

Міністерство освіти і науки України
Київський національний університет будівництва і архітектури

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

НЕЧИПОРУК ВІКТОР ГРИГОРОВИЧ

УДК 69.002.5

ДИСЕРТАЦІЯ

**ВДОСКОНАЛЕННЯ СЕРВІСНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ
МАШИН ДЛЯ БУДІВНИЦТВА ДОРІГ ІЗ ВРАХУВАННЯ ЇХ
ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ**

Спеціальність: 133 – «Галузеве машинобудування»

Галузь знань: 13 – «Механічна інженерія»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ В.Г. Нечипорук

Наукові керівники: **Назаренко Іван Іванович,**

доктор технічних наук, професор кафедри

машин та обладнання технологічних

процесів КНУБА,

Клименко Микола Олександрович,

кандидат технічних наук, доцент, завідувач

кафедри машин та обладнання технологічних

процесів КНУБА

Київ – 2026

АНОТАЦІЯ

Нечипорук В.Г. Вдосконалення сервісного обслуговування машин для будівництва доріг із врахування їх експлуатаційних показників – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 13 – «Механічна інженерія» за спеціальністю 133 – Галузеве машинобудування. Київський національний університет будівництва і архітектури, МОН України, Київ, 2025.

Основний зміст дисертаційної роботи. Дисертація присвячена вирішенню актуальної науково-прикладної проблеми, яка полягає у розробці науково обґрунтованих методів вдосконалення сервісного обслуговування машин для будівництва доріг із врахування їх експлуатаційних показників. Сучасне дорожнє будівництво являє собою складну інженерну систему, де ефективність кожного етапу безпосередньо залежить від технічного стану та надійності задіяних машин. Процес улаштування асфальтобетонних доріг вимагає суворої синхронізації між екскаваторами, бульдозерами, асфальтоукладачами та котками. Будь-яка зупинка через технічну несправність призводить не лише до фінансових втрат й до порушення технологічного циклу, що критично для гарячих асфальтобетонних сумішей. Існуючі методи сервісу, що базуються на існуючих нормативних положеннях не в повній мірі задовольняють сучасним вимогам до забезпечення надійної роботи дорожньої техніки. Незапланований вихід із ладу деталей може мати значні економічні наслідки. Крім цього поломка може спричинити руйнування інших деталей, які безпосередньо поєднанні в єдину систему машини. Науково обґрунтовані методи сервісу в роботі базуються на принципах предиктивного моніторингу, аналізі трибологічних процесів у гідравлічних системах та математичному моделюванні надійності деталей, збірних одиниць та машин в цілому.

Перший розділ «Огляд та аналіз основних методів існуючого сервісного обслуговування машин для будівництва доріг із врахування їх експлуатаційних показників» присвячений визначенню основних типів машин і обладнання для підготовки та здійснення робіт для будівництва доріг. Приведена оцінка існуючих математичних моделей дослідження надійності машин та методів існуючого сервісного обслуговування машин.

В другому розділі «Методи дослідження стану збірних одиниць та деталей машин для приготування асфальтобетонних сумішей та їх укладання в процесах улаштування доріг» приведені обґрунтування методів дослідження технічного стану машин за показниками ступеня їх зношення. Здійснена розробка системи моніторингу стану машини та приведена методика визначення відмов для формування програми сервісу машин. Розглянута методика стратегії підтримання ефективного технічного стану машин.

У третьому розділі: «Дослідження параметрів і характеристик впливу на визначення сервісного обслуговування машин в умовах їх використання» приведені результати дослідження впливу продуктивності, експлуатаційних витрат і вартості на стратегію експлуатації в реальних умовах використання машин. Досліджено та розраховано параметри і характеристики надійності розпірної плити щокрової дробарки в процесах подрібнення щебню. Досліджено та розраховано параметри і характеристики надійності розподільного шнека та вібраційної плити асфальтоукладальника.

У четвертому розділі: «Практична реалізація методів сервісного обслуговування машин та оцінка їх ефективності» наведено методики розрахунок резерву та запасних частин машин, методики та алгоритми методів сервісного обслуговування машин. Виконана оцінка ефективності результатів досліджень.

Ключові слова: машини для будівництва доріг, щокрова дробарка, розпірна щока, асфальтоукладач, шнек, вібраційна плита, відмови, надійність,

комбінована модель, кінцево-елементний аналіз, параметри, методи сервісного обслуговування, ефективність.

ABSTRACT

Nechyporuk V.G. Improving the service of road construction machines taking into account their operational indicators – Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the field of knowledge 13 – “Mechanical Engineering” in the specialty 133 – Industrial Mechanical Engineering. Kyiv National University of Construction and Architecture, MES of Ukraine, Kyiv, 2025.

The main content of the dissertation. The dissertation is devoted to solving a topical scientific and applied problem, which consists in developing scientifically based methods for improving the service of road construction machines, taking into account their operational indicators. Modern road construction is a complex engineering system, where the efficiency of each stage directly depends on the technical condition and reliability of the machines involved. The process of asphalt concrete road construction requires strict synchronization between excavators, bulldozers, pavers and rollers. Any stoppage due to a technical malfunction leads not only to financial losses but also to disruption of the technological cycle, which is critical for hot asphalt concrete mixtures. Existing service methods based on existing regulatory provisions do not fully meet modern requirements for ensuring reliable operation of road machinery. Unplanned failure of parts can have significant economic consequences. In addition, the breakdown can cause the destruction of other parts that are directly connected to a single machine system. Scientifically sound service methods in operation are based on the principles of predictive monitoring, analysis of tribological processes in hydraulic systems and mathematical modeling of the reliability of parts, assemblies and machines as a whole.

The first section,“Review and analysis of the main methods of existing service maintenance of road construction machines taking into account their operational indicators,” is devoted to determining the main types of machines and equipment for preparing and carrying out road construction work. An assessment of existing mathematical models for studying the reliability of machines and methods of existing service maintenance of machines is presented.

The second section, “Methods for studying the condition of prefabricated units and parts of the studied machines for preparing asphalt concrete mixtures and laying them in the processes of road construction,” provides justification for methods for studying the technical condition of machines based on indicators of their degree of wear. A machine condition monitoring system has been developed and a failure detection method has been presented for forming a machine service program. A strategy for maintaining the effective technical condition of machines has been considered.

The third section: “Study of parameters and characteristics of influence on determination of service maintenance of machines under conditions of their use” presents the results of the study of influence of productivity, operating costs and cost on strategy of operation under real conditions of use of machines. The parameters and characteristics of reliability of the spacer plate of a jaw crusher in the processes of crushing of crushed stone were studied and calculated. The parameters and reliability characteristics of the distribution auger and the vibrating plate of the asphalt paver were investigated and calculated.

The fourth section: "Practical implementation of machine service methods and assessment of their effectiveness" presents methods for calculating the reserve and spare parts of machines, methods and algorithms for machine service methods. An assessment of the effectiveness of the research results is made.

Keywords: road construction machinery, jaw crusher, spacer jaw, asphalt paver, auger, vibrating plate, failures, reliability, combined model, finite element analysis, parameters, service methods, efficiency.

СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ

Праці, які відображають основні наукові результати дисертації

Наукові праці, які мають імпакт-фактор (Scopus, Web of Science):

1. Nazarenko, I., Mishchuk, Y., Nechiporuk, V., Albeshchenko, D., Pereginets, I. (2026). Definition of reliability parameters of the spacer plate of a jaw crusher depending on the characteristics of the working environment and the material of manufacture. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(7(139), 13–25p

<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2026.353102>

Публікації в наукових фахових виданнях України

2. Назаренко, І., Нечипорук, В., Ткачук, В. (2024). Оцінка впливу експлуатаційних показників дорожньої техніки на ефективність їх використання. *Техніка будівництва*, (40), 63–70.

<https://doi.org/10.32347/tb.2024-40.0306>

3. Нечипорук, В. (2025). Дослідження параметрів та характеристик відмов дорожнього обладнання. *Техніка будівництва*, (41), 85–91.

<https://doi.org/10.32347/tb.2024-41.0410>

4. Нечипорук, В., Орищенко, С. (2025). Сучасні методи діагностики машин. *Техніка будівництва*, (43), 25–35

<https://doi.org/10.32347/tb.2025-43.0603>

5. Запривода, А. В., Нечипорук, В. Г. (2026). Визначення режимів, параметрів та надійності роботи вібраційної плити при улаштуванні доріг. *Вібрації в техніці та технологіях*, (1(120)), 102–110.

<https://doi.org/10.37128/2306-8744-2026-1-11>

6. Нечипорук В.(2026). Динаміка плити асфальтоукладальника з додатковим віброзбуджувачем та її вплив на процес розгладжування асфальтобетонної суміші. *System technologies*. 2026. Т. 2, № 163. С. 145–151.

URL: <https://doi.org/10.34185/1562-9945-2-163-2026-13>

Матеріали і тези наукових доповідей міжнародних конференцій

7. Нечипорук, В. (2024). Методика визначення показників надійності машин для улаштування доріг. V Міжнародної науково-практичної конференції «Енергоощадні машини і технології» 22 - 24 травня 2024. С. 44-46.

8.Іван Назаренко, Віктор Нечипорук, Василь Марач. (2025). Визначення надійності збірних одиниць машини за умов динамічного навантаження. VI Міжнародної науково-практичної конференції «Енергоощадні машини і технології» ,20 - 21 травня 2025 С.190-19

Вступ.....	4
Розділ 1. Огляд та аналіз основних методів існуючого сервісного обслуговування машин для будівництва доріг із врахування їх експлуатаційних показників.....	8
1.1. Визначення основних типів машин і обладнання для підготовки та здійснення робіт для будівництва доріг.....	8
1.1.1 Сутність будови дорожнього покриття.....	8
1.1.2. Визначення основних типів машин і обладнання для підготовки та здійснення робіт для будівництва доріг.	
1.2. Огляд та оцінка експлуатаційних показників машин для будівництва доріг.....	15
1.2.1.Огляд та оцінка експлуатаційних показників машин для подрібнення матеріалів.....	15
1.2.2.Огляд та оцінка експлуатаційних показників машин для укладання та попереднього ущільнення асфальтобетонних сумішей.....	19
1.3.Огляд та оцінка сучасних методів визначення технічного стану машин.....	26
1.4. Оцінка існуючих математичних моделей дослідження надійності машин.....	28
1.4.1. Імовірісно –статистичні моделі.....	28
1.4.2. Стохастичні моделі.....	29
1.5. Висновки по розділу та постановка задач дослідження.....	32
Розділ 2. Методи дослідження стану збірних одиниць та деталей машин для приготування асфальтобетонних сумішей та їх укладання в процесах улаштування доріг.....	34
2.1. Методика дослідження технічного стану машин	34

за показником ступеня їх зношення.....	
2.2. Розробка методики моніторингу стану машин.....	38
2.3. Методика аналізу вимірювання параметрів машин.....	45
2.4. Методика визначення відмов для формування програми сервісу машин.....	51
2.5. Методика стратегії підтримання ефективного технічного стану машин.....	56
2.6. Висновки по розділу.....	61
Розділ 3. Дослідження параметрів і характеристик впливу на визначення сервісного обслуговування машин в умовах їх використання.....	63
3.1. Дослідження впливу продуктивності, експлуатаційних витрат і вартості на стратегію експлуатації в реальних умовах використання машин.....	63
3.2. Дослідження та розрахунок параметрів і характеристик надійності розпірної плити шокової дробарки в процесах подрібнення щебню	69
3.2.1. Загальні положення методики дослідження надійності розпірної плити шокової дробарки.....	69
3.2.2. Методика та результати досліджень параметрів надійності розпірної плити шокової дробарки.....	71
3.3. Дослідження та розрахунок параметрів і характеристик надійності розподільного шнека асфальтоукладальника.....	86
3.3.1. Загальні положення методики дослідження надійності розподільного шнека асфальтоукладальника.....	86
3.3.2. Методика та результати досліджень параметрів надійності розподільного шнека асфальтоукладальника.....	87
3.4. Дослідження та розрахунок параметрів руху і характеристик надійності вібраційної плити при улаштуванні доріг.....	97

3.4.1. Загальні положення методики дослідження параметрів та надійності вібраційної плити.....	97
3.4.2. Дослідження та розрахунок параметрів руху вібраційної плити.....	100
3.4.3. Дослідження параметрів надійності вібраційної плити.....	107
3.5. Висновки по розділу.....	110
Розділ 4. Практична реалізація методів сервісного обслуговування машин.....	112
4.1. Сучасна система технічного обслуговування будівельних машин.....	112
4.2. Методика забезпечення надійності та технічного обслуговування.....	114
4.3. Організація управління технічним обслуговуванням машин.....	116
4.4 Методики та алгоритми методів сервісного обслуговування деталей та збірних одиниць щокерованої дробарки та асфальтоукладчика.....	120
4.5. Висновки по розділу	125
Загальні висновки.....	126
Список використаних джерел.....	130
Додатки.....	141

Вступ. Сучасні темпи розвитку дорожнього будівництва висувають підвищені вимоги до якості, довговічності та експлуатаційної надійності дорожніх покриттів. Якість дорожніх покриттів визначається показниками приготовленої суміші та процесом укладання й ущільнення бетонних або асфальтобетонних сумішей, який здійснюється спеціалізованими машинами. Щодо показників приготовленої суміші в частині майбутньої міцності й довговічності важлива роль належить якості форми та фракційного складу щебню, який готується дробильними машинами. Забезпечення необхідної щільності, рівності та однорідності шару залежить від укладальників, а саме їхніх робочих органів – шнеків та вібраційних плит, які виконують функцію первинного формування та ущільнення матеріалу. Необхідне виконання згаданих процесів залежить від достовірності передбачуваних технологією раціональних режимів, параметрів та динамічних характеристик машин та обладнання. Разом з тим існуючі методи розрахунку не враховують комплексного впливу динамічних факторів, надійності, контролю напручування на відмову змінних властивостей суміші, ефектів контактної взаємодії та змінного характеру навантажень у процесі експлуатації. Унаслідок цього фактичні режими роботи можуть суттєво відрізнятися від розрахункових, що призводить до зниження якості ущільнення, збільшення тривалості технологічного процесу, підвищених енергетичних витрат та передчасного зношування або руйнування окремих елементів конструкції. Рішення проблеми в роботі досягається визначенням режимів та параметрів, а надійність розглядається як інтегральна властивість, що має забезпечуватися розробкою сервісного обслуговування на основі моніторингу стану деталей, збірних одиниць і машин в цілому.

Отримані наукові результати передбачають вдосконалення сервісного обслуговування машин для будівництва доріг із врахування їх експлуатаційних показників, що дає можливість забезпечити необхідну

продуктивність та мінімізувати витрати на реальне своєчасне обслуговування дорожньої техніки.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дослідження пов'язані із науково –дослідними темами та програмами кафедр машини і обладнання технологічних процесів та будівельних машин Київського університету будівництва і архітектури.

Мета і завдання дослідження. Мета роботи полягає у вдосконаленні сервісного обслуговування машин для будівництва доріг із врахування їх експлуатаційних показників на основі дослідження надійності та моніторингу стану машин

Завдання дослідження:

- здійснити оцінку основних методів існуючого сервісного обслуговування машин для будівництва доріг із врахування їх експлуатаційних показників;
- обґрунтувати методи моніторингу сервісного обслуговування машин;
- дослідити показники надійності і ефективності та сервісного обслуговування дробарки та асфальтоукладача;
- розробити методики та алгоритми сервісного обслуговування розпірної плити дробарки, шнека та вібраційної плити асфальтоукладача.

Об'єкт дослідження: робочі процеси дорожніх машин.

Предмет дослідження: показники сервісного обслуговування, надійності, динамічного навантаження та експлуатації машин.

Методи дослідження: Методи досліджень ґрунтуються на фундаментальних законах фізики, методів аналізу параметрів технічного стану машин, методи оцінки надійності, елементи теорії ймовірностей, математичної статистики. Аналітичні та чисельні розрахунки виконуються в математичних програмних продуктах MathCAD, FEMAP (або інші), розроблення конструкції в програмному продукті проектування

SOLIDWORKS; оброблення результатів здійснено за допомогою методів математичної статистики.

Наукова новизна одержаних результатів.

Вперше:

– встановлено закономірності напрацювання на відмову розпірної плити дробарки, шнека та вібраційної плити асфальтоукладача.

– отримано аналітичні залежності для визначення показників сервісного обслуговування та надійності машин.

Вдосконалено:

– методи оцінки ефективності, надійності використання дробарок та асфальтоукладача.

Отримало подальшого розвитку:

– методи дослідження напрацювання на відмову деталей і збірних одиниць машин.

Практичне значення одержаних результатів. Розробка методики та алгоритмів сервісного обслуговування розпірної плити дробарки, шнека та вібраційної плити асфальтоукладача.

Особистий внесок здобувача. Усі результати, які становлять основний зміст дисертації, були отримані здобувачем самостійно. В опублікованих у співавторстві наукових працях, автору належать: [1] – здійснено розрахунки напрацювання на відмову розпірної плити шоккової дробарки; [2] – визначені експлуатаційні показники дорожньої техніки, що оцінюють ефективність використання техніки; [4] – здійснено аналіз сучасних методів діагностики машин; [5] – визначені параметри надійності роботи вібраційної плити при улаштуванні доріг; визначено зони резонансних режимів вібраційної системи «машина-середовище» в різних режимах ущільнення будівельної суміші, що сприяло підвищенню ефективності роботи вібраційних машин.

Апробація результатів дослідження. Отримані результати досліджень були представлені на двох міжнародних конференціях: V Міжнародна

науково-практичної конференція «Енергоощадні машини і технології» 22 - 24 травня 2024 та VI Міжнародна науково-практична конференція «Енергоощадні машини і технології» ,20 - 21 травня 2025

Публікації. Результати дисертаційного дослідження опубліковано у 8 наукових працях, серед яких 5 статей у наукових фахових періодичних виданнях з технічних наук, рекомендованих Міністерством освіти і науки України; 1 у науково метричній базі Scopus; 2 тези доповідей у збірниках матеріалів наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків і додатків. Загальний обсяг дисертації становить сторінки, з них: сторінки основного тексту, список використаних джерел зі найменувань на сторінках; додатків на сторінках.

РОЗДІЛ 1. Огляд та аналіз будови, технічного стану основних машин для будівництва доріг із врахування їх експлуатаційних показників

1.1. Визначення основних типів машин і обладнання для підготовки та здійснення робіт для будівництва доріг.

1.1.1 Сутність будови дорожнього покриття.

Дороги і загальне будівництво – дві сфери в яких застосовується найбільше щебню, разом з цим існують проблеми на які варто звернути увагу. Якщо об'єднати витрати із загальною витратою на поверхневий шар, то отримаємо наступні гістограми, рис. 1.1. З гістограм можна відмітити, що вартість бітуму визначає вартість поверхневого шару дорожнього покриття. Проте за об'ємом найбільшою часткою в дорожньому покритті є щебінь, а отже використання більш якісного заповнювача може продовжити термін служби дороги, що є інвестицією, яка окупиться.

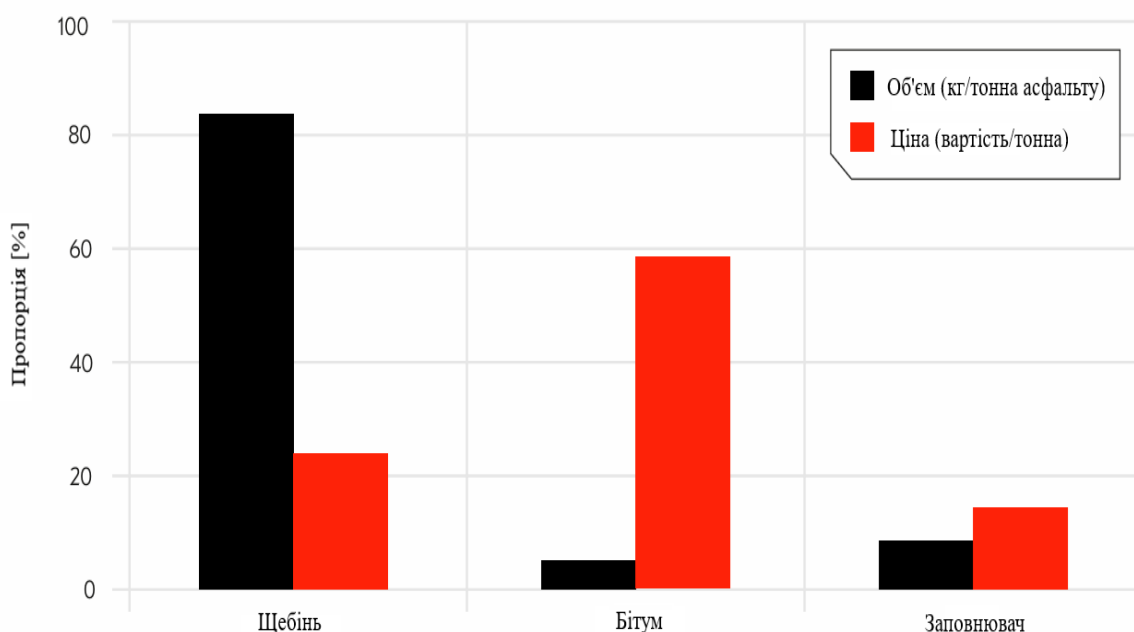
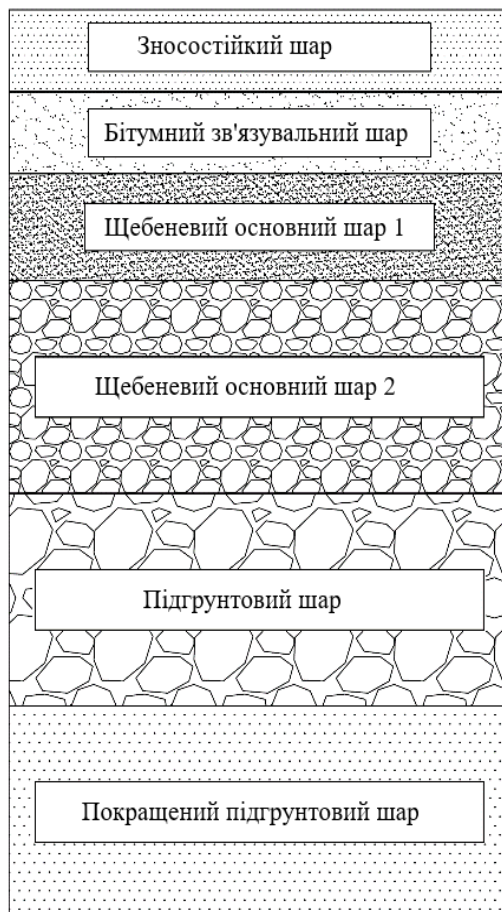


Рис. 1.1. Вартісні та об'ємні пропорції інгредієнтів в асфальті

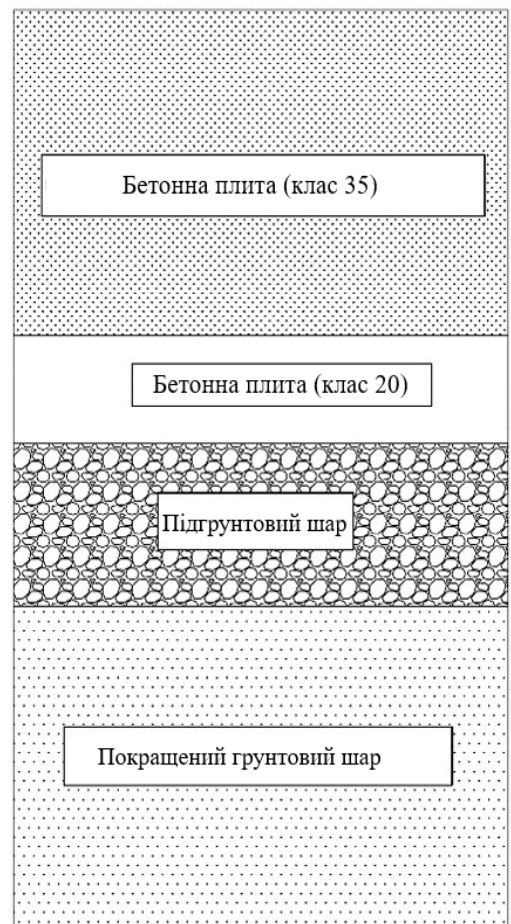
Якість заповнювача (щебня) в дорожньому покритті впливає на наступні показники: 1) підвищує стійкість до зношування; 2) покращує робочі параметри покриття; 3) створює внутрішнє тертя, яке спричиняє опір навантаженню на поверхні. Основними вимогами до заповнювача (щебня) є гострокутна форма, проте не лещадно подібна або витягнута та сталість гранулометричного складу.

Залежно від географічної зони в конструкції дороги може бути кілька шарів. Типові характеристики високоякісного дорожнього покриття шириною 10 метрів наведені в таблиці 1.1.

Дорожнє покриття можна поділити на гнучке та жорстке. Склад шарів дорожнього покриття представлено на рис. 1.2.



а



б

Рис. 1.2. Дорожнє покриття: а – гнучкий шар; б – жорсткий шар

Таблиця 1.1. Характеристики дорожнього покриття

Шар	Товщина, мм	Вага, тони/км
Зносостійкий шар, бітумний зв'язувальний шар	20-200	320-3200
Щебеневий шар 1,	100-250	1600-4000
Щебеневий шар 2	300	4800
Підґрунтовий шар	150-300	2400-4800
Покращений підґрунтовий шар	<1000	16000

Підґрунтовий шар може бути виготовлений за допомогою однієї двостадійної установки, тоді, як шари, розташовані ближче до поверхні, потребують щонайменше двох, а в деяких випадках навіть чотирьох стадій для виробництва високоякісних фракцій.

1.1.2 Визначення основних типів машин і обладнання для підготовки та здійснення робіт для будівництва доріг.

У дорожньому будівництві застосовується широкий комплекс машин (рис.1.3), від ефективності яких безпосередньо залежать строки, якість і собівартість робіт [1] (табл. 1.2 –1.4).



Рис.1.3. Схема застосування основних типів машин для влаштування доріг.

Таблиця 1.2 Машини для підготовки основи при будівництві доріг

№	Тип машини	Призначення	Основні показники
1	Екскаватор	Виїмка ґрунту, навантаження	Продуктивність, потужність, коефіцієнт наповнення ковша, тривалість робочого циклу
2	Скрепер	Виїмка і транспортування ґрунту	Продуктивність, потужність, місткість ковша, довжина транспортування, середня швидкість
3	Бульдозер	Переміщення і планування ґрунту	Продуктивність, потужність, об'єм переміщення за цикл, швидкість руху

4	Автогрейдер	Планування та профілювання	Продуктивність, потужність, точність профілювання, ширина захвату, робоча швидкість
5	Фронтальний навантажувач	Навантаження сипких матеріалів	Продуктивність, потужність, коефіцієнт наповнення ковша, час циклу
6	Крани	Піднімання матеріалів	Продуктивність, вантажопідйомність, середня швидкість
7	Коток	Ущільнення ґрунтів і основ	Продуктивність, потужність, статичне навантаження, кількість проходів, ступінь ущільнення

Таблиця 1.3 Машини для приготування асфальтобетонних та бетонних сумішей та доставки їх на об'єкт будівництва дороги

№	Тип машини	Призначення	Основні показники
1	Дробарки	Подрібнення щебню	Продуктивність, потужність
2	Грохоти	Сортування щебню	Продуктивність, потужність
3	Асфальтозмішувачі, бетонозмішувачі	Перемішування компонентів сумішей	Продуктивність, потужність
4	Асфальтобетоновози	Транспортування сумішей	Продуктивність, потужність
5	Автобетонозмішувачі	Перемішування суміші та транспортування	Продуктивність, потужність

Таблиця 1.4 Машини для укладання та ущільнення сумішей

№	Тип машини	Призначення	Основні показники
1	Асфальтоукладальник	Укладання та розрівнювання суміші	Продуктивність, потужність, ширина і товщина шару, швидкість укладання
2	Бетоноукладач	Укладання та розрівнювання суміші, часткове ущільнення	Продуктивність, потужність, ширина і товщина шару, швидкість укладання
3	Коток статичний гладко вальцювий	Ущільнення асфальту	Продуктивність, потужність, швидкість руху, статичний тиск
4	Коток вібраційний	Ущільнення бетонної суміші	Продуктивність, потужність, амплітуда і частота вібрації
5	Коток пневмоколісний	Ущільнення сумішей	Продуктивність, потужність.
6	Вібраційна плита, вібраційна рейка	Ущільнення сумішей, вирівнювання верхнього шару	Продуктивність, потужність, амплітуда і частота вібрації
7	Машина для загладжування	Загладжування сумішей	Продуктивність, потужність, оберти

В умовах ремонту дороги, наприклад, асфальтної, застосовуються і інші спеціальні машини такі, що оснащені фрезами, які знімають старе покриття. Потім цей матеріал нагрівається, подрібнюється та змішується з наступною операцією укладання на основу нової дороги.

При виробництві щебню для типового тришарового облаштування дорожнього покриття використовуються наступні схеми дробильно сортувальних заводів, рис. 1.4.

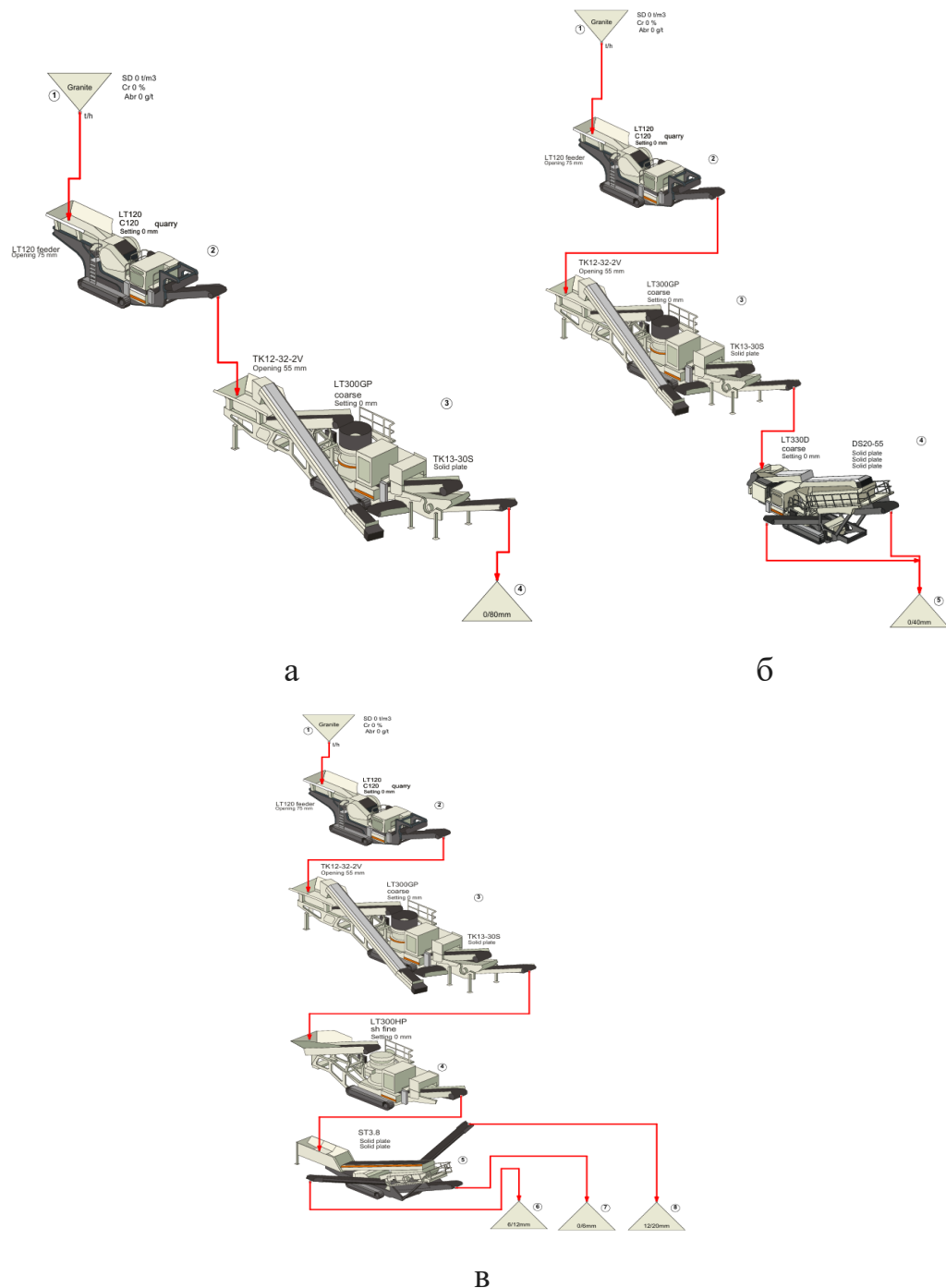
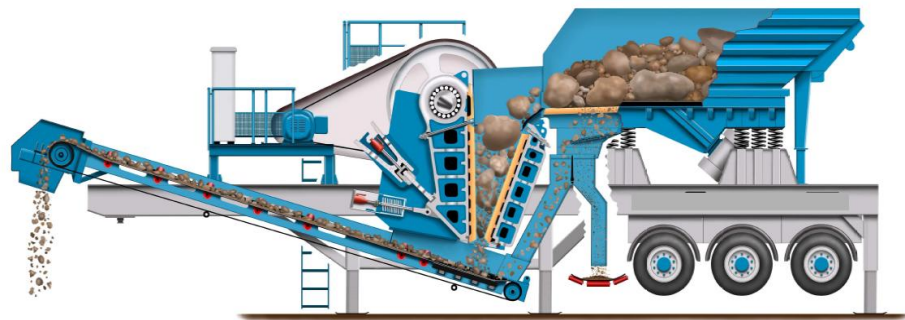


Рис. 1.4. Схеми мобільних дробильно сортувальних комплексів для виробництва дорожнього заповнювача: а – нижній шар основи; б – шар дорожньої основи (щебеневий шар 1), однокомпонентний матеріал; в – зносостійкий шар, багатоконпонентний матеріал

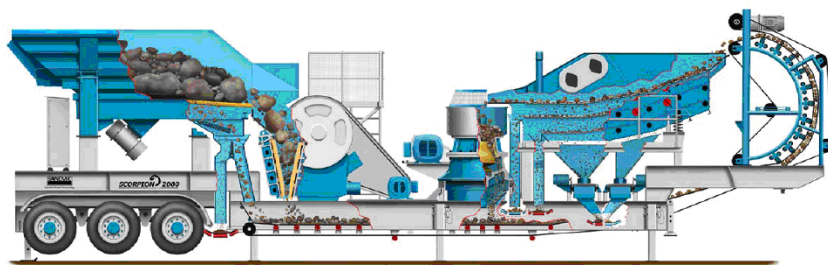
1.2. Огляд та оцінка експлуатаційних показників машин для будівництва доріг.

1.2.1 Огляд та оцінка експлуатаційних показників машин для подрібнення матеріалів.

Вибір процесів подрібнення матеріалів та машин, які це реалізують, обумовлена тим, що заповнювачі при улаштуванні доріг суттєво впливають на отримання якісного полотна дороги. Тому формування якісного фракційного складу заповнювачів є необхідною умовою забезпечення відповідних параметрів машин, їх надійності та сервісного обслуговування. Особливо це актуально для будівництва доріг у віддалених районах від заводів виготовлення сумішей. Економніше в такому випадку встановлювати дробильно – сортувальні та змішувальні установки безпосередньо в місцях будівництва доріг. До машин для подрібнення та сортування щебню (табл.1.1), як основного заповнювача суміші, відносяться дробарки та грохоти (рис1.5).



а



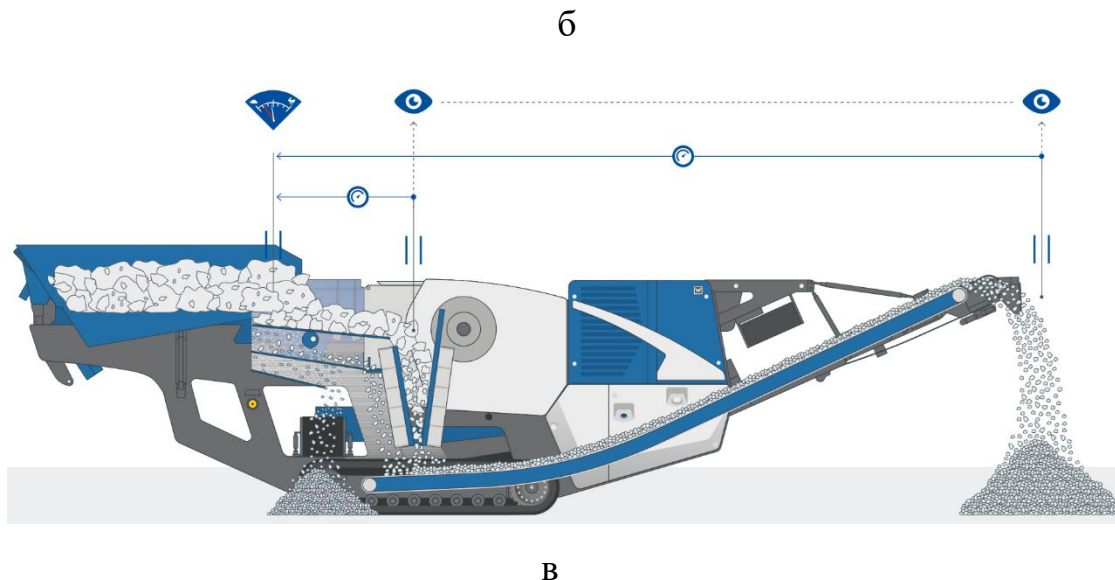


Рис. 1.5. Дробильно – сортувальні установки: а –одно стадійна із щоквою дробаркою Sandvik UJ310 (Швеція); б – двох стадійна із поєднанням щоквої і конусної дробарок та також грохота Sandvik UD211 (Швеція); в –одностадійна із системою безперервної подачі (CFS) Kleemann MOBICAT MC 110(i) EVO2 (Німеччина, Wirtgen Group)

Для оцінки ефективності, відповідності параметрів заданих технологією технологічного процесу, що суттєво впливає на надійність та необхідність контролю досліджувані мобільні установки оцінювалися за відповідним комплектуванням обладнання:

- мобільні дробильні установки із щоквою дробаркою (одно стадійні);
- мобільні дробильні установки із конусною дробаркою (одно стадійні);
- мобільні дробильно – сортувальні установки комплекси (двох стадійні), поєднання щоквої і конусної дробарок а також грохота.

Для оцінки експлуатаційних показників машин для подрібнення матеріалів прийняті наступні критерії:

$$K_1 = \frac{\Pi}{m}; \quad K_2 = \frac{\Pi}{P}; \quad K_3 = \frac{m}{P}, \quad (1.1)$$

де K_1 , K_2 , K_3 - критерій оцінки співвідношення продуктивності до маси, критерій оцінки співвідношення продуктивності до потужності

(енергетичний), критерій оцінки співвідношення маси до потужності(силовий) відповідно.

Із (1.1) слідує, що найбільш ефективними показниками тої чи іншої дробильно – сортувальної установки, або машини буде умова за якою критерії матимуть такі значення: $K_1 \rightarrow \max$, $K_2 \rightarrow \max$, а $K_3 \rightarrow \min$. Виконані розрахунки за технічними параметрами щоківих дробарок наведені на рисунку 1.6.

