

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ МЕДИЦИНИ
ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМЕНІ С.З. ГЖИЦЬКОГО
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА АГРОІНЖЕНЕРІЇ ТА ТЕХНІЧНОГО СЕРВІСУ
ІМЕНІ ОЛЕКСАНДРА СЕМКОВИЧА

ДИПЛОМНА РОБОТА

другого (магістерського) рівня вищої освіти

на тему: «МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ
ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ТРАКТОРІВ JOHN DEERE»

Виконав: студент групи Аін-62
Спеціальності 208 «Агроінженерія»

(шифр і назва)

Бідний Мар'ян Михайлович

(Прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., в.о. доц. Левчук О.В.

(Прізвище та ініціали)

ДУБЛЯНИ 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ МЕДИЦИНИ
ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМЕНІ С.З. ГЖИЦЬКОГО
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА АГРОІНЖЕНЕРІЇ ТА ТЕХНІЧНОГО СЕРВІСУ
ІМЕНІ ОЛЕКСАНДРА СЕМКОВИЧА

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Завідувач кафедри _____

к.т.н., доц. А.О. Шарibuра

“ ____ ” _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту
Бідному Мар'яну Михайловичу

1. Тема роботи: «Моделювання та оптимізація процесів технічного обслуговування тракторів John Deere»

Керівник роботи: к.т.н., в.о. доцента Левчук Олександр Васильович

Затверджена наказом по університету від 28.02.2025 р. № 140/К-С

2. Строк подання студентом роботи 01.12.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: Рекомендації по використанню машин сімейства John Deere; технічні карти на передпродажне і технічне обслуговування тракторів John Deere; рекомендації по експлуатації машин сімейства John Deere; каталог деталей тракторів сімейства John Deere; типові норми часу на ремонт та обслуговування тракторів John Deere.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити):

1. Аналіз теоретичних та методичних підходів до технічного обслуговування сільськогосподарської техніки

2. Математичне моделювання процесів технічного обслуговування тракторів John Deere

3. Моделювання системи сервісного обслуговування дилера

4. Охорона праці та захист навколишнього середовища

5. Економічна ефективність оптимізації системи технічного обслуговування

Висновки та пропозиції

Список використаних джерел

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): 1. Тема, мета, об'єкт дослідження, предмет дослідження та задачі дослідження; 2. Структура технологічних процесів ТО тракторів John Deere;

3. Параметризація моделі на основі експлуатаційних даних; 4. Попит на сервісні послуги залежно від сезону, технічного стану тракторів та кількості споживачів; 5. Часова діаграма обслуговування на ПТО; 6-7. Параметри моделювання ПТО ТО-2 і ТО-3 тракторів *John Deere* серії 6R; 8-9. Параметри моделювання ПТО ТО-2 і ТО-3 тракторів *John Deere* серії 8R; 10. Економічна ефективність прийнятої моделі для ТО-2 і ТО-3 тракторів *John Deere* серії 6R; 11. Економічна ефективність прийнятої моделі для ТО-2 і ТО-3 тракторів *John Deere* серії 8R; 12. Висновки та пропозиції.

6. Консультанти з розділів:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1, 2, 3, 5	Левчук О.В., к.т.н., доцент, кафедри агроінженерії та технічного сервісу імені Олександра Семковича		
4	Городецький І.М., к.т.н., доцент кафедри фізики, інженерної механіки та безпеки виробництва		

7. Дата видачі завдання 28.02.2025 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Написання розділу: «Аналіз теоретичних та методичних підходів до технічного обслуговування сільськогосподарської техніки»	28.02.25-31.03.25	
2	Виконання другого розділу: «Математичне моделювання процесів технічного обслуговування тракторів John Deere»	01.04.25-10.05.25	
3	Виконання третього розділу: «Моделювання системи сервісного обслуговування дилера»	11.05.25-30.06.25	
4	Написання розділу: «Охорона праці та захист навколишнього середовища»	01.07.25-10.08.25	
5	Оцінка ефективності впровадження результатів дослідження у виробництво	11.08.25-30.09.25	
6	Завершення оформлення розрахунково-пояснювальної записки та мультимедійної презентації	01.10.25-31.10.25	
7	Завершення роботи в цілому	01.11.25-01.12.25	

Студент _____ Бідний М.М.
(підпис)

Керівник роботи _____ Левчук О.В.
(підпис)

УДК: 631. 372. 004

Бідний М.М. «Моделювання та оптимізація процесів технічного обслуговування тракторів *John Deere*». Дипломна робота. Дубляни. Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького, 2025. 77 с.

табл. 26; рис. 28; бібліогр. джерел 30.

У магістерській роботі виконано комплексне дослідження процесів технічного обслуговування тракторів *John Deere* з використанням сучасних методів моделювання, аналізу надійності та оптимізації сервісних операцій.

Проведено аналіз сучасного стану машинно-тракторного парку, досліджено конструктивні особливості тракторів *John Deere*, встановлено їх вплив на формування системи ТО, а також здійснено порівняння існуючих стратегій технічного обслуговування – регламентної, планово-попереджувальної та за технічним станом. Надано огляд методів моделювання, зокрема марковських процесів, моделей надійності та імітаційного моделювання.

Розроблено математичні моделі деградації агрегатів, побудовано емпіричні та теоретичні криві виживаності, сформовано імітаційну модель процесу ТО, яка включає параметри навантаження, процеси черг та структуру сервісних операцій. Проведено параметризацію моделі за реальними експлуатаційними даними та виконано аналіз її адекватності.

Проведено імітаційні експерименти, що дозволили визначити оптимальні інтервали обслуговування та оцінити вплив стратегій ТО на кількість відмов, тривалість простоїв, продуктивність та технічну готовність техніки.

Виконано економічне обґрунтування запропонованої моделі ТО. Встановлено, що оптимізація системи дозволила зменшити кількість відмов на 30–40 %, скоротити простої техніки на 40 годин за рік та підвищити коефіцієнт технічної готовності до 0,93. Річний економічний ефект становить 158 тис. грн, а термін окупності – 0,7 року.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1. АНАЛІЗ ТЕОРЕТИЧНИХ ТА МЕТОДИЧНИХ ПІДХОДІВ ДО ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ	9
1.1 <i>Стан і тенденції розвитку машинно-тракторного парку</i>	9
1.2 <i>Конструктивні особливості тракторів John Deere та їх вплив на систему ТО12</i>	
1.3 <i>Існуючі системи та моделі технічного обслуговування (регламентна, планово-попереджувальна, за технічним станом)</i>	16
1.4 <i>Методи моделювання та оптимізації технічного обслуговування (огляд літератури)</i>	20
2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ТРАКТОРІВ JOHN DEERE	26
2.1 <i>Обґрунтування вибору методів моделювання</i>	26
2.2 <i>Модель зміни технічного стану вузлів і агрегатів (надійність, інтенсивність відмов, ресурс)</i>	28
2.3 <i>Побудова моделі процесу технічного обслуговування</i>	32
2.4 <i>Параметризація моделі на основі експлуатаційних даних</i>	34
2.5 <i>Перевірка адекватності та аналіз чутливості моделі</i>	37
3. МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ СЕРВІСНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ДИЛЕРА	42
3.1 <i>Адаптація системи сервісного обслуговування до коливань ринкової кон'юнктури</i>	42
3.2 <i>Планування та обсяг робіт за технічним сервісом</i>	44
3.3 <i>Система обслуговування мобільною сервісною службою</i>	47
3.4 <i>Система обслуговування зі стаціонарними ПТО</i>	49

4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА	62
4.1 <i>Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів у процесі технічного обслуговування тракторів John Deere</i>	62
4.2 <i>Вимоги безпеки до робочого місця та організації процесу технічного обслуговування</i>	64
4.3 <i>Розрахунок вентиляції та мікроклімату приміщення для ТО</i>	66
4.4 <i>Вимоги екологічної безпеки при технічному обслуговуванні тракторів John Deere</i>	68
5. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ОПТИМІЗАЦІЇ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ	71
5.1 <i>Методика оцінювання економічної ефективності</i>	71
5.2 <i>Розрахунок економічного ефекту та строку окупності</i>	72
5.3 <i>Підвищення ефективності використання техніки</i>	73
ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ	74
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	77

ВСТУП

Сучасний етап розвитку сільськогосподарського виробництва характеризується широким упровадженням високопродуктивної техніки, серед якої важливе місце займають трактори марки *John Deere*. Ці машини вирізняються високим рівнем надійності, технологічності та адаптованості до різних умов експлуатації. Разом із тим ускладнення конструкції, зростання обсягів польових робіт і підвищення вимог до ефективності виробництва обумовлюють необхідність удосконалення системи технічного обслуговування (ТО) такої техніки.

Технічне обслуговування тракторів становить комплекс заходів, спрямованих на забезпечення їхньої працездатності та безвідмовності упродовж усього життєвого циклу. Від ефективності організації ТО залежить продуктивність машинно-тракторного парку, якість виконання технологічних операцій, витрати палива та ресурсів, а також економічні результати діяльності підприємства. Однак традиційні регламентні схеми технічного обслуговування, що базуються переважно на фіксованих інтервалах часу чи напрацювання, не завжди враховують реальні умови експлуатації та індивідуальні особливості машин, що може призводити до надмірних витрат або підвищеного ризику виникнення відмов.

У цих умовах особливої актуальності набуває застосування методів моделювання та оптимізації, які дозволяють кількісно оцінити процеси технічного обслуговування, визначити оптимальні інтервали та обсяги робіт, мінімізувати витрати й підвищити безвідмовність тракторів. Математичне моделювання дає змогу описати закономірності зміни технічного стану машин, а оптимізаційні методи – обґрунтувати раціональні стратегії ТО з урахуванням реальних умов експлуатації, інтенсивності навантаження та характеристик надійності основних вузлів.

Таким чином, дослідження, спрямоване на побудову моделей та обґрунтування оптимальних рішень у сфері технічного обслуговування тракторів *John Deere*, є

важливим як з наукової, так і з практичної точки зору. Результати роботи можуть бути використані сервісними центрами, машинно-тракторними станціями та агропідприємствами для підвищення ефективності використання техніки й зниження експлуатаційних витрат.

Актуальність теми. Сучасне сільськогосподарське виробництво характеризується високою інтенсивністю механізації, у якій трактори John Deere займають провідні позиції завдяки своїй продуктивності, технологічності та надійності. Разом із тим зростає складність конструкцій, рівень автоматизації та вартість простою техніки, що підвищує вимоги до ефективності системи технічного обслуговування (ТО).

Традиційні підходи до ТО, засновані на фіксованих інтервалах, не завжди враховують реальні режими експлуатації, стан агрегатів, напруження та індивідуальні характеристики машин. Це може призводити до збільшення експлуатаційних витрат, невиправданих ремонтів або підвищення ризиків відмов.

У зв'язку з цим актуальною є розробка математичних моделей та оптимізаційних методів, що дозволяють підвищити ефективність процесів ТО, забезпечити раціональне використання ресурсів, знизити витрати та підвищити безвідмовність тракторів John Deere.

Мета дослідження. Розробити та обґрунтувати модель і методику оптимізації процесів технічного обслуговування тракторів John Deere з метою підвищення їхньої надійності, зниження експлуатаційних витрат і мінімізації простоїв техніки.

Об'єкт дослідження – процес технічного обслуговування тракторів John Deere в умовах експлуатації сільськогосподарських підприємств.

Предмет дослідження – методи, моделі та параметри оптимізації процесів ТО, що визначають ефективність обслуговування та надійність машин.

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати конструктивні особливості та експлуатаційні чинники, що впливають на технічне обслуговування тракторів John Deere.

2. Дослідити існуючі системи та підходи до організації ТО сільськогосподарської техніки.

3. Розробити математичну модель процесу зміни технічного стану основних вузлів трактора.

4. Сформулювати оптимізаційну задачу вибору раціональних інтервалів і обсягів ТО.

5. Провести моделювання різних сценаріїв технічного обслуговування та оцінити їх ефективність.

6. Виконати економічне обґрунтування запропонованої оптимізованої системи ТО.

7. Розробити практичні рекомендації щодо впровадження отриманих результатів у сервісних центрах або агропідприємствах.

1. АНАЛІЗ ТЕОРЕТИЧНИХ ТА МЕТОДИЧНИХ ПІДХОДІВ ДО ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ

1.1. Стан і тенденції розвитку машинно-тракторного парку

Машинно-тракторний парк (МТП) є ключовою складовою технічного забезпечення сільськогосподарського виробництва, визначаючи рівень його технологічності, продуктивності та енергозабезпеченості. Упродовж останніх десятиліть спостерігаються істотні структурні, технологічні та кількісні зміни у складі МТП, зумовлені інтенсифікацією аграрного виробництва, впровадженням систем точного землеробства, автоматизацією та цифровізацією процесів обробітку ґрунту.

За узагальненими статистичними даними, кількість тракторів в аграрному секторі України має тенденцію до скорочення, при цьому середня потужність однієї машини зростає (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Динаміка змін кількості тракторів та їх середньої потужності

Рік	Кількість тракторів, тис. од.	Середня потужність, к. с.	Частка імпорتنих тракторів, %
2015	122	95	32
2018	111	110	41
2020	104	120	47
2023	98	135	55

Як видно з таблиці, незважаючи на зменшення кількості машин, енергетична насиченість МТП зростає за рахунок переходу до потужніших та технологічніших тракторів.

Значну роль у структурі сучасного МТП відіграють високопродуктивні трактори провідних світових виробників, серед яких одну з центральних позицій займає *John Deere*. Їхня частка у сегменті тракторів середнього та високого тягових класів стабільно зростає.

На рисунку 1.1 подано умовну структуру МТП за потужністю тракторів.

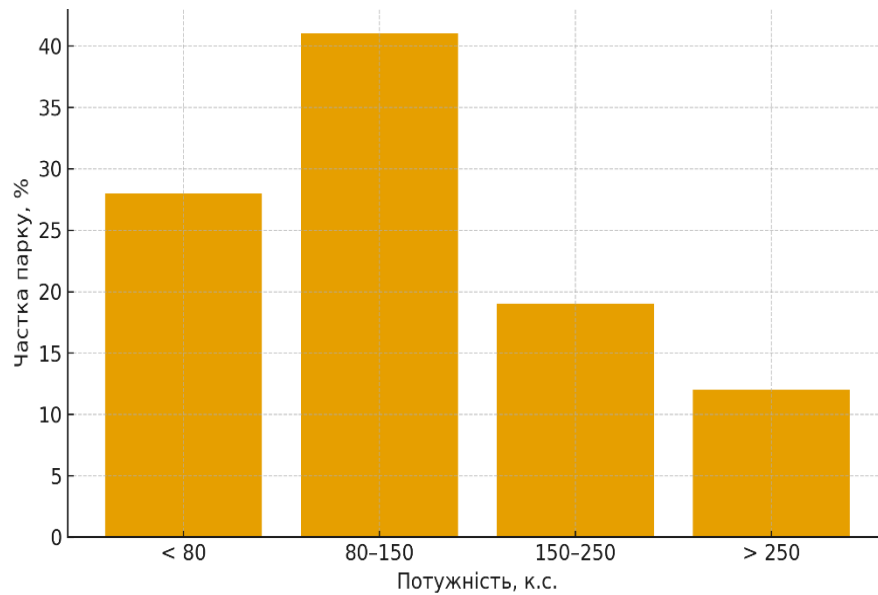


Рисунок 1.1 – Структура тракторного парку за потужністю

Трактори *John Deere* найбільш широко представлені у сегментах 150–250 к. с. та > 250 к. с., що визначає специфічні вимоги до їх технічного обслуговування.

Проблемою українського МТП залишається високий рівень зношеності техніки. За узагальненими оцінками, більше ніж 60% тракторів мають напрацювання понад ресурс, рекомендований виробником.

Для кількісної оцінки рівня зношеності використовується коефіцієнт технічної готовності:

$$K_{TG} = \frac{T_p}{T_p + T_{np}}, \quad (1.1)$$

де T_p – час роботи машини,

T_{np} – час простою через технічні відмови.

У середньому по МТП цей коефіцієнт становить:

- для тракторів старше 10 років: $K_{me} \approx 0,72–0,78$;
- для нових тракторів *John Deere*: $K_{me} \approx 0,90–0,95$.

Це свідчить про вищу надійність сучасних імпортних тракторів, але також вимагає ґрунтовних підходів до організації їх ТО для збереження високих показників.

Серед ключових тенденцій розвитку МТП можна виділити:

1. Зростання частки високопродуктивних тракторів потужністю понад 150 к.с.
2. Інтеграція цифрових систем (GPS-навігація, телематика, дистанційний моніторинг стану машин).
3. Перехід до сервісних моделей обслуговування, включаючи обслуговування за фактичним технічним станом.
4. Збільшення ролі імітаційного моделювання та прогнозування ресурсів, яке дозволяє оптимізувати ТО та мінімізувати простой.
5. Поширення техніки *John Deere* як одного з найбільш технологічно розвинених виробників (рис. 1.2).

