогічні розрахунки можуть бути виконані й для багатоканальних систем із різною кількістю навантажувально-розвантажувальних механізмів. Це дозволяє визначити оптимальне співвідношення між кількістю автомобілів та засобами механізації з погляду мінімізації витрат на виконання вантажних операцій і зниження їх трудомісткості.

Висновки до розділу 4

У четвертому розділі проведено економічну оцінку варіантів організації роботи пункту навантаження та визначено оптимальне співвідношення між кількістю транспортних засобів і навантажувально-розвантажувальних механізмів. На основі застосування математичного апарату теорії масового обслуговування встановлено вплив кількості навантажувачів на рівень непродуктивних простоїв і загальні витрати підприємства.

Порівняння одноканальної системи ($r = 1$) та двоканальної системи ($r = 2$) показало, що обидва варіанти демонструють різну собівартість простоїв у системах залежно від інтенсивності транспортного потоку. Мінімальні витрати в системі з одним навантажувачем спостерігаються при 3–4 автомобілях (0,9425–0,9221), що робить її найбільш ефективною за умов невеликого потоку транспортних засобів. Подальше збільшення кількості автомобілів призводить до значного росту простою автомобілів і, відповідно, до збільшення загальної собівартості.

У системі з двома навантажувачами мінімальна собівартість досягається при 6 автомобілях (1,5602). Проте порівняльний аналіз показує, що навіть при

однаковій кількості транспортних засобів ($n = 6$) одноканальна система залишається більш економічно вигідною: її собівартість становить 1,1265, що є нижчим за аналогічний показник двоканальної системи. Таким чином, двоканальна система забезпечує вищу продуктивність, проте є менш економічно вигідною у порівнянні з одноканальною системою з 6 автомобілями.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті виконання кваліфікаційної роботи отримано наступні результати:

1. Проведено аналіз діяльності ТОВ «ЖИТЛОБУД-2» – одного з провідних будівельних підприємств м. Луцька, що поєднує будівельно-монтажні роботи з організацією перевезень будівельних вантажів. Встановлено, що підприємство має розвинену виробничу базу (виготовлення бетону, залізобетонних виробів, бруківки) та власний парк рухомого складу, який забезпечує логістичну підтримку будівельних процесів у межах Волинської, Рівненської, Львівської та Тернопільської областей.

2. Проаналізовано фінансово-економічні показники роботи ТОВ «ЖИТЛОБУД-2» за 2019–2024 рр. Виявлено нестабільну, але загалом позитивну динаміку розвитку: після спаду обсягів реалізації у 2021–2022 рр. підприємству вдалося підвищити обсяги реалізації та наданих послуг у 2023–2024 рр. Водночас зниження чистого прибутку та рентабельності у 2024 році засвідчило необхідність оптимізації витрат, зокрема за рахунок вдосконалення організації транспортних процесів.

3. Досліджено структуру основних вантажів і парку рухомого складу підприємства. Визначено, що ТОВ «ЖИТЛОБУД-2» транспортує переважно сипучі матеріали, залізобетонні вироби, бруківку, металеві та оздоблювальні матеріали, забезпечуючи для них відповідні умови навантаження, кріплення та перевезення. Парк рухомого складу налічує 15 транспортних засобів, серед яких найбільшу частку займають самоскиди МАЗ 5551 вантажопідйомністю 9 т. Встановлено, що понад 60 % техніки експлуатується більше 15 років, що зумовлює потребу поступового оновлення автопарку для зниження експлуатаційних витрат і підвищення надійності перевезень.

4. Сформовано та досліджено модель організації перевезень будівельних вантажів як системи масового обслуговування (СМО). На прикладі маятникового маршруту «вул. Веселкова, 50 – вул. Рівненська, 113, м. Луцьк» з використанням автомобілів ЗІЛ-ММЗ 4505 та МАЗ 5551 розраховано основні техніко-експлуатаційні показники. Показано, що за однакової кількості обертів за зміну (9 обертів) МАЗ 5551 забезпечує добовий обсяг перевезень 75,6 т проти 49,5 т для ЗІЛ-ММЗ 4505, а вантажообіг за їздки становить 57,96 т·км проти 37,95 т·км відповідно. Це підтверджує доцільність пріоритетного використання автомобілів МАЗ 5551 для перевезення інертних матеріалів.

5. На основі аналізу роботи фронтального навантажувача CASE 421В визначено фактичний час завантаження кузовів самоскидів: у середньому 6 ковшів (5,5 хв) для автомобіля ЗІЛ-ММЗ 4505 та 9 ковшів (приблизно 8–9 хв) для МАЗ 5551. Ці параметри було враховано при побудові моделей систем масового обслуговування.

6. Визначено раціональну вантажопідйомність рухомого складу для перевезення піску. На основі аналітичних залежностей, що враховують відстань перевезення, технічну швидкість, коефіцієнти використання пробігу й вантажопідйомності, а також нормативи часу на навантажувально-розвантажувальні операції, встановлено, що оптимальна вантажопідйомність самоскида становить близько 9 т. Це узгоджується з фактичною наявністю в автопарку підприємства автомобілів МАЗ 5551 вантажопідйомністю 9 т і підтверджує доцільність їх подальшого використання як базового типу рухомого складу.

7. Встановлено закони розподілу інтервалів прибуття автомобілів під навантаження та тривалості навантаження. На основі статистичної обробки фактичних даних встановлено, що інтервали прибуття автомобілів-самоскидів під навантаження можуть бути описані експоненційним законом розподілу, тоді як тривалість навантажувальних операцій адекватно апроксимується законом

Пуассона, що дозволяє застосовувати теорію масового обслуговування під час планування роботи транспортних засобів та навантажувальних механізмів.