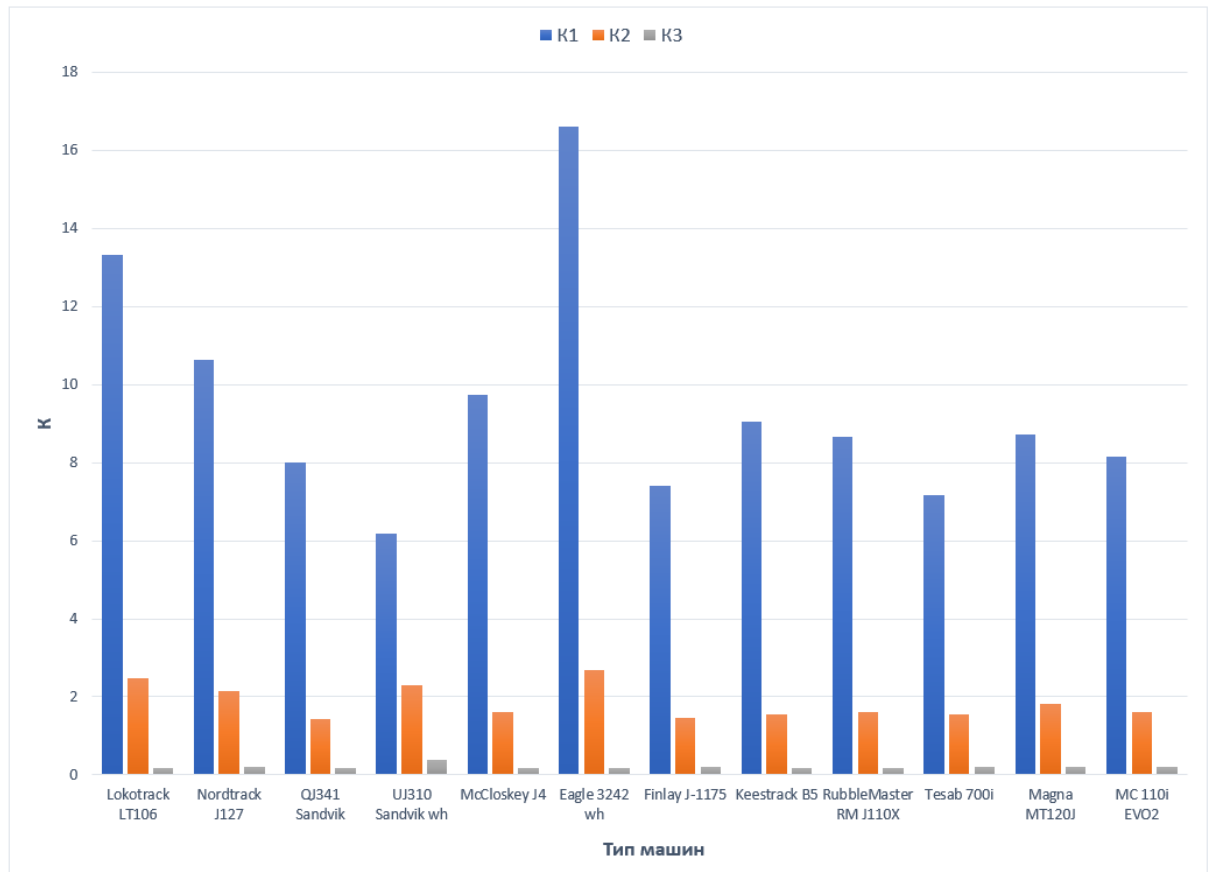


Рис.1.6. Гістограми зміни критеріїв мобільних дробильних установок із основною щоквою дробаркою (однотадійна схема) на гусеничній та колісній базі

Аналіз параметрів установок, їх дробарок, засвідчує, що найраціональнішими за показниками та надійністю є: – мобільні дробильні установки із щоквою дробаркою (однотадійні):

– за першим критерієм ($K_1 = 16,6$) Eagle 3242 wh (США), колісна база;

- за першим критерієм ($K_1=13,3$) Lokotrack LT106 Metso (Фінляндія), гусенична база;

- за другим критерієм ($K_2=2,68$) Eagle 3242 wh (США), колісна база;

- за другим критерієм ($K_2=2,48$) Lokotrack LT106 Metso (Фінляндія), гусенична база;

- за третім критерієм ($K_3=0,161$) Eagle 3242 wh (США), колісна база;

- за третім критерієм ($K_3=0,165$) McCloskey J4 (Канада), гусенична база;

Окремо був виконаний аналіз мобільних дробильних установок із основною конусною дробаркою (одностадійна схема):

- за першим критерієм ($K_1=8,09$) Lokotrack LT300GP Metso (Фінляндія);

- за другим критерієм ($K_2=1,28$) NW100HPS Metso (Фінляндія);

- за третім критерієм ($K_3=0,1$) Lokotrack LT200HP Metso (Фінляндія).

Мобільні дробильно – сортувальні двох стадійні установки:

- за першим критерієм ($K_1=2,21$) NW95 200HPS Metso (Фінляндія);

- за другим критерієм ($K_2=0,38$) NW95 200HPS Metso (Фінляндія);

- за третім критерієм ($K_3=0,11$) UD210 Sandvik (Швеція).

Таким чином, для встановлення дробильно – сортувальних безпосередньо в місцях будівництва доріг за визначеними критеріями пропонується мобільні дробильно – сортувальні установки фірми Metso. В якості дробарок визначена щоква дробарка, надійність якої досліджується в даній роботі на основі визначення на відмову її елементів із визначенням термінів її сервісу.

1.2.2 Огляд та оцінка експлуатаційних показників машин для укладання та попереднього ущільнення асфальтобетонних сумішей

Основна дорожня техніка для улаштування асфальтобетонної дороги наведена на рисунку 1.7[1]. Розглянемо конструктивні особливості, застосування, ефективність та можливі відмови в процесі їх експлуатації.



Рис.1.7 Дорожня техніка для улаштування асфальтобетонної дороги:
а – екскаватор; б – бульдозер; в – автогрейдер; г – асфальтоукладач;
д – пневмоколісний коток; е – вібраційний коток.

Дорожнє будівництво починається з підготовки земляного полотна шляхом виїмки ґрунту гідравлічним екскаватором (наприклад, Caterpillar 320) для створення основи. Насоси гідравлічної системи Caterpillar 320, що створюють тиск 35-50 МПа у режимах максимального навантаження[2] перетворюють механічну енергію двигуна на енергію потоку оливи, що керує стрілою, рукояттю та ковшем. Ефективність цього процесу залежить від чистоти гідравлічної рідини, оскільки до 80–90% відмов на цьому етапі спричинені саме забрудненням[2].

Для формування рівномірного шару основи (піщано-гравійної суміші або щебню) використовується бульдозер, наприклад Caterpillar D6. Його робота пов'язана з постійним переміщенням великих мас ґрунту, що створює значне навантаження на ходову частину. Ходова частина бульдозера є найбільш витратним елементом у плані сервісу, становлячи до 50% від загальних витрат на володіння машиною[3].

Теоретичне обґрунтування сервісу на цьому етапі базується на контролі натягу гусениць та зносу сегментів зірочок. Надмірний натяг прискорює знос втулок і пальців, а недостатній — призводить до зміщення ланцюга та пошкодження опорних котків[4].

Автогрейдери займають особливе місце в технологічному процесі планування земляного полотна та влаштування шарів основи дорожнього одягу. Основний робочий орган – грейдерний відвал – розташований між передньою та задньою осями (або візком). Це забезпечує унікальну кінематику: відвал може повертатися в горизонтальній площині на 360°, змінювати кут різання, виноситися вбік за габарит машини та нахилитися у вертикальній площині (для профілювання укосів) [5]. Наступним етапом із підготовчих робіт є ущільнення ґрунту статичними та вібраційні котками, такими, як Hamm HD+ 90i. Процес ущільнення ґрунту вимагає передачі енергії від вальця до частинок матеріалу для витіснення повітря та вологи. Вібраційний режим котків створює інтенсивні динамічні навантаження на підшипники вібраційного валу та раму машини[1].

Hamm HD+ 90i використовує систему триточкового зчленування, яка забезпечує рівномірний розподіл ваги навіть при поворотах, що критично для запобігання появі колій на незв'язних ґрунтах[6].

Рівномірне розподілення гарячої суміші (температура понад 150°C) та її попереднє ущільнення за допомогою трамбуючого бруса та вібрації вигладжуючої плити здійснюється асфальтоукладальником (наприклад, Vögele Super 1800-3i). На цьому етапі робочі органи конвєєри та шнеки

асфальтоукладальника взаємодіють із абразивним впливом щебню та липким бітумом, який може забивати. Ефективність укладання залежить від стабільності швидкості подачі суміші та точності підігріву плити, що вимагає бездоганної роботи гідравлічних приводів та електронних систем керування їх роботою [7]. Потік матеріалу в асфальтоукладальнику приведено на рисунку 1.8.

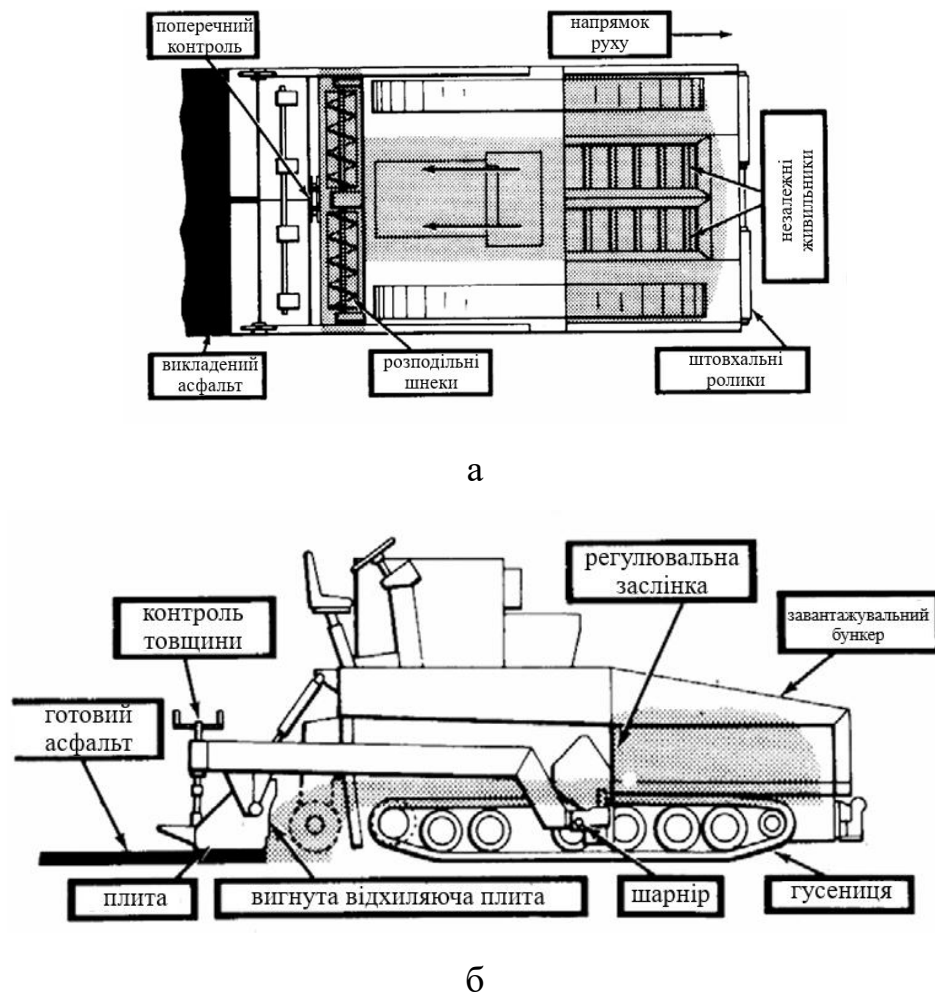


Рис.1.8. Потік матеріалу в асфальтоукладальнику

Завершальне ущільнення виконується спільно вібраційними котками та пневмоколісними машинами. Використання напрямку передачі енергії коливань котка тангенціально дозволяє ущільнювати асфальт без можливого дроблення кам'яного заповнювача [5]. Застосування пневмоколісних котків дає можливість закривати пори в шарах асфальтового покриття. Важливим є

реалізація процесу зрошення, оскільки вихід з ладу хоча б однієї форсунки призводить до налипання асфальту на вальці, що може погубити поверхню свіже укладеного асфальту дороги [8].

Асфальтоукладальники доступні в широкому діапазоні розмірів, здатних укласти дорожнє полотно від 1 м до 16 м завширшки. Мінімальний та максимальний діапазон ширини укладання варіюються залежно від моделі виробника. Асфальтоукладальники розрізняються за типом їхньої бази. Таким чином їх можна класифікувати на два типи: колісні та гусеничні. У першому випадку базою є пневматичні колеса (колісний асфальтоукладач), а в другому - гусениці (гусеничний асфальтоукладач). Два різні типи асфальтоукладальників показані на рисунку 1.9. Колісні асфальтоукладальники забезпечують чудову маневреність, мають перевагу в тому, що ними легко керувати на короткі відстані та вимагають менших витрат на придбання та експлуатацію. Вони можуть укласти дорожнє полотно шириною до 9 м. Колісні асфальтоукладальники домінують на ринку в більшості країн.

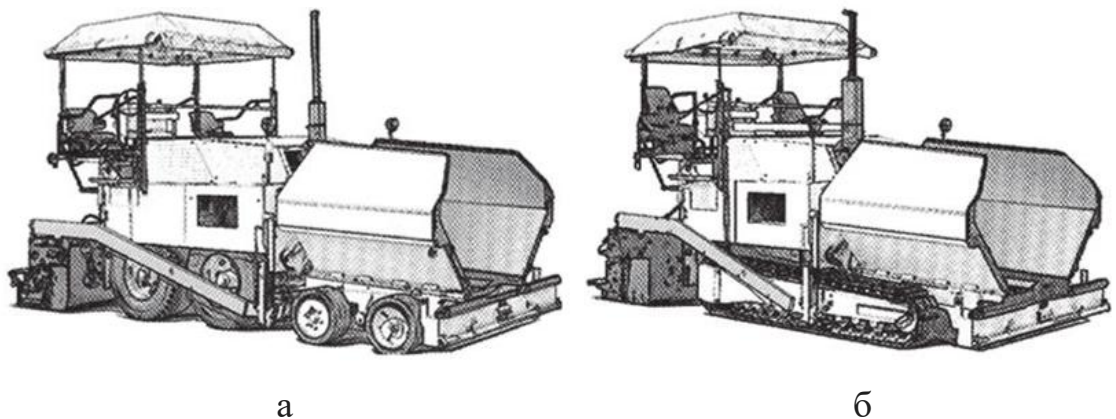


Рис. 1.9. Типи асфальтоукладальників: а – колісний; б – гусеничний

Гусеничні асфальтоукладальники, завдяки гусеницям, забезпечують дуже добре зчеплення і стійкість навіть у складних умовах та чинять менший тиск на нижні шари.

Вони можуть укладати ширші покриття порівняно з колісними асфальтоукладачами, ширина яких може досягати 14 м або навіть 16 м. Обидва асфальтоукладачі складаються з двох основних частин: тягача та плити (рис. 1.10). Деякі виробники пропонують асфальтоукладачі, які також оснащені розпилювачем перед плитою для напilenня липкого шару. Ці асфальтоукладачі розпилюють липкий шар і наносять гарячу асфальтову суміш через кілька секунд. Вони відомі як розпилювальні асфальтоукладачі або інтегральні асфальтоукладачі. В окрему категорію можна віднести розроблені асфальтоукладачі, які можуть одночасно укладати два шари асфальту (звичайно зношуваний і сполучний шар) за один прохід. Це призводить до кращого зчеплення шарів, усунення липкого шару та скорочення часу укладання [8].

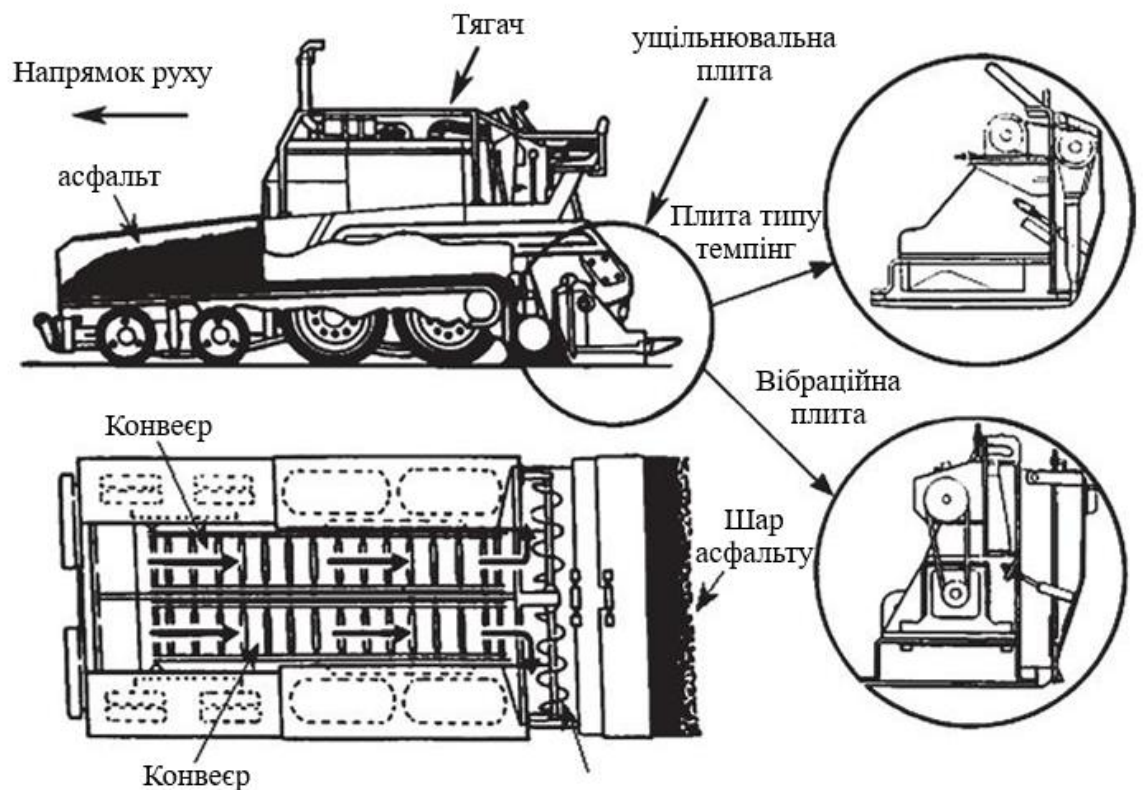


Рис. 1.10. Колісний асфальтоукладач

Цей метод відомий як метод компактного укладання асфальту. Приклад асфальтоукладача показано на рисунку 1.11.



Рис. 1.11. Система компактного укладання асфальту

Надалі здійснена оцінка експлуатаційних показників асфальтоукладачів трьох моделей: Vögele Super 1800-3, CAT AP555F та Dynapac SD2500, які з найбільш поширеними. Важливими конструктивними одиницями асфальтоукладачів, що впливають на якість укладання асфальтної суміші на полотно майбутньої дороги є розподільні шнеки та вібраційні трамбуєчі бруси (трамбувальні механізми) робочого органу машини. Надійність цих компонентів визначається їх здатністю зберігати працездатність в умовах інтенсивного абразивного зношування, високих температурних градієнтів та знакозмінних вібраційних навантажень протягом розрахункового міжремонтного ресурсу.

Асфальтоукладач Vögele Super 1800-3 належить до універсального класу («Universal Class») і забезпечує продуктивність укладання до 700 тон на годину при максимальній ширині 10 метрів. Його система розподілу базується на двох шнеках, що мають діаметр 400 мм із можливістю гідравлічного регулювання висоти на 15 см, що дозволяє оптимізувати розподілення суміші перед плитою та запобігання сегрегації матеріалу.

Асфальтоукладач CAT AP555F забезпечує продуктивність укладання до 1000 тон на годину. Його шнеки мають діаметр 355 мм, що вимагає вищих кутових швидкостей обертання для забезпечення аналогічного

об'ємного подавання порівняно з конкурентами, а це, у свою чергу, підвищує інтенсивність абразивного впливу на лопаті.

Асфальтоукладач Dynapac SD2500 має шнеки діаметром 380 мм, оснащені центральним реверсивним приводом із вузьким редуктором (15 см), що мінімізує зону потенційної сегрегації під приводом. У таблиці зведені ключові параметри, що впливають на навантаженість досліджуваних вузлів.

Таблиця 1.4 Характеристики та параметри асфальтоукладачів

№ п/п	Характеристики та параметри	Модель	Модель	Модель
		Vögele Super1800-3	CAT AP555F	Dynapac SD2500
1	Потужність двигуна, кВт	129	110	149
2	Продуктивність, т/год	700	1000	750-800
3	Діаметр шнека, мм	400	355	380
4	Амплітуда коливань бруса, мм	4; 7	2;4;7;	Вертикальні ударні
5	Частота коливань бруса, Гц	до 55	до 55	до 55
6	Регулювання висоти шнека, мм	150	автоматичне	250
7	Маса, кг	22 400	13 845	23 400

Використовуючи енергетичний критерій (1.1) здійснено розрахунок, за яким асфальтоукладач Vögele Super1800-3 має значення $K_2=5.426$, асфальтоукладач CAT AP555F $K_2= 9.091$, а асфальтоукладач Dynapac SD2500 $K_2= 5.202$. За цим критерієм мінімальна енергоємність має асфальтоукладач CAT AP555F.

1.3.Огляд та оцінка сучасних методів визначення технічного стану машин

В Україні існує низка документів, які регламентують експлуатацію будівельної техніки. Це ДБН В.2.8-3-95 "Технічна експлуатація будівельних машин [9], який передбачав планово-попереджувальну систему з жорсткими нормами періодичності ремонтів.

Стандарти ДСТУ 9118:2021 "Діагностування технічного стану матеріалів конструкцій [10] та ДСТУ ISO 13379-2:2015 "Моніторинг і діагностика стану машин. Інтерпретація даних і технічна діагностика. Частина 2. Додатки, керовані даними (ISO 13379-2:2015, IDT)" [11] враховують оцінку технічного стану та залишкового ресурсу. Тобто ці, сучасні стандарти, дозволяють відходити від жорстких календарних графіків за умови забезпечення надійного діагностичного контролю.

Важливим є також стандарт ДСТУ 4139:2021 [12], що регламентує шини для будівельних машин, та галузеві норми витрат палива (ГКД 34.20.661), які містять коефіцієнти коригування залежно від температурних умов (до 12% взимку) та умов роботи [13]. Ці коефіцієнти можуть слугувати базою для розрахунку економічної складової моделей інтенсивності.

Серед міжнародних стандартів варто згадати серію ISO 13381-1:2025 — "Condition monitoring and diagnostics of machine systems — Prognostics — Part 1: General guidelines and requirements".

Як приклад, метод факторів, стандарт [14] широко застосовується для оцінки ресурсу машин:

$$ESL = RSL \cdot f_A \cdot f_B \cdot f_C \cdot f_D \cdot f_E \cdot f_F \cdot f_G, \quad (1.2)$$

де ESL – оціночний термін служби, RSL – еталонний термін, а фактори f_A , f_B , f_C враховують якість компонентів, рівень виконання робіт, умови середовища

(f_D), умови експлуатації (f_E) та рівень обслуговування (f_G). Цей підхід є спрощеною альтернативою складним імовірнісним моделям і легко інтегрується в інженерну практику.

Технічний стан машини визначає надійність конструкції, відповідність забезпечення необхідної продуктивності і не є статичною, а динамічною характеристикою, що змінюється у часі. Зміна цього стану є наслідком навантаження на збірні одиниці та деталі та відсутність відповідного контролю, що проявляється у вигляді відмов. Відмови мають різну природу свого проявлення: наслідки фізичних процесів (тертя, втоми); стохастичний процес (випадковий характер зовнішніх впливів) [15].

Для робочих органів більшості дорожніх машин домінуючим фактором є абразивне зношування. Інтенсивність цього процесу описується моделлю, яка пов'язує об'єм зношеного матеріалу V з прикладеним навантаженням F_n та шляхом тертя L [16] :

$$V = K \frac{F_n \cdot L}{H}, \quad (1.3)$$

де F_n – нормальна сила (функція робочого навантаження), L – шлях ковзання (функція кінематики машини), H – твердість матеріалу, K – коефіцієнт зносу, що залежить від типу середовища [17].

При цьому важливо зазначити, що залежність не завжди є лінійною. При перевищенні певного порогу контактних напружень (наприклад, при ударних навантаженнях) механізм зношування являє собою втомне викришування або крихке руйнування, що призводить до пришвидшеного зростання швидкості деградації. Це підкреслює необхідність введення коефіцієнта інтенсивності як нелінійної функції від навантаження.

На несучі елементи машин (рами, корпуси, трамбуєча плита) в робочому процесі діють циклічні навантаження. Накопичення пошкоджень, які приводять до появи відмови визначаються за такою залежністю:

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \geq 1 \quad , \quad (1.4)$$

де n_i – кількість циклів навантаження; N_i – гранична кількість циклів навантаження. Із (1.4) слідує, що відмова настає, коли сума відношень кількості циклів n_i до граничної кількості циклів N_i досягає одиниці. Залежність (1.4) реалізується при певній амплітуді напружень, яка теж є випадковою величиною і її розподіл залежить від спектра навантажень [17]

Отже, інтенсивність експлуатації виступає як параметр, що формує спектр навантажень і являється інтегральною характеристикою, що відображає ступінь напруженості роботи машини за одиницю часу. Кількісна оцінка інтенсивності може бути виражена коефіцієнтом використання технічного ресурсу або коефіцієнтом еквівалентності, який приводить годину роботи у важких умовах до певної кількості годин роботи у номінальних умовах [18].

1.4. Оцінка існуючих математичних моделей дослідження надійності машин.

В сучасній практиці дослідження надійності будівельних машин застосовуються такі математичні моделі: імовірісно – статистичні, та стохастичні. Розглянемо технологію їх застосування.

1.4.1 Імовірісно – статистичні моделі.

До імовірісно – статистичних відносяться моделі для опису надійності механічних систем на основі розподілу Вейбулла. Обумовлено це тим, що цей розподіл дає можливість при зміні параметрів моделювати різні ділянки інтенсивності відмов [15]. Функція щільності ймовірності відмови для трипараметричного розподілу Вейбулла має вигляд:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta} \right], \quad t \geq \gamma \quad (1.5)$$

де: β – параметр форми; η – параметр масштабу; t – час дії; γ – параметр зсуву.

Саме параметр β визначає характер відмов. Так, якщо за розрахунками отримуємо значення $\beta < 1$ то це є свідченням періоду припрацювання, інтенсивність відмов спадає. Якщо $\beta = 1$ то це є свідченням нормальної експлуатації, інтенсивність відмов постійна ($\lambda = \text{const}$), відмови є раптовими та незалежними від часу. Якщо $\beta > 1$ то це період старіння та зносу, інтенсивність відмов зростає. Параметр η характеризує час, до якого ймовірність відмови сягає $\approx 63.2\%$. Саме цей параметр є найбільш чутливим до інтенсивності експлуатації. Параметр зсуву γ визначає мінімальний гарантований ресурс. Класична модель Вейбулла розглядає час t як єдину змінну. Для врахування інтенсивності експлуатації застосовується підхід, при якому параметр масштабу η стає функцією від навантаження L .

1.4.2. Стохастичні моделі.

Стохастичні моделі використовуються для більш складних систем, де на надійність впливає безліч різномірних факторів (температура, вібрація, якість оливи). Прикладом такої моделі є модель пропорційних ризиків Кокса, яка є напівпараметричною моделлю, що широко застосовується для аналізу. У відповідності до цієї моделі інтенсивність відмов $\lambda(t, \mathbf{z})$ є добутком базової інтенсивності $\lambda_0(t)$ та експоненційної функції [19]:

$$\lambda(t, \mathbf{z}) = \lambda_0(t) \cdot \exp(\boldsymbol{\gamma}^T \mathbf{z}),$$

де $\boldsymbol{\gamma} = (\gamma_1, \dots, \gamma_k)$ – вектор коефіцієнтів регресії, що показує вплив кожного фактора.

Якщо $\gamma_i > 0$, фактор z_i збільшує ризик відмови. Якщо $\gamma_i < 0$, фактор z_i зменшує ризик. Ця модель ідеально підходить для задач прогностичного обслуговування, оскільки дозволяє оцінювати поточний ризик відмови на основі показань датчиків у реальному часі, не роблячи жорстких припущень про форму розподілу базової надійності. Модель прискореного часу відміну від напівпараметричної моделі, припускає, що вплив коваріат призводить до зміни швидкості зміни часу для системи (ефект "стискання" або "розтягування" часу стану машини). Загальний вигляд логарифмічно-лінійної форми моделі прискореного часу [20]:

$$\ln(T) = \mu + \boldsymbol{\alpha}^T \mathbf{z} + \sigma \epsilon$$

де T – час до відмови; μ – перетин; σ – масштабний параметр помилки; ϵ – випадкова помилка з певним розподілом.

Стохастичні моделі на основі ланцюгів Маркова для систем, технічний стан яких описується дискретними рівнями (наприклад, згідно з категоріями технічного стану: "справний", "потребує уваги", "передаварійний", "аварійний"), ефективним інструментом є марковські ланцюги [21].

Процес деградації розглядається як послідовність переходів між станами $S = \{1, 2, \dots, N\}$, де стан N є поглинаючим (відмова). У дослідженні [22] проведено аналіз надійності парку кар'єрних екскаваторів.

Застосування класичної моделі Вейбулла виявило значну дисперсію даних, що ускладнювало прогноз. Введення моделі із випадковим ефектом, що враховує неоднорідність виходу із ладу машин через приховані дефекти або різницю в стилі керування операторів дозволило значно покращити апроксимацію. Результати [22] показали, що параметр форми β для гідросистеми склав 1.8, що вказує на переважання відмов через знос. Змішана модель дозволила спрогнозувати реальну роботу з точністю, достатньою для переходу від аварійних ремонтів до планових заміन вузлів при досягненні 80% надійності. Дослідження трансмісії бульдозера [23] з використанням

марковських ланцюгів показало, що головною причиною низької доступності (62%) були часті відмови гідротрансформатора через перегрів оливи при роботі на граничних навантаженнях. Побудова графа станів та аналіз матриці переходів дозволили виявити, що ймовірність переходу в аварійний стан різко зростає після 4000 годин без діагностики. Впровадження стратегії діагностики з регулярним аналізом оливи дозволило підвищити коефіцієнт готовності до 71% та зменшити витрати на аварійні ремонти[23] .

Сучасні публікації присвячені вдосконаленню методів оцінювання технічного стану, розробленню інтелектуальних систем моніторингу та впровадженню автоматизованих засобів контролю [24-26].

У роботах [27-29] розглянуто розвиток вібраційної діагностики, яка ґрунтується на аналізі спектральних характеристик коливань елементів машин. Цей метод дозволяє виявляти дисбаланс, неспіввісність, зношення підшипників, дефекти редукторів і роторів. Акустична діагностика базується на аналізі шумових сигналів та акустичної емісії, що утворюються під час роботи агрегатів [30-32]. Вона ефективна для раннього виявлення тріщин, мікродефектів і порушень у процесах тертя. Термографічна діагностика (інфрачервоне обстеження) широко застосовується для контролю нагрівання вузлів, що дозволяє своєчасно виявляти перевантаження, порушення змащення, електричні несправності та інші теплові аномалії [33,34]. Поряд із традиційними фізичними методами все більшого значення набувають електронні системи бортової діагностики (OBD), що використовуються у транспортних засобах. Системи OBD-II забезпечують зчитування кодів несправностей електронних блоків управління, контроль параметрів двигуна, паливної системи, запалювання та систем очищення вихлопних газів [35, 36, 37]. Їх застосування дозволяє зменшити час пошуку несправностей та підвищити точність діагностики. Незважаючи на розвиток високотехнологічних методів, візуальна та слухова діагностика залишаються важливими на етапах попереднього огляду техніки [38, 39, 40]. Вони

базуються на досвіді спеціаліста, який за зміною шумів, вібрацій, запаху чи зовнішнього вигляду вузлів може зробити попередній висновок про стан обладнання. Сучасні дослідження також зосереджені на інтеграції машинного навчання, нейронних мереж і цифрової обробки сигналів для автоматизації процесу виявлення несправностей та прогнозування відмов [35, 41, 42]. Використання комплексного підходу, який об'єднує традиційні, сенсорні та аналітичні методи діагностики, розглядається як основний напрям подальшого розвитку галузі [21,22, 29, 40, 43].

1.5. Висновки по розділу та постановка задач дослідження

Проведений огляд та здійснений аналіз математичного моделювання зміни технічного стану машин дозволяє зробити наступні висновки.

1.Математичне моделювання зміни технічного стану неможливе без явного врахування інтенсивності експлуатації. Ігнорування цього фактору призводить до значних похибок у прогнозуванні залишкового ресурсу. Вектор інтенсивності повинен включати динамічні, кінематичні та кліматичні параметри.

2.Жодна з розглянутих моделей (Вейбулла, Маркова, Кокса) не є універсальною. Хоча розподіл Вейбулла має ряд значних переваг він все рівно залишається статистичною моделлю, а тому для врахування реальної картини роботи будівельної машини необхідно поєднувати даний метод із іншими моделями або підходами.

3.Для рішення завдань дослідження надійності та розробки рекомендацій по сервісу будівельної техніки для улаштуванні асфальтобетонних доріг варто використовувати змішані підходи, що поєднують фізичні моделі деградації (для розуміння механізмів) зі стохастичними моделями.

4. Визначеним методом дослідження надійності та розробки рекомендацій по сервісу будівельної техніки для улаштуванні асфальтобетонних доріг обрано поєднання розподілу Вейбулла із скінченно елементною моделлю деталей та машин в цілому.

На основі проведеного огляду, здійсненого аналізу та висновків сформульовані наступні задачі досліджень:

- здійснити оцінку основних методів існуючого сервісного обслуговування машин для будівництва доріг із врахування їх експлуатаційних показників;
- обґрунтувати методи моніторингу сервісного обслуговування машин;
- дослідити показники надійності і ефективності та сервісного обслуговування дробарки та асфальтоукладача;
- розробити методики та алгоритми сервісного обслуговування розпірної плити дробарки, шнека та вібраційної плити асфальтоукладача.

РОЗДІЛ 2. Методи дослідження стану збірних одиниць та деталей машин для приготування асфальтобетонних сумішей та їх укладання в процесах улаштування доріг.

2.1. Методика дослідження технічного стану машин за показником ступеня їх зношення

Зношення в будь-якому визначенні суттєво впливає на поточний технічний рівень машин. За класифікаційні ознаки приймаються три основні види зношення: фізичне, функціональне і зовнішнє (рис. 2.1). Прийнято вважати, що фізичне зношення за причинами зношення ділиться на зношення першого роду і зношення другого роду і визначається відповідно в результаті експлуатації та внаслідок поломок, аварій і т. п.[44,45]. У відповідності до цього варто за часом дій фізичне зношення розглядати безперервним, тобто таким, що здійснюється поступово і аварійне, що настає раптово.

Функціональне зношення може бути представлено двома складовими: технологічне зношення (зміна технологічного циклу, в який традиційно включається дана машина) і моральне зношення (зміна властивостей машини).

Інша складова функціонального виду зношення – моральне зношення є елементом старіння конструкції машин, наслідком появи більш комфортної техніки, робота на якій є більш привабливою, і навіть, при однакових показниках (наприклад, продуктивності) ефективність використання такої техніки варто чекати більшою у порівнянні із існуючою-застарілою.

Отже функціональне зношення поєднує в собі як технологічну так і моральну складові. Зовнішнє зношення є економічною складовою і представляє собою зменшення вартості машини, обумовлене невідповідністю економічним вимогам, які мають місце в конкретних умовах експлуатації (наприклад, поява на ринку більш ефективних асфальтоукладачів із більшою продуктивністю у порівнянні із існуючими).

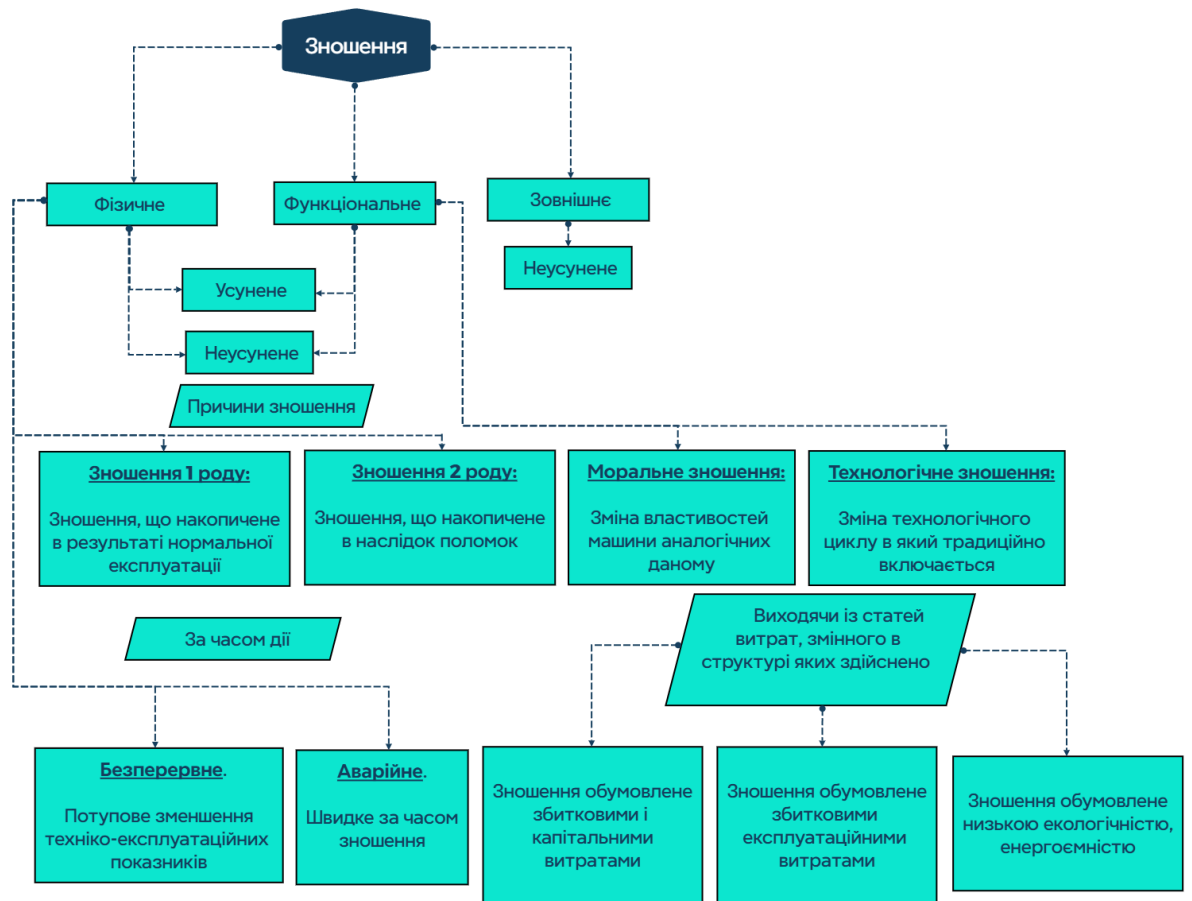


Рис. 2.1. Види зношень.

Вихідним етапом впливу видів зношення на показник використання будівельної техніки є аналіз технічного стану на основі визначення ступеня зношення машин за коефіцієнтом придатності до експлуатації K_{np} [45]:

$$K_{np} = 1 - \sum_{i=1}^n K_{zn}, \quad (2.1)$$

де K_{zn} - сумарний коефіцієнт зношення при врахуванні їх видів:

$$K_{zn} = (1 - \Phi)(1 - TP)(1 - Z)(1 - OT), \quad (2.2)$$

де Φ , TP , Z , OT – вираження в долях зношення: фізичне, функціональне (втрата необхідних технічних параметрів), зовнішнє, організаційно-технічне відповідно. Безумовно, розділення зношення на види (рис. 2.2) в повному сенсі є умовним, оскільки види зношення є взаємопов’язані і при розрахунках це необхідно враховувати.

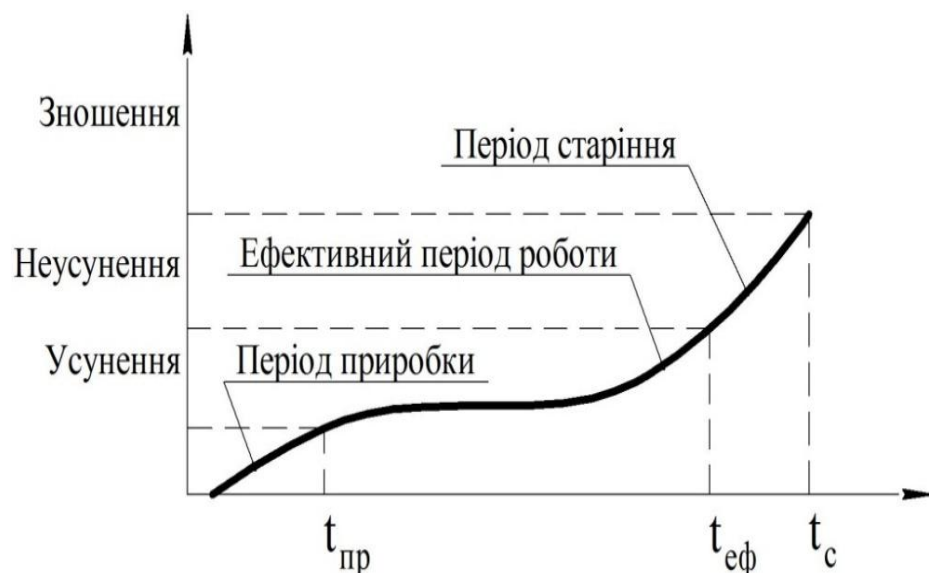


Рис. 2.2. Залежність видів зношення на періодах експлуатації машин

Як слідує із графіка, на початковому і кінцевому етапі експлуатації машини зношення має прискорений характер накопичення, а в середній стадії експлуатації «життєвого» циклу машини зношення змінюється рівномірно і цю частину прийнято вважати пропорційною між зношенням і терміном експлуатації [44,110]. Аналізом існуючих методів оцінки фізичного зношення машини та їх деталей (рис. 2.3) виявлено, що перевагою прямих методів є можливість найбільш точно визначити ступінь реального фізичного зношення, виходячи із безпосередньої експертизи технічного стану машини.