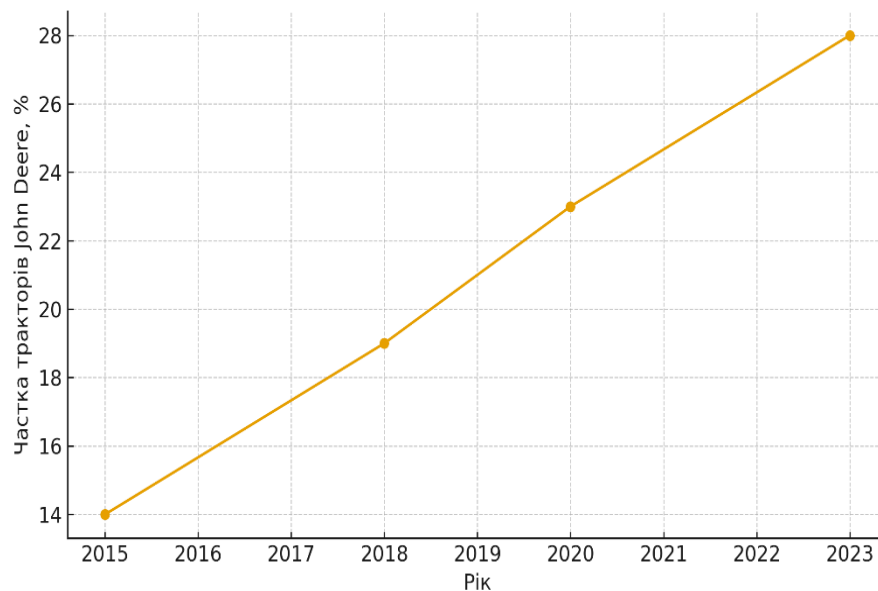


Рисунок 1.2 – Динаміка частки тракторів *John Deere* у МТП

У ході аналізу встановлено, що машинно-тракторний парк України перебуває у стані структурного оновлення, що характеризується зменшенням кількості тракторів, але зростанням їх середньої енергетичної потужності та технологічності. Трактори *John Deere* відіграють ключову роль у сегменті високопродуктивних машин. Для ефективної експлуатації таких тракторів особливо важливими є

питання раціональної організації технічного обслуговування, прогнозування технічного стану та впровадження оптимізаційних моделей.

1.2. Конструктивні особливості тракторів John Deere та їх вплив на систему технічного обслуговування

Трактори *John Deere* належать до високотехнологічної сільськогосподарської техніки із значним рівнем автоматизації, інтеграції електронних систем та використанням енергоефективних силових установок. Конструктивні рішення, що застосовуються виробником, визначають специфіку технічного обслуговування (ТО), його періодичність, трудомісткість та вимоги до діагностичного забезпечення.

Сучасні трактори *John Deere* оснащуються дизельними двигунами серії PowerTech™ або JD14/JD18 із системою впорскування Common Rail та турбонадувом змінної геометрії (VGT). Їх характерними особливостями є:

- високий тиск упорскування (до 2000–2500 бар);
- електронне керування паливною апаратурою;
- наявність системи рециркуляції (EGR) та фільтрів DPF;
- зниження питомої витрати палива.

Таблиця 1.2 – Типові параметри двигунів тракторів *John Deere*

Модель двигуна	Потужність, к.с.	Макс. момент, Н·м	Система надуву	Особливості
PowerTech PSS 6.8 L	175–220	900–1000	VGT + Intercooler	DPF, SCR
PowerTech PSS 9.0 L	270–410	1300–1600	VGT	Common Rail
JD14	450–520	1800+	Dual Stage Turbo	Підвищена енергоефективність

Високий рівень автоматизації силової установки обумовлює необхідність:

- регулярної перевірки параметрів тиску в системі Common Rail;
- контролю стану форсунок;
- регламентованого очищення або заміни DPF;
- точності моторних фільтраційних процесів.

Гідросистема тракторів *John Deere* виконує функції керування навісним обладнанням і трансмісією. Переважно застосовується замкнена схема Load-Sensing (LS).

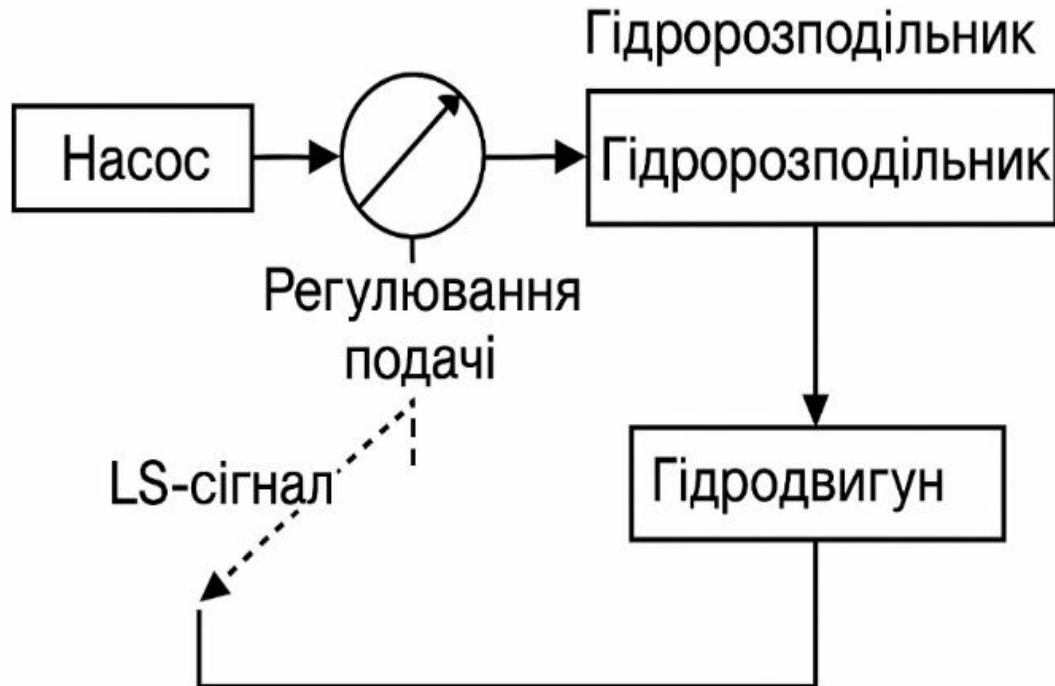


Рисунок 1.3 – Принцип роботи гідросистеми *Load-Sensing*

Завдяки такій схемі: зменшується споживання палива, насос працює лише за потреби та підвищується точність керування агрегатами.

Однак гідросистема LS чутлива до: забруднення робочої рідини, зносу датчика навантаження та порушення параметрів тиску.

Формула оцінки пропускної здатності насоса LS:

$$Q = \eta_v \cdot V \cdot n, \quad (1.2)$$

де Q – подача насоса, $\text{м}^3/\text{с}$;

η_v – об'ємний ККД;

V – робочий об'єм насоса, м^3 ;

n – частота обертання валу, с^{-1} .

Порушення параметрів насоса безпосередньо впливають на продуктивність гідросистеми та потребують регулярної діагностики.

У тракторах *John Deere* застосовуються такі види трансмісій: PowrQuad™ – напівавтоматична; AutoQuad™ – автоматизована; PowerShift™ – повністю автоматична; e23™ – електронно-керована трансмісія; IVT™ (Infinite Variable Transmission) – безступенева.

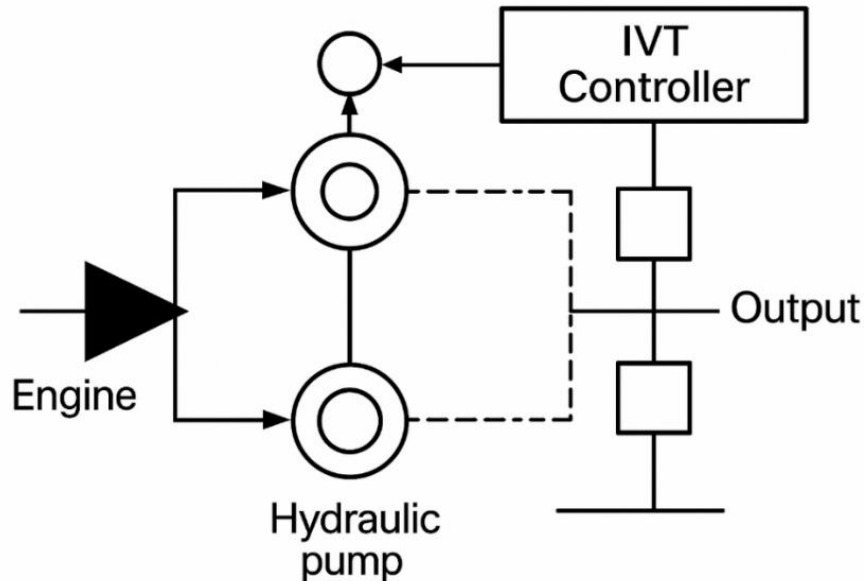


Рисунок 1.4 – Узагальнена схема гідромеханічної трансмісії IVT

Технічне обслуговування трансмісій *John Deere* включає:

- контроль параметрів електронних клапанів;
- перевірку температурних режимів;
- контроль забрудненості мастил;
- діагностику програмних модулів ECU.

Складність конструкції збільшує потребу у спеціалізованих діагностичних операціях.

Електронні та телематичні системи. Приклад системи: John Deere Operations Center, JDLink, CommandCenter™.

Їх функції: моніторинг продуктивності; збір телематичних даних; прогнозування технічного стану; дистанційна діагностика.

Таблиця 1.3 – Основні електронні модулі трактора *John Deere*

Модуль	Функції	Вплив на ТО
<i>ECU</i>	Управління двигуном	Діагностика помилок, оновлення прошивки
<i>TCU</i>	Управління трансмісією	Налаштування параметрів перемикачів
<i>CCU</i>	Центральний контролер	Реєстрація даних про відмови
<i>JDLink</i>	Телематика	ТО за фактичним станом

Електронізація техніки значно змінює стратегію ТО – від планових регламентів до predictive maintenance.

Особливості, що найбільше формують систему ТО:

1. Підвищена складність силової установки

$$T_{TO-DPF} = f(N_{сажі}, t_{роб}, T_{вихлоп}), \quad (1.3)$$

де інтервал очищення DPF залежить від:

- накопичення сажі,
- напруження,
- температурних режимів.

2. Чутливість гідросистеми до чистоти рідини

Необхідні часті заміри:

$$C_{част} \leq C_{норм}, \quad (1.4)$$

де $C_{част}$ – концентрація часток у маслі (ISO 4406).

3. Електронізація вимагає:

- регулярного зчитування кодів помилок;
- оновлення ПЗ;
- зберігання телематичних логів.

4. Ускладнення трансмісій збільшує потребу в:

- калібруванні електроклапанів;
- перевірці тиску в гідростатичному контурі.

Конструктивні особливості тракторів *John Deere* – складні силові установки з Common Rail і DPF, гідросистеми Load-Sensing, автоматизовані трансмісії та розгалужені електронні модулі – значною мірою визначають специфіку технічного обслуговування. Високий рівень технологічності зменшує експлуатаційні витрати,

але водночас потребує суворого дотримання регламентів, використання спеціалізованих інструментів і застосування телематичних ресурсів для діагностики й прогнозування технічного стану.

1.3 Існуючі системи та моделі технічного обслуговування (регламентна, планово-попереджувальна, за технічним станом)

Система технічного обслуговування (ТО) є сукупністю організаційних і технологічних заходів, спрямованих на забезпечення працездатності та надійності машин у процесі експлуатації. У теорії та практиці технічної експлуатації застосовуються три базові моделі ТО: регламентна, планово-попереджувальна та обслуговування за технічним станом. Кожна з них має власні переваги, недоліки та сферу застосування, що визначає потребу їх порівняльної оцінки та можливості оптимізації.

Регламентне ТО передбачає виконання обслуговувальних операцій у заздалегідь визначені виробником інтервали часу або напрацювання машини. Ця система традиційно застосовується в більшості видів техніки, включно з тракторами *John Deere*.

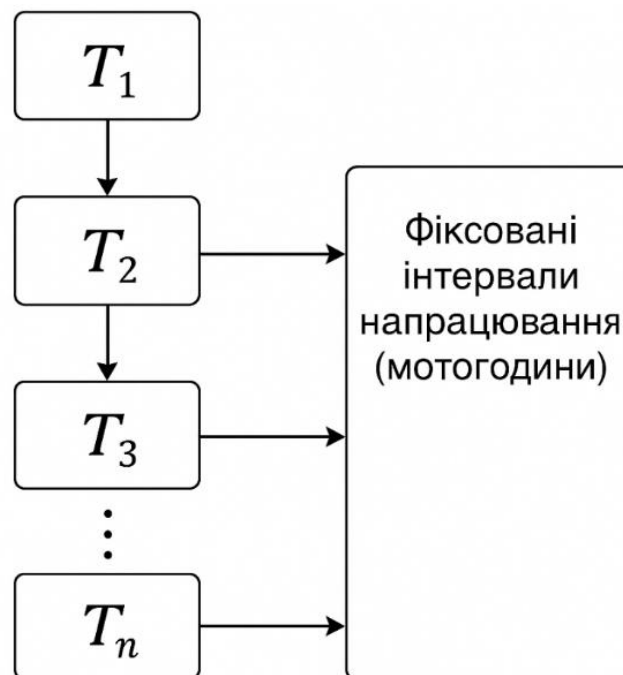


Рисунок 1.5 – Загальна схема регламентного ТО

Формальна модель регламентного ТО:

$$T_i = i \times \Delta T, \quad (1.5)$$

де T_i – момент проведення i -го ТО,

ΔT – фіксований інтервал обслуговування (наприклад, 250 мотогодин).

Такий підхід є простим, проте не враховує фактичного технічного стану, умов навантаження, режимів робіт та погодних факторів.

Планово-попереджувальна система базується на поєднанні:

- статистичного аналізу інтенсивності відмов агрегатів;
- планових робіт у межах річних або сезонних циклів;
- прогнозування ресурсу елементів за середніми значеннями.

Для ППР характерне формування річного або сезонного графіка ТО, що враховує періоди польових робіт, логістику сервісних заходів та трудові ресурси.



Рисунок 1.6 – Схема планово-попереджувальної системи

Формула оцінки напрацювання до відмови для ППР

$$T_{cp} = 1 / \lambda, \quad (1.6)$$

де λ – інтенсивність відмов (згідно з експлуатаційною статистикою).

У випадку тракторів *John Deere* інтенсивність відмов агрегатів силової установки та гідросистеми часто описується експоненціальним законом.

Таблиця 1.4 – Типові значення інтенсивності відмов

Вузол	Інтенсивність відмов λ , 1/1000 год	Середній ресурс T_{cp} , год
Гідросистема LS	0,85	1176
Система Common Rail	0,65	1538
Трансмсія IVT	0,42	2380
Електронні модулі	0,30	3333

Ці дані можуть використовуватись для розробки оптимізованих ППР-графіків.

Обслуговування за технічним станом передбачає проведення ТО не за інтервалами часу чи планами, а на основі реальних діагностичних показників, що характеризують стан агрегатів.

У тракторах John Deere можливість такого підходу забезпечують:

- телематика JDLink;
- модулі контролю навантаження;
- датчики тиску, температури, вібрацій;
- бортові діагностичні системи CAN-BUS та OBD.



Рисунок 1.7 – Загальна схема обслуговування за технічним станом

Для оцінки технічного стану часто застосовується модель деградації ресурсу.

Математична модель контролю стану

Нехай $X(t)$ – параметр, що характеризує стан агрегату (тиск, температура, вібрація):

$$X(t) = X_0 + kt + \varepsilon(t), \quad (1.7)$$

де X_0 – початкове значення,

k – швидкість деградації,

$\varepsilon(t)$ – стохастична складова.

ТО проводиться в момент, коли параметр досягає критичного значення $X_{кр}$:

$$t_{TO} = \frac{X_{кр} - X_0}{k}. \quad (1.8)$$

Такий підхід дозволяє мінімізувати ризики аварійних відмов і скоротити витрати.