8. Визначено оптимальне співвідношення між кількістю автомобілів і навантажувальними засобами з урахуванням економічної ефективності. На основі моделювання замкнутих систем масового обслуговування для різних конфігурацій парку та кількості навантажувачів визначено, що при використанні одного навантажувача мінімальна собівартість простоїв досягається за 3–4 автомобілів (0,9425–0,9221), а при двох навантажувачах – за 6 автомобілів (1,5602). Разом із тим встановлено, що навіть за однакової кількості автомобілів ($n = 6$) одноканальна система має нижчу собівартість простою (1,1265) порівняно з двоканальною (1,5602), тобто система з двома навантажувачами є більш продуктивною, але менш економічно вигідною. Розраховано коефіцієнти простою транспортних засобів та навантажувальних механізмів, які показали, що збільшення кількості автомобілів при незмінній кількості навантажувачів призводить до зростання простою автомобілів та зменшення простою навантажувальної техніки, що впливає на загальну собівартість роботи системи.

Отже, реалізація запропонованих заходів дасть змогу знизити витрати від простоїв, підвищити ефективність транспортного обслуговування будівництва та покращити загальні економічні результати діяльності підприємства.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Босняк М. Г. Вантажні автомобільні перевезення : навчальний посібник. Київ : Видавничий дім «Слово», 2010. 408 с.
2. Оліскевич М. Організація автомобільних перевезень. Ч. 1. Вантажні перевезення. Львів : Львівська політехніка, 2017. 336 с.
3. Горяїнов О. М. Транспортні технології і логістика. Кн. 1. Теорія і практика дисципліни «Вантажні перевезення» : підручник. Харків : ХНТУСГ ім. П. Василенка, 2013. 490 с.
4. Жерновий Ю. В. Імітаційне моделювання систем масового обслуговування. Львів : Видавничий центр ЛНУ ім. І. Франка, 2007. 312 с.
5. Підходи до управління матеріальними потоками та оптимізації вантажних перевезень : колективна монографія / Н. В. Птиця, К. Г. Ковцур, О. О. Орда, О. С. Колій ; за ред. П. Ф. Горбачова. Харків : СГ НТМ «Новий курс», 2025. 154 с. ISBN 978-617-7886-80-7. DOI: 10.61718/tsl2025m2.
6. OpenDataBot. ТОВ «ЖИТЛОБУД-2» (ЄДРПОУ 01274350). URL: <https://opendatabot.ua/c/01274350> (дата звернення: 16.11.2025).
7. Офіційний сайт ТОВ «ЖИТЛОБУД-2». URL: <http://www.zb2.com.ua/> (дата звернення: 17.11.2025).
8. Clarity Project. Інформація про тендерну діяльність ТОВ «ЖИТЛОБУД-2». URL: <https://clarity-project.info/tenderer/01274350> (дата звернення: 18.11.2025).
9. Литвинов А. Л. Теорія систем масового обслуговування : навчальний посібник. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. 141 с.
10. Основи теорії транспортних процесів і систем : конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня / уклад. І. С. Мурований. Луцьк : РВВ ЛНТУ, 2019. 97 с.

11. Федик Ю. Організація перевезень будівельних вантажів як системи масового обслуговування // Інноваційні технології в транспорті та механічній інженерії : тези V студентської наук.-техн. конф. Луцьк : ЛНТУ, 2025. С. 304–306.
12. Дмитриченко М. Ф., Яцківський Л. Ю., Ширяєва С. В., Докуніхін В. 3. Основи теорії транспортних процесів і систем : навчальний посібник. Київ : Видавничий дім «Слово», 2009. 336 с.
13. Технічні характеристики колісного навантажувача CASE 421B. URL: <https://www.lectura-specs.com.ua/ua/model/budivel-na-tehnika/kolisni-navantazuvaci-case/421-b-18721> (дата звернення: 19.11.2025).
14. Вільковський Є. К., Кельман І. І., Бакуліч О. О. Вантажознавство (вантажі, правила перевезень, рухомий склад) : підручник. Львів : Інтелект-Захід, 2007. 496 с.
15. Горяїнов О. М. Вантажні перевезення : конспект лекцій (для студентів напрямку «Транспортні технології»). Харків : ХНАМГ, 2009. 109 с.
16. Бідюк П. І., Ткач Б. П., Harrington Т. Математична статистика : навчальний посібник. Київ : ДП «Вид. дім «Персонал», 2018. 348 с.
17. Практична робота № 5 «Ідентифікація закону розподілу». URL: <https://share.google/XpVOd8nGAZlY6IpTx> (дата звернення: 20.11.2025).
18. Гайванович Н. Використання теорії масового обслуговування для управління логістичним забезпеченням проєктів // Економіка та суспільство. 2020. № 22. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2020-22-1>.
19. Лашених О. А., Кузькін О. Ф. Методи і моделі оптимізації транспортних процесів і систем : навчальний посібник. Запоріжжя : ЗНТУ, 2006. 435 с.
20. Основи теорії транспортних процесів і систем : практичні заняття для здобувачів першого (бакалаврського) рівня / уклад. І. С. Мурований, В. І. Мялковська. Луцьк : РВВ ЛНТУ, 2018. 35 с.

21. Dragu V., Dinu O., Rusca A., Burciu S., Roman E. Queuing theory models used for port equipment sizing // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 227. Article 012040. DOI: 10.1088/1757-899X/227/1/012040.