Коефіцієнт реального фізичного зношення за методом експертних оцінок технічного стану визначається як середнє значення зношення найважливіших вузлів і деталей, зважена по їх частці в загальній первісній або відновній вартості даної машини [45]:

$$K_{\phi z} = \sum_n^m (\Phi_j \times b_j) / 100, \quad (2.3)$$

де Φ_j - знос окремої системи, агрегату, оцінюваного технічного будівельної машини; b_j - питома вага вартості будівельної машини.

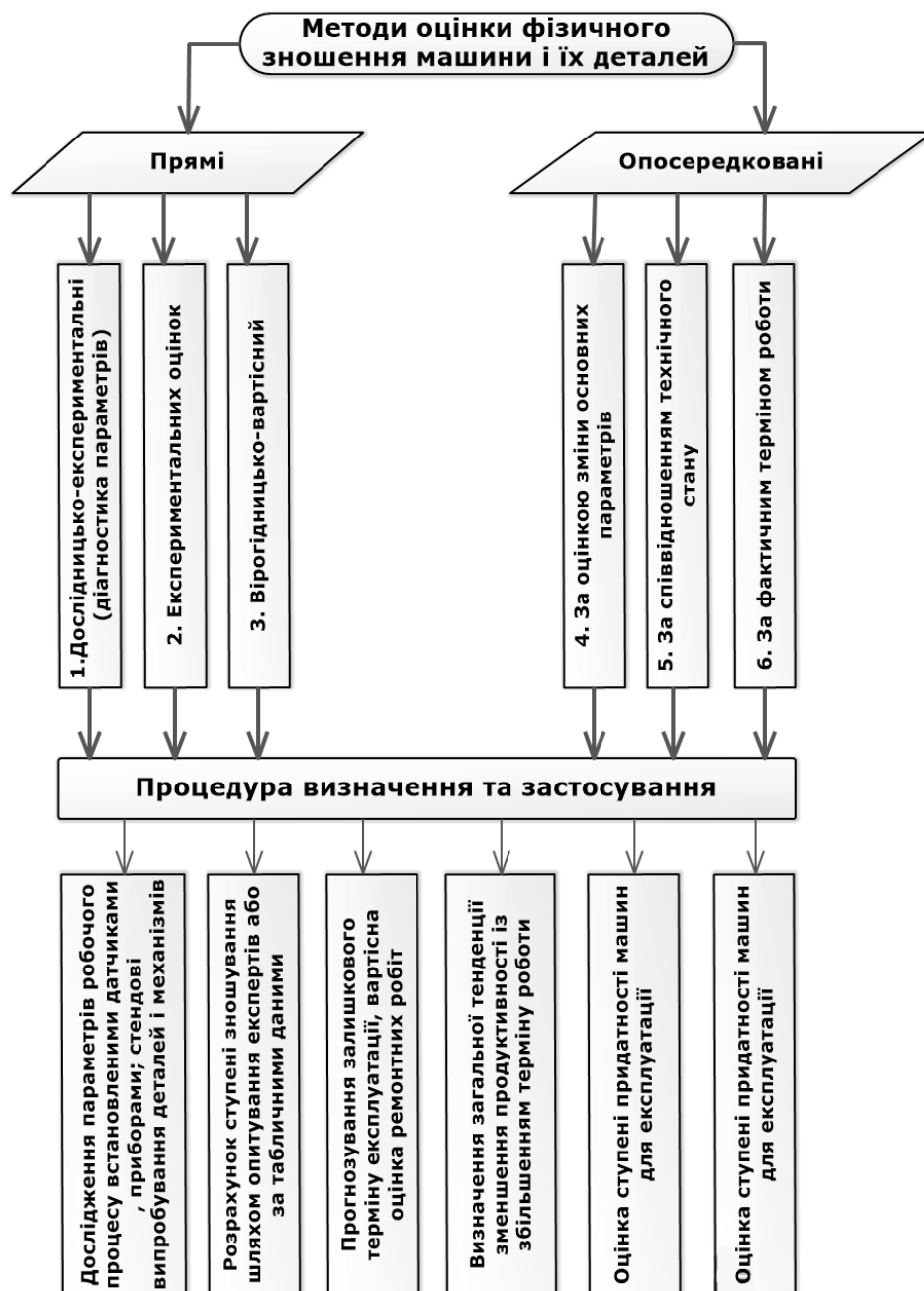


Рис. 2.3. Методи розрахунку ступені фізичного зношення будівельних машин та їх збірних одиниць

Величина середньозваженого фізичного зносу обумовлює, але одночасно не визначає працездатність будівельної машини [45]. При високому фізичному зношенні машина може перебувати в працездатному стані, так як локальне зношення основних деталей, вузлів, агрегатів не досягає граничного рівня, за яким експлуатація машини стає неможливою. У той же час, при

невисокому середньозваженому фізичному зношенні локальне зношення окремого конструктивного елемента може мати критичне значення, при якому для подальшої експлуатації машини потрібне проведення ремонту. Показником такого стану машини є абсолютне значення Φ_j . Таким чином, коефіцієнт фізичного зношення визначає технічний стан машини в цілому. Реальне фізичне зношення машини також може бути визначене методом ефективного віку [44, 45]. Ефективний вік встановлюється в результаті огляду та випробування машини, і на цій основі прогнозується час, що залишився для її експлуатації. Коефіцієнт зношення представляє собою частку від ділення ефективного віку на нормативний термін служби машини [46]:

$$K_{\Phi 3} = \frac{E_B}{T_H}, \quad (2.4)$$

де E_B - ефективний вік машини; T_H - нормативний (паспортний) термін служби машини.

Одним з прямих методів розрахунку фізичного зношення є визначення витрат на ремонт, який повністю усуває зношення [46]. Він заснований на припущенні, що ступінь фізичного зношення машини залежить від витрат на ремонт і відновлення втрачених під час експлуатації властивостей. Тоді коефіцієнт фізичного зношення визначається за формулою [46]:

$$K_{\Phi 3} = \left(\frac{B_p}{B_b} \right) + \Delta_{\text{в.з.}}, \quad (2.5)$$

де B_p - об'єктивно-необхідні витрати на ремонт; B_b - відновлена вартість машини з урахуванням її морального зношення; $\Delta_{\text{в.з.}}$ - відносна величина залишкового зношення.

2.2. Розробка методики моніторингу стану машини

Для розробки методики моніторингу стану машини необхідно систематичне визначення і аналіз чинників, які впливають на її експлуатаційну ефективність. При цьому варто враховувати ряд показників (рис.2.4).



Рис. 2.4. Головні показники ефективності будівельної машини.

Методологія дослідження основних складових індексу ефективності роботи машини та їх вплив вирішується шляхом моніторингу її експлуатації. Першочерговою задачею моніторингу показників будівельної машини можна виділити ряд витрат, які знижують ефективність використання: втрати якості та продуктивності, втрати через простої з технічних та зовнішніх причин. Така ситуація може привести до втрати продуктивності, тобто якщо протягом деякого періоду безперервної роботи будівельної машини вихід продукції буде менше проектного. Також якщо будівельної машини робить паузи в роботі або зупиняється на короткий час, наприклад на 10 хв, то це теж можна вважати втратою продуктивності роботи, а не простоем. У більшості випадків ці втрати пов'язані з нераціональними параметрами робочих майданчиків, неузгодженістю продуктивності основного і допоміжного обладнання, не синхронністю робочих процесів і т.п. Наприклад, в бункер асфальтоукладача укладається асфальтна суміш. Тоді протягом цього часу машини, які вивантажують асфальтну суміш знаходяться в працездатному стані і фактично використовуються за призначенням, але еталонна їх продуктивність не досягається, так як вони простоюють в черзі для вивантаження суміші. Інша ситуація наприклад, із екскаватором-зниження потужності двигуна і проблем з гідросистемою екскаватор працює із збільшеною на 10% тривалістю

робочого циклу. Тобто екскаватор працездатний і фактично експлуатується, проте еталонна його продуктивність не досягається. Наведені приклади свідчать про те, що є втрати в період часу, коли будівельна машина використовується за призначенням. Ці незначні зупинки і вимушені холості ходи відбуваються не з причин логістики експлуатації будівельної машини. Маленькі зупинки (наприклад, для очищення робочих органів, незначних регулювань і т.п.) зазвичай коротше, ніж 5-10 хв, і викликані не технічними відмовами будівельної машини, які, як правило, вимагають залучення персоналу обслуговування і ремонту. Оператор будівельної машини може легко усунути виниклі проблеми. Однак часті такі паузи в роботі і зупинки можуть значно зменшити ефективність використання будівельної машини, так як в цьому випадку машина працює нестійко, знижується рівномірність, регулярність і швидкість виконання будівельних процесів. Одним із наслідків згаданих причин виходу, якщо ж будівельна машина не використовується протягом досить тривалого часу, наприклад більш ніж 10-20 хв, то можна говорити про втрати від простою будівельної машини. Такі тривалі зупинки будівельної машини можуть відбуватися з технічних причин (наприклад, через її відмову або виконання запланованого обслуговування), або за зовнішніми причинами, наприклад через відсутність попиту на продукцію машини, несприятливих погодних умов і т.п. В даний час на багато будівельних машин встановлюються бортові комп'ютери (наприклад, на асфальтоукладачі) які за допомогою системи датчиків постійно фіксують стан агрегатів і систем. Основне призначення таких бортових комп'ютерів - посприяти оператору в оцінці стану будівельної машини при виконанні технологічного процесу. Використання ж цих даних для оцінки напрацювання на відмову деталей, збірних одиниць і машини в цілому, як правило, важко і тому для моніторингу потрібні спеціальні індивідуальні вимірювальні системи безперервного вимірювання і запису фізичних параметрів. Якщо безперервний моніторинг ефективності не відбувається, то зменшена продуктивність будівельної

машини буде не помічена або буде прийнята як нормальна. Система моніторингу експлуатації будівельної машини повинна передбачати мережеву підтримку і мати багаторівневу організацію для можливості роботи з нею фахівців різних рівнів кваліфікації і відповідальності [46-49]. Наявність мережевої підтримки дозволяє об'єднати системи контролю використання різних будівельної машин для приготування асфальтобетонних сумішей та їх укладання в процесах улаштування доріг. Інтегрування моніторингу експлуатації будівельної машини у виробничу виконавчу систему підприємства (рис. 2.5) дає можливість оцінки технічного стану, планів технічного обслуговування і ремонту, забезпечення персоналом, паливом, запчастинами та інш [48].

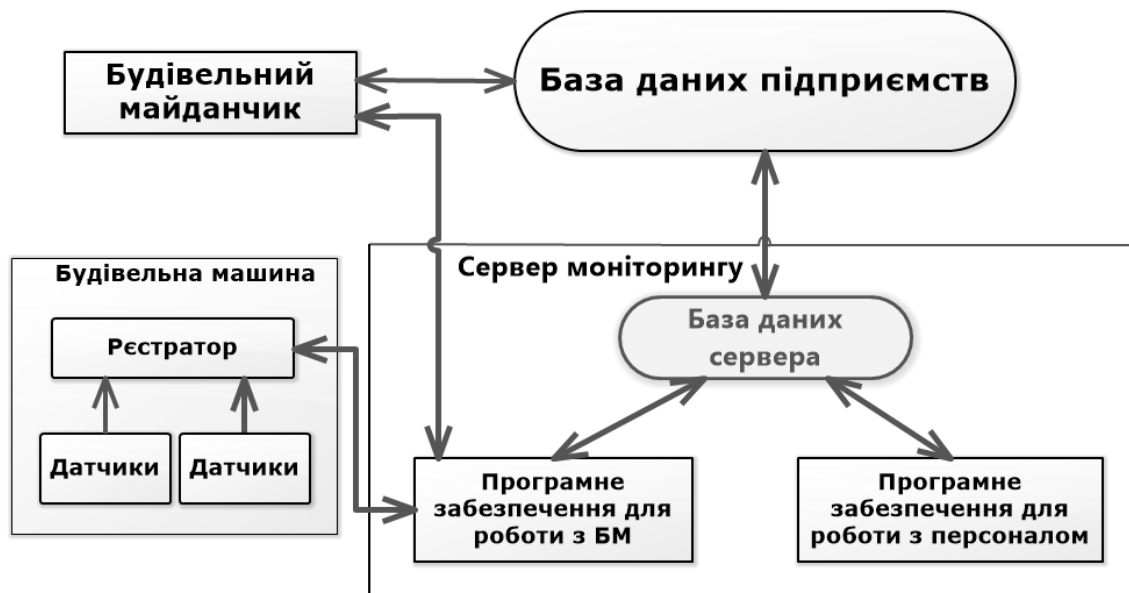


Рис. 2.5. Структурна схема моніторингу ефективності використання будівельної машини

Об'єкт моніторингу має кілька точок контролю параметрів (див. рис. 2.4) для оцінки ефективності роботи. Тобто система складається з набору датчиків (Д), що вимірюють ті чи інші фізичні параметри (тиск, температуру, зусилля, переміщення і т.п.), з'єднаних з реєстратором даних.

Реєстратор виробляє безперервне або періодичне опитування датчиків, нагромаджуючи результати вимірювань у власній пам'яті. Наприклад, безпосереднім результатом вимірювань можуть бути навантаження на підшипникові вузли розподільного шнека асфальтоукладача, його швидкість переміщення. Залежно від варіанту обробки інформації, одержуваної з аналогових/цифрових входів, можуть бути різні варіанти функціонування реєстратора, як за допомогою персонального комп'ютера так і за допомогою проміжного пристрою, що зчитує (сканера). Бортовий контролер передає зібрані дані на вимогу менеджера або із заданою періодичністю.

Моніторинг стану машини вимагає не тільки відповідне апаратне та програмне забезпечення із застосуванням ІТ- технологій, але і розробку необхідних методичних передумов для фіксування та ідентифікації різних станів машини. Зазвичай машини вважається працюючою у даний момент, якщо перебуває в роботі (тобто в русі) один або кілька її основних механізмів і навпаки. В джерелах [46,48] пропонується ряд методів моніторингу (рис.2.6).

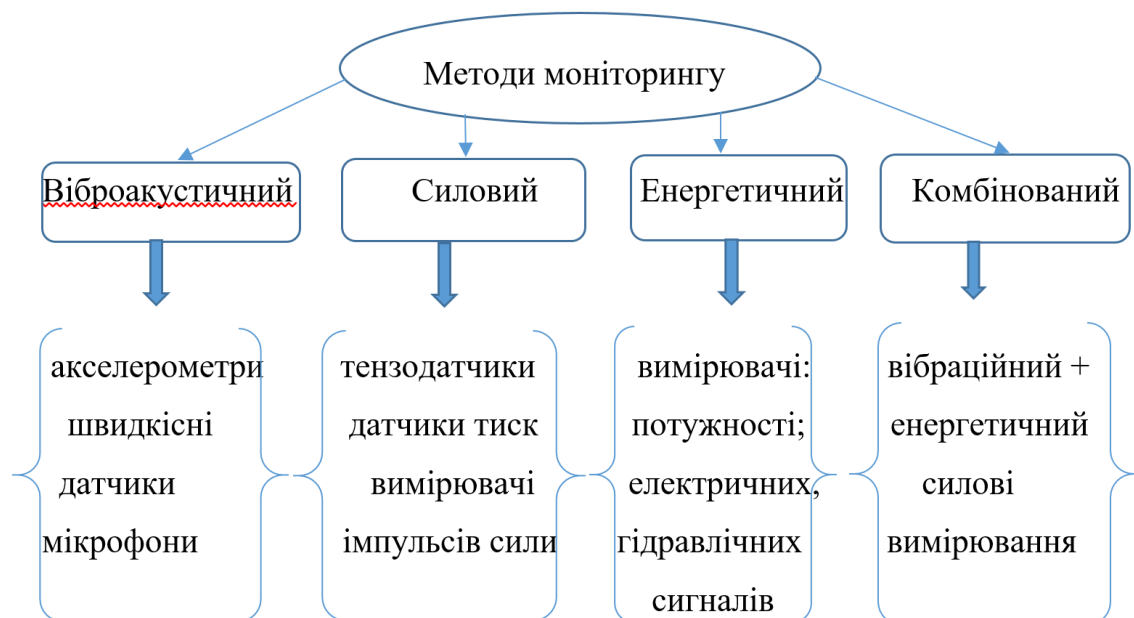


Рис.2.6 Методи моніторингу параметрів машин.

Вібраційні акустичні методи характеризуються високою інформативністю, можливістю спектрального аналізу та мають можливість непрямого визначення параметрів середовища. За інформаційною особливістю вібраційного сигналу є те, що він є інтегральним відгуком системи “машина – середовище”, що дозволяє ідентифікувати зміну жорсткості та ступінь ущільнення. Силкові методи мають безпосередній зв’язок із механічною дією та володіють можливістю розрахунку імпульсу та енергії. Енергетичний моніторинг дає можливість оцінити інтегральну ефективність та має переваги щодо мінімального втручання в конструкцію машини. Комбінований метод поєднуючи в собі, наприклад, вібраційний та енергетичний моніторинг дозволяє побудувати замкнену інформаційну модель процесу. Обґрунтування засобів моніторингу та їх особливості наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 Засоби моніторингу та їх особливості

№ п/п	Засоби моніторингу	Особливості застосування засобів
1	MEMS -акселерометри	компактність, широкий частотний діапазон
2	Тензодатчики	пряме вимірювання навантажень
3	Датчики обертів	синхронізація процесів
4	CAN-логери	використання штатних систем
5	GNSS	просторово-часова прив’язка параметрів

Моніторинг базується на застосуванні теорії коливань та ударних процесів [50], теорії дискретно-континуальних систем [51], енергетичному підході[52], процесів управління будівельним обладнанням для інженерів, кошторисників та власників [53,54]. В роботі передбачено моніторинг [55], а в роботах[48, 56] визначення параметрів на відмову. На рисунку (рис.2.7) приведена схема моніторингу збірних одиниць та деталей щокової дробарки

та асфальтоукладача. Для щоквої дробарки (рис.2.7,а) обрано розпірну плиту. Обумовлюється це тим, що вона впливає на режим та продуктивність і тому забезпечення її надійності шляхом оцінки на опрацювання на відмову є актуальною задачею досліджень. Для асфальтоукладача (рис.2.7,б) обрано дві збірні одиниці: шнек та вібраційна плита, які є ключовими в процесах улаштування асфальтобетонних доріг. Оцінка ефективності здійснюється за низкою критеріїв, що приведені в наступних розділах роботи.



а



Рис.2.7 Схема моніторингу збірних одиниць та деталей: а –щогової дробарки; б – асфальтоукладача.

2.3. Методика аналізу вимірювання параметрів машин

Для аналізу даних вимірювань параметрів необхідне уточнення поняття «робочого циклу», наприклад, можна визначати його як проміжок часу між двома виключеннями або зупинками приводу на холостий хід [47]. Зазвичай визначення коефіцієнта використання будівельної машини K_B розраховується за формулою:

$$K_B = (T_P - T_{\text{ПР}}/T_P), \quad (2.6)$$

де T_P і $T_{\text{ПР}}$ – час роботи і простою відповідно. Однак, значення K_B , варто обчислювати за часом фактичного використання будівельної машини (за сумарною тривалістю робочих циклів), тобто за формулою:

$$K_B = (T_P - T_{\text{ПР}} - T_{\text{ХХ}})/T_P, \quad (2.7)$$

де $T_{\text{ХХ}}$ - тривалість роботи БМ на холостому ході.

Аналіз вихідних статистичних даних, які отримані при моніторингу експлуатації, дозволяє визначити реальний коефіцієнт використання будівельної машини. Отже для моніторингу ефективності, необхідна чітка передумови ідентифікація станів будівельної машини. Важливо знати не тільки, як багато і коли простоює процес будівництва дороги, але також бути в змозі приписати втрачений час певному джерелу або причини втрати. Тобто потрібно мати достатньо чітку класифікацію часу роботи будівельної машини.

Таким чином, в результаті розглянутої методології моніторингу ефективності використання будівельної машини, що здійснюється на основі аналізу видів втрат ефективності і схеми моніторингу виникає задача уточнення станів будівельної машини на всьому етапі виконання технологічного процесу будівництва.

На основі загальних законів теорії надійності [44 –47] можна визначити наступні стани:

$S_{p.c.}$ – робочий стан, коли будівельної машини виконує потрібну функцію, можливо, з оптимальною продуктивністю. Ця тривалість фактичного робочого періоду виробництва включає необхідні технологічні холості ходи. Очевидно, що при цьому будівельної машини знаходиться в працездатному стані і забезпечена необхідними зовнішніми ресурсами;

$S_{з.н.с.}$ – запланований неробочий стан, коли використання не планується через економічні бізнес-рішення.

Можна відмітити, що підприємство зазвичай такими неробочими періодами не керує (тобто будівельна машина простоює через причини зовнішніх по відношенню до технічного обслуговування) і тому ці заплановані простої відбуваються в моменти, коли будівельна машина не потрібна. Заплановані перерви (зазвичай їх планують на тиждень вперед) визначаються графіком роботи підприємства (або будівельної ділянки), наприклад, з причини вихідних днів, свят, неробочих змін, перебазування будівельної машини (наприклад, перебазування асфальтоукладача після завершення

будівництва дороги). Сюди можна віднести також деякі адміністративні та виробничі простої, деякі простої в планового технічного обслуговування, цей стан може плануватися на експлуатаційній, тактичному і стратегічному рівнях. Наприклад, експлуатаційне (короткострокове) планування неробочих періодів, як правило, робиться на один тиждень;

$S_{н.с.}$ – непрацездатний стан, який часто називають "внутрішнім" неробочим станом, обумовленим або відмовою будівельної машини або нездатністю виконувати необхідну функцію протягом превентивного обслуговування. Цей стан доцільний додатково розглядати як два: стан відмови (тобто не запланований простій) і стан незавершеності технічного обслуговування (тобто стан превентивного обслуговування, виконуваного за планами – графіками технічного обслуговування). Деякі планові технічні обслуговування можуть бути частково віднесені до стану $S_{з.н.с.}$;

$S_{н.п.с.}$ - не використовується працездатний стан. Це стан, коли технічно справна не застосовується по призначенню, можна розділити на два підстана:

стан чергування (S_q), коли будівельна машина запланована для роботи в протягом заданого проміжку часу й перебуває в стані готовності до роботи (тобто в резерві або в запасі). Часто будівельна машина у цьому стані вважається працюючою, але її напрацювання в одиницях продукції може бути відсутнім, тобто немає корисного результату роботи у фізичних одиницях, наприклад, т, м³ і т.д.;

"зовнішнє" неробочий стан ($S_{з.н.}$), коли має місце недолік необхідних зовнішніх ресурсів або будівельна машина не може використовуватися по призначенню протягом непланових і планових дій, крім технічного обслуговування й ремонтів.

Прикладом можуть бути відсутність палива, нестача вихідної сировини або некондиційні будівельні матеріали, непланові перебазування будівельної машини, адміністративні й оперативні втручання в процеси (наприклад, для

змін технології будівництва і якісних характеристик, для проведення експериментів з устаткуванням та ін.).

Отже, в результаті розглянутого визначення станів можна записати:

$$T_{\Sigma} = T_{L_{\text{я.п.}}} + T_{L_{\text{з.н.с.}}} + T_{L_{\text{н.с.}}} + T_{L_{\text{н.п.с.}}} \quad (2.8)$$

де $T_{\text{я.п.}}$ - втрати робочого часу будівельної машини, зв'язані зближенням якості й продуктивності роботи. Це звичайно розрахункові величини й у вітчизняній практиці експлуатації машин, як правило, не фіксуються;

$T_{L_{\text{з.н.с.}}}$, $T_{L_{\text{н.с.}}}$ і $T_{L_{\text{н.п.с.}}}$ - втрати часу, які зв'язані з перебуванням будівельної машини в стані $S_{L_{\text{з.н.с.}}}$, $S_{L_{\text{н.с.}}}$, $S_{L_{\text{н.п.с.}}}$ тривалості відповідно запланованих неробочих періодів, перебування будівельної машини у непрацездатному стані (внутрішній неробочий стан), простоїв працездатної будівельної машини (зовнішній неробочий стан).

При оцінці ефективності використання будівельної машини слід розв'язати питання віднесення різноманітних простоїв будівельної машини до перерахованих груп. Для цього виникає задача з урахуванням умов планування будівельних робіт, моніторингу стану будівельної машини і можливості автоматизації розрахунків.

Так вважають [44], що стан $S_{L_{\text{з.н.с.}}}$ охоплює умови, якими не може управляти. Тому тривалість запланованих неробочих періодів $T_{L_{\text{з.н.с.}}}$ в (2.8) (наприклад, вихідні дні або переозброєння) нерідко взагалі не вважають простоями [47], оскільки вони звичайно враховуються при обчисленні запланованої тривалості роботи будівельної машини $T_{\text{з.н.с.}} = T_{\text{п.к.ч}} - T_{L_{\text{з.н.с.}}}$, де $T_{\text{п.к.ч}}$ - повний календарний час.

Якщо планові технічні обслуговування й ремонти виконані протягом проміжку часу, який був заздалегідь установлений, тобто відповідав стану $S_{L_{\text{з.н.с.}}}$, то час простою в цих впливах можуть бути включені в тривалість запланованих неробочих періодів $T_{L_{\text{з.н.с.}}}$, а не в простої $T_{L_{\text{н.с.}}}$. Інакше кажучи, такі простої в технічному обслуговуванні й ремонтах (які припадають на

заплановані неробочі періоди $T_{L_{з.н.с}}$) начебто не вважаються втратами й вони не включаються в доступний час $T_{з.н.с}$.

Холості ходи залежно від їхньої причини, наслідків і тривалості можна віднести до стану $S_{p.c}$, так і до стану $S_{L_{н.пс}}$.

Слід зазначити, що зміна робочого обладнання, як правило, вимагає зупинки роботи будівельної машини, наприклад, для заміни робочих інструментів і пов'язаних із цим регулювань, поки будівельна машина не дасть прийнятна якість на новому режимі. Тривалість зміни робочого встаткування, очевидно, слід відносити до втрат до $T_{L_{н.с}}$ (тобто повинне бути віднесене до готовності). Ці простой з технічних причин пов'язані з неможливістю виконання будівельної машини необхідних функцій.

Необхідно враховувати, що в неробочі дні можна здійснювати не тільки перебазування, але й технічне обслуговування і ремонт будівельної машини. При складанні графіків роботи будівельної машини доцільно періоди з несприятливими метеорологічними умовами ділити на робітники й неробочі дні. Фактори, що визначають неробочі дні по метеорологічних причинах на будівництві, звичайно обумовлені вимогами технології проведення робіт. Дні з несприятливими метеорологічними умовами можуть збігатися з неробочими днями по іншим причинам. Так, дні перебазування будівельної машини можуть збігатися із днями несприятливими метеорологічними умовами.

Відповідно до встановлених станів для оцінки рівня ефективності доцільна класифікація часу будівельної машини (рис 2.8.) [48], де у вигляді діаграми показана відповідність категорій часу роботи будівельної машини і втрат ефективності за залежністю (2.8).

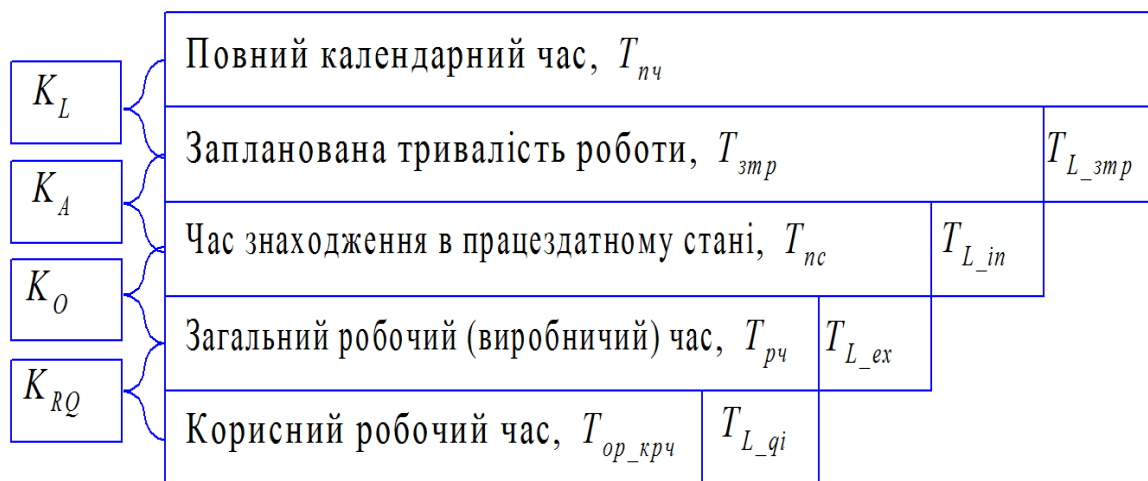


Рис. 2.8 Модель використання часу будівельної машини.

Корисний або ефективний робочий час $T_{pч}$ є теоретичним часом, який є необхідним даного обсягу продукції при еталонній продуктивності, тобто без втрат продуктивності і якості. Звичайно це розрахункова величина, яка визначається по відомих еталонних значеннях продуктивності будівельної машини або часу робочого циклу.

Слід зазначити, що між тимчасовими характеристиками (див. рис 2.8) можливі обмежені взаємозв'язки. Наприклад, простої в запланованому технічному обслуговуванні є доцільними й створюють передумови для оптимальної роботи будівельної машини на тривалу перспективу. З іншого боку, втрати часу при зміні робочого встаткування є невід'ємною частиною використання будівельної машини. Підвищення швидкості роботи будівельної машини може приводити до зниження якості роботи й до росту технічного обслуговування й ремонту (тобто до зниження готовності).

Для моніторингу, аналізу й формування діаграм тренду рівня виробничо-технічної ефективності будівельної машини необхідно використовувати інформацію про втрати ефективності роботи і їх можливих причинах. З позиції організації технічного сервісу передбачається використовувати 4 коефіцієнти:

$$K_{EF} = K_{п.з} \cdot K_{Г} \cdot K_{O} \cdot K_{я.п}, \quad (2.9)$$

де $K_{п.з}$ - рівень планованого завантаження; $K_Г$ – готовність; K_O - операційна ефективність використання; $K_{я.п}$ - рівень якості роботи й використання продуктивності.

Зазначені коефіцієнти можуть бути, застосовні до різних типів машин і дають всебічний вимір ефективності їх роботи. Не всі складові рівня ефективності в (2.9) варто обчислювати одним типом. Для визначення коефіцієнтів $K_{п.з}$, $K_Г$, K_O в (2.9) використовують одну одиницю виміру - час. Для оцінки значення коефіцієнта $K_{я.п}$, очевидно, переважніше застосування кількості продукції,

$$K_{яп} = \frac{N_{\phi}}{N_e}, \text{ або } K_{яп} = \frac{T_{р.ч}^{\phi}}{T_{р.ч}}, \quad (2.10)$$

де N_{ϕ} - фактична кількість придатної (сертифікаційної) продукції, виробленої будівельної машини;

N_e - кількість продукції, яка може зробити будівельна машина за проектних умовах роботи, тобто це потенційно досяжна кількість продукції, що випускається протягом заданого робочого часу $T_{р.ч}$ при відсутності втрат продуктивності. Очевидно, уся ця продукція N_e є сертифікованою.

У міру розвитку стандартів якості виконання роботи будівельної машини і використання сучасних ІТ - технологій для врахування різних ситуацій на будівельному майданчику коефіцієнт $K_{я.п}$ може бути розділеним, тобто може розглядатися як $K_{я.п} = K_{я} \cdot K_{п}$, де $K_{я}$ - рівень якості, $K_{п}$ - рівень використання продуктивності (швидкості). У цьому випадку модель використання часу слід доповнити активним робочим часом $T_{р.ч.а}$ [45].

Коефіцієнт $K_{я}$ відображає той факт, що під час виконання виробничої функції машина не завжди завантажена на повну потужність і не завжди завантаження на певну потужність дає однакові результати. Цей коефіцієнт враховує втрати T_L , які відбуваються, наприклад, через холостий хід, блокувань у роботі, зменшеній швидкості, незначних зупинок і ін., які не враховані при визначенні готовності $K_Г$ і операційної ефективності K_O

$$T_{p.ch_net} = T_{p.ch} - T_L \text{ та } K_y = T_{p.ch_net} / T_{p.ch}, \quad (2.11)$$

Коефіцієнт якості K_Q звичайно для технологічного обладнання може мати простої. Для будівельної машини брак звичайно усувається переробками в "робочий" час, знижуючи, таким чином, продуктивність.

Втрати якості можливо оцінити величиною T_{L_qu} [45],

$$T_{p.ch_vai} = T_{p.ch_net} - T_{L_qu} \quad K_p = T_{p.ch_vai} / T_{p.ch_net}, \quad (2.12)$$

2.4. Методика визначення відмов для формування програми сервісу машин.

Формування програми сервісу машин може бути виконане не тільки на основі аналізу технічного стану машини, а й на виявленні причин відмов окремих деталей, агрегатів та збірних одиниць[57,58]. Фактори, що призводять до відмов, можна представити у вигляді системи технічних, технологічних та організаційних причин (рис. 2.9). Переважна кількість відмов обумовлена технічними та організаційними причинами.

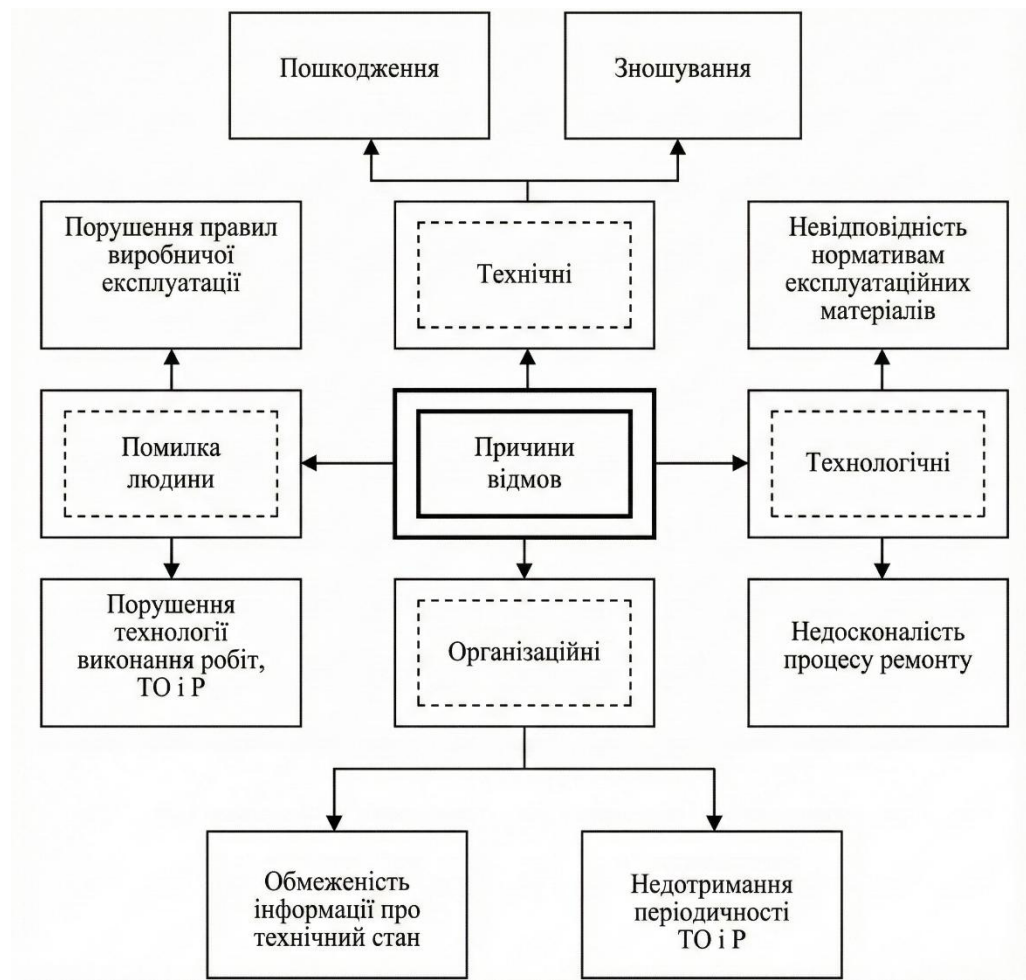


Рис. 2.9. Класифікація причин відмов

Відмови машин виникають під впливом різноманітних факторів: діючих навантажень, несвоєчасне та неякісного технічного обслуговування і ремонту, помилок обслуговуючого персоналу та ін., внаслідок чого деталі і вузли піддаються зношуванню, деформації, утомленим впливам[59,60]. Оскільки кожний фактор у свою чергу залежить від багатьох причин, то відмова елементів техніки відносяться до випадкових подій, а тривалість роботи до виникнення відмови – до випадкових величин. При дослідженні надійності технічних систем найбільш поширеними є застосування нормального розподілу, розподілу Вейбулла та експоненціального[44,61,62].

При нормальному розподілі випадкова величина теоретично може приймати будь – яке значення від $-\infty$ до $+\infty$. Оскільки час не має від'ємних значень, можливі значення випадкового часу безвідмовної роботи можуть

бути тільки позитивними. Тому кількості характеристики надійності розглядаються лише для усіченого нормального розподілу. Усічений нормальний розподіл випадкової величини виходить із нормального розподілу при обмеженні інтервалу можливих значень цієї величини. Характерним для нього є те, що інтенсивність відмов починається з нуля і зі збільшенням часу суттєво зростає, що свідчить про те, що потік відмов не є стаціонарним і має місце старіння елементів. В області малих значень часу старіння елементів несуттєво впливає на надійність, тому ймовірність безвідмовної роботи елементів машин зменшується незначно. Після тривалої експлуатації машини, відмови елементів якої мають нормальний розподіл, її надійність швидко зменшується, тому ймовірність безвідмовної роботи знижується.

Нормальний закон застосовується [44,62] при поступовій зміні параметрів чи у тому випадку, коли частка раптових відмов дуже мала, тобто для деталей, які працюють у сприятливих умовах експлуатації. Він притаманний для опису поступових зносних відмов і має два параметри: форми t_{no} і масштаб σ . Розподіл Вейбулла відповідає ситуації руйнування самої слабкої ланки (елемента) деякої сукупності (системи, що складається з групи елементів), а також є достатньо гнучкою функцією, за допомогою якої добре вирівнювати різноманітну статистику відмов, в основному, механічних об'єктів. В одному з варіантів він також має два параметри: форми b та масштабу α і характеризується різноманітністю кривих інтенсивності відмов, при $b \leq 1$ вона монотонно убиває, при $b = 1$ є константою (розподіл Вейбулла переходить в експоненціальний розподіл), при $b \geq 1$ інтенсивність відмов монотонно збільшується. При значенні параметра форми $b = 3,25$ розподіл Вейбулла наближається до нормального розподілу. Розподіл Вейбулла може бути використаний як характеристика зміни надійності елементів машин з часом їх напрацювання.