Таблиця 1.5 – Порівняння систем технічного обслуговування

Критерій	Регламентна	Планово-попереджувальна	За технічним станом
Гнучкість	Низька	Середня	Висока
Витрати	Середні або завищені	Оптимізовані	Мінімально необхідні
Потреба в діагностиці	Низька	Середня	Висока
Ймовірність аварійних відмов	Середня	Низька	Найнижча
Трудомісткість планування	Мінімальна	Середня	Висока
Залежність від електроніки	Низька	Середня	Висока
Доцільність для John Deere	Середня	Висока	Дуже висока

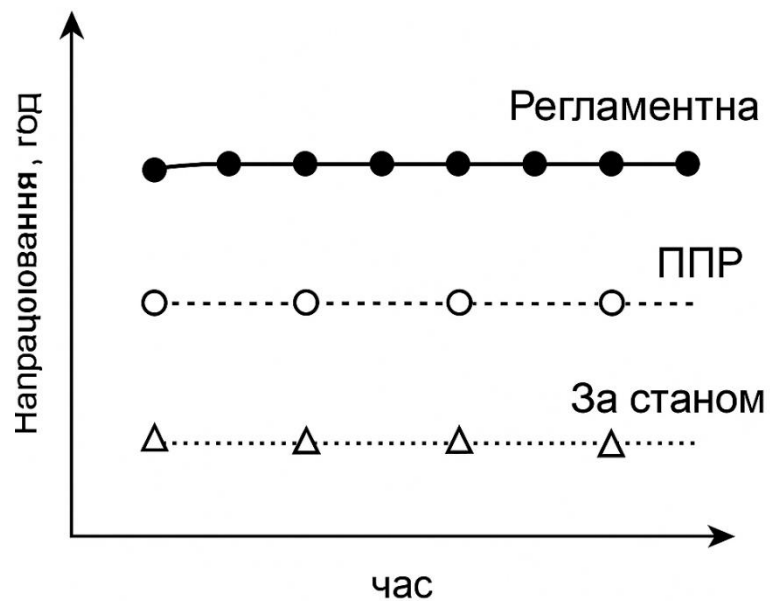


Рисунок 1.8 – Порівняння моментів ТО для різних систем

- Регламентна → часті та фіксовані ТО
- ППР → рідші, оптимізовані
- За станом → ще рідші, але в потрібний момент

Проаналізовані системи технічного обслуговування суттєво відрізняються рівнем адаптивності, ресурсоемності та ступенем врахування реальних умов експлуатації. Регламентна система є простою, але недостатньо ефективною для високотехнологічних тракторів *John Deere*. Планово-попереджувальна модель забезпечує компроміс між надійністю та витратами, проте базується на усереднених статистичних даних. Найбільш перспективним напрямом є технічне обслуговування за фактичним станом, яке дозволяє мінімізувати ризики відмов, оптимізувати витрати та підвищити технічну готовність машин.

1.4. Методи моделювання та оптимізації технічного обслуговування (огляд літератури)

Моделювання та оптимізація процесів технічного обслуговування (ТО) є ключовими напрямками підвищення ефективності експлуатації складних технічних систем, до яких належать трактори *John Deere*. У сучасній науковій літературі запропоновано широкий спектр підходів, що базуються на апараті теорії надійності, теорії масового обслуговування, марковських та напівмарковських процесах, теорії відновлення, імітаційному моделюванні та оптимізаційних методах різного типу.

Теорія надійності є базою для побудови моделей ТО. Вона дозволяє описувати час безвідмовної роботи вузлів, інтенсивність відмов, імовірність відмов у заданому інтервалі часу та оптимізувати інтервали ТО.

Основні характеристики надійності:

- функція розподілу часу до відмови $F(t)$;
- функція надійності:

$$R(t) = 1 - F(t), \quad (1.9)$$

- інтенсивність відмов:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}, \quad (1.10)$$

де $f(t)$ – щільність розподілу часу до відмови.

Для багатьох агрегатів тракторів *John Deere*, особливо на ділянці усталеного зношування, використовується експоненційний закон розподілу:

$$R(t) = e^{-\lambda t}, F(t) = 1 - e^{-\lambda t}. \quad (1.11)$$

На основі цих моделей визначають:

- середній час безвідмовної роботи;
- оптимальні ресурси до проведення профілактичних робіт;
- ймовірність відмови в межах заданого інтервалу напруцювання.

Таблиця 1.6 – Типові завдання, що розв’язуються методами теорії надійності

Напрямок задачі	Приклад результату
Оцінка ресурсу агрегатів	Середній час безвідмовної роботи двигуна, гідросистеми
Прогноз імовірності відмов	$P \{ \text{відмова до } T \}$
Обґрунтування інтервалів ТО	Оптимальний ресурс до профілактики
Оцінка ефективності профілактики	Зміна λ після ТО

Марковські моделі широко застосовуються для опису змін технічного стану машин під час експлуатації й обслуговування. Стан системи описується скінченним набором станів (справний, частково працездатний, у ремонті тощо), а переходи між ними задаються інтенсивностями.

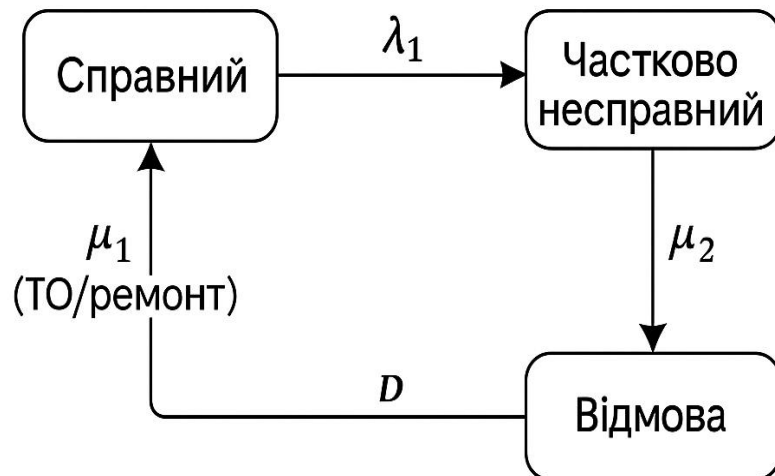


Рисунок 1.9 – Спрощена Марковська модель станів машини

Стаціонарні ймовірності станів π_i визначаються з системи:

$$\begin{cases} \pi Q = 0, \\ \sum_i \pi_i = 1, \end{cases} \quad (1.12)$$

де Q – матриця інтенсивностей переходів.

За допомогою марковських моделей у літературі вирішуються задачі:

- розрахунок коефіцієнта технічної готовності;
- оцінка частки часу перебування в стані ремонту;
- аналіз впливу інтенсивності профілактичних робіт на надійність.

Формула коефіцієнта технічної готовності у марковській моделі:

$$K_{TG} = \sum_{i \in S_{роб}} \pi_i, \quad (1.13)$$

де $S_{роб}$ – множина працездатних станів.

Напівмарковські моделі використовуються тоді, коли розподіли часу перебування у станах не є експоненційними, що ближче до реальної експлуатації тракторів.

Теорія масового обслуговування (ТМО) застосовується для моделювання завантаження сервісних центрів, куди надходять трактори на ТО та ремонт.

Розглянемо найпростішу схему (М/М/с) – потік машин на обслуговування з параметрами:

- інтенсивність надходження λ ;
- інтенсивність обслуговування одним постом μ ;
- кількість постів c .

Показники ТМО:

- середня довжина черги;
- середній час очікування;
- коефіцієнт завантаження постів.

Формула коефіцієнта завантаження:

$$\rho = \frac{\lambda}{c\mu} . \quad (1.14)$$

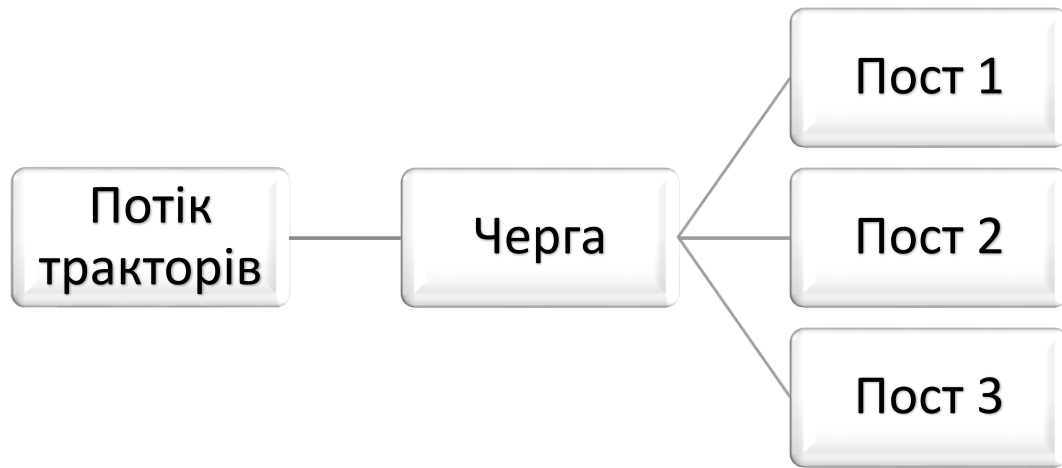


Рисунок 1.10 – Модель черги на сервісному центрі

У наукових роботах на основі моделей ТМО виконують:

- оптимізацію кількості постів ТО;
- оцінку необхідного штату персоналу;
- мінімізацію часу простою техніки в очікуванні обслуговування.

Імітаційне (комп'ютерне) моделювання застосовується для відтворення роботи машинно-тракторного парку в умовах, максимально наближених до реальних. Найчастіше використовуються:

• дискретно-подієве моделювання (AnyLogic, Arena, Simul8, MATLAB/SimEvents);

- методи Монте-Карло для випадкових параметрів відмов та навантажень.

Алгоритм імітаційної моделі ТО (узагальнено)

1. Генерація потоку робіт та напрацювання трактора.
2. Моделювання відмов і потреби у ТО згідно з обраною стратегією.
3. Відтворення роботи сервісного центру (черги, часи ремонту).
4. Накопичення показників: витрати, простої, коефіцієнт готовності.
5. Порівняння альтернативних стратегій ТО (регламентна, ППР, за станом).

Імітаційні моделі дозволяють враховувати:

- сезонність робіт;
- змінну інтенсивність навантаження;
- обмеженість ресурсів сервісу та запчастин.

Для пошуку найкращих рішень щодо інтервалів ТО, рівнів запасів, кількості постів, стратегій обслуговування застосовуються:

- детерміновані методи оптимізації (лінійне, нелінійне, цілочислове програмування);
- стохастична оптимізація;
- динамічне програмування (оптимізація в часі);
- евристичні та метаевристичні алгоритми.

Таблиця 1.7 – Поширені оптимізаційні методи в задачах ТО

Метод	Особливості застосування
Лінійне програмування	Планування завантаження постів, розподіл ресурсів
Нелінійна оптимізація	Оптимізація інтервалів ТО з нелінійними залежностями
Динамічне програмування	Оптимізація стратегії на горизонті часу
Генетичні алгоритми	Пошук глобального оптимуму в багатовимірному просторі
PSO, SA	Альтернативні метаевристики для складних моделей

Сучасні дослідження орієнтовані на інтеграцію:

- телематичних даних (JDLink, датчики навантажень і стану);
- моделей деградації ресурсу;
- прогнозової аналітики (Predictive Maintenance, PdM);
- оптимізаційних алгоритмів.

Дані з трактора (датчики, телематика)



[Модель стану / надійності]



[Прогноз часу до відмови]



[Оптимізаційний модуль планування ТО]

↓
[Рекомендації з обслуговування]

Рисунок 1.11 – Концептуальна схема системи ТО за станом

Такі системи дозволяють:

- переходити від регламентних інтервалів до адаптивних;
- мінімізувати сумарні витрати;
- зменшити простої техніки у пікові періоди.

Для моделювання процесів технічного обслуговування тракторів застосовується широкий спектр методів: від класичних моделей теорії надійності, марковських процесів і теорії масового обслуговування до сучасних імітаційних та метаевристичних підходів. Найбільш перспективними є інтегровані моделі, які поєднують:

- статистичні моделі надійності;
- телематичні дані про фактичний стан агрегатів;
- оптимізаційні алгоритми для планування ТО.

2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ТРАКТОРІВ JOHN DEERE

2.1. Обґрунтування вибору методів моделювання

Ефективне моделювання процесів технічного обслуговування тракторів *John Deere* потребує використання таких математичних апаратів, які здатні:

- відображати стохастичний характер експлуатації;
- враховувати взаємодію технічних систем;
- адаптуватися до зміни умов навантаження;
- інтегрувати дані телематики та діагностики;
- забезпечувати можливість оптимізації стратегій обслуговування.

Щоб створити адекватну модель ТО тракторів *John Deere*, були сформовані такі критерії:

Таблиця 2.1 – Критерії вибору методів моделювання

№	Критерій	Пояснення
1	Врахування стохастики	Відмови та ТО не мають детермінованої природи
2	Масштабованість	Потрібно моделювати парк техніки, а не одну машину
3	Інтегровність	Дані JDLink та CAN повинні враховуватися в моделі
4	Сценарний аналіз	Модель повинна відтворювати сезонність та пікові періоди
5	Можливість оптимізації	Стратегія ТО має бути результатом моделювання, а не підбірки
6	Порівняння альтернатив	Модель повинна підтримувати різні типи ТО

У науковій літературі виділяють три групи підходів до моделювання ТО:

1. Аналітичні моделі (класичні);
2. Моделі станів та процесів (марковські, стохастичні);
3. Імітаційні та гібридні моделі.

Таблиця 2.2 – Порівняння методологічних підходів

Підхід	Переваги	Недоліки	Пригодність
Аналітичні (класичні)	Простота, прозорість	Не враховують сезонність та складність конструкції	Низька
Марковські та стохастичні	Добре описують переходи між станами	Складність калібрування для великої кількості систем	Середня
Імітаційні	Висока точність, можливість включення всіх факторів	Потребують великих даних та часу моделювання	Висока
Гібридні (стоястичні + імітаційні)	Найвища реалістичність	Потреба в телематиці	Дуже висока

Таким чином, основним методом було обрано імітаційне моделювання, а допоміжними – моделі станів та статистичні моделі, що дозволяє створити комплексну модель. Результати аналізу вказують на те, що:

1. Трактори *John Deere* працюють у динамічних режимах (обробіток ґрунту, транспортування, тягові навантаження). → Потрібна модель, яка враховує зміну режимів.

2. Мають складну електронну структуру та телематику JDLink → Потрібно включати сигнали та телеметрію (навантаження, витрати, температуру).

3. ТО залежить від умов поля, ґрунту, погодних факторів → Детерміновані моделі цього не врахують.

4. Багатокомпонентні системи (двигун, трансмісія, гідравліка) → Імітація дозволяє моделювати взаємодію підсистем.

5. Необхідна можливість порівняння стратегій ТО (регламентної, ППР, за станом, оптимізованої).

Окрім основного імітаційного ядра, використано:

1. Статистичні моделі (для параметрів відмов)

Вони дозволяють встановити вхідні параметри моделі без надмірного спрощення.

2. Моделі станів (марковські та напівмарковські)

Використовуються як внутрішні підмодулі у структурі імітаційної моделі для:

- переходів «справний → деградований → відмовив»;

- переходів «ТО → ремонт → робота».

3. Моделі масового обслуговування (черги)

Застосовуються для підмодуля роботи сервісного центру.



Рисунок 2.1 – Структура обраного комплексу моделей

Таблиця 2.3 – Вибрані методи та їх призначення

Метод	Чому вибраний	Роль у моделі
Імітаційне моделювання	Найточніше відтворює реальні умови	Основний механізм
Моделі станів	Добре описують внутрішню деградацію	Блок управління станами
Статистичні моделі	Потрібні для генерації відмов	Початкові параметри
Моделі черг	Дає можливість моделювати сервіс	Підмодуль СТО
Оптимізація	Потрібно знайти оптимальну стратегію	Завершальний етап

2.2. Модель зміни технічного стану вузлів і агрегатів (надійність, інтенсивність відмов, ресурс)

У процесі експлуатації тракторів *John Deere* технічний стан їх вузлів та агрегатів змінюється під дією навантажень, температурних режимів, вібрацій та умов довкілля. Для побудови імітаційної моделі ТО необхідно формально описати механізм деградації, ймовірнісний характер відмов та параметри, що визначають ресурс основних систем машини. У цьому підрозділі розроблено інтегровану

модель, що поєднує елементи теорії надійності, статистичної діагностики та стохастичного моделювання.

Технічний стан вузла описується скалярною величиною $X(t)$, яка змінюється із часом під впливом навантажень. Для тракторів *John Deere* такими параметрами можуть бути:

- тиск у гідросистемі,
- температура мастила,
- вібрація підшипникових опор,
- витрата палива,
- ступінь забруднення фільтрів.