Експоненціальний розподіл характеризується [59] постійною інтенсивністю відмов $\lambda = \frac{1}{t_{\text{нв}}}$, яка є параметром розподілу. Це означає, що ймовірність відмов не залежить від того, скільки часу пропрацювала деталь до розглянутого моменту часу. Цей розподіл не враховує спрацювання та старіння і застосовується для складних систем, де можлива велика кількість відмов різних елементів із неоднаковою інтенсивністю. Розподіл має максимальну щільність ймовірності в момент включення, що характерно для низької якості виготовлення деталей та складальних одиниць машин, і не передбачає припрацювання деталей та вузлів і їхнє доведення. Експоненціальний розподіл застосовується для аналізу складальних систем, які працюють у важких умовах під постійним технологічним навантаженням та кліматичним впливом. У більшості випадків він характерний для раптових відмов і використовується частіше за інші при аналізі надійності. Розподіл характеризується простими формулами для розрахунку надійності. При $\lambda = \text{const}$ ймовірність безвідмовної роботи деталі протягом заданого часу не залежить від часу роботи, що значно спрощує розрахунки. Оцінка $t_{\text{нв}}$ визначається за формулою. Дифузійно – монотонний (ДМ) і дифузійно – немонотонний (ДН) розподіли, які відомі під назвою «розподілу Бірнбаума – Саундерса» і «оберненого розподілу Гауса», застосовується, в основному, при дослідженні електронної техніки. Пріоритетними напрямками вдосконалення технічного обслуговування є підвищення якості інформації про технічний стан та заходи з мінімізації порушень періодичності технічного обслуговування та ремонту. В роботі [63] пропонується підхід для оцінювання надійності системи, коли дані про відмову відсутні. Дослідження в першу чергу спрямовано на таку галузь як авіаційна техніка. Основним недоліком роботи є те що для визначення параметрів надійності використовувався тільки один функціональний метод Вейбулла, це може призвести до неточності моделі, при цьому параметр форми приймається відомим заздалегідь. Крім цього побудована модель [63]

враховує тільки безвідмовні спостереження та перевірена тільки для супутникового сенсора. В іншій роботі [64] автори виконали аналіз надійності верстатів із числовим програмним керуванням, де описано дані між часом відмови верстатів двопараметричним розподілом Вейбула. Недоліком роботи є обмеженість даних верстатами із числовим програмним керуванням повних моделей та відсутність аналізу експлуатаційних факторів. В роботі [65] автори комбінують Баєсівський підхід із Weibull-розподілом для моделювання розподілу часу до відмови та оцінювання надійності системи на основі набору даних. Недоліками дослідження є те, що при використанні Баєсівського методу результат сильно залежить від обраного розподілу, обмежений аналіз технічних причин відмов та експлуатаційних умов, малий обсяг вибірки даних. В роботі [66] автори використовують змішані моделі Вейбула. Проте такий підхід все рівно не підвищує точності моделі так як побудований на статистичній моделі розподілу і не враховує напружено-деформований стан конструкції верстатів. З іншого боку використання трипараметричного розподілу Вейбулла значно ускладнює розрахункову модель, що також може впливати на точність розрахунків. В джерелі [6,67] автори вибудовують модель надійності верстатів з чпк на основі поєднання структурної моделі в BlockSim та статистичного розподілу відмов в Weibull++. Тут все рівно не вирішується задача врахування реального напруженого стану деталей або конструкції верстата. Хоча Weibull++ та BlockSim підтримують різні типи функціональних методів розподілу і є потужними інструментами для аналізу надійності, проте при вирішенні задач проєктування та створення конструкцій машин частим є необхідність відображення картини напружень та деформацій. Окремо слід зазначити, що в роботі [67] виконано припущення, що час між відмовами підпорядковується тільки розподілу Вейбула. В роботі [68] виконаний аналіз втомної надійності механічних компонентів, які піддаються випадковому вібраційному навантаженню. Модель розподілу Вейбула поєднується з моделлю накопичення втомного пошкодження, що

дозволяє моделювати стохастичну поведінку механічного компонента під динамічним навантаженням і робити прогнози щодо надійності. Недоліками моделі є можливість використання тільки для аналізу систем, що працюють у умовах вібраційного навантаження. Відсутність картини напружень та деформацій, а також динамічний аналіз, який визначає енергетичні характеристики процесу. В роботі [69] розглянуто дослідження використання розподілу Вейбулла у випадку коли відсутні дані про відмови, тобто за умови коли деталі виготовлені із міцних матеріалів та із високою точністю обробки. Тут слід відмітити кращим варіантом в такому випадку є використання функціонального методу розподілу в поєднанні із кінцево елементним аналізом. В джерелі [70] розглядається практичне використання двох статистичних моделей для оцінки надійності промислових систем:

- 1) дискретна модель Inverse Polya;
- 2) дискретна версія розподілу Вейбула.

До недоліків можна віднести невелику вибірку даних та дискретну апроксимацію. В роботі [71] автори розглядають прогнозування відмов механічних систем із використанням змішаної моделі Вейбулла у поєднанні з пропорційною моделлю ризику. Недоліками є складність моделі та необхідність великого обсягу даних. В роботі [72] досліджується використання розподілу Вейбулла як критерію для оцінки аварійних станів техніки на основі аналізу вібраційних параметрів машин. Недоліком є обмеженість застосування такого підходу підземним гірничим обладнанням, залежність від якості даних та спрощена модель hazard-функції.

В роботі [51] досліджено розподіл напружень та деформацій в елементах вібраційних конструкцій машин. Недоліком роботи є відсутність досліджень параметрів надійності. В джерелі [52] досліджуються рівняння руху системи «машина-середовище», в яких середовище представлено дискретно-континуальною моделлю, разом з тим напрацювання на відмову в роботі не наведено. Все зазначене вище дозволяє стверджувати, що доцільним є

проведення дослідження присвяченого визначенню параметрів надійності елементів конструкцій будівельних машин з використання комбінованих методів, які включатимуть кінцево-елементну модель в поєднанні із алгоритмом лінійного накопичення пошкодження, функціональний метод розподілу та фізико-механічні властивості середовища.

2.5 Методика стратегії підтримання ефективного технічного стану машин

Основним завданням технічної експлуатації машин для улаштування асфальтобетонних доріг є управління процесом підтримки їхньої працездатності, ефективність якого найбільшою мірою визначається стратегією системи технічного обслуговування та ремонту.

Якщо врахувати, що сучасні машини, призначені для будівництва та утримання асфальтобетонних доріг, характеризуються широкою номенклатурою та суттєвою різницею ресурсних показників машин, стає очевидною необхідність системного підходу до обґрунтування концепції забезпечення надійності. У цьому випадку технічне обслуговування необхідно розглядати як складну систему, що складається з безлічі об'єктів управління — незалежних операцій, які відносяться до конкретних напрямів діяльності і реалізуються в межах обраного системного підходу.

Найбільш розповсюджена офіційно прийнята система технічного обслуговування та ремонту, що дозволяє досить ефективно витратити ресурс машин за рахунок виконання конкретних технічних впливів. Вона характеризується простотою застосування, чіткістю нормативів і можливістю планування числа технічних впливів, які виконуються з певною періодичністю. До основних недоліків планової системи належить певна невизначеність у призначенні періодичності через варіацію часу досягнення деталями та збірних одиниць граничного стану. Застосування

контрольно-профілактичної системи, яка передбачає призначення системи технічного обслуговування та ремонту на підставі періодичного технічного діагностування. Тобто варто застосовувати систему обслуговування за фактичним станом, що і є системою планування прогнозованого сервісного ремонтно-профілактичного обслуговування. Саме такий підхід і реалізується в даній роботі. Тобто на основі діагностики виробляються рекомендації щодо профілактики, ремонту або подальшої експлуатації.

Під стратегією експлуатації асфальтоукладальника будемо вважати поточний моніторинг його технічного стану в процесі експлуатації, передбачуючи можливі відмови із оперативним у часі їх ліквідації. При якісному і своєчасному проведенні технічного обслуговування, суворому дотриманні розрахункових режимів і параметрів асфальтоукладальника, можливо забезпечити максимальну продуктивність, за мінімальних витрат коштів на їх технічне обслуговування та ремонт. Разом з тим, стратегія експлуатації машини визначається не тільки умовами експлуатації, їх вихідними характеристиками машини, а і параметрами надійності, які варто дослідити і врахувати в умовах експлуатації.

Вирішення задачі визначення стратегії експлуатації можна використати наступну динамічну модель [57]:

$$B_{\tau}(t, t_1) = \left\{ \begin{array}{l} K_H = \frac{B_{\text{опт.}\tau}(0,0) + B_{\tau}(t, t_1)}{P_{\text{опт.}\tau}(0,0)} + B_{\tau+1}(1,0) \\ K_3 = \frac{B_{\text{опт.}\tau}(t, t_1)}{P_{\text{опт.}\tau}(0,0)} + B_{\tau+1}(1, t_1) \\ K_P = \frac{B_{\text{опт.}\tau}(t, t) + P_{\tau}(t, t_1)}{P_{\text{опт.}\tau}(t, t_1)} + B_{\tau+1}(t + 1, t) \end{array} \right\} \Rightarrow \min. \quad (2.13)$$

де K_H , K_3 , K_P – параметри впливу на машину, що визначають: заміну старої машини новою, збереження і ремонту машини;

$B_{\tau}(t, t_1)$ – витрати коштів на одиницю напрацювання в рік τ і за період після року τ при оптимальному використанні в період, що залишився, включаючи рік τ , машини віку t , якщо останній ремонт був у віці t_1 ;

$V_{\text{опт.}\tau}(t, t_1)$, $P_{\text{опт.}\tau}(t, t_1)$ – відповідно: оптимальні експлуатаційні витрати, оптимальна продуктивність на рік τ машини віку t , яка пройшла ремонт у віці t_1 ; $S_{\tau}(t, t_1)$ – витрати на заміну в рік τ машини віку t , що пройшла останній капітальний ремонт у віці t_1 , аналогічно новій; $P_{\tau}(t, t_1)$ – витрати на ремонт в рік τ машини віку t , що пройшла ремонт у віці t_1 ;

$v_{\tau+1}(1,0)$, $v_{\tau+1}(1, t_1)$, $v_{\tau+1}(t + 1, t)$ – витрати коштів за період після року τ і до кінця розглянутого періоду при експлуатації за оптимальним варіантом машини, що мала в рік τ відповідно вік 0 (нова машина) і пройшла ремонт у віці t_1 , і вік t і пройшла ремонт у віці t ; $t_{\text{гп}}$ – гранично допустимий вік машини, t_0 – початковий вік машини.

У модель (2.13) вводиться значення початкової продуктивності, експлуатаційних витрат, вартості ремонту і надійності, для конкретного технологічного процесу і на цій основі визначається оптимальна стратегія експлуатації. При визначенні номенклатури запасних частин до будівельних машин має місце поєднання обох напрямків.

Принцип прогнозування витрат деталей в залежності від допустимого зношення на основі положень теорії надійності [47], в якій функція відновлення виражається інтегральним рівнянням:

$$M(t) = F(t) + \int_0^1 M(t - \tau) dF_i(t), \quad (2.14)$$

де - $F(t)$, $F_i(t)$ - функція розподілу ресурсу початково встановленої (нової) і запасної деталі, що працює після i -ї заміни замість початкової; τ - змінна інтегрування.

Вирішення рівняння (2.14) представляє собою композицію розподілів ресурсів деталей, можливе лише при експоненціальному, нормальному і гамма – розподілі ресурсів. При інших розподілах і, зокрема, при розподілі Вейбулла використовують графічний метод вирішення [59].

Забезпечення надійності роботи деталей, збірних одиниць і машини в цілому досягається через своєчасне виявлення можливого виходу із ладу стану

шляхом організації безперервного моніторингу з використанням дистанційної діагностики. Для моніторингу пропонується дворівнева схема моніторингу асфальтоукладача:

1. Перший рівень: двигун, ходова частина, гідропривід, електрообладнання.
2. Другий рівень: збірні одиниці та механізми, що входять до складу агрегатів першого рівня, в тому числі шнеки та вібраційна плита.

Оцінка фактичного стану дозволяє перейти від фіксованої періодичності технічного обслуговування до вибіркового їх проведення. При досягненні граничного стану деталі або механізму виконується його регулювання, ремонт або заміна. У цьому разі жорстка періодичність технічного обслуговування і ремонту поступається місцем елементам обслуговування (рис.2.10).



Рис. 2.10 Система вибіркового обслуговування механізмів машини.

Наведена структура системи обслуговування механізмів та машини в цілому нормативну складову технічного обслуговування (заміна експлуатаційних матеріалів) та за потребою (моніторинг, ремонт). Періодичність моніторингу визначається технічним станом, а неперервність є

відносною і визначається інтервалом між вимірюваннями. При сумнівному діагнозі проводиться поглиблена діагностика. Зберігається встановлена періодичність щоденного та сезонного обслуговування. Заміна експлуатаційних матеріалів проводиться при досягненні напрацювання, проте за результатами аналізу (наприклад, спектрального) термін їх служби може бути продовжений. Параметри оптимізації мають обиратися з економічних міркувань. Таким чином, розглянуті організаційні напрями вдосконалення технічної експлуатації, що мінімізують можливість появи відмов та помилок персоналу, є найбільш значущими факторами управління надійністю експлуатації асфальтоукладача.

2.6. Висновки по розділу

1. Виявлено, що зношення суттєво впливає на поточний технічний рівень машин. При цьому фізичне зношення ділиться на зношення першого роду і зношення другого роду і визначається відповідно в результаті експлуатації та внаслідок виходу із ладу деталей та збірних одиниць машини. У відповідності до цього фізичне зношення в роботі розглядається безперервним, тобто таким, що здійснюється поступово і аварійне, що настає раптово.

2. Отримані аналітичні залежності для визначення коефіцієнта придатності до експлуатації, який визначає вплив видів зношення на показник використання будівельної техніки.

3. Визначені основні показники для розробки системи моніторингу стану машини, які впливають на її експлуатаційну ефективність. В результаті розглянутої методології моніторингу ефективності використання будівельної машини здійснено аналіз видів втрат ефективності і сформульована задача уточнення станів будівельної машини на всьому етапі виконання технологічного процесу будівництва дороги.

4. Наведена методика стратегії підтримання ефективного технічного стану машин для улаштування асфальтобетонних доріг на основі застосування управління процесом підтримки їхньої працездатності.

5. Для розробки програми сервісу машин здійснено аналіз технічного стану машини та розглянуто можливі причини відмов окремих деталей, агрегатів та збірних одиниць. Фактори, що призводять до відмов, представлено у вигляді системи технічних, технологічних та організаційних причин.

6. Запропоновано методи моніторингу стану машини, які враховують не тільки відповідне апаратне та програмне забезпечення, а і необхідні методичні передумови для фіксування та ідентифікацію різних станів машини.

7. Розроблено алгоритм моніторингу та визначення параметрів на відмову щоклової дробарки та асфальтоукладача. Визначено основні деталі та збірні одиниці машин, які впливають на режим та продуктивність за методикою опрацювання на відмову та забезпечення надійності роботи машин в процесах улаштування асфальтобетонних доріг.

РОЗДІЛ 3. Дослідження параметрів і характеристик впливу на визначення сервісного обслуговування машин в умовах їх використання

3.1 Дослідження впливу продуктивності, експлуатаційних витрат і вартості на стратегію експлуатації в реальних умовах використання машин.

Продуктивність будь якої будівельні машини для улаштування асфальтобетонної дороги можуть мати не тільки різну продуктивність, а й різний темп її зміни в процесі експлуатації (рис.3.1)

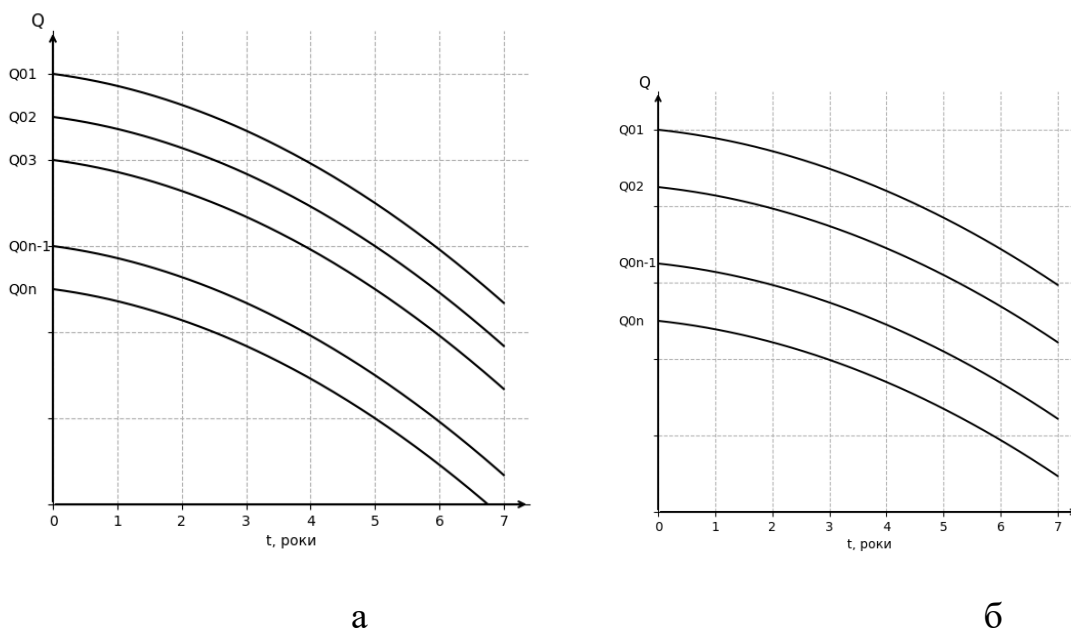


Рис. 3.1. Зміна продуктивності машини ($Q_{01}, Q_{02}, \dots, Q_{0n}$) в процесі її експлуатації: а – різні значення за умов однакового зниження продуктивності; б – різні значення за умов різного зниження продуктивності.

При цьому розглянуто два випадки темпів зниження продуктивності:

$$\frac{dQ_{01}}{dt} < \frac{dQ_{02}}{dt} < \dots < \frac{dQ_{0n}}{dt}. \quad (3.1)$$

$$\frac{dQ_{01}}{dt} > \frac{dQ_{02}}{dt} > \dots > \frac{dQ_{0n}}{dt}. \quad (3.2)$$

Розрахунки за умовами (3.1) та (3.2) показав[нечип, стат], що величина початкової продуктивності машини практично не впливає на оптимальний термін її роботи. Разом з тим, істотно змінюються питомі витрати коштів на одиницю виконаної машиною роботи(рис.3.2)

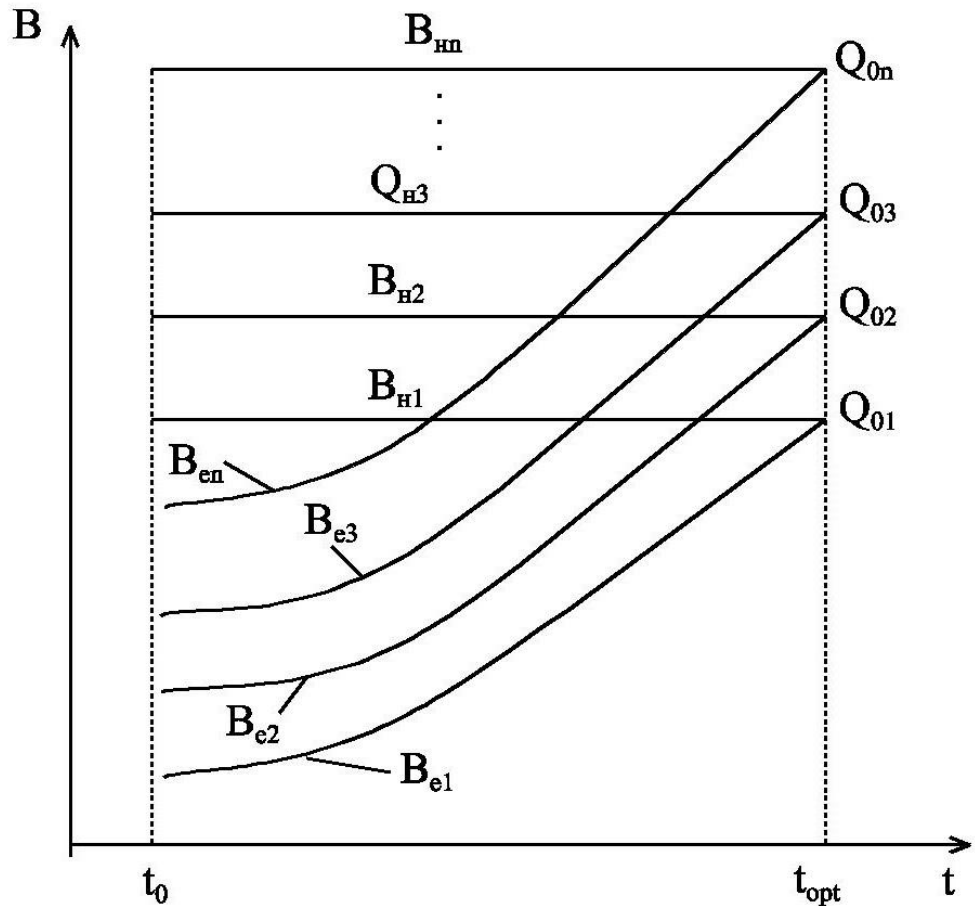


Рис. 3.2. Вплив початкової продуктивності машини на величину питомих витрат коштів на одиницю роботи

Варто відмітити, що із збільшенням початкової продуктивності питомі витрати коштів на одиницю роботи зменшуються. Аналогічні розрахунки, проведені для умов, коли в процесі експлуатації машини темп зниження продуктивності змінюється, показали, що зі збільшенням темпу зниження продуктивності оптимальний термін служби зменшується (рис. 3.3, лінія 3).

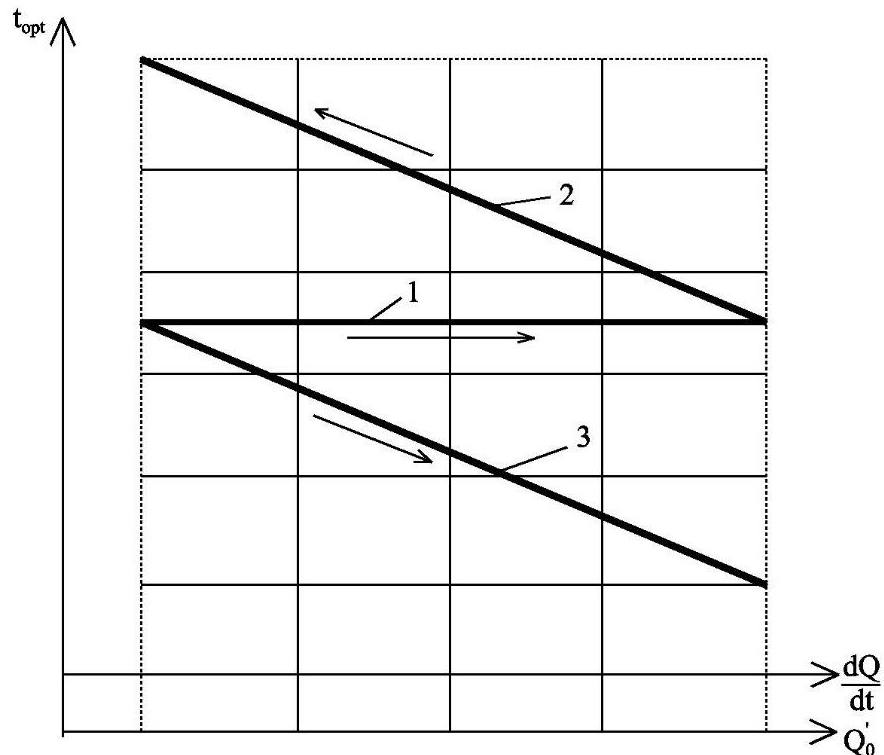


Рис. 3.3. Залежність зміни оптимального терміну роботи машин від величини продуктивності та темпу її зміни в процесі експлуатації:

- 1- $t_{onm} = f(Q)$ *npu* $dQ/dt = \text{const} = A$; 2 - $t_{onm} = f(Q)$ *npu* $dQ/dt = \text{const} < A$;
 3- $t_{onm} = f(Q)$ *npu* $dQ/dt = \text{const} > A$.

А із зменшенням темпу зниження продуктивності оптимальний термін збільшується (рис. 3.3, лінія 2). Що стосується величини питомих витрат коштів на одиницю виконаної роботи, то зі збільшенням темпу зниження продуктивності середнє її значення за термін служби машини зростає, а зі зменшенням темпу - зменшується. Ці результати підтверджують виключно важливе значення заходів, спрямованих на підтримку високої продуктивності машин у процесі їх експлуатації. Серед таких заходів особливу роль грають заходи з підтримання машин у справному технічному стані та забезпечення їх високої експлуатаційної надійності. Підтримка високого рівня продуктивності в процесі експлуатації машин дозволяє не тільки скоротити терміни виконання механізованих робіт, а й домогтися зниження витрат коштів на їх виконання.

До числа важливих вихідних параметрів машини відносяться, крім продуктивності, величина експлуатаційних витрат (E_e) і вартість ремонту (E_p). Вплив цих вихідних параметрів на оптимальний термін роботи машини досліджували шляхом зміни значень E_e і E_p і рішення задачі для кожного значення параметра. При зміні величини E_e для кожного випадку визначали значення функції $v = f(t)$, тобто знаходили значення питомих експлуатаційних витрат, що змінюються залежно від віку машини при різних E_e . Принциповий характер зміни питомих експлуатаційних витрат у функції віку машини t при різних початкових значеннях E_e показаний на рис.3.4.

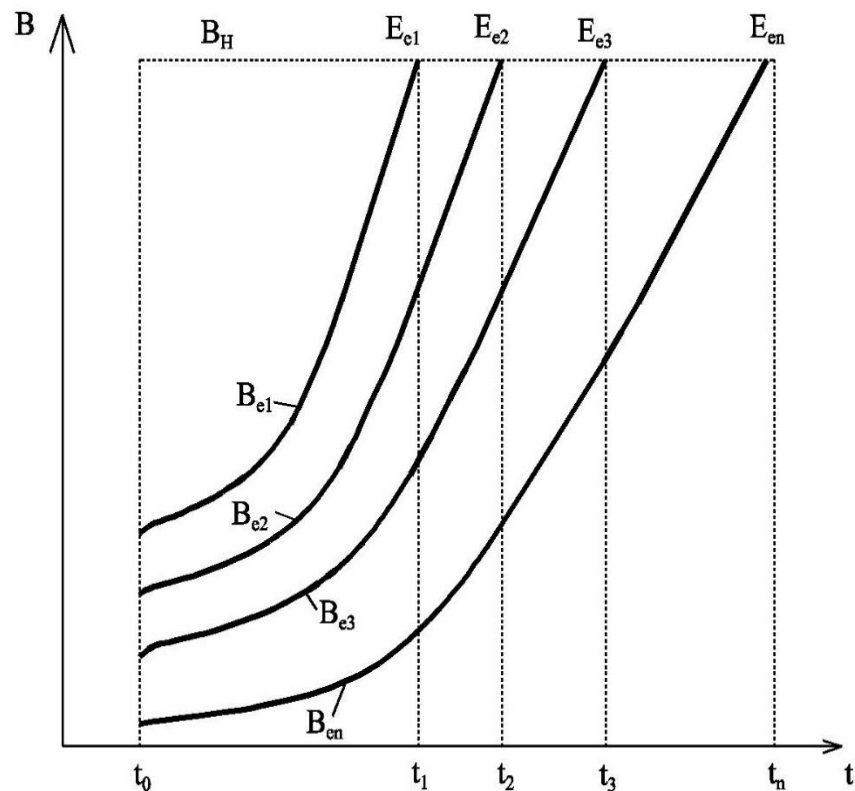


Рис. 3.4. Зміна питомих витрат коштів на одиницю напрацювання машини при різних початкових значеннях експлуатаційних витрат E_e : v_e - питомі експлуатаційні витрати на одиницю напрацювання машини при i -му значенні первісної величини E_e ($i = 1, 2, \dots, n$); v_H - питомі витрати коштів на одиницю напрацювання при заміні існуючої машини на більш ефективну.

З графіків видно, що чим більше значення E_e , тим раніше величина v_e досягає значення v_H . Отже, чим більше початкова величина експлуатаційних витрат E_e , тим менше оптимальний термін роботи машини. Аналіз результатів дослідження про вплив величини початкових експлуатаційних витрат на оптимальний термін роботи машин дозволяє зробити висновок про те, що одним з найважливіших умов збільшення оптимальних термінів служби і зменшення собівартості механізованих робіт є зниження експлуатаційних витрат при роботі машин.

Домогтися зниження цих витрат можна таким чином, що в період її експлуатації за рахунок раціонального використання машин, застосування прогресивних систем технічного обслуговування та способів агрегування. За аналогічною методикою були проведені дослідження [59] впливу величини ремонтних витрат E_p на оптимальний термін служби машин. При цьому в динамічну модель, що враховує можливість ремонту, вводили різні значення E_p і шляхом моделювання процесу визначали значення функції $v = f(t)$, тобто обчислювали значення питомих експлуатаційних витрат, що змінюються в процесі експлуатації машини, при різних значеннях E_p .

Принциповий характер зміни функції $v = f(t)$ при різних значеннях E_p показаний на рис. 3.5. Тут, як і у випадку з величиною E_e , чим більше величина E_p , тим менше оптимальний термін служби машини. На рисунку 3.7 величина $v_{Hi}(i = 1, 2, \dots, n)$ - це питомі витрати коштів на одиницю напрацювання машини при i -м значенні величини E_{pi} ; v_H - питомі витрати коштів на одиницю напрацювання машини при заміні машини на нову;

v_E - питомі експлуатаційні витрати на одиницю напрацювання машини в разі продовження її експлуатації. Розрахунки показали, що із збільшенням вартості ремонту питомі витрати коштів на одиницю вироблення машини зростають, а число ремонтів за термін служби зменшується.

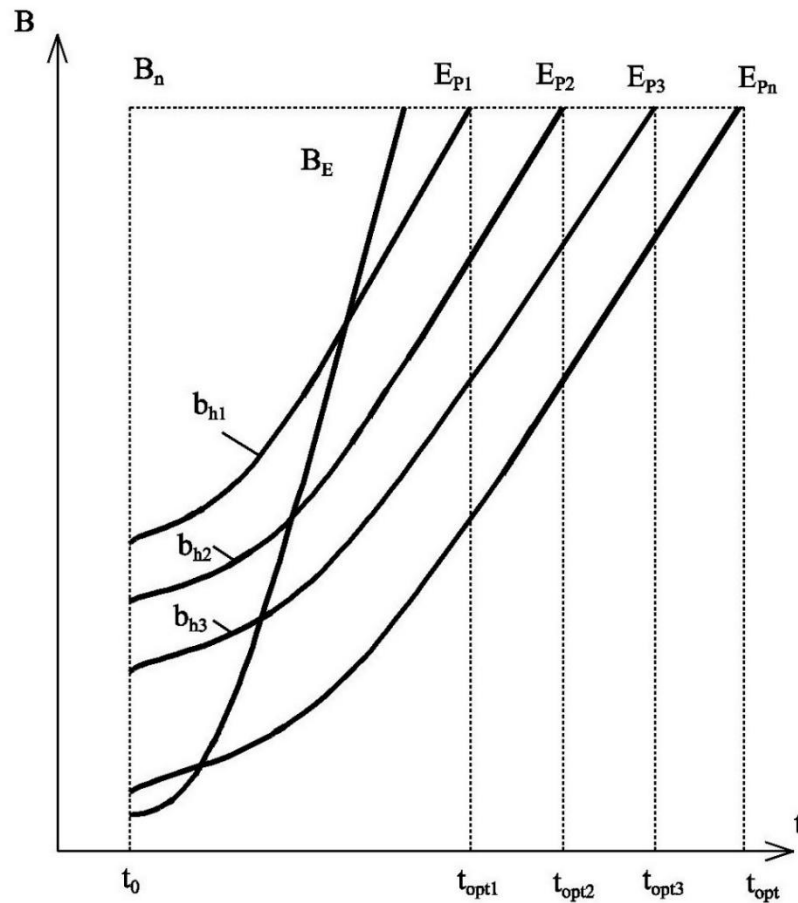


Рис. 3.5. Вплив ремонтних витрат на оптимальний термін роботи машин

Таким чином, можна зазначити, що величина ремонтних витрат є важливим чинником, що впливає на стратегію експлуатації машин і що при вирішенні питання про доцільність проведення ремонту (при економічному підході) слід порівнювати не поточні значення питомих витрат коштів на одиницю вироблення машини, а середні значення питомих витрат, отримані за термін роботи машини.

3.2. Дослідження та розрахунок параметрів і характеристик надійності розпірної плити шокової дробарки в процесах подрібнення щебню.

3.2.1. Загальні положення методики дослідження надійності розпірної плити шокової дробарки.

Шокові дробарки використовуються в основному на першій та другій стадії дроблення [73]. Затрати матеріальних ресурсів на процес виготовлення будівельних матеріалів дробильною машиною в цілому можна розділити на дві категорії, а саме на руйнування матеріалу до необхідних розмірів та експлуатацію машини. До експлуатаційних затрат відноситься сервісне обслуговування машини, метою якого є підтримання машин в справному стані за рахунок ремонту або заміни зношених деталей[73]. Руйнування елементів конструкції дробарки може відбуватись внаслідок втомного зношування після деякого напрацювання або раптово внаслідок дефектів в процесі виготовлення деталі[74 –76]. Надійність деталей конструкції дробильної машини залежить від цілого ряду факторів внаслідок чого вирішення такої задачі має значні труднощі [77]. Незапланований вихід із ладу деталі або вузла дробильної машини може призвести до зниження продуктивності дробильної установки, небажаних простоїв обладнання, що в кінцевому випадку призведе до значних матеріальних затрат[78]. До найбільш навантажених компонентів шокової дробарки можна віднести ряд збірних одиниць, в тому числі розпірну плиту. Розрахунок на міцність розпірної плити в існуючих методах здійснюється на використанні емпіричних формул. Застосовуються також ряд функціональних методів. Проте більшості функціональних методів притаманні недоліки, які побудовані на статистичних підходах. Проте більшості функціональних методів притаманні наступні недоліки:

- побудовані на статистичних підходах, що може призводити до неточного відтворення картини виходу із ладу елементів конструкції машини;
- мають значні труднощі при врахуванні взаємодії елементів конструкції машини;
- складність опису параметрів надійності за умов роботи елементів машини при змінному навантаженні. Тому для врахування реальної картини роботи будівельної машини необхідно поєднувати функціональний метод із іншими моделями або підходами. До таких моделей можна віднести коефіцієнти умов експлуатації, фізичні моделі навантаження, моделі граничного стану, деградаційні моделі, моделі прискорених випробувань, марковські моделі та ін. Слід відмітити, що традиційні підходи, що базувалися на жорстко регламентованих нормах списання ресурсів (наприклад, планово-попереджувальні ремонти за календарем), поступово витісняються стратегіями обслуговування за фактичним станом (Condition-Based Maintenance) та прогностичним обслуговуванням (Predictive Maintenance). У цьому контексті «класична тріада» експлуатаційних показників – напруження, енергоспоживання та навантаження – набуває нового змісту, перетворюючись на потік цифрових даних, що потребує складної аналітичної обробки. В роботі задача вирішується шляхом використання комбінованої моделі, а саме алгоритму лінійного накопичення пошкодження в поєднанні із скінченно-елементною моделлю до якої додається розподіл Вейбулла, що є найбільш універсальним методом функціонального розподілу для визначення граничних станів деталей та збірних одиниць машини[79 –81]. Таке рішення дозволяє визначити параметри надійності, встановити реальну картину процесу та розробити алгоритм сервісу дробарки.

3.2.2 Методика та результати досліджень параметрів надійності розпірної плити шокової дробарки.

Метою дослідження є визначення параметрів надійності розпірної плити шокової дробарки в залежності від характеристик робочого середовища та матеріалу виготовлення. Методикою передбачено виконання досліджень в наступній послідовності.

1. Дослідження впливу параметрів методу розподілу Вейбулла на зміну надійності.

2. Дослідження надійності розпірної плити спроектованої шокової дробарки на основі використання комбінованого методу та з врахуванням характеристик робочого середовища і матеріалу виготовлення.

3. Розробити рекомендації до визначення надійності елементів конструкції шокової дробарки на основі встановлених закономірностей.

Об'єктом дослідження є розпірна плита шокової дробарки, в якій визначені параметри довговічності на відмову та втомної міцності, які забезпечують її надійність. В роботі прийнята гіпотеза, що застосування для досліджень розподіл Вейбулла у поєднанні із комбінованою скінченно-елементною моделлю деталі надає можливість отримати параметри довговічності на відмову та втомної міцності розпірної плити, які відображають реальну картину процесу її навантаження. Припущеннями в роботі є прийнятий матеріал подрібнення міцністю 80 МПа. Розглянутий випадок дії сили вздовж осі розпірної плити є спрощенням, прийнятим в процесі проведення дослідження.

Для виконання розрахунків, побудови графіків коефіцієнтів запасу міцності було використано програмне забезпечення nCode DesignLife (HBK, Німеччина), JupyterLab (Open Source Project, International Community), Ansys 2024 R1 (ANSYS, Inc., USA). Твердотільне моделювання машин та деталей виконувалось в Autodesk Inventor 2025 (Autodesk, Inc., USA).

Статистичні розподіли призначені для моделювання певної поведінки. Математична функція, яка описує розподіл є функція щільності вірогідності. Функція розподілу Вейбула може бути трьох видів, відповідно до кількості параметрів. Так, трипараметрична функція щільності вірогідності Вейбула визначається на основі залежності[81]:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta}}, \quad (3.3)$$

де $f(t) \geq 0$, $t \geq \gamma$, η – параметр масштабу або характерний термін служби, $\eta > 0$; β – параметр форми (або нахил), $\beta > 0$; γ – параметр розташування (або безвідмовний термін служби), $-\infty < \gamma < \infty$.

Двух параметричний розподіл Вейбула отримуємо з рівняння (3.3) за умови прийняття $\gamma = 0$. В свою чергу однопараметричний Вейбула отримуємо при $\gamma = 0$ та $\beta = C = \text{constant}$.

Середній й очікуваний час до відмови:

$$\bar{T} = \gamma + \eta \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right), \quad (3.4)$$

де $\Gamma(n)$ – гамма-функція.

Медіана розподілу Вейбула або час до відмови 50% виробів визначається як [72]

$$T_m = \gamma + \eta (\ln 2)^{\frac{1}{\beta}}, \quad (3.5)$$

Мода розподілу Вейбула або одна конкретна відмова, яка трапляється найчастіше, [72]

$$T_{\text{moda}} = \gamma + \eta \left(1 - \frac{1}{\beta} \right)^{\frac{1}{\beta}}, \quad (3.6)$$

Стандартне відхилення або міра розсіювання значень навколо середнього, [72]

$$\sigma_T = \eta \sqrt{\Gamma\left(\frac{2}{\beta} + 1\right) - \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)^2}, \quad (3.7)$$

Функція надійності Вейбула, [56]

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}, \quad (3.8)$$

Час до якого деталь буде працювати з певною заданою надійністю [14]

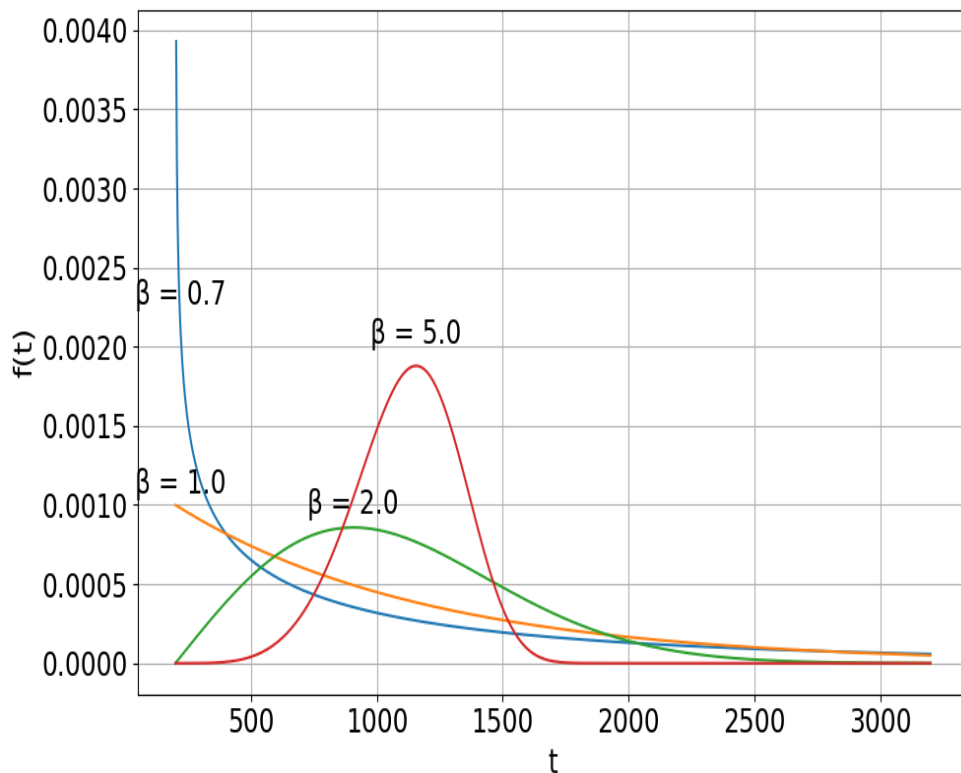
$$T_R = \gamma + \eta \{-\ln(R)\}^{\frac{1}{\beta}}, \quad (3.9)$$

Функція інтенсивності відмов [56]

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1}, \quad (3.10)$$

Далі було розглянуто вплив параметрів на розподілу Вейбула. Так параметр β або параметр форми має помітний вплив на поведінку розподілу. Значення цього параметру визначає нахил регресійної кривої.

При визначених значення β можна отримати інші форми розподілу. Графік зміни щільності ймовірності розподілу в залежності від зміни β представлений на рисунку 3.6 .



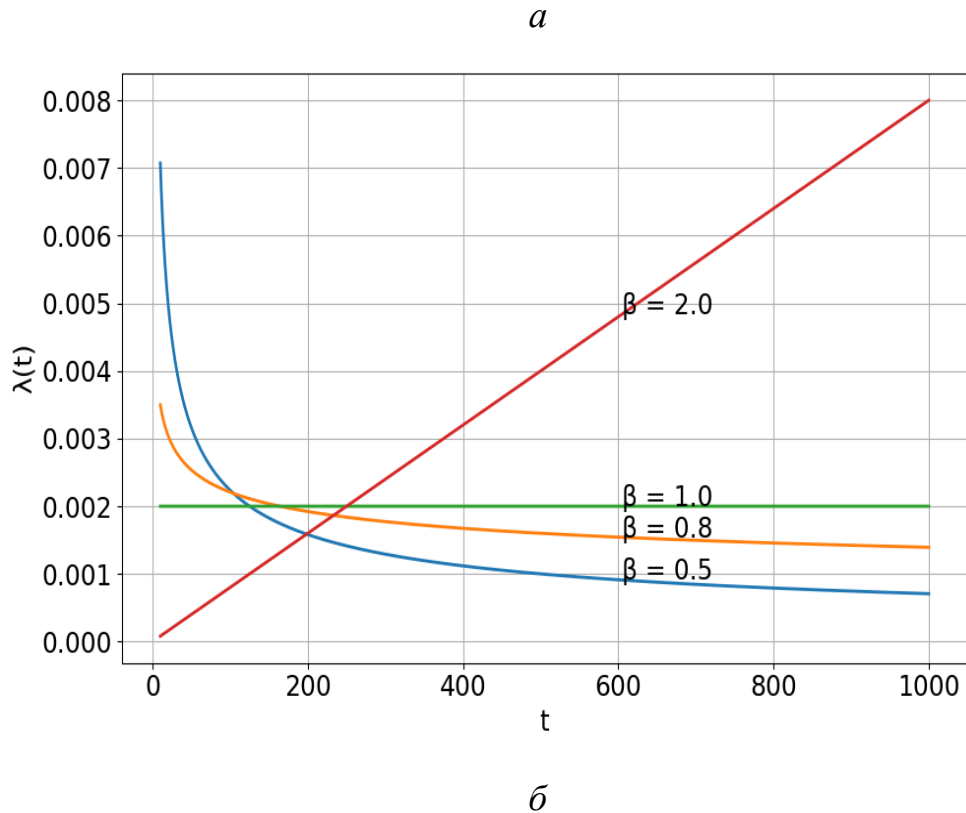


Рис. 3.6. Графіки залежності: *a* – параметру форми на щільність ймовірності розподілу; *б* – параметру форми на коефіцієнт відмов

Із графіка рис. 3.6, *a* можна зазначити, що при значеннях $\beta < 1$ крива розподілу повторює форму гіперболи і чим менше значення тим крутіше зменшується крива. При значеннях $\beta > 1$ крива спочатку збільшується, потім досягає свого піку, після чого зменшується. Додатково слід відмітити, що при $\beta = 0.999$, $f(0) = \infty$ проте при $\beta = 1.001$, $f(0) = 0$. Така властивість розподілу ускладнює оцінку максимальної правдоподібності (MLE).

Вплив коефіцієнту β на коефіцієнт відмов зображено на рис.3.6, *б*. З графіка можна відмітити, що при $\beta = 1$, крива розподілу є горизонтальною і відображає постійний коефіцієнт відмов. Таким чином розподіли, які визначаються при $\beta < 1$ відображають рівень невдач, який зменшується з часом, а при $\beta > 1$ рівень невдач, які зростають із часом. Інтенсивність відмов в діапазоні $0 < \beta < 1$ може свідчити про відмови раннього типу, тобто це можуть бути проблеми у виробничому процесі, пакування тощо. Постійне

значення відмов при $\beta = 1$ відображає інтенсивність відмов одиниць протягом терміну служби. Для $\beta > 1$ параметр $\lambda(t)$ збільшується та відображає інтенсивність відмов вузлів, що демонструють зносоподібні пошкодження.

Зміна параметру масштабу на ймовірність щільності розподілу представлена на рис.3.7.

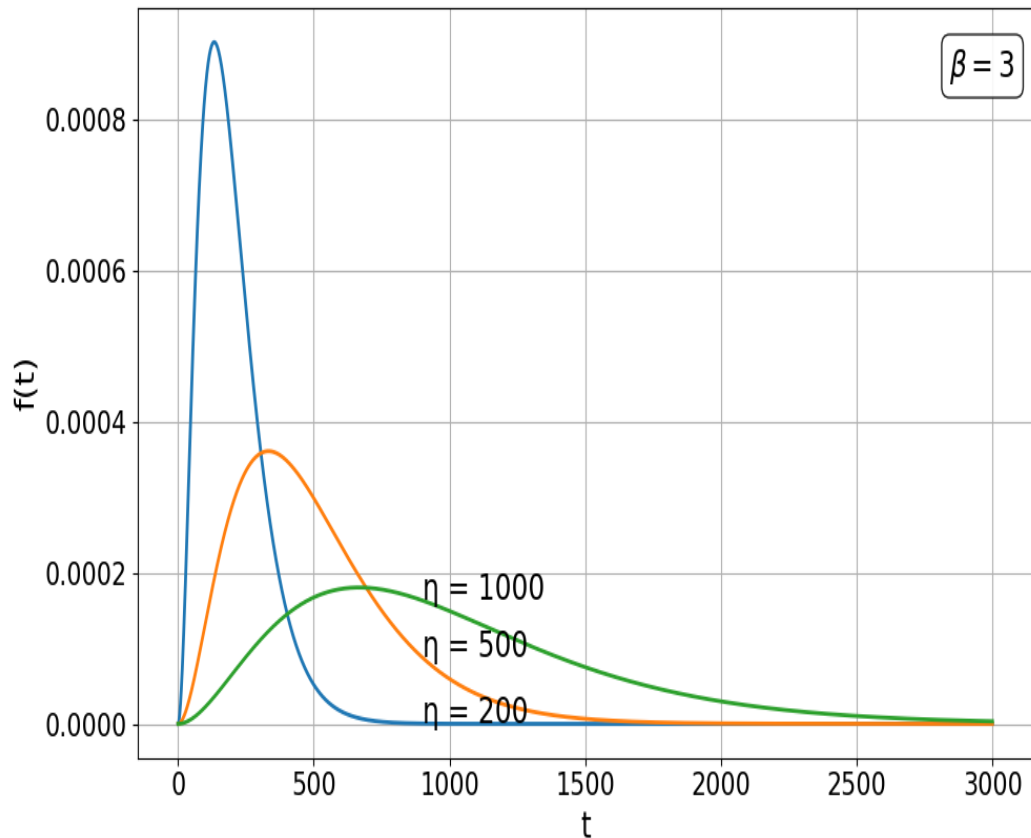


Рис. 3.7. Графік впливу параметру масштабу на зміну щільності ймовірності розподілу

Збільшення значення η при сталому значенні β розтягує графік в напрямку збільшення шкали абсцис, таким чином, що пік кривої щільності ймовірності розподілу зменшується.

Далі досліджено надійність елементів конструкції щокрової дробарки. З цією метою була прийнята твердотільна модель щокрової дробарки із складним рухом щоки та розміром приємного отвору 1080x1240 (рис. 3.8, а). Для

досліджень напрацювань на відмову розглянуто розпірну плиту дробарки. Модель розпірної плити представлена на рис. 3.8, б.

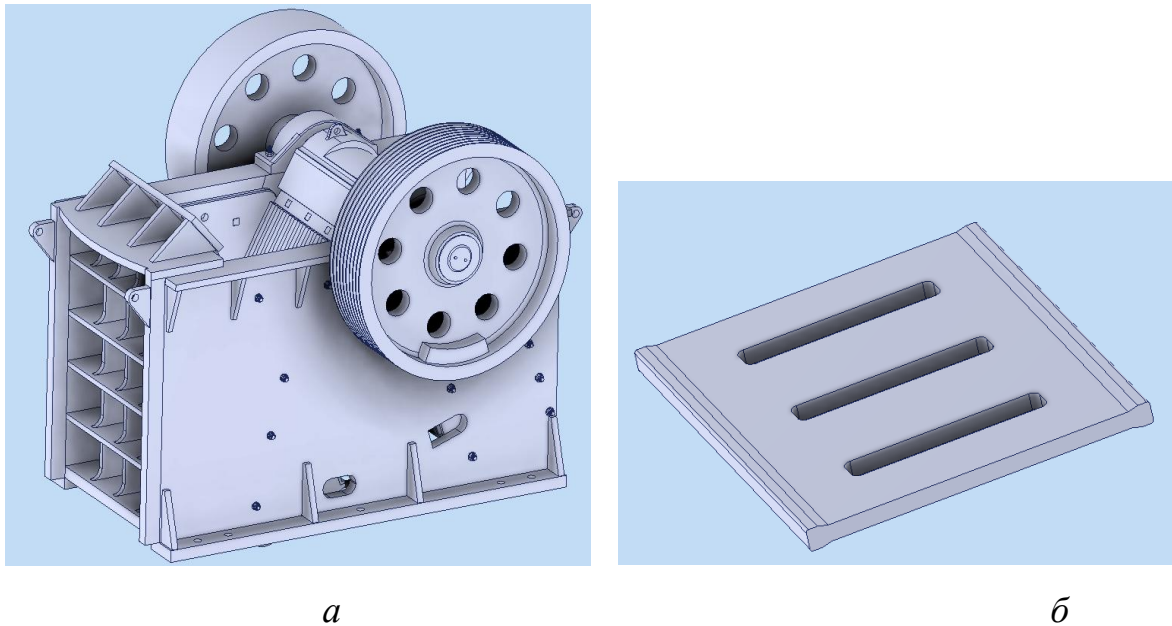


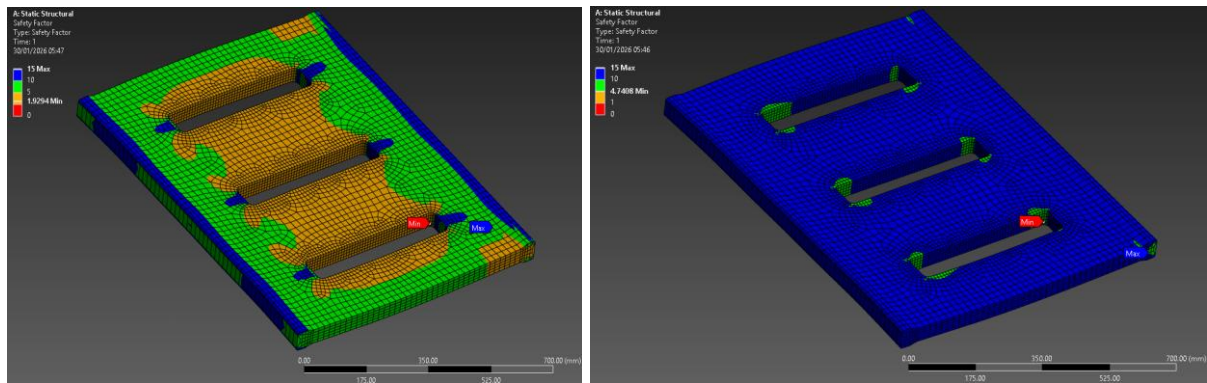
Рис. 3.8 Твердотільна модель: *a* – щокова дробарка із складним рухом щоки; *б* – розпірна плита.

Дослідження виконані в програмному комплексі Ansys 2024 R1 з використанням модуля ncode DesignLife 2024. Ncode DesignLife 2024 програмне забезпечення, яке дозволяє виконувати аналіз втомної міцності та довговічності конструкцій машин та обладнання. На першому етапі було виконано статичний аналіз напружень та деформацій які можуть виникати в розпірній плиті. В роботі [75] зазначається, що навантаження на розпірну плиту можна визначити на основі залежності

$$F_{pn} = \frac{2\pi\sigma_c^2(D^2 - d^2)L}{12ES_k} \cos\left(\alpha - \frac{\beta}{2}\right), \quad (3.11)$$

де $\sigma_c = 80$ МПа – границя міцності на стиск; $E = 55000$ МПа – модуль пружності; $S_k = 0.028$ м – хід рухомої щоки; $L = 1,24$ м – довжина камери дроблення; $D = 0.8$ м – середній діаметр матеріалу, який надходить до камери дроблення; $d = 0.21$ м – розмір продукту дроблення; $\alpha = 20^\circ$ – кут захвату; β

$=19^\circ$ – кут встановлення розпірної плити. На основі прийнятих значень розрахункових параметрів значення сили, яка діятиме на розпірну плиту при дробленні матеріалу міцністю 80 МПа буде складати 1580953 Н. Додатково необхідно враховувати силу від ваги елементів конструкції дробарки – 83517 Н. Таким чином загальне зусилля буде складати – 1664470 Н. Був розглянутий випадок дії сили вздовж осі розпірної плити. В якості матеріалу виготовлення приймемо СЧ18-36 (аналог Grey Cast Iron BS1452 Grade250 [82]) та сталь 45 (аналог Carbon Steel SAE1045-225-ANLD. Картини по запасу міцності різних ділянок розпірної плити для сірого чавуна BS1452 Grade250 та вуглецевої сталі SAE1045-225-ANLD зображені на рис.3.9. Для сталі SAE1045 мінімальний запас міцності є значним – 4.74.



a

б

Рис.3.9. Картина коефіцієнта запасу міцності для: *a* – сірого чавуна BS1452 Grade250; *б* – вуглецевої сталі SAE1045-225-ANLD

Далі були виконані два аналізи – nCode EN Constant та nCode EN TimeSeries. При використанні ncode DesignLife в зв'язці із Ansys 2024 R1 слід відмітити наявність підготовлених восьми пресетів. Перші два пресети nCode EN Constant та nCode EN TimeSeries призначені для розрахунку втоми при сталому навантаженні (Constant) або при змінному навантаженні (TimeSeries). Позначення EN відповідає за те що керуючою величиною втоми є деформація. У випадку пресетів nCode SN Constant та nCode SN TimeSeries керуючою величиною є напруження. Пресети ncode SN VibrationPSD та ncode SN

VibrationSweptSine призначені для втомного аналізу за умов вібраційної дії. VibrationPSD відповідає за випадкові вібрації, що задаються через power spectral density. VibrationSweptSine відповідає за гармонічне збудження. NCode WeldShellSeam та nCode WeldSolidSeam призначені для аналізу втомної довговічності зварних швів.

На наступному етапі був розглянутий пресет nCode EN Constant. Вікно моделювання має вигляд представлений на рисунку 3.10.

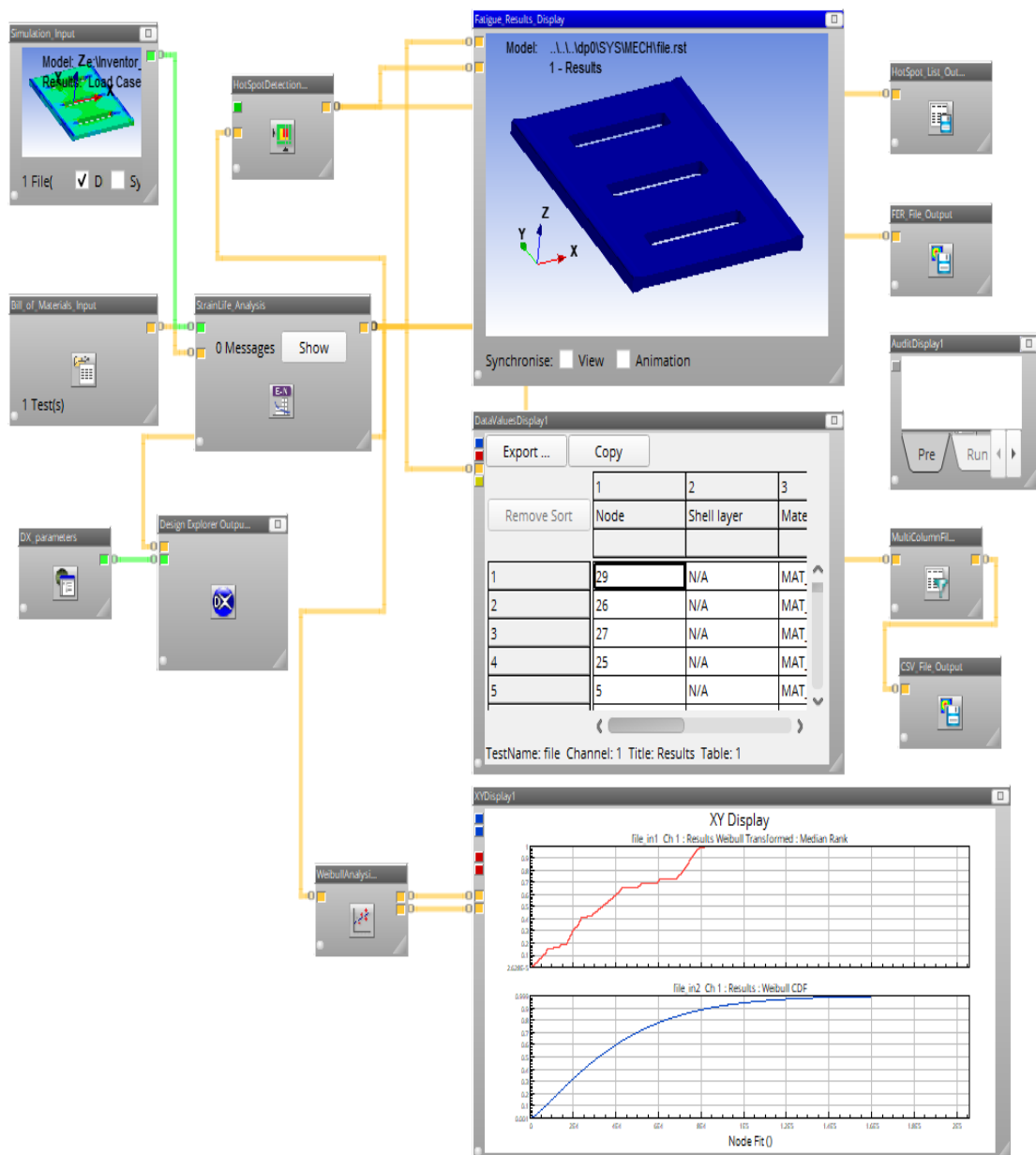


Рис.3.10. Модель розрахунку розпірної плити в діалоговому вікні nCode EN Constant

Як слідує із рисунка, модель складається із набору блоків – гліфів. Тут слід зазначити за що відповідають основні гліфи. Гліф `Simulation_Input` завантажує результат розрахунку деталі із FEA модуля Ansys в модуль ncode. В `Simulation_Input` можна відобразити відповідні картини напружень та деформацій, які виникають в деталі. `Bill_of_material_input` дозволяє редагувати властивості матеріалу із якого виготовлена конструкція деталі. `StrainLife_Analysis` є головним гліфом в який на вхід подають дані із гліфів `Simulation_Input` та `Bill_of_material_input`, після чого виконується втомний аналіз по деформаціям або по напруженням. Відмінність пресета nCode EN TimeSeries на даному розрахунковому етапі полягає в наявності додаткового гліфа в який завантажуються експериментальні дані і подаються на вхід до `StrainLife_Analysis`. Гліф `Fatigue_Results_Display` відображає візуальну картину для аналізу втоми та довговічності. `DataValueDisplay1` відображає таблицю розрахованих параметрів, таких як цикли життя (Life cycles), загальні накопичені пошкодження, коефіцієнт безпеки, значення напружень. В цілому `DataValueDisplay1` допомагає відслідковувати значення параметрів при перевірці правильності розрахунків. На рисунку 3.11 представлені картини довговічності до відмови, із якої можна відмітити, що для сталі задане вище зазначене навантаження в часі не призведе до втоми. Для чавуна мінімальна кількість циклів складатиме 45290. До розрахункової моделі nCode EN Constant був застосований розподіл Вейбулла, який в даному випадку може виконати оцінку довговічності конструкції по зміні напружено-деформованого стану.

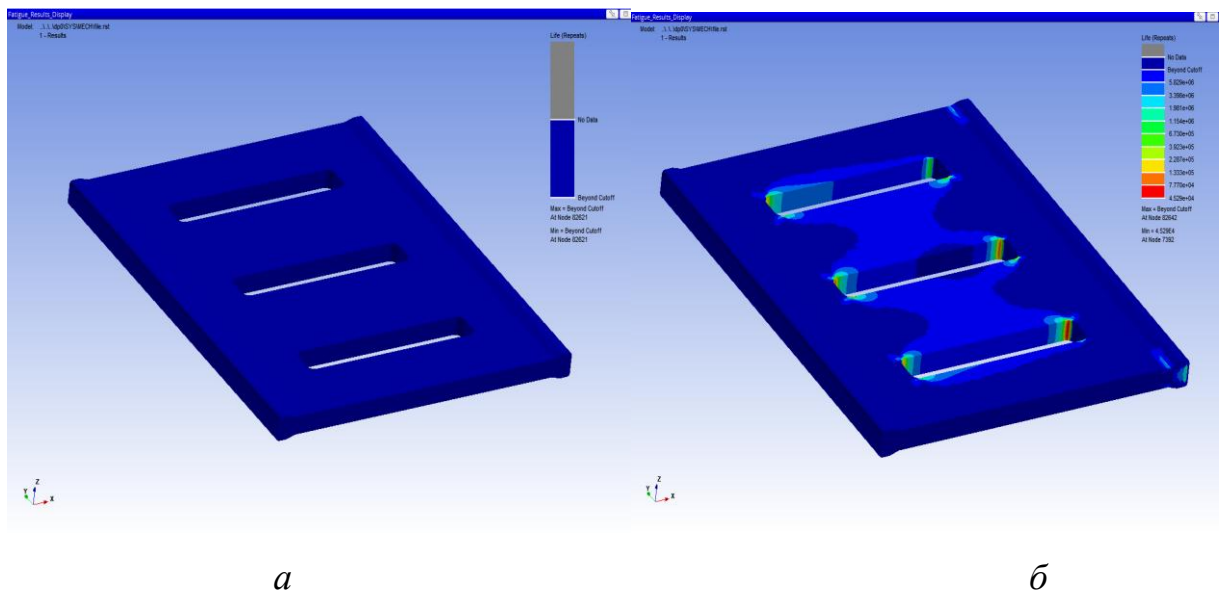


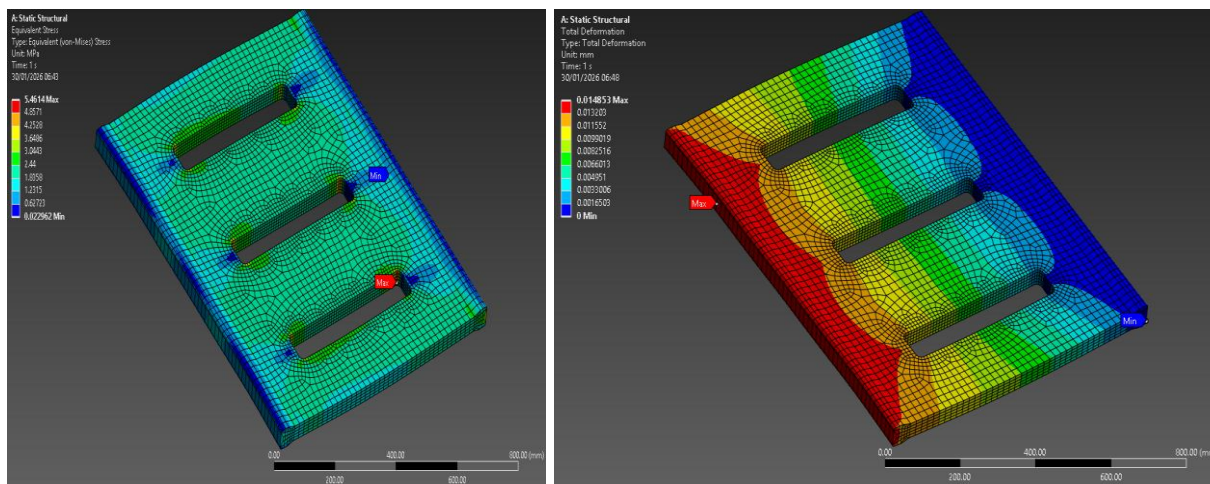
Рис.3.11. Результати розрахунку розпiрної плити на довговiчнiсть до вiдмови в nCode EN Constant: *a* – SAE1045-225-ANLD; *б* – Grey Cast Iron BS1452 Grade250

При використаннi присету nCode EN Time Series необхідним є наявнiсть експериментальних даних змiни навантаження в часi. За вiдсутностi таких даних можна скористатися наближеним математичним описом процесу. Так, наприклад, змiну навантаження на елемент конструкцiї дробарки в деякому наближеннi можна описати рiвнянням:

$$-F_p = F_{pp} \sin(\omega t + \phi) \quad (3.12)$$

де F_{pp} – максимальне навантаження на розпiрну плиту, ω – кутова частота коливань рухомої щоби, ϕ – фазовий зсув. Ще одним важливим параметром процесу є потрапляння бiльшої кiлькостi матерiалу в камеру дроблення або бiльш мiцнiших кускiв матерiалу, що може спричиняти рiзке пiдвищення рiвня навантаження на елементи конструкцiї дробарки. При дробленнi мiцних порiд або роботи машини у важких умовах такі перевантаження можуть сягати 100%. Тому рiвняння для генерацiї сигналу може мати набагато складнiший вид нiж представлене вище. Слiд вiдмiтити, що рiвняння $F_p = F_{pp} \sin(\omega t + \phi)$ будує iдеальну форму сигналу, використання якої в розрахункових моделях дає значну похибку. Важливим моментом в постановцi задачi є те що сила ваги вiд елементiв конструкцiї дробарки в

процесі змінюється в досить малих межах, на основі чого її можна прийняти постійно діючою. Тоді в модулі статичного розрахунку до плити необхідно прикласти навантаження від дії сил ваги – 83518 Н. Картини напружень та деформацій для сталі представлені на рис. 7.



a

б

Рис. 3.12. Результат розрахунку розпiрної плити вiд дiї сил ваги елементiв конструкцiї дробарки: *a* – картина напружень; *б* – картина деформацiй.

В свою чергу картина напружень та деформацiй для сiрого чавуна є схожою.

Вiкно проекту в nCode EN TimeSeries представлено на рис. 8. Дiалогове вiкно є дещо вiдмiнним вiд стандартного. Видалено глiф Time Series Input, який гарно працює тiльки iз даними, що мають розширення .s3t. Для завантаження експериментальних даних додано глiф ExcelInput1 в поєднаннi iз глiфом XYDisplay1, що дозволяє графiчне вiдображення даних.

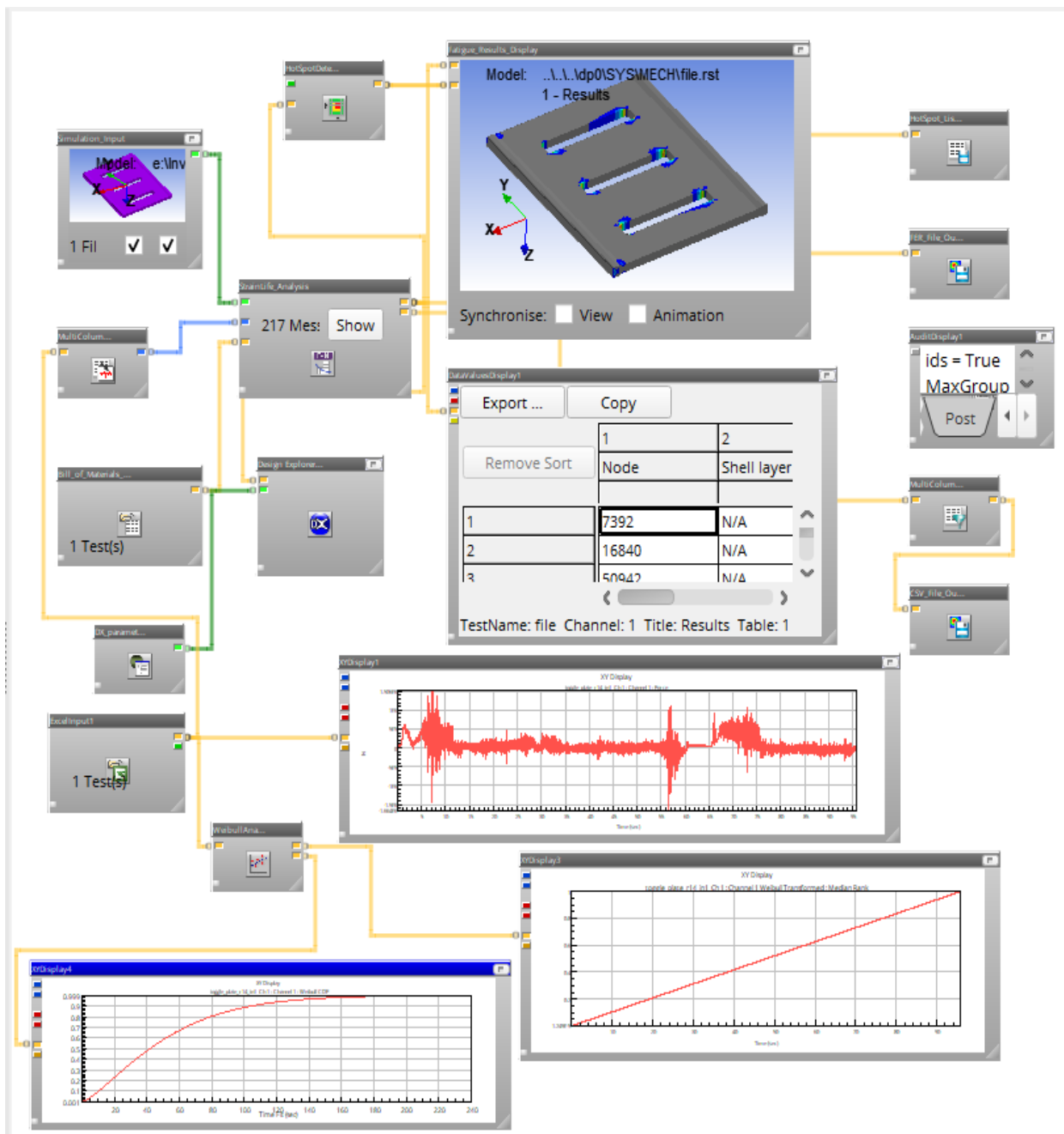


Рис.3.13. Модель розрахунку розпiрної плити в дiалоговому вiкнi
nCode EN TimeSeries

Додатково доданий глiф, який перетворює данi в часовий ряд. З метою використання розподiлу Вейбулла для аналізу додано глiф WeibullAnalysis, а також вiдповiднi глiфи-дисплеї. На рисунку 3.14 представлено графiчне вiдображення результатiв моделювання.

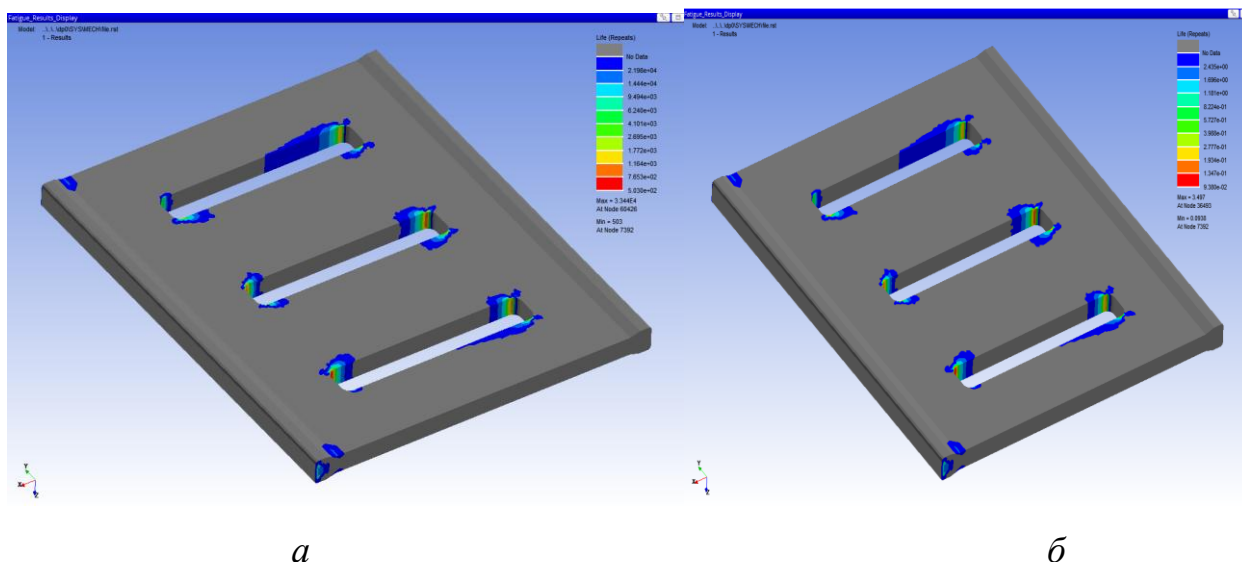
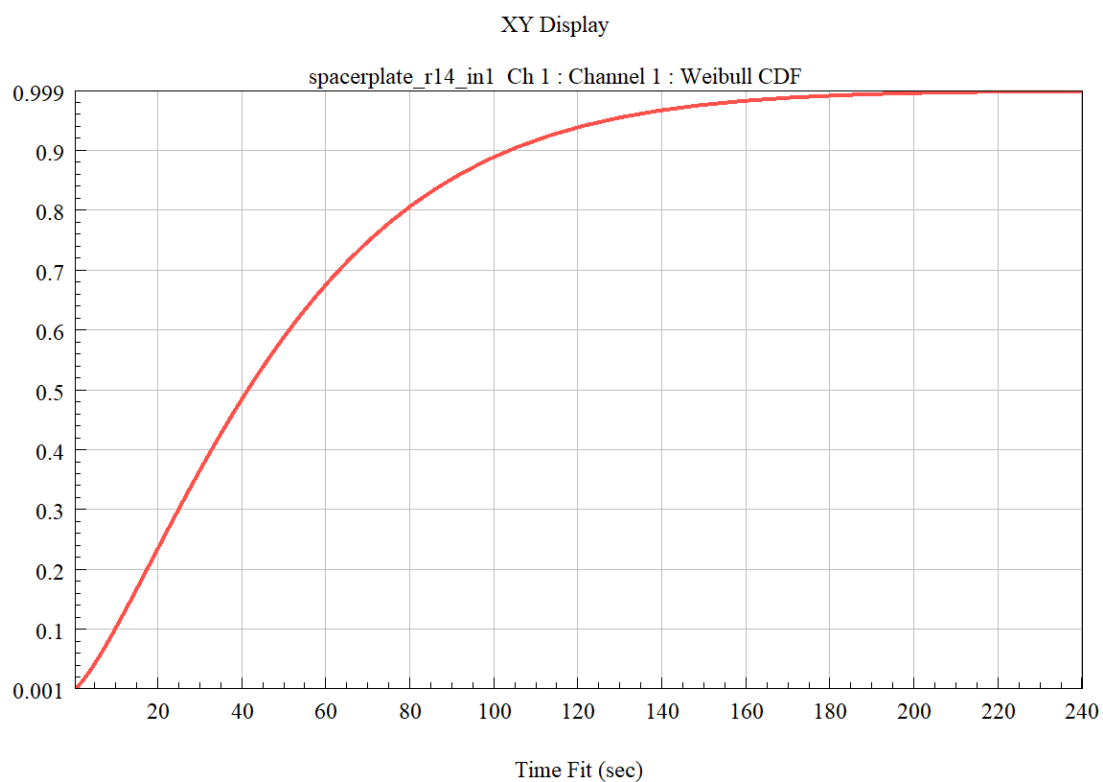


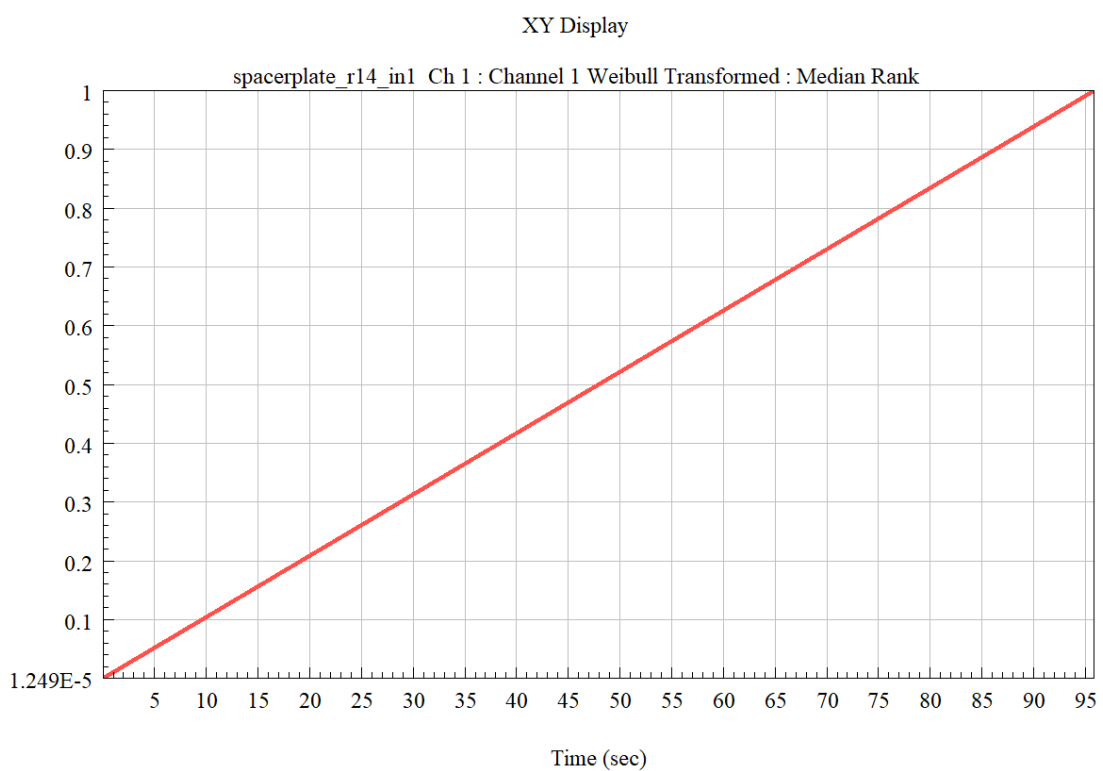
Рис.3.14. Результати розрахунку розпирної плити на довговічність до відмови в nCode EN TimeSeries: *а* – SAE1045-225-ANLD; *б* – Grey Cast Iron BS1452 Grade250

Аналізуючи картини втомної довговічності (рис.3.14) можна зазначити, що найбільш небезпечними зонами є вершини технологічних отворів. Мінімальне значення параметру Life для сталі SAE1045-225-ANLD є рівним 503, в той час як для чавуна Grey Cast Iron BS1452 Grade250 цей параметр знаходиться в межах нуля.

В гліфі WeibullAnalysis були налаштовані відповідно параметри аналізу. Тут слід відмітити, що для аналізу в даному випадку є доступний тільки двопараметричний розподіл. Криві розподілу приведено на рисунку 3.15.



a



б

Рис. 3.15. Результати розподілу Вейбулла: *a* – апроксимовані дані; *б* – експериментальні дані із медіанним рангом

Перший вивід гліфу аналізу Вейбула (рис.3.15, б) виводить дані у порядку зростання разом із відповідним медіанним рангом. Медіанний ранг обчислюється за допомогою функції Бенара. Другий вихідний сигнал надає значення, які представляють кумулятивну функцію розподілу (CFD). Розподіл підганяється до медіанних рангів. Діапазон вихідних значень визначається властивостями CurveNumPoints, CurveYMin та CurveYMax. Двопараметричний розподіл утворює пряму лінію на осях Вейбула та прагне мінімального терміну служби. Функцію CDF можна використовувати для оцінки ймовірності відмови. Терміни служби N1, N10 та N50 автоматично обчислюються та виводяться в метаданні.

Запропонована модель розрахунку розпірної плити в діалоговому вікні дозволила визначити картини втомної довговічності. Цей результат є одним із практичних рекомендацій до визначення надійності елементів конструкції подібного класу машин. Приведені картини довговічності на відмову реалізовані для конкретних матеріалів. Так, мінімальне значення параметру Life для сталі SAE1045-225-ANLD є рівним 503, в той час як для чавуна Grey Cast Iron BS1452 Grade250 цей параметр знаходиться в межах нуля. При цьому визначено, що найбільш небезпечними зонами є вершини технологічних отворів. Таким чином, використання пресету nCode EN Constant та nCode EN TimeSeries дозволяє оцінити довговічність конструкції при урахуванні зміни напружено-деформованого стану, що дає можливість здійснювати аналіз деталей, які працюють під постійним та змінним навантаженням в часі [83,84]. До рекомендацій для наукового та практичного використання пропонується запропонований метод поєднання кінцево-елементного аналізу деталі із алгоритмом лінійного накопичення пошкодження та функціонального методу розподілу Вейбула. Важливість цього методу досліджень полягає у можливості врахування фізико – механічних властивостей матеріалу, що подібнюється.

3.3. Дослідження та розрахунок параметрів і характеристик надійності розподільного шнека асфальтоукладальника.

3.3.1. Загальні положення методики дослідження надійності розподільного шнека асфальтоукладальника.