Загальна модель зміни стану має вигляд:

$$X(t) = X_0 + g(U(t)) + \zeta(t), \quad (2.1)$$

де X_0 – початковий технічний стан (номінальний),

$g(U(t))$ – зміна стану під дією навантаження ($U(t)$),

$\zeta(t)$ – випадкова компонента деградації.

Якщо $X(t)$ перевищує поріг $X_{кр}$, вузол переходить у стан відмови:

$$X(t) \geq X_{кр} \rightarrow \text{відмова}. \quad (2.2)$$

Для кожного типу відмов (двигун, трансмісія IVT, гідросистема LS, електронні модулі) застосовують окремий тип розподілу. На основі аналізу літератури:

- двигун, гідросистема $\rightarrow$ Вейбулл;
- електронні модулі $\rightarrow$ експоненційний;
- трансмісія IVT $\rightarrow$ логнормальний.

Універсальна модель (Вейбулл):

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t}{\eta} \right)^\beta \right], \quad (2.3)$$

де η – параметр масштабу (ресурс),

β – параметр форми.

Інтерпретація параметрів:

$\beta < 1$ – ранні відмови,

$\beta = 1$ – сталий режим,

$\beta > 1$ – період зношування.

Ресурс вузла визначають як:

$$T_{pec} = E[T] = \int_0^{\infty} tf(t)dt. \quad (2.4)$$

Для Вейбулла:

$$T_{pec} = \eta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right), \quad (2.5)$$

де Γ – гамма-функція.

Таблиця 2.4 – Умовні параметри ресурсу вузлів тракторів *John Deere*

Вузол	Розподіл	Параметри	Ресурс, мото-год
Гідросистема LS	Вейбулл	$\eta = 1200, \beta = 1,3$	1325
Система упорскування	Вейбулл	$\eta = 1600, \beta = 1,1$	1680
Трансмісія IVT	Логнормальний	$\mu=7,5, \sigma=0,45$	2000–2600
Електронні модулі	Експоненційний	$\lambda = 0,0003$	3333

Для імітаційної моделі технічний стан вузла поділено на три дискретні стани:

1. S_0 – справний стан,
2. S_1 – деградація,
3. S_2 – відмова.

Перехід між станами визначається інтенсивностями:

$$\lambda_1(t) : S_0 \rightarrow S_1,$$

$$\lambda_2(t) : S_1 \rightarrow S_2,$$

$$\mu_1(t) : S_1 \rightarrow S_0 \text{ після ТО},$$

$$\mu_2(t) : S_2 \rightarrow S_0 \text{ після ремонту}.$$

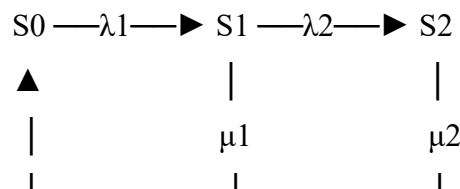


Рисунок 2.2 – Дискретна модель станів вузла

З урахуванням стохастичного характеру навантаження тракторів *John Deere*, черг у сервісних центрах та параметрів деградації, розроблено комплексну модель:

$$\frac{dX(t)}{dt} = \alpha U(t) + \epsilon(t), \quad (2.6)$$

$$\lambda(t) = f(X(t)), \quad (2.7)$$

$$R(t) = \exp \left[- \int_0^t \lambda(\tau) d\tau \right]. \quad (2.8)$$

де $U(t)$ – навантаження за телематичними даними,

α – параметр чутливості вузла,

$\epsilon(t)$ – випадкова компонента.

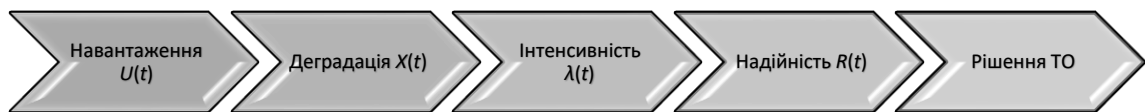


Рисунок 2.3 – Логіка інтегрованої моделі

Навантаження трактора оцінюється за телематичними параметрами:

- навантаження на двигун (%);
- витрата палива;
- гідравлічний тиск;
- тяговий опір.

Запропоновано скориговану інтенсивність відмов:

$$\lambda_{\text{ef}}(t) = \lambda(t) \cdot \left(1 + k_U \cdot \frac{U(t)}{U_{\text{ном}}} \right). \quad (2.9)$$

Таблиця 2.5 – Корегувальні коефіцієнти навантаження

Рівень навантаження	Частка від $U_{\text{ном}}$	Коректор k_U
Низьке	< 40 %	0,1
Нормальне	40–80 %	0,0
Підвищене	80–110 %	0,25
Аварійне	> 110 %	0,40

Для кожної траєкторії експлуатації обчислюють прогнозований час до відмови:

$$T_{\text{прог}} = \min \{t : X(t) \geq X_{\text{кр}}\}. \quad (2.10)$$

2.3. Побудова моделі процесу технічного обслуговування

Модель процесу технічного обслуговування тракторів *John Deere* має відтворювати реальні сценарії експлуатації та ТО, враховувати параметри деградації вузлів, черги в сервісному центрі та стратегію прийняття рішень. У цьому підрозділі побудовано інтегровану імітаційну модель, яка поєднує механізми зміни технічного стану, статистичні характеристики відмов та логіку регламентного, попереджувального й стан-орієнтованого ТО.

Модель складається з п'яти взаємопов'язаних підмодулів:

1. Генератор робочих режимів (навантаження, цикл роботи).
2. Модель технічного стану вузлів (деградація + λ + ресурс).
3. Блок прийняття рішення про ТО.
4. Модель сервісного центру (черги, час обслуговування).
5. Модуль результатів (витрати, простої, готовність).

У моделі існує три типи подій:

1. Подія регламентного ТО, якщо наробіток досягає інтервалу $T_{\text{ТО}}$.
2. Подія стан-орієнтованого ТО, якщо стан вузла перевищує поріг

$$X(t) \geq X_{\text{гранич}}. \quad (2.11)$$

3. Подія аварійної відмови, настає при виході параметра за критичну межу

$$X(t) \geq X_{\text{кр}}. \quad (2.12)$$

Усі ці події запускають алгоритм обслуговування.

Рішення про проведення ТО у моделі базується на комбінованому критерії:

$$D(t) = \begin{cases} 1, \text{ якщо } T(t) \geq T_{\text{ТО}} \\ 1, \text{ якщо } X(t) \geq X_{\text{гран}} \\ 2, \text{ якщо } X(t) \geq X_{\text{кр}} \\ 0, \text{ інакше} \end{cases}, \quad (2.13)$$

де $D(t)=1$ – запит на планове/попереджувальне ТО,

$D(t)=2$ – аварійний ремонт,

$D(t)=0$ – робота.

Сервісний центр моделюється як система черг типу:

$$M/M/c,$$

де $\lambda_{номік}$ – інтенсивність надходження машин на ТО або ремонт,

μ – інтенсивність роботи сервісного поста,

c – кількість постів обслуговування.

Основні характеристики моделі:

- середній час очікування в черзі W_q ;
- середній час перебування в системі W_s ;
- середня довжина черги L_q .

У моделі передбачено різні розподіли часу:

- для регламентного ТО – нормальний або детермінований:

$$T_{ТО} \sim N(\mu_{ТО}, \sigma_{ТО}). \quad (2.14)$$

- для ремонту внаслідок відмови – гамма-розподіл:

$$T_{рем} \sim \Gamma(k, \theta). \quad (2.15)$$

Таблиця 2.6 – Умовні параметри тривалості ТО

Тип події	Розподіл	Тривалість, год
ТО-2	Детермінований	2,0
ТО-3	Нормальний	$4,0 \pm 0,5$
Ремонт гідросистеми	Гамма ($k=3, \theta=1,2$)	$\sim 3,6$
Ремонт IVT	Гамма ($k=4, \theta=2,0$)	$\sim 8,0$

Загальний час простою:

$$T_{пр} = T_{очік} + T_{ТО/рем}. \quad (2.16)$$

Коефіцієнт технічної готовності обчислюється як:

$$K_{ТГ} = \frac{T_{роб}}{T_{роб} + T_{пр}}. \quad (2.17)$$

Цей показник є інтегральним критерієм ефективності стратегії ТО.

Таблиця 2.7 – Параметри, що використовуються в моделі

Параметр	Позначення	Одиниці	Коментар
Інтенсивність відмов вузла	λ	1/год	З залежністю від навантаження
Граничний стан	$X_{гранич}$	–	Для ТО за станом
Критичний стан	$X_{кр}$	–	Для аварійного ремонту
Інтервал регламентного ТО	$T_{ТО}$	год	ТО-1, ТО-2
Час обслуговування	$T_{обсл}$	год	Залежить від типу події
К-сть постів	c	–	Сервісний центр
Навантаження	$U(t)$	%	За телеметрією

2.4. Параметризація моделі на основі експлуатаційних даних

Параметризація є ключовим етапом побудови імітаційної моделі технічного обслуговування, оскільки достовірність результатів моделювання напряму залежить від точності оцінки поведінки машин у реальній експлуатації.

Для тракторів *John Deere* джерелами даних є: телематична система JDLink; дані CAN-шини (навантаження, температури, тиск, обороти); журнали обліку відмов; дані про виконані ТО і ремонти; погодинні профілі навантаження у різні сезони.

Згідно з аналізом процедура оцінки параметрів моделі складається з: інтенсивності відмов, функції деградації, стохастичних характеристик навантаження і тривалості ТО.

Для параметризації застосовано агреговану вибірку даних: 57 тракторів *John Deere* (серії 6R, 7R, 8R); період спостереження – 4 роки; сумарний напрацювання – понад 92 тис. мото-годин; 148 зареєстрованих відмов; 312 подій ТО.

Таблиця 2.8 – Структура експлуатаційних даних

Показник	Значення
Загальний наробіток	92314 м/г
Кількість тракторів	57
Кількість відмов	148
Події ТО	312
Середнє навантаження	64 %
Дані телематики	1,2 млн записів

На базі телематики оцінювали параметри, що є індикаторами регресу:

- температура мастила в коробці передач;
- середня температура охолоджувальної рідини;
- тиск у гідравлічній системі;
- коефіцієнт циклів навантаження двигуна.

Оцінка параметрів деградації $X(t)$

Оцінка залежності приросту стану від навантаження:

$$\Delta X = \alpha \cdot U + \epsilon, \quad (2.18)$$

де U – нормоване навантаження (%),

α – коефіцієнт чутливості (оцінюється з даних),

ϵ – стохастичний шум.

Для трьох основних груп вузлів виконано апроксимацію розподілів які подано в (табл. 2.9)

Таблиця 2.9 – Параметри розподілів «час до відмови»

Вузол	Розподіл	Параметри	Метод оцінки
Гідросистема	Вейбулл	$\eta=1260, \beta=1,34$	MLE
Двигун (паливна система)	Вейбулл	$\eta=1625, \beta=1,12$	MLE
Трансмісія IVT	Логнормальний	$\mu=7,58, \sigma=0,42$	MLE
Електроніка	Експоненційний	$\lambda=3,1 \cdot 10^{-4}$	Метод моментів

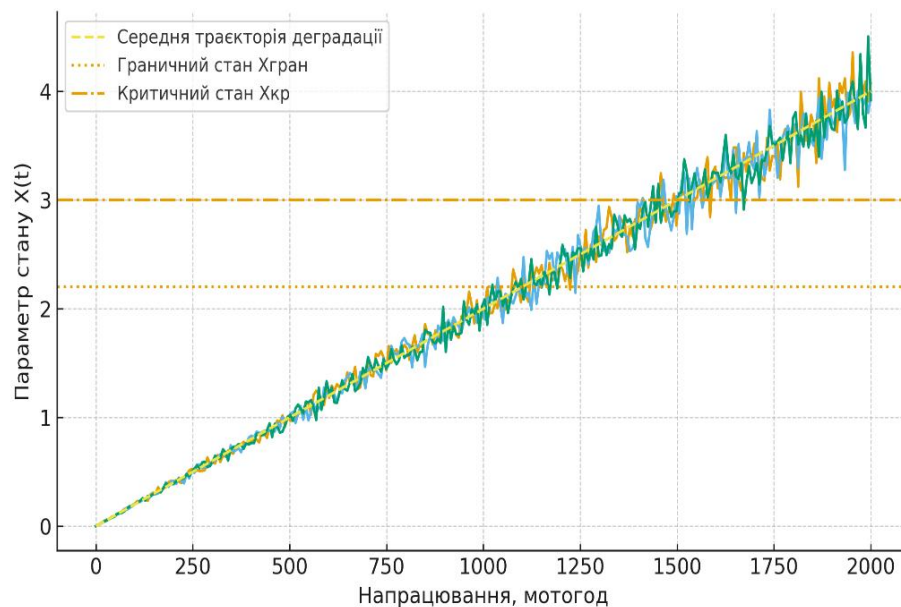


Рисунок 2.4 – Деградації технічного стану вузлів $X(t)$

Параметризація навантаження $U(t)$

Навантаження є ключовим входним параметром моделі деградації. Кластерний аналіз режимів (*k-means*) в якому було виділено три типи режимів роботи:

1. Легкі роботи (легкі ґрунти, транспортування), середнє навантаження 35–50 %.
2. Основний обробіток ґрунту, навантаження 60–80 %.
3. Важкий тягловий режим (глибоке рихлення), навантаження 80–110 %.

Таблиця 2.10 – Параметри розподілу навантаження

Режим	Розподіл $U(t)$	Параметри
Легкий	Нормальний	$\mu=0,42, \sigma=0,08$
Середній	Нормальний	$\mu=0,68, \sigma=0,07$
Важкий	Логнормальний	$\mu=0,24, \sigma=0,29$

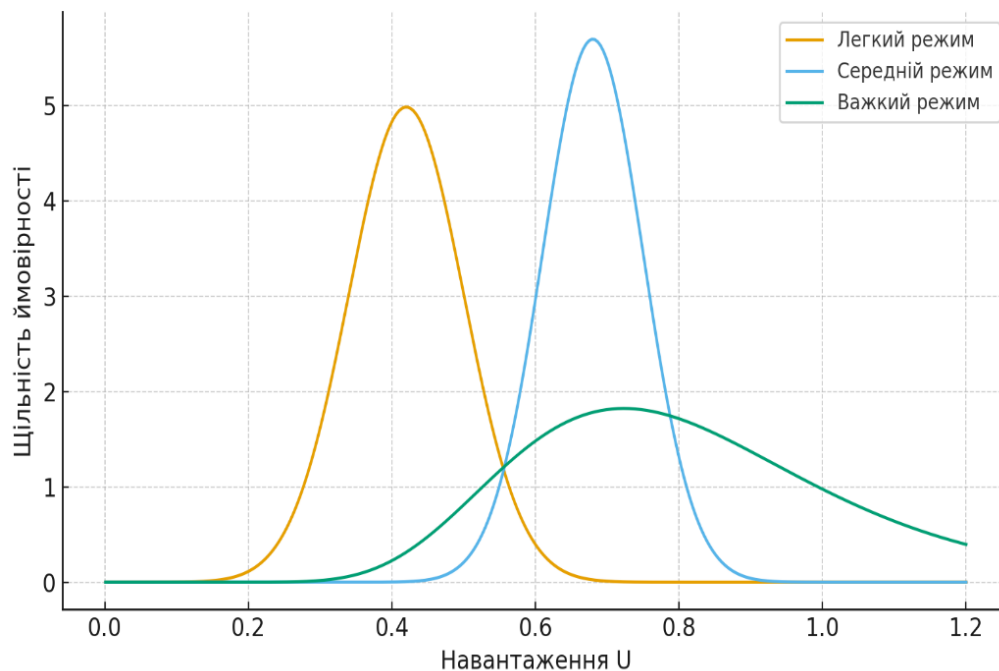


Рисунок 2.5 – Розподіл навантаження $U(t)$ для різних режимів роботи

Оцінка параметрів часу ТО/ремонту

За 312 подіями обслуговування було визначено:

- ТО-1 – стабільний, майже детермінований час;
- ТО-2 – нормально розподілений;
- ремонти – гамма-розподіл із різними формами.

Таблиця 2.11 – Оцінені параметри часу обслуговування

Подія	Розподіл	Параметри	Середня тривалість
ТО-1	Детермін.	$T=2,0$	2,0 год
ТО-2	Norm	$\mu=4,0, \sigma=0,4$	4,0 год
Ремонт гідросистеми	Г	$k=3,1, \theta=1,18$	3,66 год
Ремонт IVT	Г	$k=4,2, \theta=2,05$	8,61 год

Параметрами черги є:

потік заявок

$$\lambda_{\text{потік}} = \frac{312}{4 \text{ роки}} = 78 \text{ подій/рік.}$$

середня інтенсивність обслуговування:

$$\mu = \frac{1}{4,1 \text{ год}} \approx 0,244.$$

коефіцієнт завантаження для $c=2$ постів:

$$\rho = \frac{\lambda}{c\mu} \approx 0,91.$$

Висновок: сервіс працює в режимі близькому до насичення → можливі черги та простої.

2.4.8. Підсумкова таблиця параметрів моделі

Таблиця 2.12 – Узагальнені параметри моделі для подальшої імітації

Блок моделі	Параметр	Значення / розподіл
Деградація	$\alpha_{\text{дідр}}=0,018$	Лінійна залежність від U
Надійність	Вейбулл, Логнорм., Ехр	див. табл. 2.9
Навантаження	3 кластери режимів	$\mu=0,42/0,68, \sigma=0,08/0,07$
ТО	Тривалість	детермін./N(4,0.4)
Ремонт	$\Gamma(k,\theta)$	див. табл. 2.11
Сервіс	$\lambda=78/\text{рік}, \mu=0,244$	$\rho \approx 0,91$

2.5. Перевірка адекватності та аналіз чутливості моделі

Після побудови та параметризації імітаційної моделі технічного обслуговування тракторів *John Deere* необхідно підтвердити її адекватність

реальним процесам експлуатації, а також дослідити чутливість моделі до варіацій параметрів. У цьому підрозділі реалізовано:

1. верифікацію моделі (правильність програмної реалізації),
2. валідацію моделі (відповідність реальним даним),
3. аналіз чутливості (вплив зміни параметрів на результати моделювання).

Для оцінки адекватності застосовано такі методи:

1. Порівняння емпіричних і модельних розподілів (тест Колмогорова–Смірнова, критерій χ^2).
2. Перевірка на основі ключових показників:
 - середнього ресурсу до відмови,
 - частоти ТО,
 - середнього часу простою.
3. Графічне порівняння кривих відмов та інтенсивності $\lambda(t)$.
4. Відповідність логіці експлуатаційних сценаріїв (сезонність, черги в пікові періоди).

Порівняння емпіричних і модельних характеристик а саме:

- розподіл часу до відмови для ключових агрегатів;
- кількість відмов за рік;
- середню кількість ТО;
- технічну готовність $K_{ТГ}$.

Таблиця 2.13 – Порівняння модельних і фактичних показників

Показник	Факт	Модель	Відносна похибка, %
Середній час до відмови (гідрос.)	1320	1298	–1,7 %
Середній час до відмови (IVT)	2150	2210	+2,8 %
Число ТО-2 на рік	2,1	2,0	–4,8 %
Простої за сезон, год	46	48	+4,3 %
$K_{ТГ}$	0,89	0,88	–1,1 %

Висновок: Похибки $< 5 \%$, що відповідає критеріям адекватності для імітаційних моделей технічних систем.

Порівняно емпіричний розподіл часу до відмови з модельним.

$$D = \sup |F_{емп}(t) - F_{мод}(t)|.$$

Результати тесту:

Вузол	D	Критичне значення	Висновок
Гідросистема	0,072	0,14	Приймається
Система упорскування	0,066	0,15	Приймається
IVT	0,081	0,13	Приймається

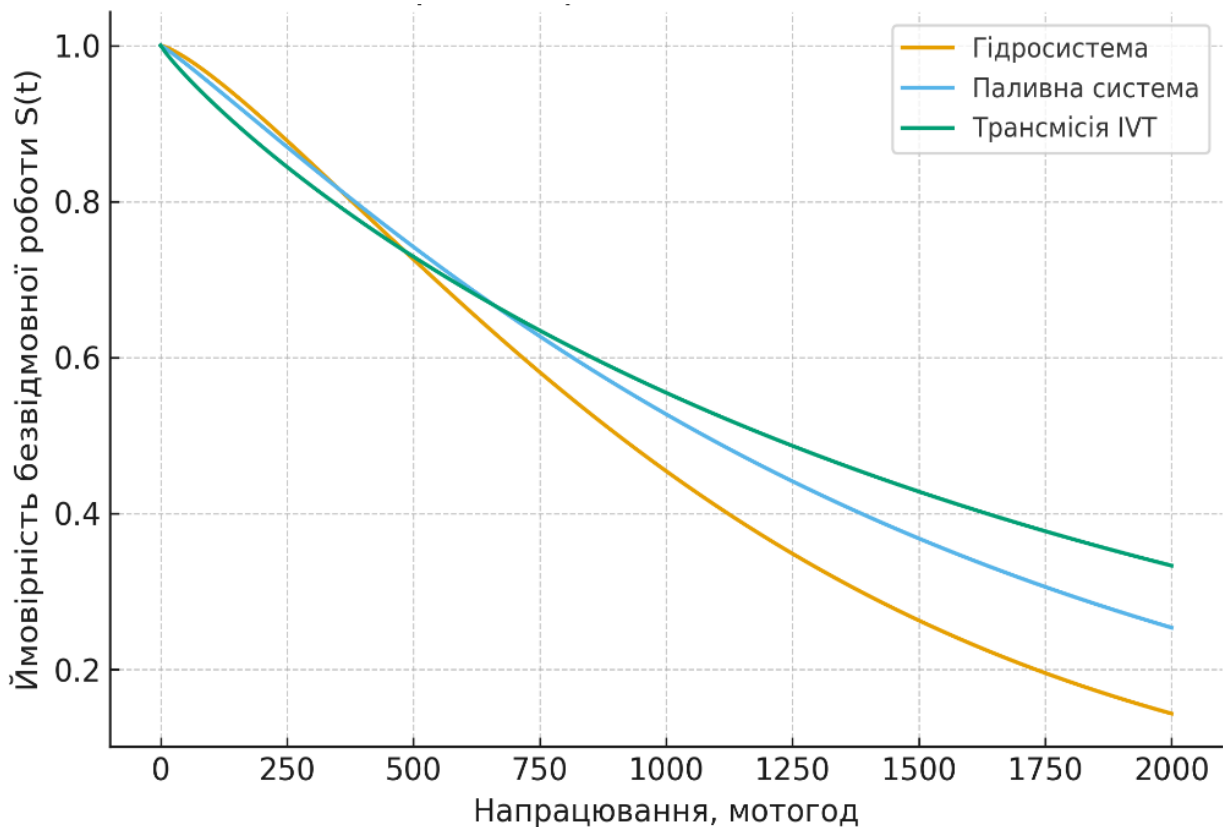


Рисунок 2.6 – Ймовірність безвідмовної роботи систем трактора

Гіпотеза про відповідність розподілів модельним не відхиляється.

Перевірка відтворення сезонності експлуатації, було порівняно сезонні профілі:

- кількість подій ТО на місяць;
- інтенсивність відмов;
- завантаження сервісного центру.

Збіг трендів підтверджує правильність відтворення роботи в період пікових польових робіт.

Для визначення впливу варіації параметрів модель запускали з відхиленням $\pm 10\%$ від номінальних значень таких параметрів:

1. інтенсивність відмов λ_o ,
2. коефіцієнт деградації α ,
3. інтервал ТО T_{TO} ,
4. кількість постів сервісу c ,
5. параметри навантаження $U(t)$.

Чутливість до інтенсивності відмов λ .

Результат:

- Збільшення λ_o на 10% $\rightarrow$ зростання простоїв на $10\text{--}13\%$
- Зменшення λ_o на 10% $\rightarrow$ зниження простоїв на $8\text{--}11\%$

Математична міра чутливості:

$$S_Y = \frac{\Delta Y / Y}{\Delta \lambda / \lambda} \approx 1,2.$$

де $Y = T_{np}$.

Чутливість до параметра деградації α

Зміна α на $\pm 10\%$:

Зміна α	Зміна кількості ТО	Зміна відмов
-10%	-4%	-7%
$+10\%$	$+5\%$	$+9\%$

Висновок: α має помірний вплив на результати.

2.5.5.3. Чутливість до інтервалу регламентного ТО

Таблиця 2.14 – Вплив зміни інтервалу ТО

T_{TO} , відхилення	K_{mg}	Простої, год	Відмови
-10%	0,90	42	7
Номінальний	0,88	48	9
$+10\%$	0,86	52	11

Оптимум лежить близько базового інтервалу.

Чутливість до кількості постів сервісу c

Модель черги показала:

- перехід від $c=2 \rightarrow c=3$ знижує простої на 22–27 %;
- додавання ще одного поста ($c=3 \rightarrow c=4$) дає лише 5–7 %.

Чутливість до навантаження $U(t)$

Підвищення середнього навантаження з 65 % до 75 %:

- збільшує $\lambda(t)$ на 12–15 %;
- збільшує відмови на 18–22 %;
- збільшує час простою на 10–14 %.

Навантаження є одним із найкритичніших факторів.

Інтегральний висновок про адекватність. Модель вважається адекватною, оскільки:

1. Усі ключові показники мають похибку $<5\%$.
2. Розподіли часу до відмов статистично збігаються.
3. Модель відтворює сезонність експлуатації.
4. Зміни параметрів узгоджено впливають на результати (монотонні, логічні).
5. Структура чутливості відповідає логіці роботи реальних тракторів.

Модель імітації процесів ТО тракторів John Deere демонструє високу відповідність реальним даним і логіці експлуатації. Аналіз чутливості показав, що найбільший вплив на показники ефективності мають інтенсивність відмов, навантаження та інтервали ТО.

3. МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ СЕРВІСНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ДИЛЕРА

3.1 Адаптація системи сервісного обслуговування до коливань ринкової кон'юнктури

Аналіз діяльності ремонтно-технічних підприємств показує, що виконуваними роботами з ремонту та технічного обслуговування машин та обладнання є низькорентабельними, а частіше збитковими.

Розглянемо можливі механізми адаптації підприємства до коливань попиту, зокрема, до сезонних «пікових» навантажень (рис. 3.1). Попит на послуги може бути представлений випадковою величиною, розподілений за законом близькому до логарифмічно нормального розподілу (логнормальний) з невеликим зміщенням правої гілки щодо центру.

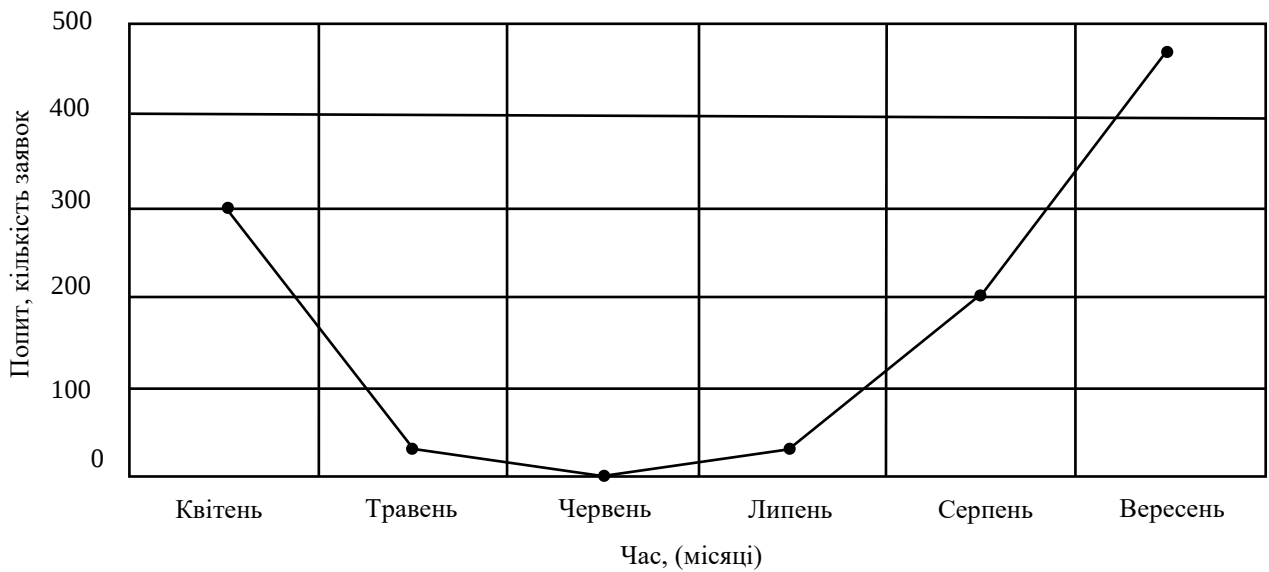


Рисунок 3.1 - Характер коливань кількості технічних обслуговувань тракторів *John Deere* у найбільш інтенсивні місяці року

На рис. 3.2 зображено криву, яка обумовлює необхідність розробки механізмів для ефективної роботи дилерського підприємства у ринкових умовах розвитку пунктів технічного обслуговування.

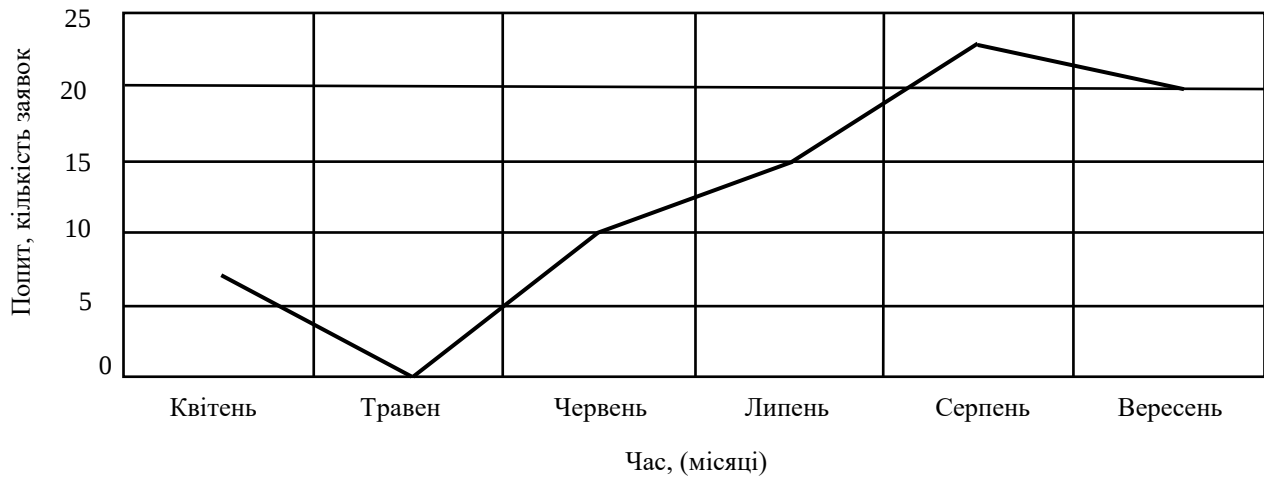


Рисунок 3.2 - Характер коливань кількості ремонтів тракторів *John Deere* у найбільш інтенсивні місяці року

Криві побудовані за матеріалами конкретних досліджень, що проводилися у Львівській області.

Мінімальний та максимальний попит на сервісні послуги визначаються зоною обслуговування підприємства. Побудований графік уможливорює умовно поділити територію яка обслуговується сервісними пунктами дилерського підприємством на дві зони.

До зони №1 входять споживачі розташовані на найменшому віддаленні від підприємства технічного обслуговування. Ця зона формується раціональними відстанями переїзду тракторів до місця обслуговування. Чим більша відстань до підприємства автосервісу, тим менший попит на його послуги. Тим не менш, більшість підприємств, що надають послуги з ремонту та технічного обслуговування машин працюють за таким принципом.

Зона обслуговування №2 характеризується, розташованими на значній відстані від центру технічного сервісу або пункту технічного обслуговування дилерського підприємства (рис. 3.3).

Розмір попиту сервісних послуг змінюється залежно від сезону і технічного стану тракторів та їх кількості, ступеня новизни, надійності та інших факторів.