Укладання асфальтобетонної суміші потребує оцінки заповнювачів [85] та аналізу процесів [86], в тому числі дотримання положень обслуговування [87,88] та сервісу [89 –91]. Найбільш навантаженими вузлами асфальтоукладальника є ті вузли які контактують безпосередньо із робочою сумішшю, серед яких є шнеки. Незапланований вихід із ладу деталей асфальтоукладальника може мати значні економічні наслідки. Крім цього поломка може спричинити руйнування інших деталей, які безпосередньо поєднанні [92,93]. Так, наприклад при зношуванні шнека асфальт почне нерівномірно розподілятися по ширині дорожнього полотна. Це призведе до необхідності повторного укладання, і тим самим збільшенні енергозатрат процесу в цілому та порушенні послідовності технологічних операцій. В цілому розподільний шнек асфальтоукладача є одним із найбільш навантажених робочих органів у дорожньому будівництві, виконуючи критичну функцію поперечного розподілу гарячої асфальтобетонної суміші. В роботі [94] розглядається визначення структурних параметрів асфальтового покриття: комбінований підхід до прискорених лабораторних та польових випробувань за допомогою тривимірного аналізу методом скінченних елементів. На сьогодні відомий широкий спектр функціональних методів визначення граничних станів деталей та вузлів машин. Проте самі по собі дані методи є статистичними і мають ряд недоліків. Для врахування реальної картини роботи дорожньої машини перспективним є поєднання функціонального методу з іншими моделями визначення граничних станів деталей. До таких моделей можна віднести такі які побудовані на критеріях

руйнування, напружено-деформованому стані деталей, фізичні моделі навантаження, деградаційні моделі та ін.

Робочий процес розподільного шнека відбувається в умовах безпосереднього контакту з нагрітим абразивним середовищем. Такі умови спричиняють комбіновану втрату ресурсу шнека, при якій механічне зношування поєднується із термічною втомою. При механічному зношуванні основним фактором втрати ресурсу є абразивна дія матеріалу на лопаті шнека. При постійному обертанні шнека відбувається ерозія його передньої кромки. Окрім цього може відбуватися деформація валу шнека через нерівномірне навантаження. Тобто за умов коли одна сторона шнека працює із перевантаженням. З метою оптимізації ресурсу розподільного шнеку необхідно проаналізувати параметри надійності з врахуванням його життєвого циклу. В теорії надійності робочий процес деталей виконавчих органів машин розглядається як випадковий процес, що підпорядковано певним статистичним закономірностям. Для опису таких закономірностей існує набір функціональних методів, які використовують в залежності від поставлених задач. Найбільш універсальним є метод розподілу Вейбулла.

3.3.2. Дослідження та розрахунок параметрів і характеристик надійності розподільного шнека

Розглянемо двопараметричний розподіл Вейбулла. Функція інтенсивності відмов для розподілу Вейбулла має наступний вигляд:

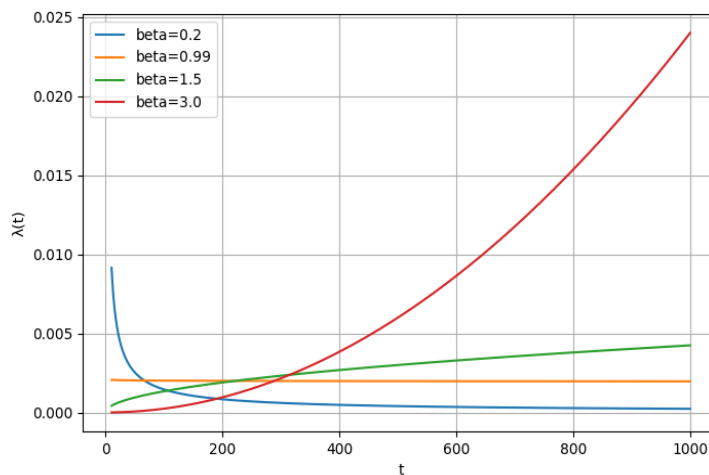
$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1}, \quad (3.13)$$

де t – поточне напрацювання, η – параметр масштабу, $\eta > 0$; β – параметр форми, $\beta > 0$.

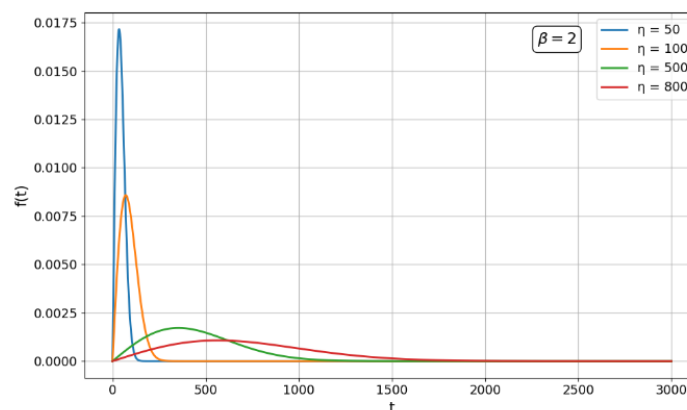
Однопараметричний розподіл Вейбулла можна отримати із рівняння (3.13) за умови коли $\beta = C = \text{const}$. Параметр форми у рівнянні (3.13) визначає

характер зміни інтенсивності відмови у часі, ступінь неоднорідності матеріалу, тип механізму руйнування.

Для візуальної оцінки впливу параметра β на інтенсивність відмов побудуємо відповідний графік, рис. 1, а. Із графіка можна відмітити, що при $\beta < 0$ крива має великі значення на початку, а потім йде на спад. Це свідчить про можливість ранніх відмов, який знижується із часом. При β в околі точки 0 крива є горизонтальною, що відповідає ризику випадкових відмов. При $1.5 < \beta < 3$ крива може зростати лінійно або параболічно, що є свідченням поступового зносу. Коли $\beta > 3$ крива починає рости значно стрімко, що відповідає високій ймовірності масових відмов в короткий проміжок часу.



а



б

Рис.3.16. Графіки впливу: а – параметру форми на інтенсивність відмов; б - параметру масштабу на зміну щільності ймовірності розподілу

Для шнеків асфальтоукладачів характерна комбінована модель надійності. Підшипникові вузли та електронні компоненти часто демонструють сталу інтенсивність відмов $\beta \approx 1$, в той час як робочі лопаті шнека чітко слідують закону зношування з β у діапазоні від 2.0 до 3.5.

Вплив параметру масштабу представлено на рисунку 3.16,б, який визначає ширину розподілу по вісі часу. Чим менше значення η ти вища ймовірність події на ранньому етапі роботи конструкції.

Шнековий механізм асфальтоукладача за своєю конструктивною суттю є складним валом із закріпленими на ньому гвинтовими лопатями. У процесі роботи на шнек подається матеріал, який далі за рахунок обертання шнека поперечно переміщується. Для проведення інженерних розрахунків на міцність шнек найчастіше моделюється як балка, що спирається на два або більше підшипникових вузлів, залежно від конструкції машини. До шнека прикладається комбінована система сил, а саме навантаження на згин та кручення. Основним силовим фактором є вага асфальтобетонної суміші, це навантаження передається на лопаті шнека і розподіляється вздовж його осі.

Навантаження від асфальтової суміші можна представити як рівномірно розподілене навантаження, що діє вертикально вниз, під дією гравітації, а також горизонтальну складову опору переміщенню суміші. Напрямок прикладеного силового навантаження на кожну лопать шнека є результатом взаємодії декількох векторів: сили тяжіння суміші, нормальної сили реакції поверхні лопаті та сили тертя матеріалу об метал.

Для дослідження надійності розподільного шнека асфальтоукладача була розроблена відповідна твердотільна модель, рис. 2. Максимальний згинальний момент, який виникає в центрі прольоту можна визначити на основі рівняння $M_{зг} = wL^2/2$.

Навантаження на лопаті не є статичним. Воно залежить від консистенції суміші, швидкості обертання шнека та швидкості руху самого укладача. Якщо об'єм матеріалу, що подається на шнек перевищує рівень вала, то виникає додатковий опір, який можна моделювати як гідростатичний тиск в'язкої рідини. Лопаті шнека відчувають найбільший тиск у нижній частині траєкторії обертання, де матеріал стискається між основою та гвинтовою поверхнею.

Потужність, необхідна для обертання шнека в середовищі гарячого асфальту, залежить від продуктивності укладання та геометричних параметрів шнека:

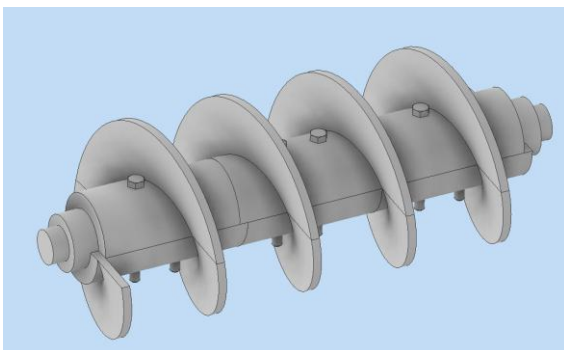
$$P = KQ(L_w + H), \quad (3.16)$$

де K – коефіцієнт; Q – продуктивність; L_w – довжина шнека; H – висота підйому матеріалу.

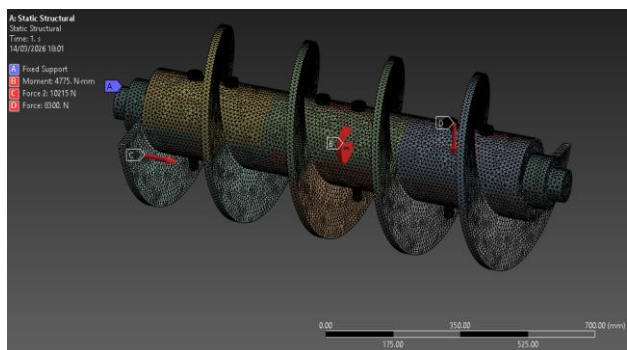
Крутний момент розраховується через потужність та частоту обертання – $T=9550P/n$. Для перевірки діаметру вала використовується теорія еквівалентних напружень. Еквівалентне напруження не повинно перевищувати допустиме напруження для обраної марки сталі з урахуванням температурного коефіцієнта:

$$\sigma_{ек} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq [\sigma], \quad (3.17)$$

де σ – напруження згину; τ – напруження кручення.



а



б

Рис. 3.17 Розподільний шнек: а – твердотільна модель в середовищі Autodesk Inventor; б – модель шнека із заданими граничними умовами.

На першому етапі виконаємо статичний аналіз напружень та деформацій, які можуть виникати в розпірній плиті на основі вище зазначених умов навантаження розподільного шнека.

Для розрахунку валу шнека приймаємо наступні параметри: 1) частота обертів шнека – 60 об/хв; 2) потужність на валу шнека – 30 кВт; 3) діаметр шнека на основі твердотільної моделі – 460 мм; 4) густина асфальтної суміші – 2300 кг/м³; 5) висота шару асфальту – 0.4 м; 6) ширина шару асфальту приймаємо по діаметру валу шнека – 0.46 м.

Враховуючи зазначені параметри визначаємо крутний момент на валу $T=4775$ Нм та розподілене навантаження від ваги суміші $q = 8300$ Н/м. Крім крутного моменту та розподіленої ваги суміші при роботі шнека виникає осьове навантаження, яке прикладається до його лопаток від сили, що необхідна для переміщення матеріалу. Осьова сила залежить від крутного моменту, радіуса шнека, кута гвинтової лінії. Силу на гвинті визначаємо наступним чином:

$$F_z = \frac{T}{R} \tan(\alpha) = 3405 \text{ Н}, \quad (3.18)$$

де $T=4775$ Нм – крутний момент; R – радіус шнека, α – кут нахилу гвинтової лінії шнека.

Кут підйому гвинта визначаємо із наступної залежності:

$$\tan(\alpha) = \frac{t}{\pi D} = 0.164, \quad (3.19)$$

де $t = 0.237$ м – крок шнека; D – діаметр шнека.

Для врахування додаткового опору в процесі переміщення суміш значення осьової сили необхідно домножити на поправочний коефіцієнт мінімальне значення якого 3. Тоді $F_z = 10215$ Н.

Картина напружень та переміщень для сталі SAE1006-85-HR представлена на рис. 4. Як бачимо напруження та переміщення відображають значення, що вказують на значний запас міцності. З іншого боку слід враховувати, що для розрахунку були взяті номінальні значення параметрів, а також не враховувались можлива асиметрія та нерівномірність навантажень в процесі роботи шнека.

Дослідження параметрів надійності на основі кінцевоелементної моделі будемо виконувати в модулі Ansys 2024 R1 – ncode DesignLife 2024. Ncode DesignLife програмне забезпечення, яке дозволяє виконувати аналіз втомної міцності та довговічності конструкцій машин та обладнання

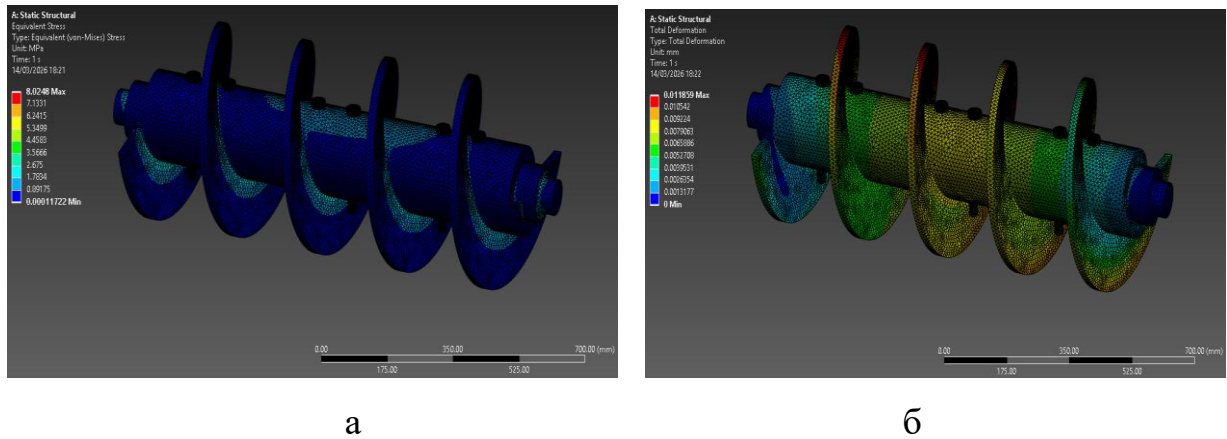


Рис.3.18. Результат розрахунку розподільного шнека: а – картина напружень; б – картина переміщень.

При використанні ncode DesignLife в зв'язці із Ansys 2024 R1 слід відмітити наявність підготовлених восьми модулів. Модулі із позначенням в назві Constant призначені для розрахунку втоми при сталому навантаженні, а при позначенні TimeSeries - змінному навантаженні. Позначення EN відповідає за те що керуючою величиною втоми є деформація, а у випадку SN керуючою величиною є напруження. Модулі VibrationPSD та VibrationSweptSine призначені для втомного аналізу за умов вібраційної дії. WeldShellSeam та WeldSolidSeam призначені для аналізу втомної довговічності зварних швів.

В дослідженні будемо використовувати тільки модуль nCode EN Constant, так як при використанні модуля nCode EN TimeSeries необхідно мати експериментальні дані роботи шнека. Вікно моделювання nCode EN Constant має вигляд представлений на рис.3.19.

Розрахункова модель в nCode EN Constant складається із набору блоків – гліфів. Гліф Simulation_Input завантажує результат розрахунку деталі із FEA модуля Ansys в модуль ncode. Bill_of_material_input дозволяє редагувати властивості матеріалу із якого виготовлена конструкція деталі. StrainLife_Analysis є головним гліфом в який на вхід подаються дані із гліфів Simulation_Input та Bill_of_material_input, після чого виконується втомний аналіз по деформаціям або по напруженням. Гліф Fatigue_Results_Display відображає візуальну картину для аналізу втоми та довговічності. DataValueDisplay1 відображає таблицю розрахованих параметрів, таких як цикли життя (Life cycles), загальні накопичені пошкодження, коефіцієнт безпеки, значення напружень. В цілому DataValueDisplay1 допомагає відслідковувати значення параметрів при перевірці правильності розрахунків.

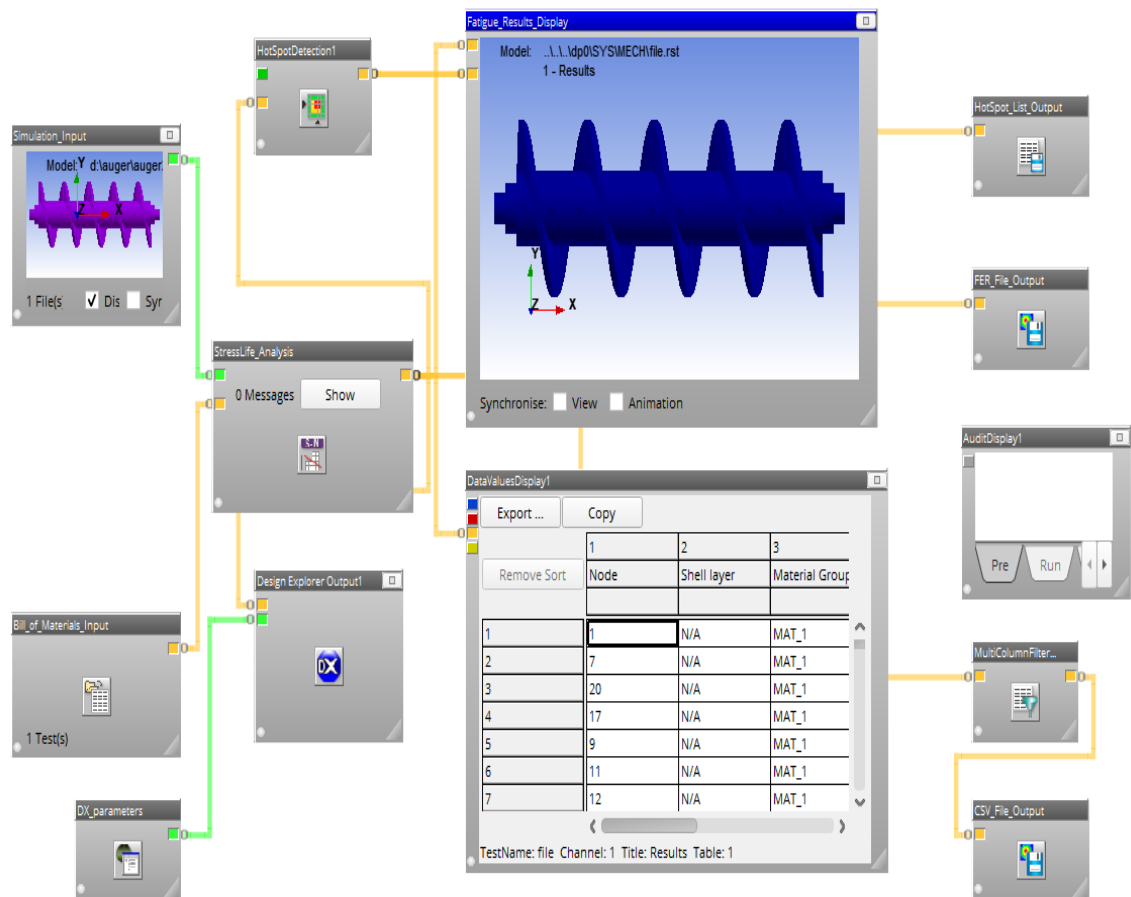


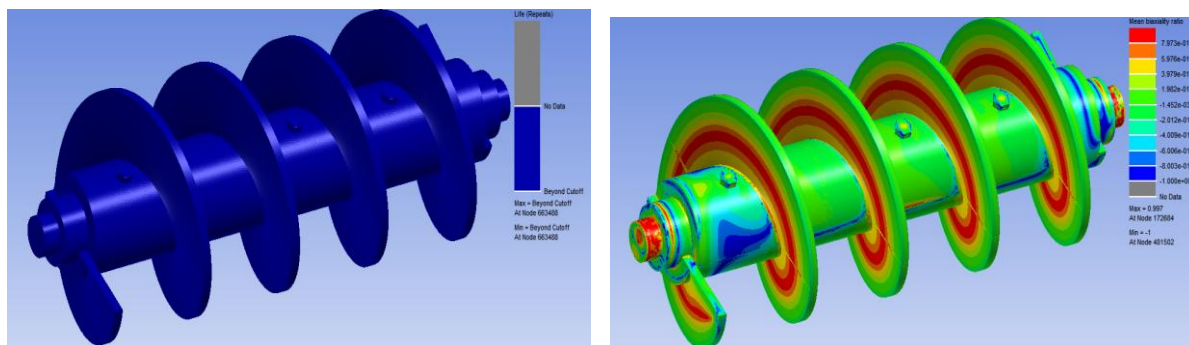
Рис.3.19. Модель розрахунку шнека в діалоговому вікні nCode EN Constant

Параметр mean biaxiality ratio, який використовується для оцінки напруженого стану матеріалу під циклічним навантаженням та за умови багатовісного прикладання сил. MBR показує співвідношення середнього напруження у двох перпендикулярних напрямках на елементі. Формула для розрахунку має наступний вигляд:

$$MBR = \frac{\sigma_{m1} + \sigma_{m2}}{2\sigma_{eq}}, \quad (3.20)$$

де σ_{m1} , σ_{m2} – середні значення головних напружень у площині; σ_{eq} – еквівалентні напруження. Чим ближче MBR до 1 тим більш рівномірно навантажена деталь у двох напрямках. Із картин втомної довговічності

(рис.3.20) можна відмітити, що для сталі SAE1006-85-HR задане комбіноване навантаження в часі не призведе до втоми. По картині співвідношення напружень, можна відмітити нерівномірність на опорах валу та лопатках шнека.



а

б

Рис.3.20. Результати розрахунку розподільного шнека на втомну довговічність в nCode EN Constant для сталі SAE1006-85-HR: а – картина втомної довговічності; б – картина середнього двовісного співвідношення напружень.

Розрахункові дані по окремим вузлам шнека представлені в таблиці 1.

Таблиця 3.1. Результати розрахунку розподільного шнека

Вузол	Накопичене пошкодження	Середнє двовісне напруження	Максимальне напруження	Втомна довговічність
515805	Beyond cutoff	0.2331	9.596	Beyond cutoff
515746	Beyond cutoff	0.2072	9.482	Beyond cutoff
488378	Beyond cutoff	0.2277	9.301	Beyond cutoff
488319	Beyond cutoff	0.1636	9.251	Beyond cutoff
488374	Beyond cutoff	0.215	8.251	Beyond cutoff
515801	Beyond cutoff	0.2084	8.23	Beyond cutoff
515606	Beyond cutoff	0.0295	7.846	Beyond cutoff

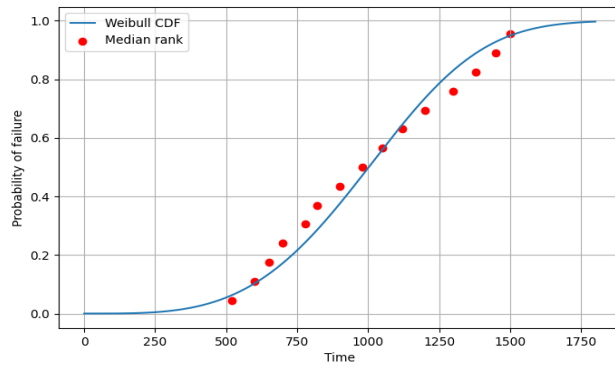
488179	Beyond cutoff	0.02717	7.809	Beyond cutoff
512799	Beyond cutoff	0.1083	7.213	Beyond cutoff

Для аналізу довговічності на основі розподілу Вейбулла були внесені в таблицю 3.2 середні значення напрацювань валу та лопатей шнека.

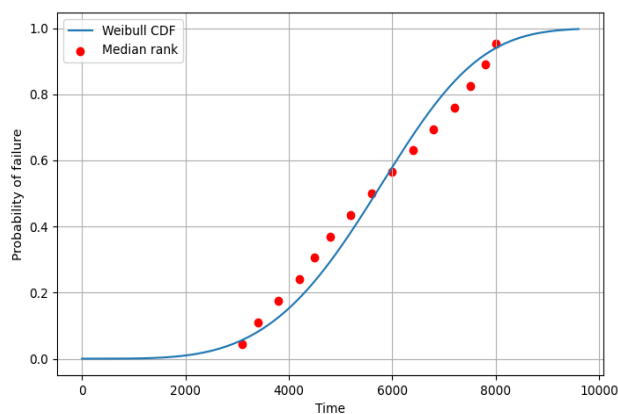
Таблиця 2. Напрацювання на відмову лопатей та валу шнека.

Напрацювання на відмову лопатей шнека, год	Напрацювання на відмову валу шнека, год
520	3100
600	3400
650	3800
700	4200
780	4500
820	4800
900	5200
980	5600
1050	6000
1120	6400
1200	6800
1300	7200
1380	7500
1450	7800
1500	8000

На основі даних таблиці 2 побудовано відповідні графіки розподілу Вейбула, рис.3.21.



а



б

Рис.3.21. Результати розподілу Вейбулла: а –лопаті шнека; б – вал шнека

Із рис.3.21 визначаємо параметри форми та масштабу: 1) для лопатей $\beta = 3.613$ та $\eta = 1109.3$; 2) для валу $\beta = 4.086$ та $\eta = 6213.2$.

Таким чином, результати розрахунку шнека відображають значний запас міцності при номінальному значенню зовнішнього комбінованого зусилля. При моделюванні на втомну довговічність ресурс спроектованого валу є значним, що вказує на необхідність топологічної оцінки геометрії деталей розподільного валу. Проте з іншого боку в аналізі не враховувались можливі пікові, асиметричні навантаження. З цією метою необхідним є виконання аналізу nCode EN TimeSeries. Картина середнього двовісного співвідношення напружень, вказує на значну різницю напружень в лопатках

валу та в опорах під підшипники. Для побудови графіків розподілу Вейбулла (CDF та median rank) були використані середні значення напрацювань лопаток шнека та валу, які надали відповідні значення параметрів форми та масштабу.

3.4. Дослідження та розрахунок параметрів і характеристик надійності вібраційної плити при улаштуванні доріг.

3.4.1. Загальні положення методики дослідження параметрів та надійності вібраційної плити.

Від показників параметрів та надійності вібраційної плити залежить якість процесу улаштування доріг. Вібротрамбуюча плита є класичною за конструкцією вібраційною машиною та одним із визначальних робочих органів асфальтоукладача, від технічного стану якого безпосередньо залежать щільність, рівність і довговічність дорожнього покриття. У процесі роботи плита функціонує в умовах одночасної дії значних динамічних навантажень, високих температур, контактного тиску та інтенсивного абразивного зношування з боку гарячої асфальтобетонної суміші. За таких умов надійність цього вузла слід розглядати як імовірнісну характеристику його здатності зберігати працездатність упродовж заданого часу за встановлених режимів експлуатації. В роботі [95] приведено інтелектуальні технології укладання та ущільнення асфальтового покриття. В роботі [96] наведено моделювання динамічних характеристик взаємодії суміші трамбування та асфальту: застосування для прогнозування щільності асфальтового покриття. Робота [97] присвячена покращенню продуктивності асфальтоукладальної машини на основі експериментального аналізу та контролю сил збудження. Разом з тим, в роботі відсутні досліджень напруженого стану окремих елементів конструкції машини, а також параметрів надійності, особливо за умови вібраційного ущільнення. Крім цього в роботі використовується спрощена

модель частинок. В роботі [98] зазначено, що оптимізація робочих параметрів вібраційно-вирівнюючої системи асфальтоукладача слугує підвищенням ефективності ущільнення та якості дорожнього покриття. Описана багатокритеріальна модель оптимізації процесу. В роботі не враховано напружено-деформованого стану плити та інших елементів конструкції, а також відсутні розрахунки параметрів надійності, вирішена локальна задача взаємодії плити і суміші, яка не враховує інші параметри системи, такі як швидкість укладання. В роботі [98] приведена оцінка попереднього ущільнення асфальтового покриття за допомогою вимірювань частоти ущільнення суміші. Робота [99] присвячена моделюванню процесів взаємодії асфальтобетонної суміші та плити. Разом з тим, відсутні розрахунки на міцність та параметрів надійності. Оцінка попереднього ущільнення асфальтового покриття здійснена в роботі [100], а дослідження структурної міцності основи методу скінченних елементів приведено в роботі [101]. Отже, процеси взаємодії плити та суміші потребують подальших досліджень на основі застосування основних положень класичної теорії коливань [102–108] шляхом вдосконалення моделі, як дискретно континуальної системи та досліджень надійності їх роботи.

Режими, параметри та надійність плит розглядається як інтегральна властивість, що має забезпечувати якісне ущільнення та задану надійність встановленого періоду експлуатації. Разом з тим, існуючі розрахунки ґрунтуються на емпіричних або на пів емпіричних залежностях взаємовпливу робочих органів та оброблювальних середовищах. Внаслідок цього в неповній мірі реальні режими та параметри відповідають розрахунковим, що приводить до неякісного результату ущільнення суміші, збільшення довго тривалості процесу та передчасного виходу із ладу деталей вібраційних плит. Обумовлено це складністю процесів, що відбуваються в системі «машина – середовище» та відсутністю загальноприйнятої розрахункової моделі, яка адекватно відображає реальний процес. В роботі вирішення проблеми

обумовлено наступними гіпотезами. Застосування комплексного та системного підходу до розгляду розрахункової моделі «машина –середовище» як дискретно – континуальної із урахуванням взаємного впливу цих підсистем між собою. Ефективність роботи вібраційної плити значною мірою визначається раціональним вибором режимів коливань, конструктивних параметрів та динамічних характеристик системи. У процесі роботи плита взаємодіє з в'язкопружним середовищем дорожньої суміші, що призводить до виникнення складних коливальних процесів у системі «вібраційна машина – оброблюване середовище». Характер цих процесів визначає інтенсивність ущільнення матеріалу, рівномірність формування шару покриття, а також рівень динамічних навантажень, які сприймають конструктивні елементи робочого органу. Разом з тим існуючі методи розрахунку параметрів та режимів роботи вібраційних плит здебільшого базуються на залежностях, що відображають тільки процес ущільнення без взаємодії плити з середовищем. Унаслідок цього фактичні режими роботи вібраційної плити можуть суттєво відрізнятися від розрахункових, що призводить до зниження якості ущільнення, збільшення тривалості технологічного процесу, підвищених енергетичних витрат та передчасного зношування або руйнування окремих елементів конструкції.

Залишаються недостатньо розробленими питання комплексного визначення режимів і параметрів роботи в межах єдиної моделі «машина – середовище», у якій би одночасно враховувалися дискретні параметри конструкції робочого органу, континуальні властивості оброблюваного середовища, нелінійна контактна взаємодія, температурно-реологічні чинники та накопичення пошкоджень у деталях плити. Саме ця наукова прогалина обґрунтовує доцільність системного підходу, покладеного в основу даної роботи, де визначення раціональних технологічних і енергетичних параметрів процесу ущільнення поєднується з прогнозуванням надійності та сервісного обслуговування вібраційної плити. Досягнення цих цілей потребує

комплексного підходу до дослідження динамічних процесів у системі «вібраційна плита – дорожня суміш», визначення раціональних параметрів коливального збудження та оцінювання надійності роботи конструктивних елементів робочого органу.

3.4.2 Дослідження та розрахунок параметрів руху вібраційної плити.

Методикою досліджень надійності роботи вібраційної плити були вирішені наступних задачі:

- обґрунтування конструктивних і динамічних параметрів вібраційної плити з урахуванням особливостей взаємодії системи «машина – середовище» та змінних властивостей дорожньої суміші;
- підвищення надійності та довговічності елементів вібраційної плити шляхом оцінювання інтенсивності динамічних навантажень і прогнозування робочого ресурсу на основі характеристик навантаження.

Оцінка існуючих параметрів вібраторів плити. Дослідження вібраційної плити (рис.3.22) ґрунтується на визначенні режимів та параметрів її коливань в різних точках(1 –4) та надійності конструктивних елементів.

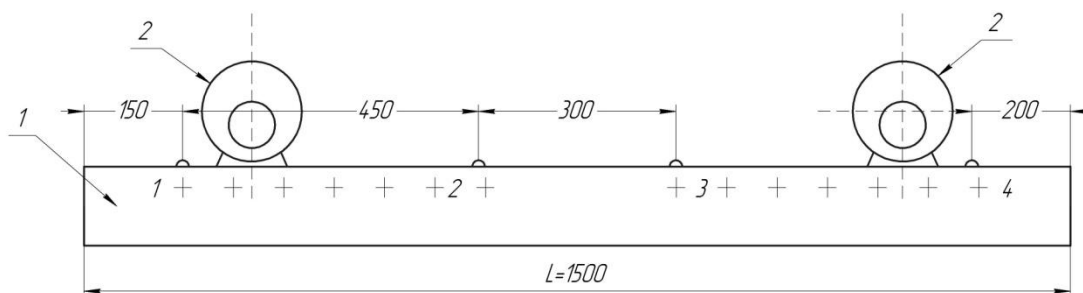


Рис.3.22. Вібраційна плита: 1 – брус; 2 –вібратори.

Оцінка конструктивних та енергетичних параметрів вібраторів плити здійснювалася за трьома критеріями: $K_1=m_0r_0=F/\omega^2$; $K_2=F/m$;

$K_3 = a/g = x_0 \omega^2/g$. Тут $m_0 r_0$ – статичний момент маси дебалансів; F – змушуюча сила вібратора; ω – частота коливань; $m = m_{пл.} + m_c k$; $m_{пл.}$ – маса плити; m_c – маса суміші; k_p – хвильовий коефіцієнт, що враховує реактивний опір суміші [50]:

$$k_p = \frac{\alpha \sinh 2\alpha h + \beta \sin 2\beta h}{h(\alpha^2 + \beta^2)(\cosh 2\alpha h + \cos 2\beta h)}, \quad (3.21)$$

де $\alpha = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\sqrt{1+\gamma^2}-1}{2(1+\gamma^2)}}$; $\beta = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\sqrt{1+\gamma^2}+1}{2(1+\gamma^2)}}$. α, β – коефіцієнти, що враховують розсіювання енергії в суміші.

Рівняння руху сумішей описується хвильовим рівнянням континуальної моделі Кельвіна- Фойгта, а вплив вібраційної плити визначався дискретною моделлю у вигляді силових виразів в граничних умовах коливань системи «вібраційна плита – ущільнююча суміш». Для рішення отриманих рівнянь була розроблена програма із використанням методу Рунге-Кутта. У якості матеріалів були обрані бетонна та асфальтобетонна суміші. В таблиці 3.3 наведені основні параметри та характеристики вібраторів найбільш відомих фірм.

Таблиця 3.3. Основні числові значення параметрів вібраторів.

№	Назва	Частота, ω рад/с	Змушуюча сила, F, Н	Маса, m, кг
1	Kemp Vibration HSV - 24	1130	62230	19.5
2	Bianchi VP-6000	1150	60000	17.5
3	Brecon 18 600 001	1150	60000	18.0

4	Navco UV L62Y	376	63000	180
5	Nettervibration NEG 506220	630	62970	181
6	ИБ-60-50	314	60000	219
7	Nettervibration NHG 6000L	314	61206	96
8	Nettervibration CCV-6- 25-8HA	408	49210	40.6
9	Martin -eng HSV18- 8300	188	37000	48.5

Як слідує із таблиці, основний параметр –частоти коливань змінюється в широких межах від 188 до 1150 рад/с, що свідчить про різні можливості динамічних параметрів для використання на практиці. На основі цих значень у відповідності до методики досліджень даних були розраховані критерії (табл.3.4).

Таблиця 3.4 Числові значення критеріїв

№	Назва	K ₁	K ₂	K ₃
1	Kemp Vibration HSV - 24	0.049	3191	39.07
2	Bianchi VP-6000	0.045	3428	40.53
3	Brecon 18 600 001	0.045	3333	40.53
4	Navco UV L62Y	0.443	350	4.34
5	Nettervibration NEG 506220	0.159	347	12.06
6	ИБ-60-50	0.608	273	4.71

7	Nettervibration NHG 6000L	0.62	637	4.71
8	Nettervibration CCV-6- 25-8HA	0.295	1218	5.09
9	Martin -eng HSV18- 8300	1.04	445	1.08

Як слідує із таблиці, відмічається різниця в числових значень критеріїв. Так, критерій K_1 змінюється від 0.049 до 1.04, а числові значення критерія K_2 від 3191 до 273, тобто відмінність є значною. Така розбіжність обумовлена вочевидь різними підходами до розрахунків та різними конструкторськими рішеннями. У якості узагальненої оцінки на основі наведених розрахунків для застосування збудника коливань плити асфальтоукладача рекомендується вібратор Nettervibration NHG 6000L.

Дослідження параметрів руху вібраційної плити. У відповідності до прийнятої гіпотези використана розрахункова модель, що враховує як дискретні (плита) так і розподілені (суміш) параметри (рис.3.23)

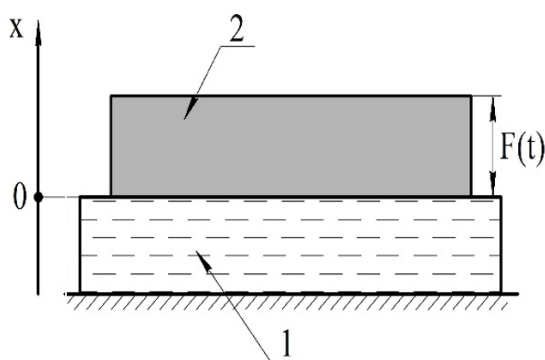


Рис.3.23. Розрахункова модель системи «вібраційна плита –суміш»:

1 – суміш; 2 – плита; $F(t)$ – вимушена сила вібратора; x – координата.

Для визначення режимів та параметрів плити із урахуванням взаємодії із ущільнювальною сумішшю приймаємо хвильове рівняння її руху у вигляді [50]:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{c(1+i\varphi)} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad (3.22)$$

де u – переміщення шарів суміші; t – поточний час; c – швидкість розповсюдження хвиль в суміші; φ – коефіцієнт, що враховує розсіяння енергії в суміші; i – мнима одиниця, яка вказує зсув на 90 градусів сили пружності до сили опору.

Для вирішення рівняння (3.22) необхідно прийняти метод та визначити граничні умови у вигляді певних сил. Для рішення рівняння (3.22) використано метод Фур'є [109]:

$$u(x, t) = u_x e^{i\omega t}, \quad (3.23)$$

де

$$u_x = A_1 e^{x(\alpha+i\beta)} + A_2 e^{-x(\alpha+i\beta)}. \quad (3.24)$$

Тут A_1 і A_2 – постійні коефіцієнти, знаходження яких є процедурою визначення граничних умов, а коефіцієнти α і β – враховують розсіяння енергії. Для визначення α і β знайдемо значення похідних другого порядку залежності (3.24):

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = (\alpha + i\beta)(A_1 e^{x(\alpha+i\beta)} + A_2 e^{-x(\alpha+i\beta)}); \quad (3.25)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\omega^2 [A_1 e^{x(\alpha+i\beta)} + A_2 e^{-x(\alpha+i\beta)}]. \quad (3.26)$$

Підставляємо (3.25) і (3.26) в (3.23) і після нескладних перетворень отримаємо:

$$(\alpha + \beta)^2 = -\frac{\omega^2}{c^2(1+i\varphi)}. \quad (3.27)$$

Помноживши чисельник і знаменник правої частини на $(1+i\varphi)$ отримаємо залежність для визначення коефіцієнтів α і β у комплексному

вигляді:

$$\alpha^2 - \beta^2 + 2\alpha\beta i = -\frac{\omega^2}{c^2(1+i\varphi)} + i\frac{\omega^2\varphi}{c^2(1-i\varphi)} \quad (3.28)$$

Здійснюючи процедуру розділення на умовну і дійсну частини залежності (3.28), отримаємо:

$$\alpha^2 + \beta^2 = \frac{\omega^2}{c^2(1+\varphi^2)}; \quad 2\alpha\beta = \frac{\omega^2\varphi}{c^2(1+\varphi^2)}. \quad (3.29)$$

Звідки:

$$\alpha = \mu \cdot \omega/c; \quad \beta = \nu \omega/c, \quad (3.30)$$

де

$$\mu = \sqrt{\frac{\sqrt{1+\gamma^2}}{2(1+\gamma^2)}}; \quad \nu = \sqrt{\frac{\sqrt{1+\gamma^2}+1}{2(1+\gamma^2)}}. \quad (3.31)$$

Коефіцієнти у (3.31) враховують розсіювання енергії в середовищі.

Тепер визначаємо граничні умови:

$$x=h; \quad u=0. \quad (3.32)$$

де h – висота шару суміші.