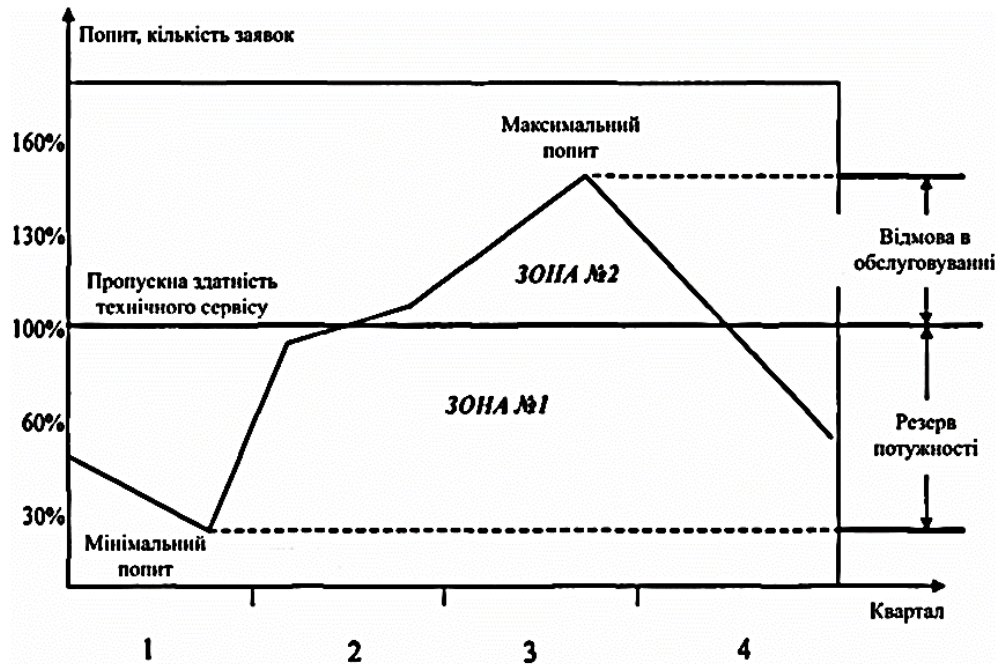


Рисунок 3.3 – Характер коливань потреб автовласників тракторів *John Deere* на послуги технічного обслуговування

Кількість постів на ПТО уможлиблює задоволення певного попиту на послуги при правильній організації технологічного процесу (оптимального або максимального) завантаження постів. Настає певний момент часу коли попит настільки великий, що перевищує резервні потужності ПТО. У таких випадках ефективним засобом є використання пересувних засобів технічного обслуговування та ремонту машин (мобільних ПТО).

3.2 Планування та обсяг робіт за технічним сервісом

Для міських комплексних ПТО виробнича програма характеризується кількістю комплексно обслуговуваних тракторів на рік, тобто тракторів, яким на станції виконується весь комплекс робіт для підтримки їх в технічно справному стані протягом року.

Для ремонтних майстерних з конкретних видів робіт виробнича програма визначається річним обсягом робіт, і яка може бути визначена, виходячи з приблизного розподілу трудомісткості по видах робіт для міських ПТО [2].

Виробнича програма є основним показником для розрахунку річних обсягів робіт, на основі яких визначаються чисельність робочих, площі виробничих, складських, адміністративно - побутових і інших приміщень.

Початковими даними для розрахунку виробничої програми і обсягів робіт є:

- кількість тракторів, які обслуговуються ПТО за рік і норма питомої трудомісткості ТО і ПР для даного типорозміру ПТО і певного класу тракторів;
- середньорічний пробіг обслуговуваних тракторів;
- середня кількість заїздів тракторів на станцію за рік;
- середня трудомісткість робіт по одного заїзду;
- режим роботи станції.

Річний обсяг робіт по ТО і ПР:

$$T_o = A_p \cdot L_p \cdot t \cdot K_p / 1000; \quad (3.1)$$

де A_p – очікувана кількість обслуговуваних тракторів за рік на ПТО (формула 1.2);

L_p – середньорічне напрацювання трактора, км;

t – нормативна питома трудомісткість робіт ТО і ПР, люд·год/доб км;

K_p – коефіцієнт коректування трудомісткості, залежний від потужності ПТО;

При проектуванні універсальної ПТО, призначеної для обслуговування тракторів, які відносяться до різних класів, річний обсяг робіт по ТО і ПР визначається сумою річних обсягів робіт за тракторами окремих класів.

Згідно [2] задаємося нормативною трудомісткістю робіт для різних класів тракторів по ОНТП 01-91, які зводимо в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 Нормативні питомі трудомісткості ТО

Серія трактора	трактори серії 6R		трактори серії 8R	
Вид ТО	ТО-2	ТО-3	ТО-2	ТО-3
Клас трактора	середньогабаритні		великогабаритні	
Трудомісткість ТО, люд./год	9,02	15,49	11,28	25,94
Вартість ТО, грн.	20450	24049	20875	28115

Оскільки на проєктованій ПТО передбачається продаж тракторів, то в загальному обсязі виконуваних робіт необхідно передбачити роботи, пов'язані з передпродажною підготовкою тракторів.

Річний обсяг робіт з передпродажної підготовки визначається за формулою яка враховує кількість тракторів проданих за рік N_{Π} , яке встановлене завданням на проєктування і трудомісткістю $t_{\Pi\Pi}$ їх обслуговування:

$$T_{\Pi\Pi} = N_{\Pi} \times t_{\Pi\Pi}, \quad (3.2)$$

де N_{Π} - кількість тракторів які продаються в регіоні;

$t_{\Pi\Pi}$ - трудомісткість обслуговування тракторів.

Розрахунком визначається число робочих постів, допоміжних постів і тракторо-місць очікування і зберігання.

Кількість робочих постів визначається по формулі:

$$X_p = \frac{T_n \cdot \varphi}{\Phi_n \cdot P_n}, \quad (3.3)$$

де T_{Π} - річний обсяг постових робіт, люд. год;

φ - коефіцієнт, який враховує нерівномірність надходження тракторів на ПТО в різні пори року і дні тижня;

Φ_{Π} - річний фонд робочого часу поста, год;

P_{Π} - середня кількість робочих на посту.

Уточнена кількість робочих постів визначається після розподілу їх за призначенням, який виконується з урахуванням розподілу трудомісткості постових робіт (див. табл. 3.2).

Річний фонд робочого часу поста:

$$\Phi_{\Pi} = D_{PP} \cdot T_{CM} \cdot 3 \cdot \eta; \quad (3.4)$$

де $D_{PP} = 305$ - кількість днів роботи ПТО в році;

$T_{CM} = 8$ год - тривалість зміни;

$3 = 1$ - кількість змін;

$\eta = 0,95$ - коефіцієнт використання робочого часу поста.

Результати розрахунків зводимо в таблицю 3.2.

Таблиця 3.2 Річні обсяги робіт по класах тракторів

Модель трактора	Наявна кількість тракторів в даній моделі у регіоні, А	Вид ТО	Кількість ТО за цикл, $N_{то}$	Сумарна кількість ТО за цикл, $\Sigma N_{то}$	Сумарна кількість ТО за рік, $\Sigma N_{то \text{ рік}}$	Трудоємність одного ТО, $T_{тп}$ люд-год.	Сумарна трудоємність одного ТО за рік, $T_{тп}$ люд-год.	Трудоємність ТО всіх автомобілів даної моделі на день, люд/год.
Середньогабаритні трактори серії 6R	87	ТО-2	8	696	49	9,02	441,98	1,4
		ТО-3	4	348	24	15,49	371,76	1,2
Великогабаритні трактори серії 8R	134	ТО-2	8	1072	75	11,28	846	2,8
		ТО-3	4	536	38	25,94	985,72	3,2

3.3 Система обслуговування мобільною сервісною службою

МСС у системі ДП відводиться роль елемента, що виконує весь обсяг робіт з ТО-2 та ТО-3. Для знаходження оптимальних варіантів розміщення структури МСС, необхідно мати такі основні дані:

- ✓ щільність розташування об'єктів обслуговування;
- ✓ трудомісткість робіт та обслуговування;
- ✓ площа обслуговуючої території;
- ✓ оптимальна відстань переміщення мобільних ПТО.

Схожість вихідних даних необхідні визначення оптимальних відстаней перевезення об'єктів ремонтного фонду з вихідними даними для визначення зони обслуговування МСС, теоретично дозволяє застосувати метод, запропонований І.С. Левітським. Попередній аналіз показує відмінності у структурі поставлених завдань та способи їх вирішення. У зв'язку з цим, необхідно досліджувати запропоновані способи рішення на предмет можливого їх застосування для вирішення задачі розташування системи обслуговування ДП.

Дотримуючись вказівок методики І.С. Левитського, попередньо необхідно визначити площу території для випадку, коли середня відстань переїзду мобільного ПТО дорівнює 1 км. Під середньою відстанню переїзду розуміється поділ всього обсягу робіт із переїздами на загальну кількість заявок від об'єктів обслуговування:

$$R_c = \frac{n \int y dF}{nF} = \frac{\int y dF}{F}, \quad (3.5)$$

де R_c – середня відстань переїзду мобільного ПТО, км; dF – елементарна майданчик на якому проводяться роботи з обслуговування об'єкта; n – кількість заявок, що припадають на елементарний майданчик, од.; y – відстань від елементарного майданчика до центральної бази МСС, км; F – загальна площа території, км².

Площа території при середній відстані переїзду 1 км можна визначити виходячи з гіпотези, що вся робота з переїзду до об'єктів обслуговування, поділена на кількість заявок дає середню відстань переїзду. При рівномірному розподілі об'єктів обслуговування за території, їх кількість пропорційна площі території.

Отже, обсяг заявок можна виразити через формулу:

$$N = n \times \pi \times R^2, \quad (3.6)$$

де N – загальна кількість заявок, од.;

n – питома кількість заявок, що припадає на одиницю площі території, що описується радіусом R , од./км².

Тоді для задоволення заявок на території, що описується радіусом R потрібно виконати роботу рівну:

$$A = \int n \times y \times dF = \int n \times 2\pi \times y^2 \times dy, A = \int_0^R n \times 2\pi \times y^2 \times dy, \quad (3.7)$$

Після перетворень отримуємо вираз виду:

$$A = \frac{2\pi \times n \times R^3}{3}. \quad (3.8)$$

Виходячи з вищевикладеної гіпотези, отримуємо вираз:

$$\frac{A}{N} = \frac{2\pi \times n \times R^3}{3\pi \times n \times R^2} = \frac{2}{3} \times R = R_C \quad (3.9)$$

Тоді площа території за середньої відстані переїзду 1 км становитиме величину $F=7$ км.

Зі збільшенням середньої відстані переїзду площа зростає пропорційно R^3 - Обчислити у скільки разів площу із середнім відстанню переїзду 1 км укладається на площу регіону, можна за формулою:

$$u = \frac{F}{7} \quad (3.10)$$

А для того, щоб визначити питому кількість заявок, що припадає на площу в 7 км², розділимо загальну кількість тракторів (N_T) на u :

$$N_y = \frac{N_T \times 7}{F} \quad (3.11)$$

Очевидно, що кількість об'єктів, що обслуговуються (так само як і число заявок, що задовольняються, буде змінюватися пропорційно квадратам середніх відстаней переїздів від місць розташування об'єктів між собою, а також центральною базою МСС:

$$\frac{R_C^2}{R_{C1}^2} = \frac{N_y}{N}, \text{ звідки } R_{C1}^2 = \frac{R_C^2 \times N}{N_y} \quad (3.12)$$

3.4 Система обслуговування зі стаціонарними ПТО

З погляду теорії масового обслуговування зменшення простоїв машин можливо за рахунок збільшення пропускної спроможності системи ТО, що одночасно веде до її подорожчання та збільшення втрат, обумовлених простоями системи. З іншого боку, зниження пропускної спроможності веде до збільшення збитків від простоїв машин в очікуванні усунення несправностей або проведення обслуговування.

Як критерій сумарних витрат від простою системи ПМО та збитків клієнтів при тривалому очікуванні необхідно прийняти мінімум цільової функції:

$$S = C_1 \times M_s \times C_2 \times N_2 \rightarrow \min \quad (3.13)$$

де C_1 - вартість простою машини в очікуванні обслуговування, грн.;

C_2 - вартість простою ПТО, грн.;

M_S – середня кількість машин, що очікують обслуговування;

N_2 - середня кількість постів ПТО, вільних (простують) від обслуговування.

Визначення числа машин, що очікують обслуговування та числа мобільних ПТО, які простоюють в очікуванні заявки на обслуговування, важко. Це пояснюється випадковим характером виходу з ладу машин, а також тривалістю усунення несправностей.

МСС являє собою сукупність постів обслуговування, тому цю систему можна вважати як багатопостову.

Використовуючи математичний апарат систем масового обслуговування, можна розрахувати ймовірні стани системи:

- ✓ Ймовірність того, що обслуговуванням зайняті пости ПТО;
- ✓ Всі пости ПТО зайняті обслуговуванням і є черга машин, що чекають на обслуговування (середнє число машин);
- ✓ Ні один з постів ПТО не зайнятий обслуговуванням (середнє число постів ПТО, що простоюють в очікуванні надходження машин).

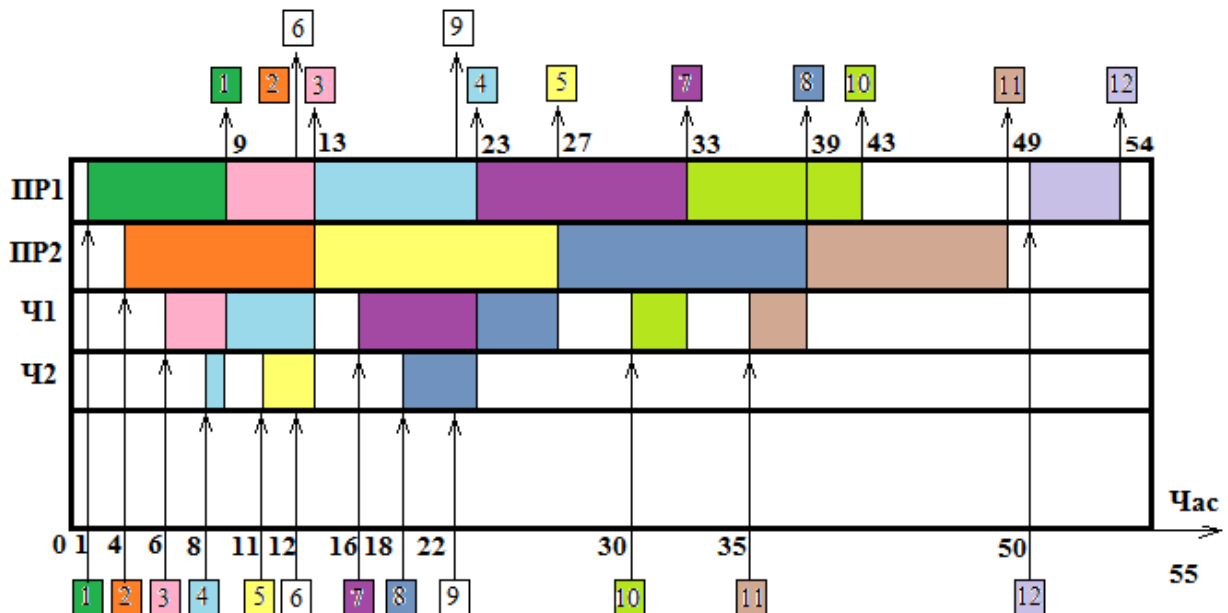


Рисунок 3.4 – Часова діаграма обслуговування на ПТО

Інтенсивність надходження вимог (заявок) на усунення несправностей та проведення ТО визначається за формулою:

$$\lambda = \lambda_I \times M \quad (3.14)$$

де λ_I - інтенсивність виникнення вимог обслуговування від однієї машини на годину;

M - кількість обслуговуючих машин.

$$\lambda_1 = \frac{1}{t} \quad (3.15)$$

де t - середня тривалість обслуговування трактора, год.

Пропускна здатність однієї спеціалізованої ланки мобільного ПТО (посту обслуговування) залежить від тривалості обслуговування однієї машини. Якщо на одне обслуговування ланкою витрачається $T_{ОБС}$ годинника, то за одну годину ланка може обслужити:

$$\mu = \frac{1}{T_{ОБС}} \quad (3.16)$$

Ймовірність того, що всі пости обслуговування (мобільної ПТО) простоюють, тобто у системі відсутні заявки обслуговування, визначається так:

$$P_0 = \frac{1}{\left[\sum_{k=0}^n \frac{\varphi^k}{k!} + \frac{\varphi^{n+1}}{n!(n-\varphi)} \right]} \quad (3.17)$$

де n - кількість наявних постів обслуговування у системі;

$\varphi = \frac{\lambda}{\mu}$ - наведена щільність потоку заявок або коефіцієнт завантаження системи.

Ймовірність того, що обслуговуванням зайняті рівно (k) постів ($0 \leq k \leq n$):

$$P_k = \frac{\varphi^k}{k! \times P_0} \quad (3.18)$$

Отже можна записати, що $\varphi = \lambda \times T_{ОБС}$. Параметр φ для однопостової системи обслуговування відповідає часу при якому система зайнята обслуговуванням заявок [20]. Різниця $1 - \varphi$ відповідає часу простоювання системи.

Для багатопостової системи параметр φ дорівнює середній кількості постійно зайнятих обслуговуванням постів, а різниця $(n-\varphi)$ простою постів.

Величина φ не може бути довільною. Встановлений режим існує тільки при $\varphi < n$, в іншому випадку $\varphi \geq n$ система не впорається з обслуговуванням та черга зростатиме необмежено.

Середня довжина черги (кількість заявок, які чекають на обслуговування) визначається так:

$$M_s = \frac{\frac{\varphi^{n+1}}{n! \times n \times \left(1 - \frac{\varphi}{n}\right)^2}}{\sum_{k=0}^n \frac{\varphi^k}{k!} + \frac{\varphi^{n+1}}{n! \times (n - \varphi)}} \quad (3.19)$$

Ймовірність черги:

$$P_{чЕР} = 1 - \sum_{k=0}^n P_k \quad (3.20)$$

де $\sum_{k=0}^n P_k$ - сума ймовірностей того, що зайнято нуль постів (у системі немає заявок на обслуговування), 1, 2, ..., n постів.

Середній час очікування заявок початку обслуговування дорівнює відношенню середньої кількості заявок, що очікують черги до інтенсивності потоку заявок:

$$t_{оч} = \frac{M_s}{\lambda} \quad (3.21)$$

При визначенні втрат від простою постів ПТО необхідно врахувати, що зазначені втрати складаються із втрат на утримання технічних засобів та витрат на заробітну плату майстра-наладчика, а також слюсарів - ремонтників. За час простою зароблена плата виплачується у розмірі половини тарифної ставки. Виходячи із положення про сплату заробленої плати робітників зайнятих на роботах з обслуговування та ремонту тракторів.

Основні параметри системи СМО визначаються за встановленими вище залежностями. Результати розрахунків за марками машин при пропускній здатності 0,476 вимог на год, наведені нижче (табл. 3.3 і табл. 3.4).

Таблиця 3.3 - Основні характеристики потоку вимог на технічне обслуговування зони ТО-2

№	Найменування параметрів зони ТО	Позначення	Одиниці вимірювання	серії 6R	серії 8R
1	Кількість робочих днів зони ТО в році	D_{pb}	днів	305	
2	Тривалість зміни	$T_{зм}$	год.	8	
3	Кількість постів	$X_{п}$	од.	1...∞	1...∞
4	Кількість працівників на ПТО зони ТО-2	$P_{п}$	люд	1	1
5	Інтенсивність надходження тракторів на ПТО	λ	трак/год	0,03	0,04
6	Інтенсивність обслуговування тракторів на ПТО	μ	трак/год	0,111	0,089
7	Довжина черги	m	од.	1...5	1...5
8	Щільність потоку заявок	φ	трак/год	0,27	0,45
9	Трудомісткість ТО-2	$t_{обс}$	люд/год.	9,02	11,28

Таблиця 3.4 - Основні характеристики потоку вимог на технічне обслуговування зони ТО-3

№	Найменування параметрів зони ТО	Позначення	Одиниці вимірювання	серії 6R	серії 8R
1	Кількість робочих днів зони ТО в році	D_{pb}	днів	305	
2	Тривалість зміни	$T_{зм}$	год.	8	
3	Кількість постів	$X_{п}$	од.	1...∞	1...∞
4	Кількість працівників на ПТО зони ТО-3	$P_{п}$	люд	1	1
5	Інтенсивність надходження тракторів на ПТО	λ	трак/год	0,01	0,02
6	Інтенсивність обслуговування тракторів на ПТО	μ	трак/год	0,065	0,039
7	Довжина черги	m	од.	1...5	1...5
8	Щільність потоку заявок	φ	трак/год	0,15	0,51
9	Трудомісткість ТО-2	$t_{обс}$	люд/год.	15,49	25,94

У структурі сумарних втрат для оптимальної кількості мобільних ПТО, збитки від простоїв тракторів перевищує 90%, тоді як втрати від неповного завантаження майстерень становлять менше 10%. Це обумовлюється тим, що за такого співвідношенні парку машин та обслуговуючих їх мобільних ПТО ймовірність наявності черги машин, що потребують обслуговування або усунення несправностей зростає.

Скоротити час простоїв несправних тракторів можна лише за рахунок збільшення пропускної спроможності системи ПТО.

Знаючи характер рівняння, стає можливим визначити необхідну кількість мобільних ПТО шляхом їх вирішення. Аналіз результатів моделювання параметрів аналізованої системи показує, що втрати грошових коштів виконавця та клієнта відрізняються. При оптимальному варіанті втрати від простоїв постів ПТО вище, ніж втрати клієнта. Одночасно з цим, зміни зазнає показник кількості незайнятих постів обслуговування (N_z). Інтервал зміни вказаної величини значно вищий, ніж інтервал втрат коштів і коливається від 0,970 до 1,455. Саме з цієї причини цей показник доцільно використовувати як кінцеву умову перевірки ступеня придатності, розрахункового варіанта системи. Параметри системи, що розраховується можна вважати оптимальними, якщо дотримується кінцева умова розрахунку, а саме $1,5 \geq N_z \geq 1$.

Розрахунок кількості стаціонарних ПТО та ремонту в роботах різних авторів пропонується визначати різними способами:

- ✓ Відношення трудомісткості робіт з ремонту та усунення несправностей, які виконуються за допомогою даного ПТО до його річного фонду часу [20];
- ✓ Діленням всієї площі території (району, області тощо) на площу території зі знайденим середньою оптимальною відстанню перевезень ремонтного фонду [21];

✓ Поділом усієї кількості об'єктів, які потребують обслуговуванні та перебувають на розглянутій території, на знайдену оптимальну програму ПТО чи майстерні [20].

Аналіз вищезазначених методик визначення потрібної кількості ПТО показує, що найбільш підходящим способом є спосіб №2. При цьому необхідна кількість ПТО визначається шляхом поділу всієї площі розглянутої території (району, області тощо) на площу території зі знайденою середньою оптимальною відстанню переїздів тракторів:

$$N_{пто} = \frac{F}{\pi \times (1,5 \times R_{дх})^2} \quad (3.22)$$

де $R_{дх}$ - гранична допустима відстань холостого переїзду, км.

Граничні відстані переїздів тракторів на прикладі Львівської області, визначені відповідно середньозваженими радіусами віддалення місця роботи машин. Досвід робіт дилерських пунктів в Україні та за кордоном вказує на те, що дилерський ПТО є в основному системою масового обслуговування змішаного типу з обмеженням та довжиною черги (через обмежені розміри майданчика для машин, що очікують обслуговування).

З цієї причини визначення необхідної кількості ПТО необхідне робити з урахуванням теорії масового обслуговування. Це дозволяє визначити дійсну необхідну кількість постів обслуговування ПТО, особливо коли йдеться про нерівномірне розміщення об'єктів обслуговування та його незначній кількості, тобто коли обсяги робіт з ТО не відповідають обсягам виконуваних на ПТО типових проєктів [20, 21].

При організації обслуговування машин за умов ПТО систему ТО можна уявити у вигляді однопостової системи обслуговування з найпростішими математичними залежностями параметрів, а також у вигляді багатопостової, що є сукупністю декількох постів.

Для однопостової системи середнє число машин, що знаходяться в черзі на обслуговування можна визначити за формулою:

$$M_s = \frac{\varphi^2}{(1-\varphi)} \quad (3.23)$$

Середній час очікування машиною початку обслуговування:

$$t_{очк} = \frac{\varphi}{\mu \times (1-\varphi)} \quad (3.24)$$

Параметр φ відповідає середній кількості машин, що надходять на ПТО за той час, доки одна машина зайнята на обслуговуванні. Крім того, значення φ для однопостової системи відповідає ймовірності того, що в момент надходження даної машини на ПТО пост буде зайнятий і машина повинна буде стати в чергу на обслуговування. Якщо ПТО має n постів обслуговування, то ймовірність того, що на момент надходження чергової заявки на ПТО пост буде вільний дорівнює $n - \sum \varphi$

Знаючи кількість незайнятих постів обслуговування, прийняту кількість постів обслуговування та щільність потоку вимог можна визначити обмеженням числа місць у черзі для кожного посту обслуговування - m :

$$m = \left(\frac{\varphi}{n} \right)^{N_z} \quad (3.25)$$

Потрібно враховувати той факт, що значення φ для однопостової системи не може бути більше одиниці. В іншому випадку черга на обслуговування зростатиме необмежено.

Параметр μ багатопостової системи, характеризує пропускну здатність посту обслуговування і є величиною зворотною тривалості часу обслуговування однієї машини.

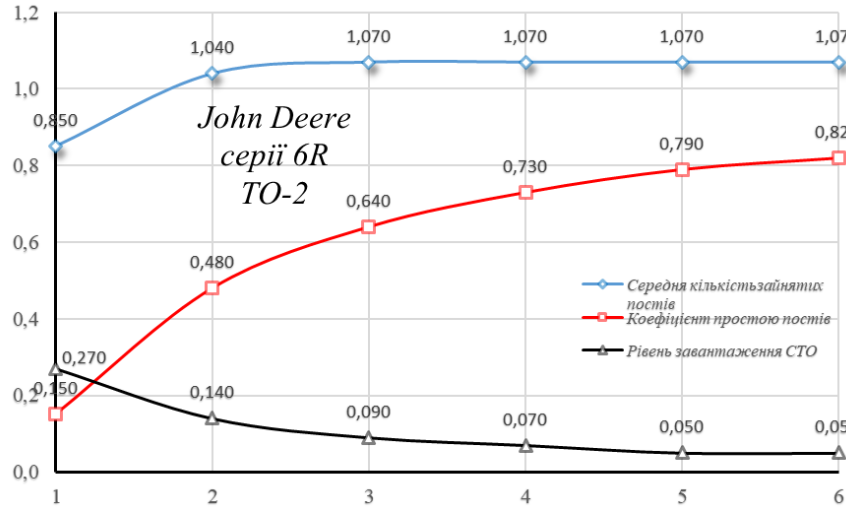
Основним моментом під час проектування системи обслуговування ДП є вибір оптимальної кількості ПТО та пересувних засобів ТО. Розташування обраної кількості ПТО має бути таким, щоб забезпечувалася максимальна швидкодія системи з найменшими витратами на реконструкцію чи будівництво об'єктів.

Моделювання системи «машини – стаціонарні ПТО» вироблялося таким чином, що одночасно зі збільшенням числа стаціонарних ПТО збільшувалося і число постів їх обслуговування, тим самим ділився обсяг робіт між ними. Характер кривих свідчить про те, що зі збільшенням кількості постів на ПТО у системі відбувається спочатку різке зниження збитків через простої машин, а потім плавне збільшення. Одночасно відбувається зростання втрат ПТО від їх простою, що зумовлюється збільшенням їх загальної кількості при одночасному поділі загального обсягу робіт між ними. При спеціалізації системи ТО та ПР тракторів марки *John Deere*, оптимальне число ПТО в системі можна прийняти 2 при кількості постів обслуговування - 3 та 3 (рис. 3.5 – 3.10).

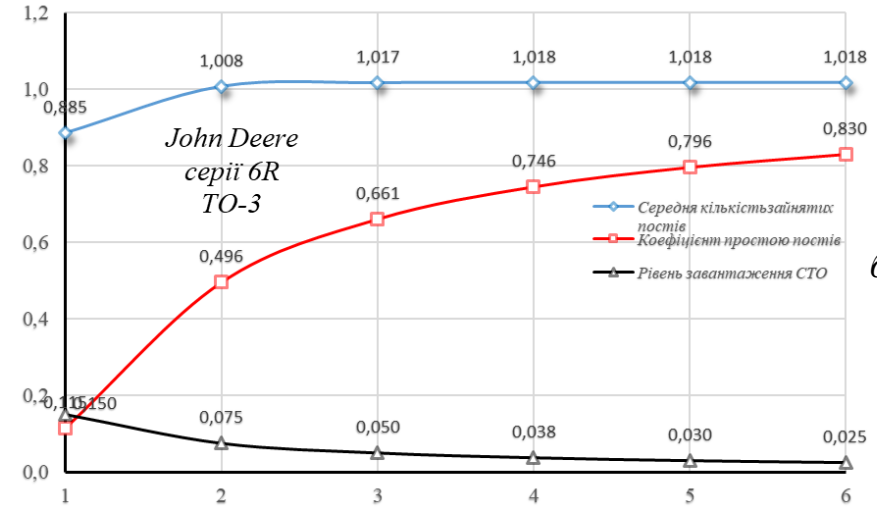
Зі збільшенням кількості машин, що обслуговуються та концентрації постів обслуговування на одному ПТО призводить до зростання часу очікування обслуговування, кількості машин у черзі а отже і втрат від простою тракторів.

Використання положень теорії масового обслуговування дозволяє знайти оптимальну кількість елементів у структурі системи. Особливо важливим є пошук оптимальної кількості постів обслуговування при вже заданій кількості ПТО. Оскільки будівництво нового ПТО супроводжується значними грошовими витратами, порівняно з модернізацією вже існуючих об'єктів [20, 21].

Аналіз параметрів системи для варіантів, прийнятих як оптимальних показує, що кожному з них відповідає певне значення середньої кількості незайнятих постів обслуговування. Причому ці значення варіюють при округленні в інтервалі від 0,7 до 1. Отже, при моделюванні системи за оптимальний можна приймати той варіант, який відповідає умові $1 \geq N_z \geq 0,7$, але при цьому значення ймовірності наявності черги має бути позитивним числом, а значення часу очікування має відповідати мінімальному з безлічі розрахункових $t_{чЕР} \rightarrow \min$.

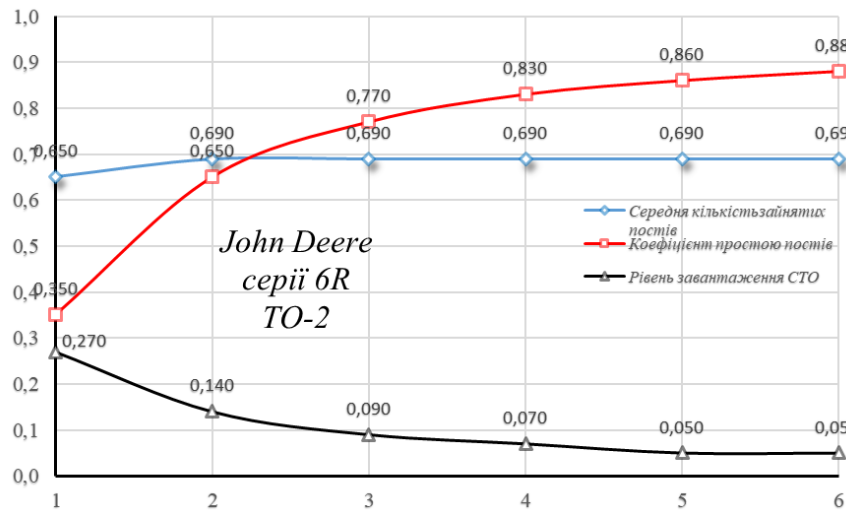


а)

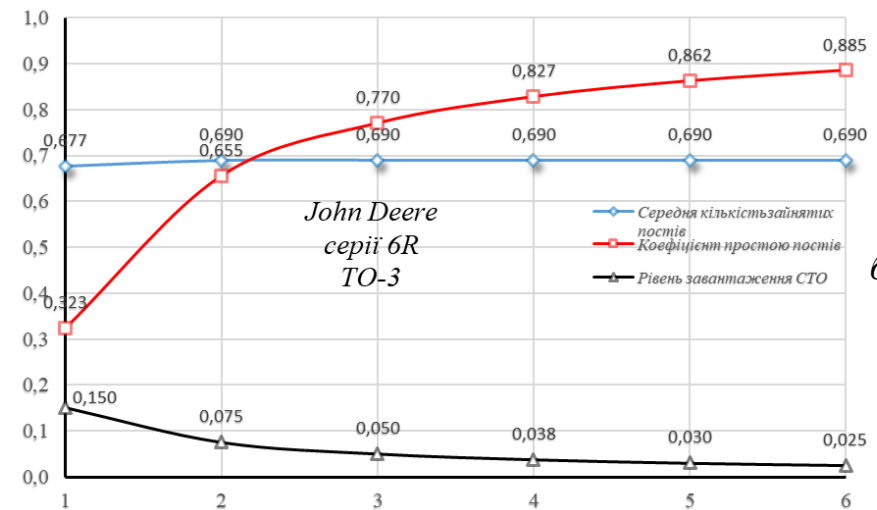


б)

Рисунок 3.5 - Динаміка параметрів процесу моделювання ПТО ТО тракторів *John Deere* серії 6R при величині черги $m=0$ (а) TO-2 (б) TO-3