Враховуючи (3.32) та (3.24) отримуємо перше рівняння для визначення коефіцієнтів A_1 і A_2 :

$$A_1 = -A_2 e^{-2h(\alpha+i\beta)}. \quad (3.33)$$

За умови, що в зоні контакту координата $x=0$, переміщення ущільнювальної суміші і поверхні вібраційної плити є рівними між собою:

$$u_o = x_o = [A_1 + A_2] e^{i\omega t}. \quad (3.34)$$

Друге рівняння для визначення коефіцієнтів A_1 і A_2 отримаємо, розглядаючи умови динамічної рівноваги маси плити і реакції ущільнювальної суміші в зоні їхнього контакту:

$$m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = [F e^{i\omega t} + ES[1+i\gamma] \frac{\partial u}{\partial x}] \quad (3.35)$$

де E – модуль пружності ущільнювальної суміші. Після нескладних перетворень підстановками членів в (3.24) отримаємо друге рівняння:

$$-m\omega^2(A_1 + A_2) - ES(1+i\gamma)(\alpha+i\beta)[A_1 - A_2] = F_o, \quad (3.36)$$

Використовуючи вирази (3.36) та (3.33), знаходимо залежності для коефіцієнтів A_1 та A_2 і після їх підстановки в (3.24) отримаємо вираз для визначення амплітуди коливань системи «вібраційна плита» в будь якому перетині шару суміші у вигляді:

$$x(o,t) = \frac{F_o}{|m\omega^2|} \sqrt{\frac{(a^2 + b^2)d}{\left[a + \frac{m_c\omega^2}{|m\omega^2|}\right]^2 + b^2}} \quad (3.37)$$

$$a = \frac{h(\alpha \sin 2\beta h - \beta \sin 2\alpha h)}{ch2\alpha h + \cos 2\beta h}, \quad b = \frac{h(\alpha \sin 2\beta h + \beta \sin 2\alpha h)}{ch2\alpha h + \cos 2\beta h}, \quad (3.38)$$

$$d = \frac{ch\alpha(x-h) - \cos 2\beta(x-h)}{ch2\alpha h - \cos 2\beta h}. \quad (3.21)$$

Виконаними розрахунками (3.37) із урахуванням (3.38) отримані віброграми коливань вібраційної плити(рис.1) в точках 1-4 (рис.3.24).

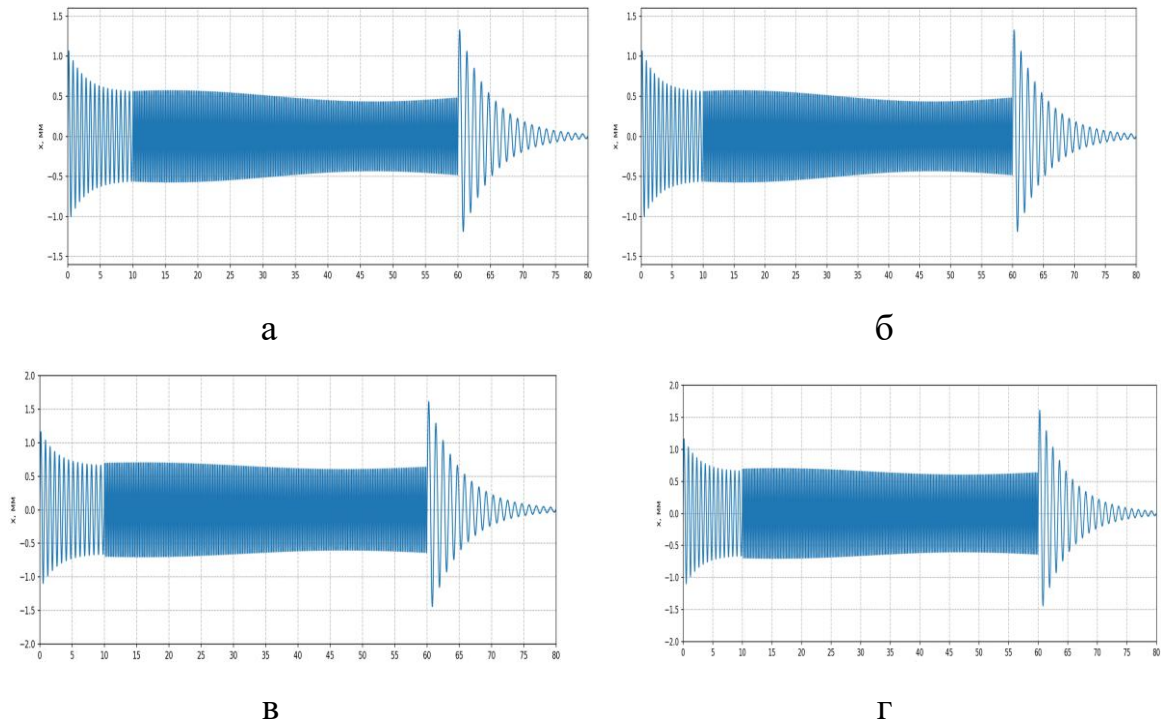


Рис.3.24 Віброграми коливань вібраційної плити в точках:

а –1; б –2; в –3; г –4.

Аналіз отриманих віброграм (рис. 3.25) засвідчив дещо відмінні значення амплітуд коливань вібраційної плити по довжині в залежності від ваги плити

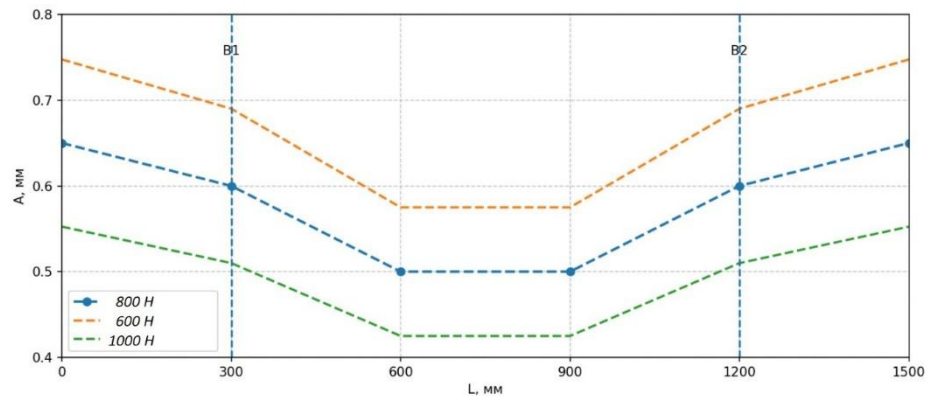


Рис.3.25 Зміна амплітуди коливань по довжині плити.

Так на краях плити амплітуди коливань складали величину 0,52мм, а в центральній частині 0,43, що складає відмінність близько 18%[110].

3.4.3 Дослідження параметрів надійності вібраційної плити.

Проблема надійності вібраційної плити в літературі висвітлена значно слабше, ніж проблема технологічної ефективності ущільнення [50]. Можна зазначити, що оцінювання ресурсу за одним лише часом роботи або числом циклів не завжди є достатнім, особливо за змінних спектрів навантаження, резонансних режимів і випадкового характеру збудження.

Особливістю роботи вібротрамбуючої плити є нерівномірний розподіл асфальтобетонної суміші перед робочим органом і під ним. Це призводить до локального зростання навантажень на окремі ділянки конструкції, насамперед на передню крайку плити, елементи трамбуючого механізму, вузли кріплення віброзбуджувачів і зони концентрації напружень. Унаслідок цього процес втрати працездатності має не лише часовий, а й виражений енергетичний та локально-зональний характер, що зумовлює необхідність застосування

адекватних математичних моделей для аналізу відмов. Відмова вібротрамбуючої плити є комплексним явищем, що виникає внаслідок синергії механічних, гідравлічних та термічних чинників. Робочий орган асфальтоукладача працює за принципом «плаваючої плити», де положення агрегату залежить від балансу сил: сили тяги, опору суміші та вертикальних зусиль від трамбуючого і вібраційного механізмів. Для опису надійності технічних систем використовують різні закони розподілу, кожен із яких відображає певний механізм відмов та розподіли та вибір методів контролю якості та міцності [111 –113]. Тому при цьому необхідно врахувати комплексний вплив динамічних факторів, надійності, контролю напруцювання на відмову змінних властивостей суміші, нелінійності контактної взаємодії та змінного характеру навантажень у процесі експлуатації. У загальному випадку для аналізу працездатності елементів вібротрамбуючої плити можуть бути використані експоненціальний, нормальний, логнормальний та вейбуллівський. Їх порівняльну характеристику наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Порівняння математичних моделей для аналізу відмов

Модель розподілу	Тип відмов	Ключовий параметр для аналізу
Експоненціальний	Раптові, випадкові відмови	λ – інтенсивність відмов
Нормальний (Гаусса)	Поступове механічне зношування за симетричного розсіювання ресурсу	μ – середнє значення ресурсу; σ – середньоквадратичне відхилення
Логнормальний	Втомні процеси, корозія, деградація матеріалу	параметри масштабу та форми

		логнормального розподілу
Вейбулла	Комбіноване зношування, втома, старіння, локальне руйнування	β – параметр форми; η – параметр масштабу

Попри можливість використання кількох моделей, для оцінювання надійності вібротрамбуючої плити найбільш доцільним є розподіл Вейбулла. Його перевага полягає в тому, що він дає змогу враховувати зміну інтенсивності відмов у часі, а отже, описувати як початковий період приробітку, так і стадію стабільної роботи та подальшого інтенсивного зношування. Саме такий характер зміни технічного стану є найбільш типовим для робочих органів асфальтоукладача.

Функція надійності для розподілу Вейбулла має вигляд

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta} \right] \quad (3.39)$$

де $R(t)$ – імовірність безвідмовної роботи за час t ; η – характеристичний ресурс; β – параметр форми, що визначає характер розвитку відмов.

Інтенсивність відмов при цьому визначається залежністю

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} \quad (3.40)$$

За здійсненими розрахунками для значень $\beta < 1$ переважають ранні відмови, пов'язані з початковими дефектами або нестабільністю роботи. При $\beta = 1$ інтенсивність відмов залишається сталою, що відповідає випадковим пошкодженням. Якщо $\beta > 1$, процес втрати працездатності визначається накопиченням зношування, втомою матеріалу та старінням, що є найбільш характерним для вібротрамбуючих плит у реальних умовах експлуатації. Для

підвищення точності оцінювання надійності доцільно пов'язати параметри моделі не лише з часом роботи, а й з енергетичним навантаженням у зоні контакту плити з асфальтобетонною сумішшю. Такий підхід дозволяє врахувати нерівномірність динамічної взаємодії по довжині плити та встановити найбільш навантажені ділянки конструкції. З практичної точки зору це створює підґрунтя для вдосконалення геометрії передньої частини плити, зниження локального накопичення суміші та зменшення інтенсивності абразивного зношування її крайових елементів.

3.5 Висновки по розділу

1 Досліджено вплив продуктивності, експлуатаційних витрат і вартості на стратегію експлуатації в реальних умовах використання машин.

2. Досліджено та розраховано параметри і характеристики надійності розпірної плити щокової дробарки в процесах подрібнення щебню. Так. виконаний аналіз впливу зміни основних параметрів розподілу Вейбула на надійність дав можливість оцінити вплив параметру β на щільність ймовірності розподілу та визначити доцільні межі його зміни. Найбільш оптимальним формою кривої при визначенні впливу коефіцієнту β на коефіцієнт відмов є значення, що не значно перевищує 1.

3. Виконані дослідження параметрів надійності розпірної плити щокової дробарки, з метою зниження вірогідності передчасного виходу її із ладу та оцінки методів підвищення терміну її служби, що забезпечить зниження затрат на комплектуючі матеріали. Для цього була використана комбінована модель, що включає кінцево-елементний аналіз деталей, алгоритм лінійного накопичення пошкодження, функціональний метод розподілу Вейбула та параметри середовища, що подрібнюється. На основі моделювання були отримані відповідні картини двоговічності на відмову, окремо при сталому та змінному в часі прикладенні навантаження до плити.

4. Виконані дослідження напрацювання на відмову шнека асфальтоукладальника із використанням nCode DesignLife (EN Constant) та окремого програмного коду для побудови графіків розподілу Вейбулла. На основі розрахунку розподільного шнека від дії комбінованого навантаження встановлено, що максимальні напруження при статичному навантаженні складають 8.025 МПа. Визначені параметри форми та масштабу, які для лопатей шнека мають значення $\beta = 3.613$ та $\eta = 1109.3$, в той час як для валу шнека - $\beta = 4.086$ та $\eta = 6213.2$.

5. Отримано аналітичні залежності та здійснені дослідження динамічних параметрів вібраційної плити з урахуванням особливостей взаємодії системи «машина – середовище» та змінних властивостей дорожньої суміші

6. Досліджено та розраховано параметри і характеристики надійності вібраційної плити при улаштуванні доріг. Підвищення надійності та довговічності елементів вібраційної плити здійснено шляхом оцінювання інтенсивності динамічних навантажень і прогнозування робочого ресурсу на основі характеристик навантаження.

РОЗДІЛ 4. Практична реалізація методів сервісного обслуговування машин та оцінка їх ефективності.

4.1. Сучасна система технічного обслуговування будівельних машин

Сучасна система технічного обслуговування будівельних машин забезпечує їхню надійність та доступність протягом усього терміну служби.

Характеристиками сучасної системи технічного обслуговування будівельних машин є концепція технічного обслуговування, організація технічного обслуговування та технологія технічного обслуговування, а також спосіб управління технічним обслуговуванням.

Концепція є дуже важливою особливістю системи технічного обслуговування, яка впливає на її якість. Її можна визначити як принцип прийняття рішень щодо часу та способу проведення робіт з технічного обслуговування. Технічне обслуговування будівельних машин включає три концепції: профілактичне, коригувальне та комбіноване технічне обслуговування.

Організація служби технічного обслуговування базується на спеціалізованих відділах технічного обслуговування та польових бригадах. Звичайна діяльність відділу технічного обслуговування - це організація процесу технічного обслуговування, моніторинг стану машин, підготовка та впровадження технологічного процесу технічного обслуговування, організація транспорту та підтримка постачання запасних частин.

Технологія технічного обслуговування визначає метод технічного обслуговування на основі вібраційної діагностики[114-116]. Застосування певної технології залежить здебільшого від конструктивної складності машин, обладнання цеху та навчання працівників. Керівництво забезпечує нагляд за впровадженням системи технічного обслуговування. Організаційні відділи відповідають за ведення бізнесу своїх професійних сферах, такі як відділ

фінансів та адміністрування, відділ продажів та маркетингу, відділ польового обслуговування та обслуговування в майстернях, відділ обслуговування клієнтів, відділ закупівлі та продажу запасних частин та їхній склад.

На сьогодні використовуються сучасні інформаційні системи для прогнозування та аналізу операцій, а також зворотній контроль. Згідно з вищезазначеним, у системі існує багато факторів, які впливають на якість обслуговування машин. Тому технічне обслуговування будівельної техніки є складною організаційно-технологічною системою. Кожен елемент системи має свої власні характеристики та параметри стану. Елементи системи взаємопов'язані та залежать один від одного, вони визначаються обмеженнями, найважливішими з яких є витрати на технічне обслуговування та витрати, пов'язані з недоступністю або простоем. Іноді вся система технічного обслуговування розробляється користувачем машин. Однак практика показує реальний варіант, а саме поєднання двох способів: технічного обслуговування яке виконується користувачем та технічне обслуговування уповноваженим постачальником послуг. Торгівельні та сервісні представники пропонують машини та обладнання, як невід'ємну частину будівельного процесу та приймають оплату за оренду та обслуговування залежно від кількості робочих годин або обсягу робіт. Машини, які не часто використовуються, зазвичай є дорогими. Наприклад, вважається, що при використанні машини менше ніж 1000 робочих годин на рік вказує на те, що її краще орендувати, ніж купувати її. Саме тому машини орендуються, оскільки тоді немає витрат на купівлю, відсотків, страхування чи витрат на технічне обслуговування. Очікується, що в майбутньому оренда машин стане одним з кращих інвестиційних рішень.

4.2.Методика забезпечення надійності та технічного обслуговування

Будь-яка несправність машини не означає одночасно її вихід з ладу. Машина може виконувати свою функцію за призначенням з деяким допустимим рівнем несправності. Технічні засоби мають активні діагностичні системи, які попереджають про несправності та прогнозують можливість подальшого використання машини до певної межі. Для точної локалізації несправностей також необхідне добре знання логічних схем машини.

Несправність може бути технічною та функціональною. Технічна несправність – це стан машини, який, з певними обмеженнями або повністю, все ще забезпечує можливість її використання. Функціональна несправність – це вихід машини з ладу, і вона виникає, коли актив більше не є безпечним для використання, і коли подальше використання може призвести до дуже дорогих поломок та тривалого простою.

Концепція технічного обслуговування передбачає політику технічного обслуговування: профілактичне обслуговування, коригувальне та комбіноване обслуговування (рис. 4.1).

Профілактичне обслуговування – це метод технічного обслуговування через заздалегідь встановлені інтервали. Заходи включають регулярне обслуговування, діагностику, заміну деталей відповідно до рекомендованого часу або робочих годин, змащування та очищення обладнання. Іншим способом профілактичного обслуговування є технічне обслуговування за станом, де немає попередньо визначеного інтервалу, а періодичність змінюється, доки не досягне певних параметрів (наприклад, гальмівні колодки та диски тощо). Це поширена концепція профілактичного обслуговування. Більш інтенсивне профілактичне обслуговування потрібне для старіших машин з більшою кількістю робочих годин, щоб уникнути дорогого ремонту та підвищити експлуатаційну готовність.

Коригувальне обслуговування – це метод технічного обслуговування після виникнення несправності. У разі виникнення несправності виконується ремонт, заміна деталей або вузлів, а також капітальний ремонт машин для відновлення їхньої функціональності. Коригувальне обслуговування часто вимагає негайного втручання, щоб мінімізувати втрати часу та зменшити можливість додаткового простою. Основними процедурами коригувального обслуговування є: виявлення несправностей, діагностика стану, коригувальні дії (ремонт) та перевірка стану після ремонту та перед передачею машини користувачеві.

Комбіноване технічне обслуговування – це практично реальний спосіб технічного обслуговування, який поєднує попередні дії профілактичного та коригувального обслуговування. Наприклад, після виходу з ладу та ремонту машини проводяться профілактичні заходи з технічного обслуговування, такі як діагностика та регулювання. Також, під час профілактичного обслуговування, може спостерігатися додаткова поломка, яка потребує ремонту або заміни деталей, що призводить до комбінованих процедур технічного обслуговування.



Рис. 4.1. Концепція технічного обслуговування

Ця концепція обслуговування будівельної техніки планується, організовується та впроваджується на практиці через базове (щотижневе), поточне (щомісячне) та періодичне технічне обслуговування. Відомі виробники будівельної техніки практично класифікують цю концепцію у своїх моделях обслуговування, як ефективний спосіб обслуговування техніки у користувачів. Користувачі будівельної техніки можуть мати постійний дистанційний моніторинг стану машин. Телематика моніторингу стану визначає стан машини на будівельних майданчиках на основі стану її ключових функцій. Ця технологія та профілактика є результатом простої технології GPS-локації. Окрім положення машини, робочого часу, витрати палива та неправильного використання та захисту машини, телематика технічного обслуговування пропонує моніторинг стану та дистанційну діагностику машини, особливо протягом гарантійного періоду. Наприклад, інтегроване телематичне обладнання, на двигуні дозволяє дистанційно усунути несправності, що може ініціювати діагностичне тестування та визначити потенційні проблеми під час роботи машини. Якщо потрібен ремонт, користувач попереджається про проблему та про прибуття команди із сервісного обслуговування.

4.3. Організація управління технічним обслуговуванням машин

Дорожні будівельні машини – це, перш за все, важкі та дорогі машини, маломобільні, розташовані на відносно великій відстані від доріг та сервісних центрів. Тому послуги з технічного обслуговування машин виконуються переважно в польових умовах, на будівельному майданчику. Більш масштабні роботи, які неможливо виконати в польових умовах, виконуються в сервісній майстерні авторизованого або сервісного центру клієнтів. Рішення про місце обслуговування приймається для кожного окремого випадку за погодженням з користувачем машини.

Польова організація технічного обслуговування машин у кількох будівельних проектах показана на рис. 12.6. Кожна група машин у цих місцях (Проект 01 та Проект 02) знаходиться під наглядом польової команди (ПГ) на відносно прийнятній відстані від табору (Т). Відомчу організацію можна вважати достатньою організацією для управління процесом технічного обслуговування групи різних машин.

Управління технічним обслуговуванням встановлює цілі та визначає бізнес-політику компанії з технічного обслуговування. Завданнями адміністрації є управління бізнесом, планування та організація бізнесу, а також нагляд за всіма сферами бізнесу, від фінансової, технічної до екологічної та маркетингової. Організаційні служби або відділи відповідають за ведення бізнесу у своїх професійних сферах.

Наприклад, відділ фінансів та адміністрування керує завданнями, пов'язаними з фінансовими, бухгалтерськими та іншими операціями, моніторингом правових норм і правил, плануванням персоналу, особливо виконанням планів, встановлених адміністрацією. Відділ продажів здійснює маркетингову діяльність та продаж машин та обладнання. Відділ обслуговування впроваджує технологію підтримки справності машин у польових умовах та в майстерні. Служба підтримки клієнтів консультує користувачів з питань технічного обслуговування та виконує завдання, пов'язані з гарантіями, наданими виробником машин або авторизованим сервісним центром. Служба закупівлі та продажу запасних частин керує закупівлею та продажем рідин, мастильних матеріалів, пневматики та необхідних для бізнесу матеріалів, особливо запасів запасних частин.

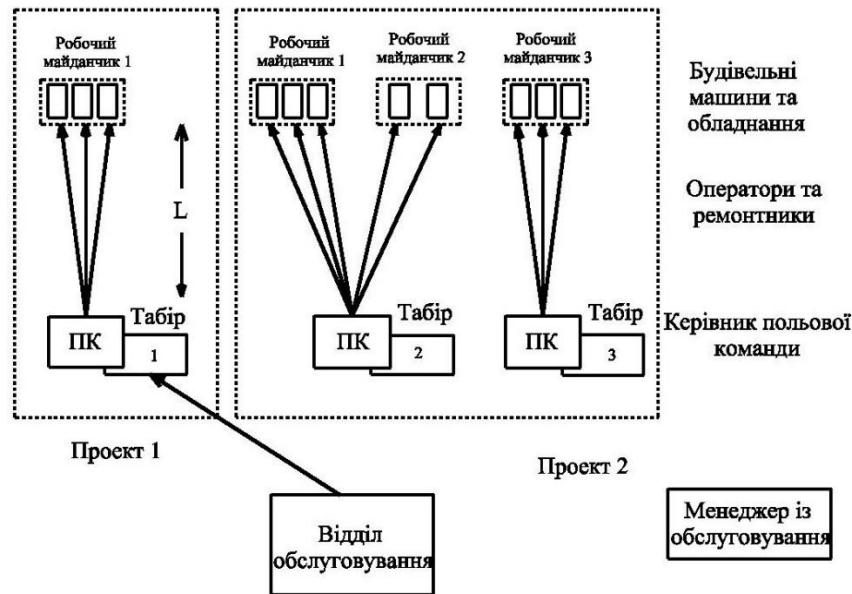


Рис. 4.2. Організація технічного обслуговування на місці

Оцінка стану машинного парку за допомогою інформаційної системи надає фундаментальну інформацію для прийняття рішень щодо технічного обслуговування машин, оптимізації ресурсів, зниження ризику несправностей, відмов та продовження терміну служби машин.

Елементи оцінки стану:

- Структура машин, вік;
- Потужності майстерень;
- Структура професійного персоналу;
- Справність машин, несправності та списання;
- Реалізовані ресурси, кількість робочих годин, км;
- Якість машин та послуг, надійність, простота обслуговування;
- Задоволеність клієнтів;
- Витрати, запасні частини, паливо, олива, мастила, енергія.

Вимоги до технічного обслуговування можна класифікувати за пріоритетом та важливістю, щоб скласти план технічного обслуговування, який включає графік обслуговування, заміну деталей, ремонт та інші необхідні заходи з технічного обслуговування. Управління якістю передбачає

встановлення політики та цілей якості, а також системи управління якістю. Усі процедури в системі технічного обслуговування спрямовані на клієнта, тобто на задоволення потреб користувача/сторони.

Бізнес-сфери підтримуються за допомогою ІТ-системи, яка використовує високоякісне програмне забезпечення, а також відповідне ІТ-обладнання. Окрім звичайного програмного забезпечення для управління комерційними та бухгалтерськими справами, також використовуються спеціальні комп'ютерні програми, рис.4.3.

Адміністрування та планування:

- Створення статистичних аналізів для щоденних, щомісячних або річних операцій;
- Визначення операційних значень;
- Реалізація контрольних функцій адміністрації;
- Планування продажу машин, деталей, сервісних операцій.



Рис. 4.3. Мережеві бізнес-одиниці в ІТ-системі

4.4. Постачання запасних частин

Запасні частини зазвичай поділяються на: капітальні деталі, нестандартні та стандартні деталі. Капітальні запасні частини – це ключові частини машини з високою ціною (з тривалим терміном служби), які

призводять до її функціонального збою. Ці деталі зазвичай отримують від оригінального виробника безпосередньо перед встановленням. Однак, у випадку з будівельною технікою, зазвичай термін поставки довший, що призводить до недоступності машини та витрат на її простої.

Нестандартні деталі – це деталі, які необхідно купувати у виробника оригінальних деталей, але вони не враховуються як капітальні деталі, оскільки вони мають відносно низьку ціну. Це деталі, які зазвичай виробляються виробником лише для певного типу машини чи двигуна та не можуть бути знайдені у постачальників, які охоплюють кілька марок машин.

Стандартні деталі доступні на ринку та мають короткий термін поставки. Стандартні деталі не потрібно закуповувати у оригінального виробника. Наприклад, масляні фільтри двигуна, гальмівні колодки тощо. Час недоступності будівельної техніки на практиці здебільшого залежить від часу очікування капітальних та нестандартних запасних частин, а також від складності ремонту. Щоб вирішити проблему очікування запасних частин, необхідно забезпечити достатні запаси цих деталей.

Однак, мати занадто великий запас запчастин не варто з таких причин – запаси – це «мертвий» капітал;

- витрати на зберігання не є незначними;

- деталі та матеріали з часом псуються.

Кількість запасних частин для технічного обслуговування здебільшого залежить від тяжкості відмови. Більша інтенсивність використання машин також призводить до більшої інтенсивності їх відмов. Тому дуже важливо забезпечити запас капітальних запасних частин на основі інтенсивності відмови. Другий період терміну служби машини є основою для розрахунку запасу запасних частин. Основним параметром цього періоду надійності згідно з експоненціальним розподілом ймовірностей є постійна інтенсивність відмов (λ).

Метою забезпечення запасів є швидке збалансування коливань попиту шляхом закупівлі запасних частин з таких причин:

- тривалий процес закупівлі запасних частин;
- підтримка доступності будівельної техніки для виконання робіт;
- зміна умов праці;
- економічні та фізичні умови на момент виникнення потреби в запасних частинах.

Організація зберігання може бути пірамідальною — багаторівневою (склад вищого рівня постачає кілька складів нижчого рівня) та децентралізованою — однорівневою (склад для одного типу запасних частин або для кількох типів). Для конкретних польових місць використовується децентралізований склад у межах польової станції (табору). Процес управління запасами запасних частин графічно зображено на схемі рис. 4.4.

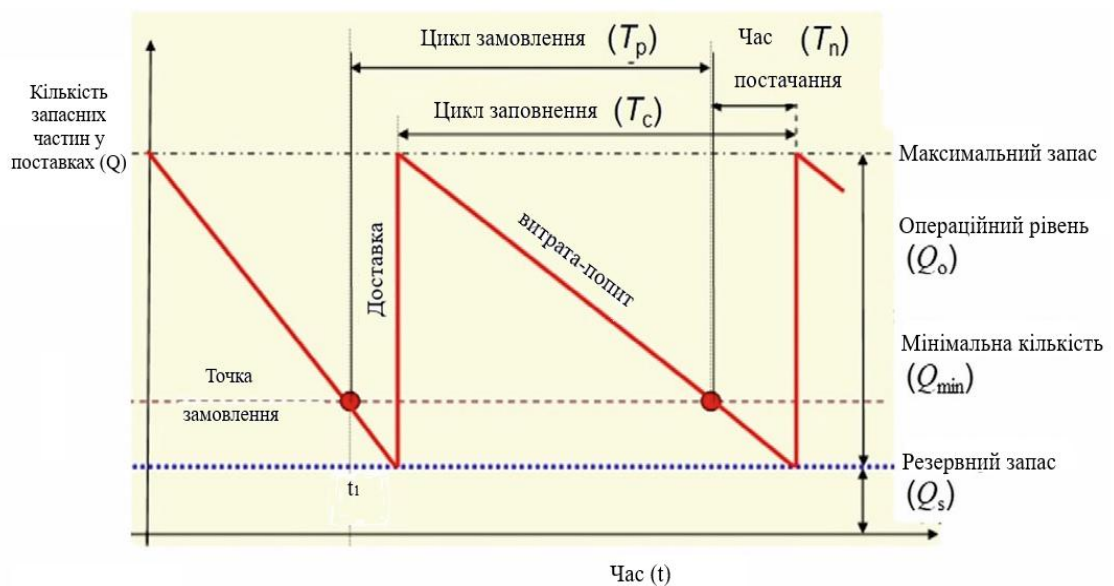


Рис. 4.4. Схема управління процесом запасних частин

Рівень оперативних запасів (Q_0) - кількість товарно-матеріальних цінностей, необхідних для технічного обслуговування в період між

замовленням та отриманням. Мінімальна кількість ($Q_{\min}$) - рівень запасів на момент закупівлі. Точка замовлення (t_1) - момент закупівлі. Час закупівлі (T_n) - час між датою замовлення та отриманням (включає: адміністративний час, час виробництва, час доставки, контроль та отримання). Цикл замовлення (T_p) - інтервал між окремими перевірками поточного рівня запасів / між окремими замовленнями, тобто час споживання. Цикл заповнення (T_c) - інтервал між окремими поповненнями. Розмір замовлення (Q) - кількість одиниць, за якими розпочато закупівлю. Страховий запас (Q_s) - Кількість запасних частин для забезпечення попиту.

Розрахунок запасів запасних частин. Модель розрахунку базується на статистичній/стохастичній моделі бюджету запасів запасних частин. Застосовується розподіл ймовірності Пуассона, який визначає надійність того, що запчастина буде на складі:

$$P(r)_i = [\sum (N n_i \lambda_i t)^r / r!] \exp(-N n_i \lambda_i t) = P_z, \quad (4.1)$$

де $P(r)_i$ - ймовірність того, що буде «r» запитів на якусь запчастину; N - кількість певних машин (для яких надаються запасні частини); n_i - кількість деталей, які враховуються як запасні частини у машині; λ_i - інтенсивність руйнування деталі; t - час роботи машини, на який розраховуються поставки запасних частин; r_i - кількість запчастин до визначеної деталі; P_z - потрібний рівень надійності запасу запчастин (ймовірність).

Для практичного використання рівняння термін «очікуваний попит» визначається:

$$p = N n_i \lambda_i t, \quad (4.2)$$

Для спрощеного розрахунку запасів запасних частин за цією моделлю використовуються номограми надійності або відповідні комп'ютерні програми. Приклад номограми для визначення кількості запасних частин (λ = константа) представлена на рис. 4.5.

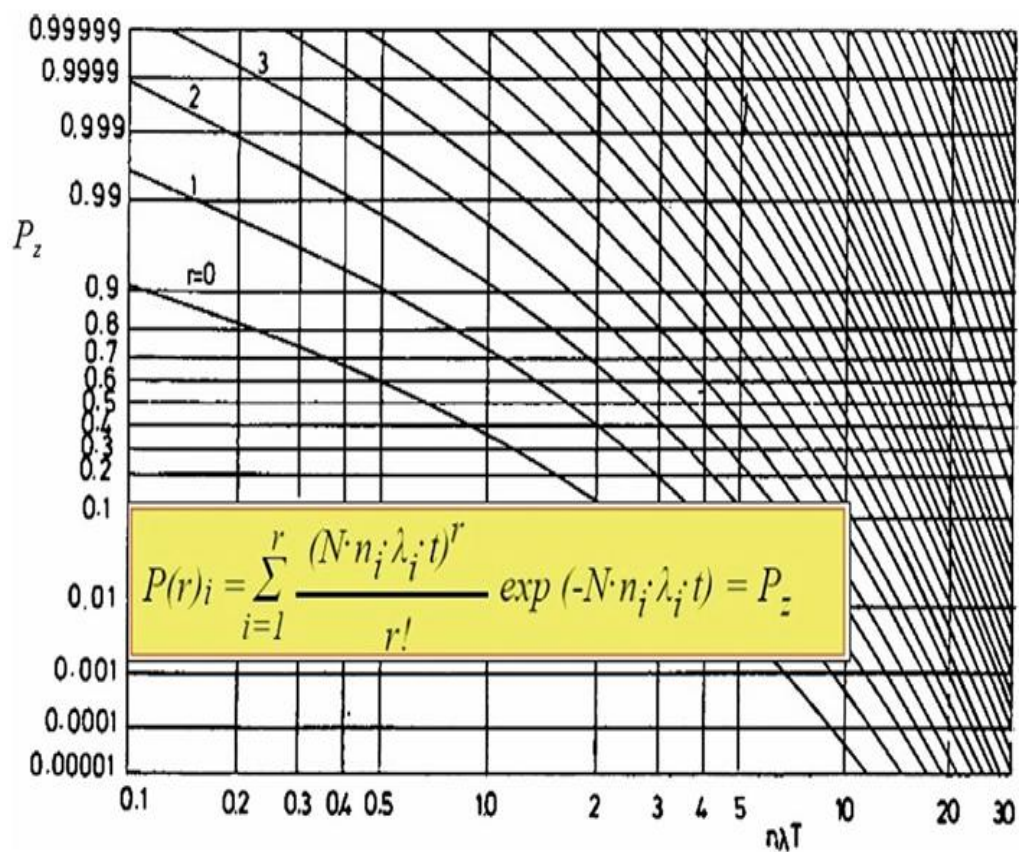


Рис. 4.5. Номограма для визначення кількості запасних частин

На рисунку 4.6 приведено алгоритм визначення процесу сервісного обслуговування збірних одиниць асфальтоукладача.

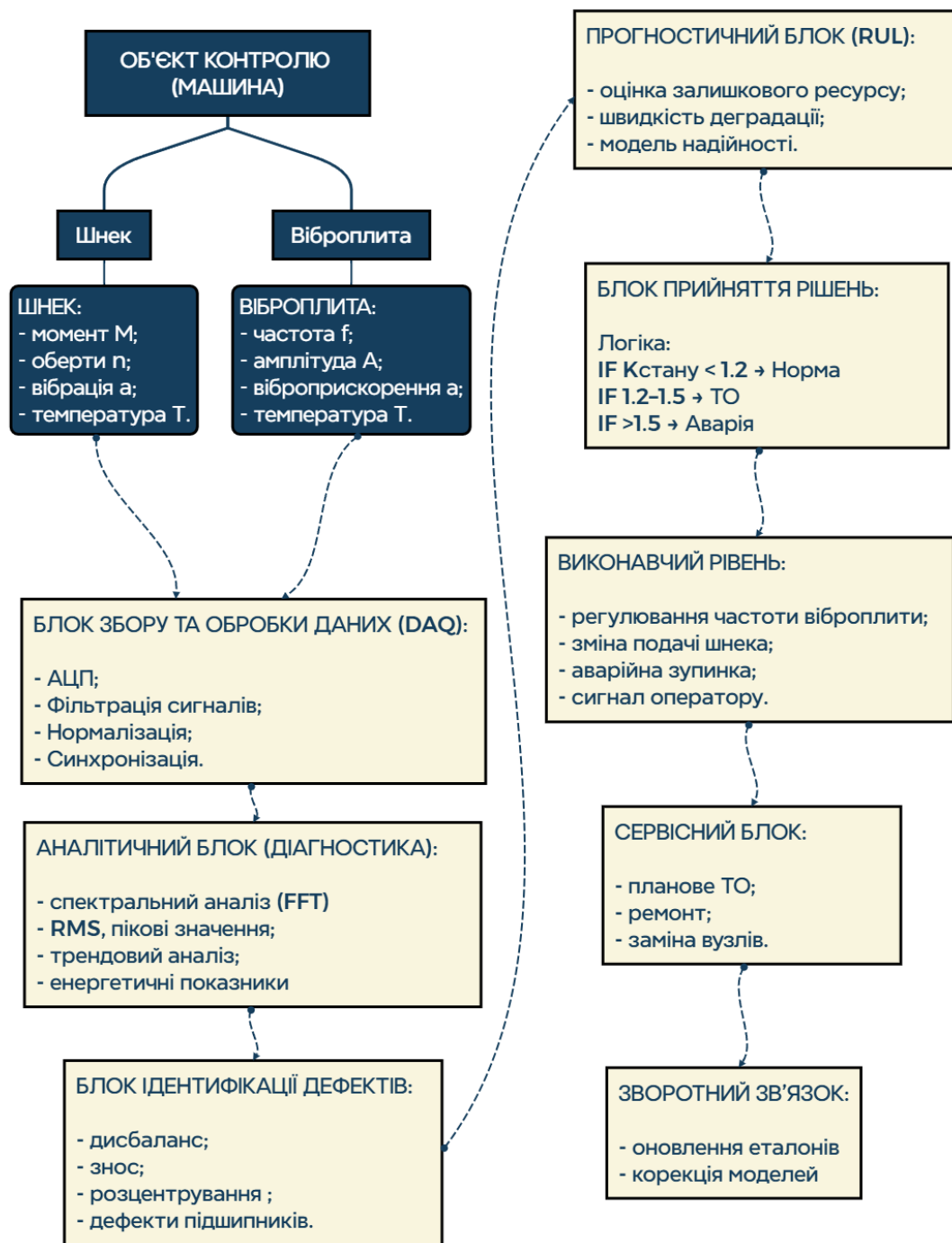


Рис.4.6 Алгоритм визначення процесу сервісного обслуговування

4.5. Висновки по розділу

1. Приведена сучасна система технічного обслуговування будівельних машин, яка забезпечує їхню надійність та доступність протягом усього терміну роботи.

2. Розроблена методика забезпечення надійності та технічного обслуговування та організація управління технічним обслуговуванням машин.

3. Приведено методику постачання запасних частин та алгоритм розрахунку вдосконаленої системи сервісного обслуговування.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Робота присвячена вирішенню важливої науково – практичної задачі вдосконалення сервісного обслуговування машин для будівництва доріг із врахування їх експлуатаційних показників. Обумовлено це зростаючими вимогами підвищення ефективності процесів улаштування доріг із мінімізацією енергії. Досягнення вимог здійснено рішенням передбачуваних можливих проблем виходу із ладу деталей, збірних одиниць та машин в цілому в процесах будівництва доріг шляхом розробки фізично – математичних моделей процесів напрацювання на відмову та розробкою на цій основі вдосконалених методів сервісного обслуговування дорожньої техніки.

Виконаний огляд та аналіз джерел за темою дисертаційного дослідження, отримані наукові та практичні результати засвідчують наступне.

1. Математичне моделювання зміни технічного стану неможливе без явного врахування інтенсивності експлуатації. Ігнорування цього фактору призводить до значних похибок у прогнозуванні залишкового ресурсу. Вектор інтенсивності повинен включати динамічні, кінематичні та кліматичні параметри.

2. Жодна з розглянутих моделей (Вейбулла, Маркова, Кокса) не є універсальною. Хоча розподіл Вейбулла має ряд значних переваг він все рівно залишається статистичною моделлю, а тому для врахування реальної картини роботи будівельної машини необхідно поєднувати даний метод із іншими моделями або підходами.

3. Для рішення завдань дослідження надійності та розробки рекомендацій по сервісу будівельної техніки для улаштуванні асфальтобетонних доріг варто використовувати змішані підходи, що поєднують фізичні моделі деградації (для розуміння механізмів) зі стохастичними моделями.

4. Визначеним методом дослідження надійності та розробки рекомендацій по сервісу будівельної техніки для улаштуванні асфальтобетонних доріг обрано поєднання розподілу Вейбулла із скінченно елементною моделлю деталей та машин в цілому.

5. Виявлено, що зношення суттєво впливає на поточний технічний рівень машин. При цьому фізичне зношення ділиться на зношення першого роду і зношення другого роду і визначається відповідно в результаті експлуатації та внаслідок виходу із ладу деталей та збірних одиниць машини. У відповідності до цього фізичне зношення в роботі розглядається безперервним, тобто таким, що здійснюється поступово і аварійне, що настає раптово.

6. Отримані аналітичні залежності для визначення коефіцієнта придатності до експлуатації, який визначає вплив видів зношення на показник використання будівельної техніки.

7. Визначені основні показники для розробки системи моніторингу стану машини, які впливають на її експлуатаційну ефективність. В результаті розглянутої методології моніторингу ефективності використання будівельної машини здійснено аналіз видів втрат ефективності і сформульована задача уточнення станів будівельної машини на всьому етапі виконання технологічного процесу будівництва дороги.

8. Наведена методика стратегії підтримання ефективного технічного стану машин для улаштування асфальтобетонних доріг на основі застосування управління процесом підтримки їхньої працездатності.

9. Для розробки програми сервісу машин здійснено аналіз технічного стану машини та розглянуто можливі причини відмов окремих деталей, агрегатів та збірних одиниць. Фактори, що призводять до відмов, представлено у вигляді системи технічних, технологічних та організаційних причин.

10. Запропоновано методи моніторингу стану машин, які враховують не тільки відповідне апаратне та програмне забезпечення, а і необхідні методичні передумови для фіксування та ідентифікацію різних станів машини.

11. Розроблено алгоритм моніторингу та визначення параметрів на відмову щоклової дробарки та асфальтоукладача. Визначено основні деталі та збірні одиниці машин, які впливають на режим та продуктивність за методикою опрацювання на відмову та забезпечення надійності роботи машин в процесах улаштування асфальтобетонних доріг.

12. Досліджено вплив продуктивності, експлуатаційних витрат і вартості на стратегію експлуатації в реальних умовах використання машин.

13. Досліджено та розраховано параметри і характеристики надійності розпірної плити щоклової дробарки в процесах подрібнення щебню. Так, виконаний аналіз впливу зміни основних параметрів розподілу Вейбула на надійність дав можливість оцінити вплив параметру β на щільність ймовірності розподілу та визначити доцільні межі його зміни. Найбільш оптимальною формою кривої при визначенні впливу коефіцієнту β на коефіцієнт відмов є значення, що не значно перевищує 1.

14. Виконані дослідження параметрів надійності розпірної плити щоклової дробарки, з метою зниження вірогідності передчасного виходу її із ладу та оцінки методів підвищення терміну її служби, що забезпечить зниження затрат на комплектуючі матеріали. Для цього була використана комбінована модель, що включає кінцево-елементний аналіз деталей, алгоритм лінійного накопичення пошкодження, функціональний метод розподілу Вейбула та параметри середовища, що подрібнюється. На основі моделювання були отримані відповідні картини двоговічності на відмову, окремо при сталому та змінному в часі прикладенні навантаження до плити.

15. Виконані дослідження напрацювання на відмову шнека асфальтоукладальника із використанням nCode DesignLife (EN Constant) та

окремого програмного коду для побудови графіків розподілу Вейбулла. На основі розрахунку розподільного шнека від дії комбінованого навантаження встановлено, що максимальні напруження при статичному навантаженні складають 8.025 МПа. Визначені параметри форми та масштабу, які для лопатей шнека мають значення $\beta = 3.613$ та $\eta = 1109.3$, в той час як для валу шнека - $\beta = 4.086$ та $\eta = 6213.2$.

16. Отримано аналітичні залежності та здійснені дослідження динамічних параметрів вібраційної плити з урахуванням особливостей взаємодії системи «машина – середовище» та змінних властивостей дорожньої суміші. Досліджено та розраховано параметри і характеристики надійності вібраційної плити при улаштуванні доріг. Підвищення надійності та довговічності елементів вібраційної плити здійснено шляхом оцінювання інтенсивності динамічних навантажень і прогнозування робочого ресурсу на основі характеристик навантаження.

17. Наведено методики розрахунок резерву та запасних частин машин, методики та алгоритми методів сервісного обслуговування машин.

Список використаних джерел

1. Mikulić, D., & Mück, D. (2024). Construction machines. Springer Nature Switzerland AG.
2. Lavrov, I., Shlyakhov, O. (2021). Analysis of failures of hydraulic systems of road construction machines. Journal of Mechanical Engineering, No. 4, pp. 88–95.
3. Haddock, K. (2007). The Earthmover Encyclopedia: The Complete Guide to Heavy Equipment of the World. Motorbooks International. ISBN 978-0760329641.
4. Guzman, E.A. (2023). Heavy Equipment Operation and Maintenance Manual (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003360667>.
5. Gransberg, D.D., Popescu, C.M., & Ryan, R. (2006). Construction Equipment Management for Engineers, Estimators, and Owners (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420013993>.
6. Paulmichl, I., Adam, C., & Adam, D. (2019). Analytical modeling of the stick-slip motion of an oscillation drum. Acta Mechanica, 230(9), 3103–3126.
7. SUPER 1800-3(i) - Wirtgen Group, доступ отримано 5 березня, 2026, [https://www.wirtgengroup.com/binary/full/o205542v89_V_PB_SUPER_18003\(i\)_EN_V1_0122.pdf](https://www.wirtgengroup.com/binary/full/o205542v89_V_PB_SUPER_18003(i)_EN_V1_0122.pdf)
8. Nikolaides, A. (2014). Highway Engineering: Pavements, Materials and Control of Quality (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b17690>.
9. ДБН В.2.8-3-95 Будівельна техніка, оснастка, інвентар та інструмент. Технічна експлуатація будівельних машин - БУДСТАНДАРТ Online, доступ отримано січня 25, 2026, https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=4036.
10. ДСТУ 9118:2021 Технічна діагностика. Діагностування технічного стану матеріалів конструкцій. Загальні вимоги - БУДСТАНДАРТ Online, доступ отримано січня 25, 2026, https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=96266

11. ДСТУ ISO 13379-2:2015 Моніторинг і діагностика стану машин. Інтерпретація даних і технічна діагностика. Частина 2. Додатки, керовані даними (ISO 13379-2:2015, IDT), доступ отримано січня 25, 2026, https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=93057&utm_source=chatgpt.com.
12. ІДС «Будстандарт» Державне підприємство «, доступ отримано січня 25, 2026, <https://nidi.org.ua/ua/ids-budstandart>.
13. Норми витрат паливно-мастильних матеріалів на роботу дорожньо-будівельних машин (доповнення 3 до норм Н218. Укравтодор 043-96) - БУДСТАНДАРТ Online, доступ отримано січня 25, 2026, https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=1383.
14. International Organization for Standardization. (2025). Condition monitoring and diagnostics of machine systems — Prognostics — Part 1: General guidelines and requirements (ISO 13381-1:2025). ISO.
15. Nowogońska, B. (2015). Mathematical reliability model of building components by Rayleigh. Civil and Environmental Engineering Reports, 15(4), 155–162. <https://doi.org/10.1515/ceer-2014-0036>.
16. Аулін, В. В., Настоящий, В. А., & Тихий, А. А. (2014). Вибіркове зношування робочих органів ґрунтообробних та землерийних машин як відображення стохастичної природи їх взаємодії з частинками ґрунту. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, (148). <https://doi.org/10.18664/1994-7852.148.2014.71933>.
17. Calculation of service life | Basic Bearing Knowledge | Koyo Bearings /JTEKT CORPORATION, доступ отримано січня 25, 2026, <https://koyo.jtekt.co.jp/en/support/bearing-knowledge/5-2000.html>.
18. Steam Turbine Equivalent Operating Hours (EOH) - Loss Control, доступ отримано січня 25, 2026, https://www.aegislink.com/content/dam/aegislink/resources/publications/public/LossControl/LC_Steam_Turbine_Equivalent_Operating_Hours.pdf.

19. Zhang, Y., Liu, H., Wang, C., Li, X. (2022). A Markov chain-based reliability evaluation method for complex electronic systems. *Electronics*, 11(15), 2353. <https://doi.org/10.3390/electronics11152353>.
20. Accelerated Failure Time Models - Emergent Mind, доступ отримано січня 25, 2026, <https://www.emergentmind.com/topics/accelerated-failure-time-models>
21. Yakovyna, V. ., Symets, I. (2022). Method of high-order markov chain representation through an equivalent first-order chain for software reliability assessment. *Computer Systems and Information Technologies*, (3), 66–73. <https://doi.org/10.31891/CSIT-2021-5-9>.
22. Ghomghaleh, A., Khaloukakaie, R., Ataei, M., Barabadi, A., Nouri Qarahasanlou, A., Rahmani, O., Beiranvand Pour, A. (2020). Prediction of remaining useful life (RUL) of Komatsu excavator under reliability analysis in the Weibull-frailty model. *PLoS ONE*, 15(7), e0236128. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0236128>
23. Bhushan, K., Chattopadhyaya, S., Sharma, S., Sharma, K., Li, C., Zhang, Y., & Tag Eldin, E. M. (2022). Analyzing reliability and maintainability of crawler dozer BD155 transmission failure using Markov method and total productive maintenance: A novel case study for improvement productivity. *Sustainability*, 14(21), 14534. <https://doi.org/10.3390/su142114534>.
24. Yin, W., Hu, Y., Ding, G., & Chen, X. (2025). Digital twin-driven condition monitoring system for traditional complex machinery in service. *Machines*, 13(6), 464. <https://doi.org/10.3390/machines13060464>.
25. Martins, A., Fonseca, I., Farinha, J. T., Reis, J., & Cardoso, A. J. M. (2021). Maintenance prediction through sensing using hidden Markov models — A case study. *Applied Sciences*, 11(16), 7685. <https://doi.org/10.3390/app11167685>.
26. Mutlu, U., & Kaewunruen, S. (2026). Digitalised Predictive Maintenance in Railways: A Systematic Review of AI, BIM, and Digital Twins. *Infrastructures*, 11(3), 87. <https://doi.org/10.3390/infrastructures11030087>
27. Lei, Y., Lin, J., He, Z., & Zi, Y. (2020). A review on empirical mode decomposition in fault diagnosis of rotating machinery. *Mechanical Systems and Signal Processing*,

- 138, 106562. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2012.09.015>.
28. Lee, J., Wu, F., Zhao, W., Ghaffari, M., Liao, L., & Siegel, D. (2014). Prognostics and health management design for rotary machinery systems — Reviews, methodology and applications. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 42(1–2), 314–334. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2013.06.004>.
 29. Jain, P. H., Bhosle, S. P. (2020). Analysis on vibration signal analysis techniques used in diagnosis of faults in rotating machinery. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 10(3), 3377–3396.
https://www.researchgate.net/publication/351083898_Analysis_on_Vibration_Signal_Analysis_Techniques_used_in_Diagnosis_of_Faults_in_Rotating_Machinery
 30. Yang, J., Liu, C., Xu, Q., & Tai, J. (2022). Acoustic Emission Signal Fault Diagnosis Based on Compressed Sensing for RV Reducer. *Sensors*, 22(7), 2641. <https://doi.org/10.3390/s22072641>
 31. Pham, M. T., Kim, J.-M., & Kim, C. H. (2020). Intelligent Fault Diagnosis Method Using Acoustic Emission Signals for Bearings under Complex Working Conditions. *Applied Sciences*, 10(20), 7068. <https://doi.org/10.3390/app10207068>.
 32. Zhang, Y., Li, X., Zhou, Q. (2023). A survey of mechanical fault diagnosis based on audio signal analysis. *Measurement*, 220, 113294. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113294>.
 33. Wang, R., Zhan, X., Bai, H., Dong, E., Cheng, Z., Jia, X. (2022). A Review of Fault Diagnosis Methods for Rotating Machinery Using Infrared Thermography. *Micromachines*, 13(10), 1644. <https://doi.org/10.3390/mi13101644>
 34. Tadić, L., Golub Medvešek, I., Vujović, I., & Šoda, J. (2025). Infrared Thermography in Maritime Systems: A Systematic Review. *Applied Sciences*, 15(23), 12551. <https://doi.org/10.3390/app152312551>.
 35. Michailidis, E. T., Panagiotopoulou, A., & Papadakis, A. (2025). A Review of OBD-II-Based Machine Learning Applications for Sustainable, Efficient, Secure, and Safe Vehicle Driving. *Sensors*, 25(13), 4057.

<https://doi.org/10.3390/s25134057>.

36. Ali, S. H., Ullah, I., Ali, S. A., Haq, M. I. U., & Ullah, N. (2024). A Cyber-Physical System Based on On-Board Diagnosis (OBD-II) for Smart City. *ICCK Transactions on Intelligent Systematics*, 1(2), 49–57. <https://doi.org/10.62762/TIS.2024.329126>.
37. Гнатов , А., Аргун, Щ., Ульянець , О. ., & Іванов , Д. . (2025). Діагностика електромобілів за допомогою OBD-II: принципи, можливості та перспективи. *Автомобільний транспорт*, (56), 5–12. <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2025.56.0.01>.
38. Y. Zhang and M. Martínez-García, "Machine Hearing for Industrial Fault Diagnosis," 2020 IEEE 16th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), Hong Kong, China, 2020, pp. 849-854, doi: 10.1109/CASE48305.2020.9216787.
39. Димова, Г. О. (2025). Аналіз віброакустичних сигналів для діагностики технічного стану електромеханічного обладнання. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*, (59), 285-293. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-59-36>.
40. Smolin, Y. (2025). Diagnosis and recognition of types of mechanical defects of complex metal structures by acoustic emission method. *Ukrainian Metrological Journal*, 1(1). <https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2025.325917>.
41. Martins, A., Fonseca, I., Farinha, J. T., Reis, J., & Cardoso, A. J. M. (2021). Maintenance Prediction through Sensing Using Hidden Markov Models –A Case Study. *Applied Sciences*, 11(16), 7685. <https://doi.org/10.3390/app11167685>.
42. Pham, M. T., Kim, J.-M., & Kim, C. H. (2020). Intelligent Fault Diagnosis Method Using Acoustic Emission Signals for Bearings under Complex Working Conditions. *Applied Sciences*, 10(20), 7068. <https://doi.org/10.3390/app10207068>.
43. Zhang, B., Wang, W. & He, Y. A hybrid approach combining deep learning and signal processing for bearing fault diagnosis under imbalanced samples and multiple operating conditions. *Sci Rep* **15**, 13606 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41598->

44. Білякович М. О., Полянський С. К. (2012) Технічна експлуатація будівельно-дорожніх машин та автомобілів. Київ: Слово, 616 с.
45. Хмара Л. А., Кравець С. В., Скоблюк М. П. (2014) Машини для земляних робіт. Рівне: НУВГП, 544 с.
46. Михайлов В. В. (2018) Експлуатація та сервіс дорожніх машин: Навчальний посібник. Харків: ХНАДУ, 296 с.
47. Литвиненко О. С. (2020) Діагностування та обслуговування дорожньо-будівельної техніки: Монографія. Харків: ХНАДУ, 240 с.
48. Назаренко, І., Нечипорук, В., Ткачук, В. (2024). Оцінка впливу експлуатаційних показників дорожньої техніки на ефективність їх використання. Техніка будівництва, (40), 63–70. <https://doi.org/10.32347/tb.2024-40.0306>
49. Хмара Л. А., Кравець С. В. (2015) Машини для будівництва та утримання доріг: Підручник. Рівне: НУВГП, 412 с
50. Назаренко І.І. Прикладні задачі теорії вібраційних систем. Навчальний посібник (2-е видання). –К.: Видавничий Дім «Слово»,2010. –440 с.
51. Nazarenko, I., Dedov, O., Mishchuk, Y., Slipetskyi, V., Delembovskyi, M., Zalisko, I. ., & Nesterenko, M. (2021). Research of stress-strain state of elements of technological technical constructions. In I. Nazarenko (Ed.), DYNAMIC PROCESSES IN TECHNOLOGICAL TECHNICAL SYSTEMS (pp. 140–179). Kharkiv: TECHNOLOGY CENTER PC. <https://doi.org/10.15587/978-617-7319-49-7.ch8>.
52. Nazarenko, I., Dedov, O., Bernyk, I., Zapryvoda, A., Ruchynskyi, M., Bondarenko, A. (2025). Determining the rational energy level for processing environments of different structures. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5(1 (137)), 55–65. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.341458>
53. Gransberg, D. D., Popescu, C. M., Ryan, R. (2016) Construction Equipment Management for Engineers, Estimators, and Owners. Florida: CRC Press, 510 p.
54. Nunnally, S. W. (2015) C. M., Ryan, R. (2016) Construction Equipment

- Management for Engineers, Estimators, and Owners. Florida: CRC Press, 510 p.
55. Peurifoy, R. L., Schexnayder, C. J., Shapira, A. (2018) Construction Planning, Equipment, and Methods. New York: McGraw-Hill Education, 816 p
56. Nazarenko, I., Mishchuk, Y., Nechiporuk, V., Albeshchenko, D., Pereginets, I. (2026). Definition of reliability parameters of the spacer plate of a jaw crusher depending on the characteristics of the working environment and the material of manufacture. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1(7(139), 13 – 25p <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2026.353102>
57. Нечипорук, В. (2025). Дослідження параметрів та характеристик відмов дорожнього обладнання. Техніка будівництва, (41), 85–91. <https://doi.org/10.32347/tb.2024-41.0410>
58. Bloch, H. P., Geitner, F. K. (2012) Machinery Failure Analysis and Troubleshooting. Oxford: Butterworth-Heinemann, 760 p.
59. John Moubray Reliability-Centered Maintenance. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1997. 448 p.
60. Lindy C. Higgins, R. Keith Mobley Maintenance Engineering Handbook. 8th ed. New York: McGraw-Hill, 2018. 1824 p.
61. Воляк Л. Р. (2019) Надійність та ремонт машин: Навчальний посібник. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 342 с.
62. O'Connor, P. D., Kleyner, A. (2012) Practical Reliability Engineering. Chichester: Wiley, 512 p.
63. Li, Z., Fu, H., Guo, J. (2025). Reliability Assessment of a Series System with Weibull-Distributed Components Based on Zero-Failure Data. Applied Sciences, 15(5), 2869. <https://doi.org/10.3390/app15052869>
64. Liang, H. (2015). A Reliability Analysis of NC Machine Tools Based on the Weibull Distribution. Applied Mechanics and Materials, 741, 763–767. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.741.763>.
65. Yu, N. H., Zhang, Z. X., Wang, Z., & Zhang, X. P. (2011). Weibull-Distribution-Based Method of Bayesian Reliability Evaluation for Machining Center. Advanced

- Materials Research, 317–319, 1949–1953.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.317-319.1949>
66. Chen, C. H., Yang, Z. J., Chen, F., Hao, Q. B., Xu, B. B., Kan, Y. N., Li, G. F. (2013). The Study of Reliability Modeling of Machining Center Based on Blocksime and Weibull++. *Applied Mechanics and Materials*, 274, 49–52.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.274.49>
 67. Torres-Villaseñor, R. C., Barraza-Contreras, J. M., & Piña-Monarez, M. R. (2023). A probabilistic methodology for Weibull-based vibration fatigue reliability analysis. *Applied Sciences*, 13(18), 10291.
 68. Zhang, L., Long, X., Li, Q. (2021). Weibull Parameter Estimation and Reliability Analysis with Zero-Failure Data from High-Quality Products. *Reliability Engineering & System Safety*, 207, 107321.
<https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107321>
 69. Pasanisi, A., Roero, C., Bousquet, N., & Remy, E. (2014). On the practical interest of discrete Inverse Polya and Weibull-1 models in industrial reliability studies. Ar Xiv:1411.0408, <https://arxiv.org/abs/1411.0408>.
 70. Escobar, L. A., & Meeker, W. Q. (2013). Mixture Weibull proportional hazard model for mechanical system failure prediction. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 43, 103–112. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2013.02.008>
 71. Wang, Z. M., & Yang, J. G. (2011). Reliability Assessment of Numerical Control Machine Tools Using Weibull Mixture Models. *Advanced Materials Research*, 181–182, 161–165. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.181-182.161>
 72. Biały, W., Prostański, D., Korbiel, T., & Kuric, I. (2024). Weibull distribution as a criterion of emergency levels. *Acta Montanistica Slovaca*, 29(1), 216–226.
<https://doi.org/10.46544/AMS.v29i1.19>
 73. Назаренко І. І. (1997) Машини та обладнання для виробництва будівельних матеріалів і конструкцій. Київ: Вища школа, 584 с.

74. Mu, F. S., Li, H., Li, X. X., Xiong, H. Z. (2013). Jaw crusher based on discrete element method. *Applied Mechanics and Materials*, 312, 101–105.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.312.101>.
75. Румяк Г. О., Клендїй В. М. (2017) Процеси та обладнання для руйнування матеріалів. Тернопіль: ТНТУ, 218 с
76. Gupta, A., Yan, D. (2016) *Mineral Processing Design and Operations (Chapter: Jaw Crushers Maintenance)*. Amsterdam: Elsevier, 880 p.
77. Lindqvist, M. (2008) *Energy efficiency in crushing (Focus on Jaw Crushers reliability and wear)*. Gothenburg: Chalmers University of Technology, 184 p.
78. Terva, J. (2013) *Wear analysis of jaw crusher plates: Failure and life cycle*. Tampere: TUT, 142 p.
79. N. H., Zhang, Z. X., Wang, Z., Zhang, X. P. (2011). Weibull-Distribution-Based Method of Bayesian Reliability Evaluation for Machining Center. *Advanced Materials Research*, 317–319, 1949–1953.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.317-319.1949>
80. Zhang, L., Long, X., & Li, Q. (2021). Weibull Parameter Estimation and Reliability Analysis with Zero-Failure Data from High-Quality Products. *Reliability Engineering & System Safety*, 207, 107321.
<https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107321>
81. Gómez, Y. M., Gallardo, D. I., Marchant, C., Sánchez, L., Bourguignon, M. (2024). *An in-depth review of the Weibull model with a focus on various parameterizations. Mathematics*, 12(1), 56. <https://doi.org/10.3390/math12010056>
82. Oloyede, O, Cochrane, RF and Mullis, AM (2017) Effect of rapid solidification on the microstructure and microhardness of BS1452 grade 250 hypoeutectic grey cast iron. *Journal of Alloys and Compounds*, 707. pp. 347-350. ISSN: 0925-8388 .
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.08.214>
83. Boardman, B., 1982"Crack Initiation Fatigue – Data, Analysis, Trends and Estimation," SAE Technical Paper 820682,
<https://doi.org/10.4271/820682>

84. Escobar, L. A., Meeker, W. Q. (2013). Mixture Weibull proportional hazard model for mechanical system failure prediction. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 43, 103–112. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2013.02.008>.
85. Robert C. Dunne (2019) *Mineral Processing Extractive Metallurgy Handbook*. Society for Mining, Metallurgy Exploration, USA, p. 2258. ISBN 978-0-87335-385-4. URL: <https://www.ebooks.com/en-us/book/209590006/sme-mineral-processing-and-extractive-metallurgy-handbook/robert-c-dunne/#author-list>
86. Scherocman, J. A. (2016) *Hot-Mix Asphalt Paving: Placement and Maintenance*. Lanham: NAPA, 310 p.
87. He, Q., Long, G. (2023) *Handbook of Construction Machinery*. Singapore: Springer Nature, 1024 p
88. Day, D. A., Benjamin, N. B. (2019) *Construction Equipment Guide*. New Jersey: John Wiley & Sons, 592 p.
89. Vögele, J. (2014) *Paving Guide: Manual for Paver Operators and Service Engineers*. Ludwigshafen: Joseph Vögele AG, 224 p
90. [Harries, L., Böhm, S., Liu, J. \(2025\). A discrete element simulation study of paver screed and hot mix asphalt interaction. *Scientific Reports*.
<https://doi.org/10.1038/s41598-025-98928-7>](https://doi.org/10.1038/s41598-025-98928-7)
91. Zhu, S., Li, X., Wang, H., & Yu, D. (2018). Development of an Automated Remote Asphalt Paving Quality Control System. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2672(26), 28-39.
<https://doi.org/10.1177/0361198118758690>
92. Harris Tedric A., Michael N. Kotzalas *Rolling Bearing Analysis*. 5th ed. Boca Raton: CRC Press, 2006. 1080 p.
93. Robert Errichello *Gear Failure Analysis*. Materials Park, OH: ASM International, 2012. 342 p.
94. Liu, Z., Gu, X., Ren, H., Wang, X., Dong, Q. (2022). Three-dimensional finite element analysis for structural parameters of asphalt pavement: A combined laboratory and field accelerated testing approach. *Case Studies in Construction*

- Materials, 17, e01221. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01221>
95. Zhan, Y., Zhang, Y., Nie, Z., Luo, Z., Qiu, S., Wang, J., Zhang, A. A., Ai, C., Tang, X., & Tan, C. (2023). Intelligent paving and compaction technologies for asphalt pavement. *Automation in Construction*, 156, 105081. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105081>.
96. Jia, J., Liu, H., Wan, Y. (2019). Dynamic characteristics modelling of the tamper–asphalt mixture interaction: application to predict asphalt mat density. *International Journal of Pavement Engineering*, 20(5), 530–543. <https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1316642>.
97. Song, F., Ren, S., and Nguyen, V., "Improving the Performance of Asphalt Paver Machine Based on the Experiment Analysis and Control of Excitation Forces," *SAE Int. J. Commer. Veh.* 19(2):1-12, 2026, <https://doi.org/10.4271/02-19-02-0008>
98. Xiu, Yun et al., "Optimization of Operating Parameters of the Asphalt-Paver Vibration-Screed System in Improving Compaction Efficiency and Pavement Quality for Driving Vehicle Performance," *SAE Int. J. Veh. Dyn., Stab., and NVH* 7(2):249-262, 2023-, <https://doi.org/10.4271/10-07-02-0015>
99. Yanni Shi, Honghai Liu, Gangfeng Wang (2021) Modeling of asphalt mixture-screed interaction: A nonlinear dynamic vibration model for improving paving density, *Construction and Building Materials*, Volume 311, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125296>.
100. Leandro Harries, David Kempf, Matthias Scheidig, Maximilian Schütz, Moritz Middendorf, Kazim Uzar, Xiaohui Su, Stefan Böhm, Jia Liu (2024) Assessing Asphalt Pavement Pre-Compaction with Paver Screed Frequency Measurements, *Procedia Structural Integrity*, Volume 64, Pages 262-268, ISSN 2452-3216, <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.09.243>
101. Jia, J., Liang, Y., Wan, Y. (2020). Study on structural strength of paver screed based on finite element method. *Journal of Physics: Conference Series*, 1654,

012087. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1654/1/012087>

102. Inman Daniel J. Engineering Vibration. 4th ed. Boston: Pearson, 2014. 640 p.
103. Бабак В. П., Ханін М. С. Вібраційні процеси та машини : навч. посіб. –Київ : Вища школа, 2010. –320 с.
104. Писаренко Г. С., Яковлєв А. П., Матвєєв В. В. Коливання механічних систем : підручник. – Київ : Наук. думка, 2002. – 448 с.
105. Тимошенко С. П., Янг Д. Х., Вівер В. Коливання в інженерній справі. – Київ : Наук. думка, 2003. – 560 с.
106. Mechanical Vibrations / S. S. Rao. – 6th ed. –Boston : Pearson, 2017. –1024 p.
107. Theory of Vibrations with Applications / W. T. Thomson, M. D. Dahleh.–5th ed. – Upper Saddle River : Prentice Hall, 1998. – 546 p.
108. Vibration Problems in Engineering / S. Timoshenko, D. H. Young, W. Weaver.– 5th ed. – New York : Wiley, 1990. – 624 p.
109. Макарець М.В., **Посібник з рівнянь теорії суцільного середовища.** Навчальний посібник, –К.: КНУ, 2024. – 118с.
110. Запривода, А. В., Нечипорук, В. Г. (2026). Визначення режимів, параметрів та надійності роботи вібраційної плити при улаштуванні доріг. Вібрації в техніці та технологіях, (1(120)),102–110. <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2026-1-11>
111. Christian U. Grosse, Masayasu Ohtsu (eds.). Acoustic Emission Testing. Berlin: Springer, 2008. 414 p.
112. Masayasu Ohtsu Acoustic Emission and Related Non-destructive Evaluation Techniques in the Fracture Mechanics of Concrete. Cambridge: Woodhead Publishing, 2015. 520 p.
113. Xavier P. V. Maldague Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing. New York: Wiley-Interscience, 2001. 684 p.
114. Victor Wowk V. Machinery Vibration: Measurement and Analysis. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 2012. 368 p. Cornelius Scheffer C., Paresh Girdhar P. Practical

Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance. Amsterdam: Elsevier, 2004. 272 p.

115. Singiresu S. Rao Mechanical Vibrations. 6th ed. Boston: Pearson, 2017. 1104 p.

ДОДАТКИ

Додатки

Скрипт визначення залежності продуктивності від діаметру шнека

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Параметри (можеш змінювати)
n_rpm = 60          # об/хв
phi = 0.3           # коеф. заповнення
rho = 2300          # густина, кг/м^3

# Перевід в об/с
n = n_rpm / 60

# Діапазон діаметрів (м)
D = np.linspace(0.1, 0.6, 100)  # від 100 мм до 600 мм

# Продуктивність (м^3/с)
Q = (np.pi / 4) * D**3 * n * phi

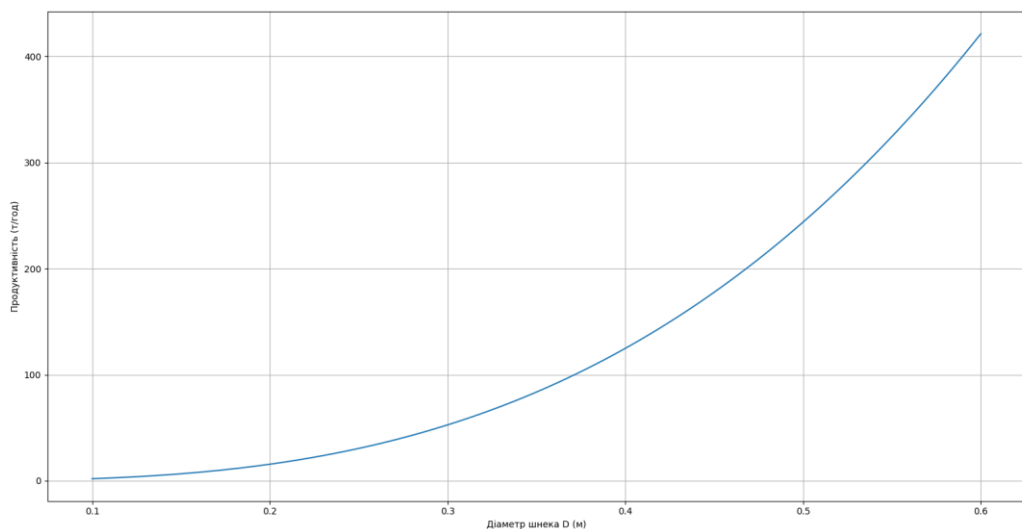
# Масова продуктивність (кг/с)
m_dot = rho * Q

# Перевід у т/год
m_dot_tph = m_dot * 3600 / 1000

# Графік
plt.figure()
plt.plot(D, m_dot_tph)
plt.xlabel("Діаметр шнека D (м)")
plt.ylabel("Продуктивність (т/год)")
plt.title("Залежність продуктивності від діаметра шнека")
plt.grid()

plt.show()
```

Графік залежності



```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

t = np.linspace(0, 7, 200)

# Початкові значення (перетин з віссю P)
P0 = [100, 90, 80, 60, 50]

labels = ["Q01", "Q02", "Q03", "Q0n-1", "Q0n"]

a = 2.0
b = 0.8

plt.figure(figsize=(6,6))

for p, lab in zip(P0, labels):
    P = p - a*t - b*t**2
    plt.plot(t, P, color='black')

    # підпис біля осі Y (t = 0)
    plt.text(-0.7, p, lab, fontsize=10, verticalalignment='center')

plt.text(
    -0.25, 110,
    "Q",
    fontsize=12,
    rotation=0,
    ha='center',
    va='bottom',
    clip_on=False
)

plt.xlim(0,7.4)
plt.ylim(0,110)

plt.xlabel("t, роки")

plt.tick_params(axis='y', labelleft=False)

plt.grid(True, linestyle='--')

plt.annotate(
    '',
    xy=(7.4, 0), xytext=(0, 0),
    arrowprops=dict(arrowstyle='->', linewidth=1.5, color='black'),
    clip_on=False
)

# додаємо стрілку по Y
plt.annotate(
    '',
    xy=(0, 110), xytext=(0, 0),
    arrowprops=dict(arrowstyle='->', linewidth=1.5, color='black'),
    clip_on=False
)

ax = plt.gca()
ax.spines['top'].set_visible(False)
ax.spines['right'].set_visible(False)

plt.show()

```

Рис. 2. Код дослідження зміни продуктивності машини в процесі її експлуатації (різні значення за умов однакового зниження продуктивності)

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

t = np.linspace(0, 7, 200)

P0 = [100, 85, 65, 50]

labels = ["Q01", "Q02", "Q0n-1", "Q0n"]

a = 1.6
b = 0.6

plt.figure(figsize=(6,6))

for p, lab in zip(P0, labels):
    P = p - a*t - b*t**2
    plt.plot(t, P, color='black')

    plt.text(-0.7, p, lab, fontsize=10,
             verticalalignment='center')

plt.text(
    -0.25, 110,
    "Q",
    fontsize=12,
    rotation=0,
    ha='center',
    va='bottom',
    clip_on=False
)

plt.xlim(0,7.4)
plt.ylim(0,110)

plt.xlabel("t, роки")

plt.tick_params(axis='y', labelleft=False)

plt.grid(True, linestyle='--')

plt.annotate(
    '',
    xy=(7.4, 0), xytext=(0, 0),
    arrowprops=dict(arrowstyle='->', linewidth=1.5, color='black'),
    clip_on=False
)

plt.annotate(
    '',
    xy=(0, 110), xytext=(0, 0),
    arrowprops=dict(arrowstyle='->', linewidth=1.5, color='black'),
    clip_on=False
)

ax = plt.gca()
ax.spines['top'].set_visible(False)
ax.spines['right'].set_visible(False)

plt.show()

```

Рис. 3. Дослідження зміни продуктивності машини в процесі її експлуатації (різні значення за умов різного зниження продуктивності)

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.stats import weibull_min

# Дані (часи відмов)
data = np.array([3100,3400,3800,4200,4500,4800,5200,5600,6000,6400,6800,7200,7500,7800,8000])
data = np.sort(data)
n = len(data)

# Median rank
median_rank = (np.arange(1, n+1) - 0.3) / (n + 0.4)

# Оцінка параметрів Вейбулла (beta, eta) через scipy
beta, loc, eta = weibull_min.fit(data, floc=0) # фіксуємо loc=0

print(f"Оцінка параметрів: beta = {beta:.3f}, eta = {eta:.1f}")

# Побудова CDF
t = np.linspace(0, max(data)*1.2, 500)
cdf = weibull_min.cdf(t, c=beta, scale=eta)

plt.figure(figsize=(8,5))
plt.plot(t, cdf, label='Weibull CDF')
plt.scatter(data, median_rank, color='red', label='Median rank')
plt.xlabel('Time')
plt.ylabel('Probability of failure')
#plt.title('Вейбулл CDF та Median Rank')
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.show()

```

Рис. 4. Побудова графіка результатів розподілу Вейбулла лопаті шнека на основі експериментальних даних

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

def weibull_pdf_beta1(t, eta, gamma, beta):
    pdf = np.zeros_like(t)
    mask = t > gamma
    pdf[mask] = ((beta / eta) * ((t[mask] - gamma) / eta)**(beta - 1) *
        np.exp(-((t[mask] - gamma) / eta)**beta))
    return pdf

# Parameters
beta = 2
gamma = 0
etas = [50, 100, 500, 800] # characteristic life

# Time axis
t = np.linspace(0, 3000, 4000)

plt.figure(figsize=(10, 6))

for eta in etas:
    pdf = weibull_pdf_beta1(t, eta, gamma, beta)
    plt.plot(t, pdf, linewidth=2, label=f'η = {eta}') # додаємо label

# Підпис β в кутку
plt.text(
    0.8, 0.95,
    rf'$\beta = {beta}$',
    transform=plt.gca().transAxes,
    fontsize=16,
    ha='right',
    va='top',
    bbox=dict(
        boxstyle='round',
        facecolor='white',
        edgecolor='black',
        alpha=0.9
    )
)

# Легенда у верхньому правому куті
plt.legend(fontsize=13, loc='upper right')

plt.xlabel('t', fontsize=15)
plt.ylabel('f(t)', fontsize=15)

plt.xticks(fontsize=13)
plt.yticks(fontsize=13)

plt.grid(True)
plt.tight_layout()
plt.show()

```

Рис. 5. Скрипт побудови графіка впливу параметру масштабу на зміну щільності ймовірності розподілу

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.special import gamma

# Parameters
gamma_val = 200      # location
eta = 1000           # scale
beta_values = [0.7, 1.0, 2.0, 5.0] # shape parameters

# Time axis (focus around the distribution)
t = np.linspace(gamma_val, gamma_val + 3*eta, 1000)

# Fundections
def weibull_pdf(t, beta, eta, gamma_val):
    return (beta / eta) * ((t - gamma_val) / eta)**(beta - 1) * np.exp(-((t - gamma_val)/eta)**beta)

def weibull_mttf(beta, eta, gamma_val):
    return gamma_val + eta * gamma(1 + 1/beta)

def weibull_mode(beta, eta, gamma_val):
    if beta <= 1:
        return gamma_val
    else:
        return gamma_val + eta * ((beta - 1)/beta)**(1/beta)

def weibull_median(beta, eta, gamma_val):
    return gamma_val + eta * (np.log(2))**(1/beta)

# Plot
plt.figure(figsize=(10, 6))
eps = 1e-6
for beta in beta_values:
    pdf = weibull_pdf(t, beta, eta, gamma_val)
    plt.plot(t, pdf)
    if beta <= 1:
        # для  $\beta \leq 1$  беремо точку на правому схилі
        t_label = gamma_val + 0.02 * eta
    else:
        # для  $\beta > 1$  - Mode
        t_label = weibull_mode(beta, eta, gamma_val)

    f_label = weibull_pdf(t_label, beta, eta, gamma_val)

    #t_peak = weibull_mode(beta, eta, gamma_val)
    #t_label = max(t_peak, gamma_val + eps)
    #f_label = weibull_pdf(t_label, beta, eta, gamma_val)

    plt.text(
        t_label,
        f_label * 1.05,
        f' $\beta = \{beta\}$ ',
        fontsize=14,
        ha='center',
        va='bottom'
    )

# Mark Mode, Median, MTTF
plt.axvline(weibull_mode(beta, eta, gamma_val), color='gray', linestyle='--', alpha=0.5)
plt.axvline(weibull_median(beta, eta, gamma_val), color='orange', linestyle='--', alpha=0.5)
plt.axvline(weibull_mttf(beta, eta, gamma_val), color='green', linestyle='--', alpha=0.5)

plt.xlabel('t', fontsize=14)
plt.ylabel('f(t)', fontsize=14)
plt.title('Щільність ймовірності розподілу Вейбула')
plt.legend(title=' $\beta$  values')
plt.tick_params(axis='both', which='major', labelsize=14)
plt.grid(True)
plt.tight_layout()
plt.show()

```

Рис. 6. Скрипт побудови графіка залежності впливу параметру форми на коефіцієнт
ВІДМОВ



НАУКОВА УСТАНОВА ТОВ «НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЦЕНТР АКАДЕМІЇ БУДІВНИЦТВА
УКРАЇНИ»

03037 Київ, вул. Освіти, 4. Kyiv, St. Education, 4

т. (050) 788 61 96

Email: ivan.pereginets@gmail.com

Вих. № 08/26
від «08» 04 2026 р.

ДОВІДКА ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційного дослідження

НЕЧИПОРУКА ВІКТОРА ГРИГОРОВИЧА

Результати дисертаційної роботи Нечипорука Віктора Григоровича на тему «**Вдосконалення сервісного обслуговування машин для будівництва доріг із врахуванням їх експлуатаційних показників**» впроваджені у практичну діяльність ТОВ «Науково-технічний центр Академії будівництва України» при виконанні науково-дослідних, проектних та інжинірингових робіт у сфері цифровізації будівельного виробництва. Основні наукові положення та практичні рекомендації дисертації використовуються під час розроблення цифрових моделей організації будівництва із застосуванням технологій інформаційного моделювання (BIM), зокрема при створенні **4D BIM-моделей**, що забезпечують інтеграцію тривимірної моделі об'єкта з календарним плануванням виконання будівельних робіт.

Запропоновані автором підходи щодо оцінювання технічного стану будівельних машин, прогнозування їх експлуатаційної надійності, оптимізації сервісного обслуговування та врахування експлуатаційних показників використовуються під час формування моделей роботи будівельної техніки, механізмів і транспортних засобів у цифровому середовищі управління проектами. Використання результатів дослідження дозволило підвищити обґрунтованість планування використання машин і механізмів, забезпечити більш точне визначення їх виробничого навантаження, мінімізувати ризики виникнення простоїв через технічні несправності, а також покращити якість календарного планування будівельних процесів. Практичне застосування розроблених підходів також сприяє підвищенню ефективності управління матеріально-технічними ресурсами під час реалізації інвестиційно-будівельних проєктів, удосконаленню цифрових моделей організації будівництва, розвитку концепції цифрового двійника будівельного майданчика та впровадженню сучасних методів управління життєвим циклом будівельної техніки.

Отримані результати мають практичну цінність і можуть бути рекомендовані для подальшого використання при виконанні науково-дослідних робіт, розробленні BIM-технологій організації будівництва, цифровізації управління будівельними проєктами та підготовці інженерних кадрів у галузі будівництва.

Директор

Академік Академії будівництва України,

кандидат технічних наук.



Іван Перегінець