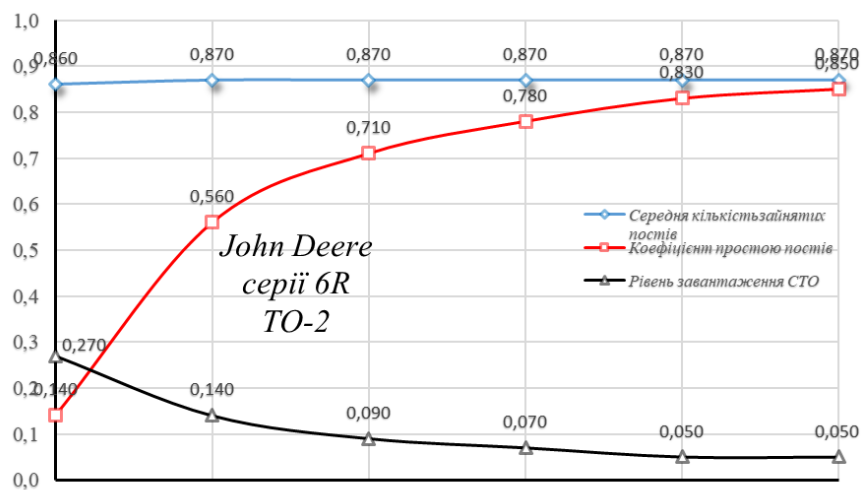


а)

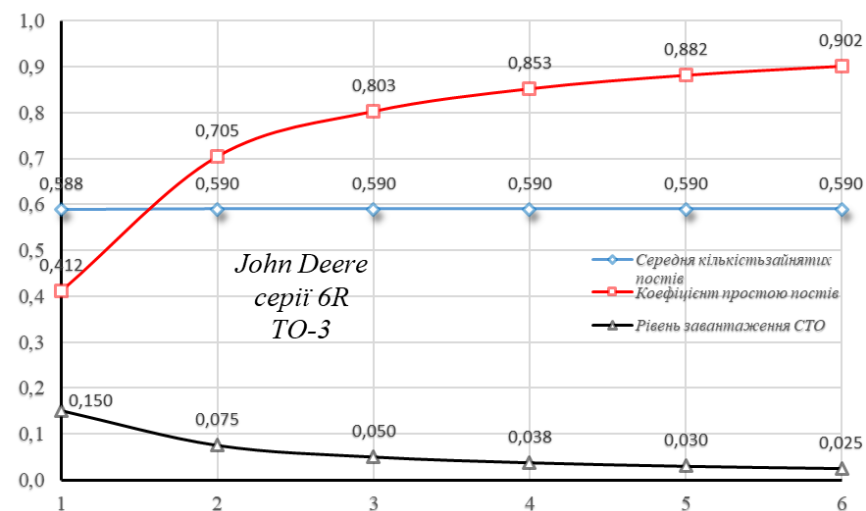


б)

Рисунок 3.6 - Динаміка параметрів процесу моделювання ПТО ТО тракторів *John Deere* серії 6R при величині черги $m=1$ (а) TO-2 (б) TO-3

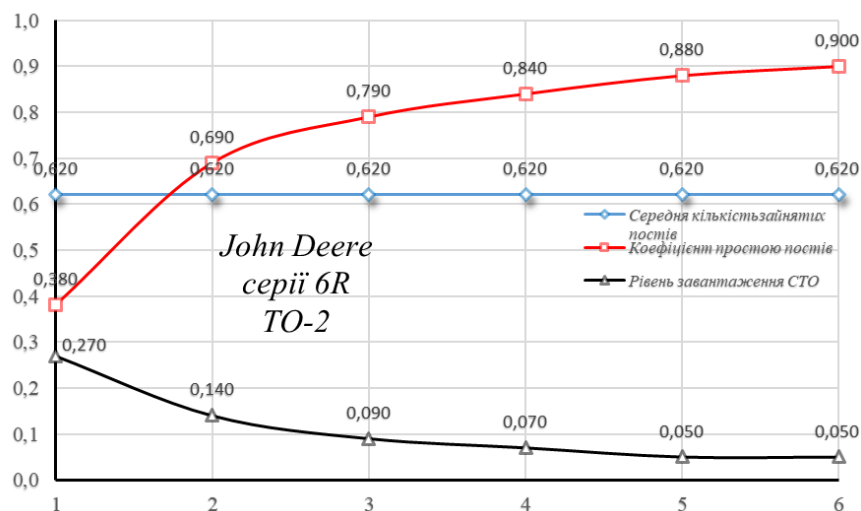


а)

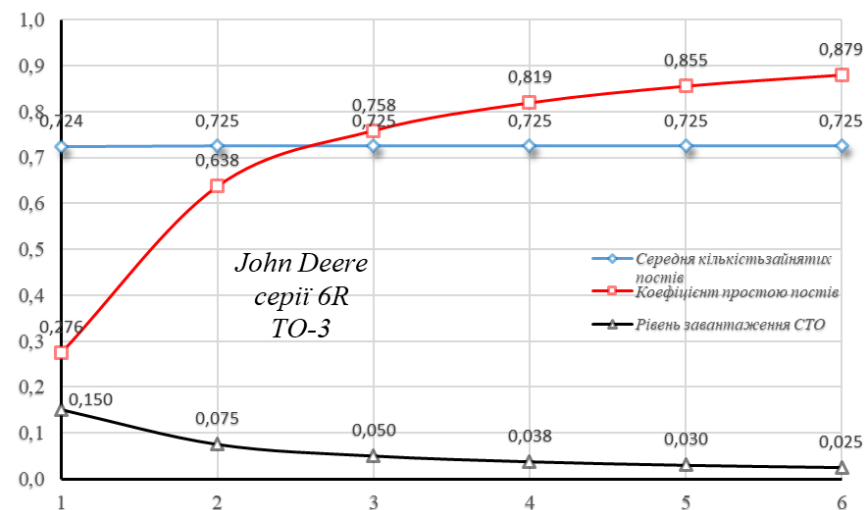


б)

Рисунок 3.7 - Динаміка параметрів процесу моделювання ПТО ТО тракторів *John Deere* серії 6R при величині черги $m=2$ (а) *ТО-2* (б) *ТО-3*

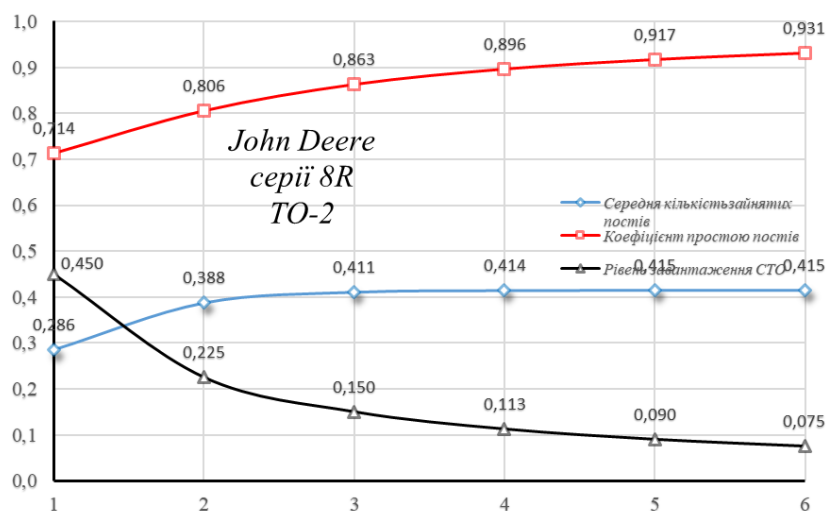


а)

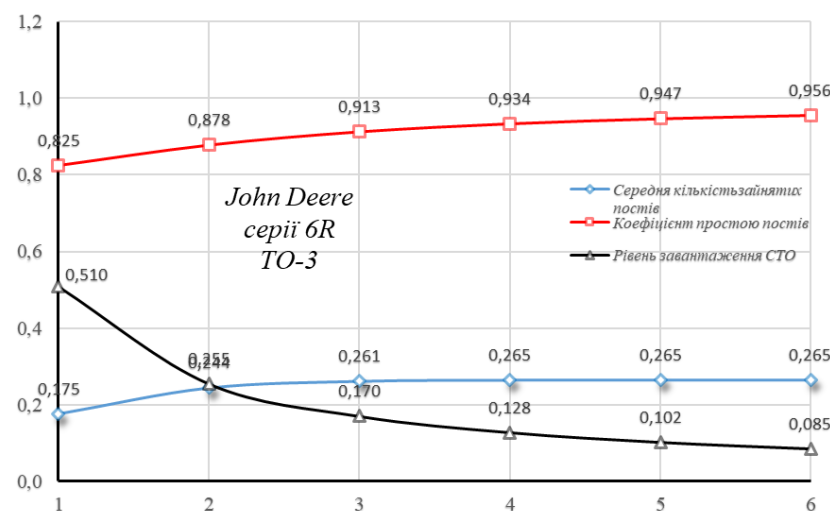


б)

Рисунок 3.8 - Динаміка параметрів процесу моделювання ПТО ТО тракторів *John Deere* серії 6R при величині черги $m=3$ (а) *ТО-2* (б) *ТО-3*

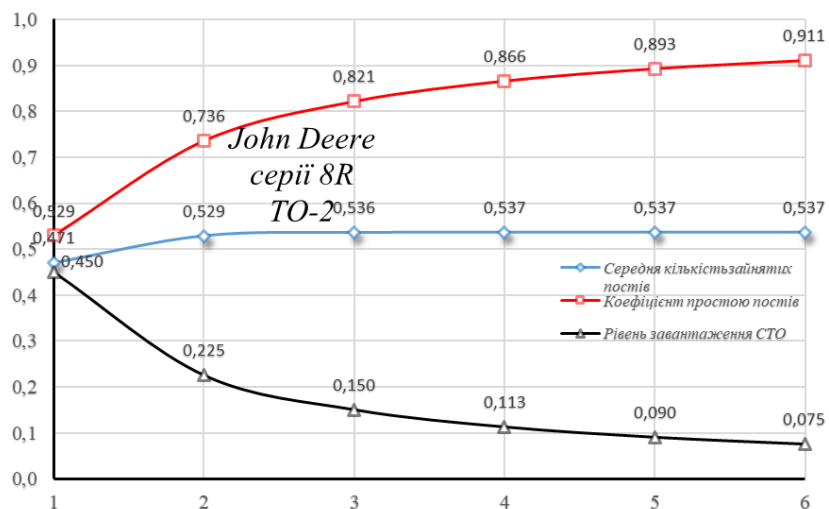


а)

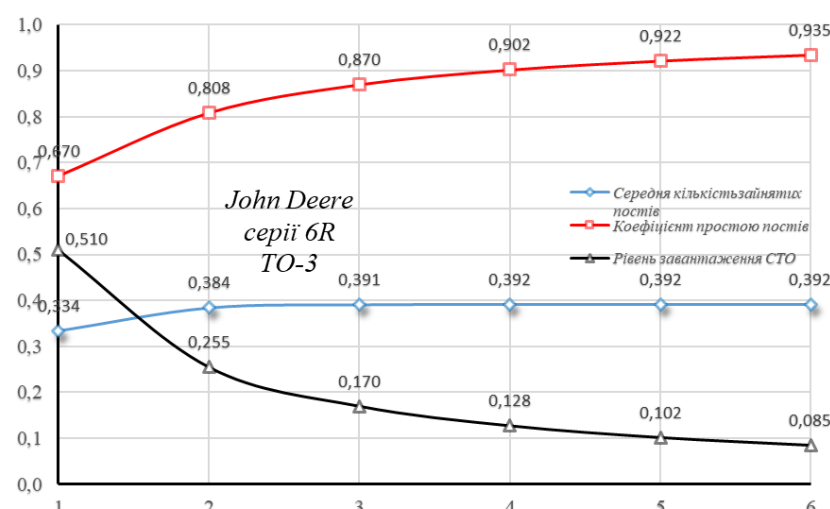


б)

Рисунок 3.9 - Динаміка параметрів процесу моделювання ПТО ТО тракторів *John Deere* серії 8R при величині черги $m=0$ (а) ТО-2 (б) ТО-3



а)



б)

Рисунок 3.10 - Динаміка параметрів процесу моделювання ПТО ТО тракторів *John Deere* серії 8R при величині черги $m=1$ (а) ТО-2 (б) ТО-3

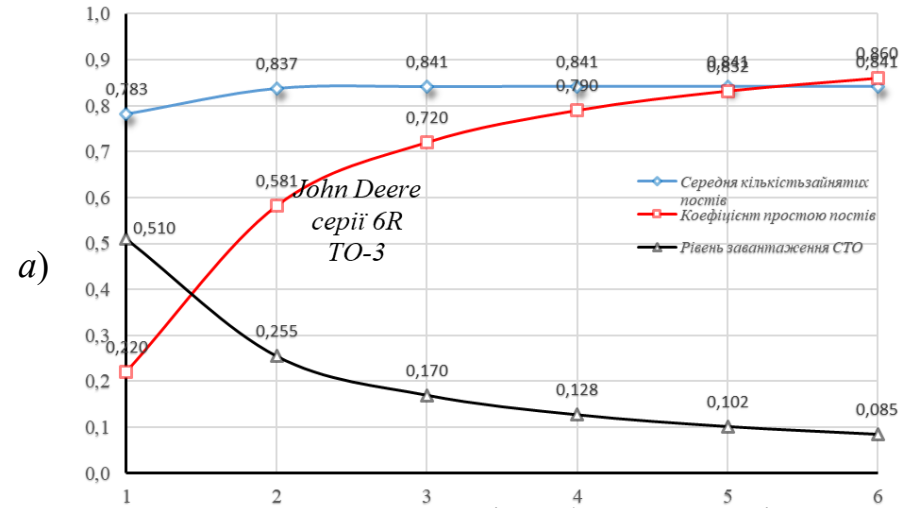
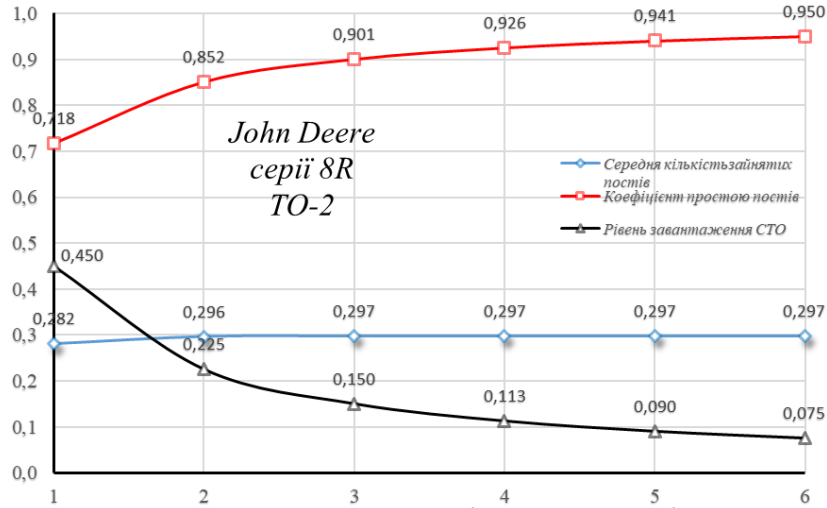


Рисунок 3.11 - Динаміка параметрів процесу моделювання ПТО ТО тракторів *John Deere* серії 8R при величині черги $m=2$ (а) ТО-2 (б) ТО-3

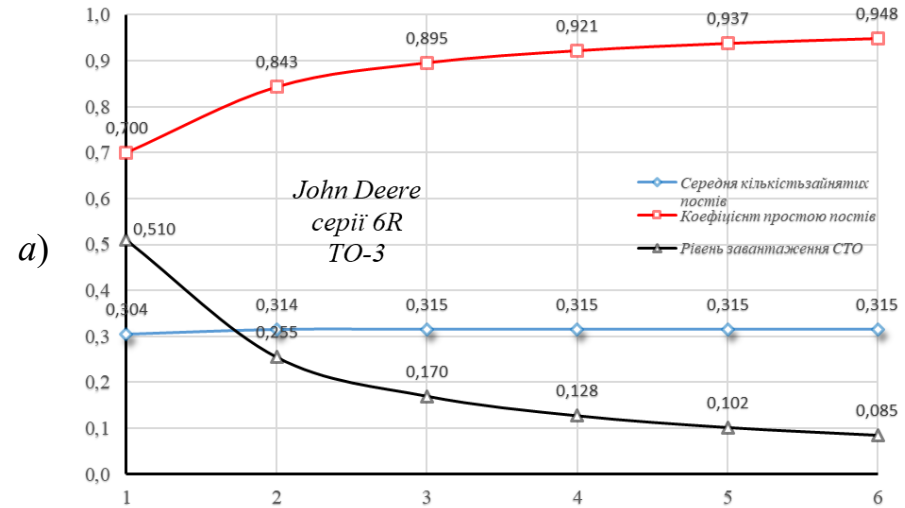
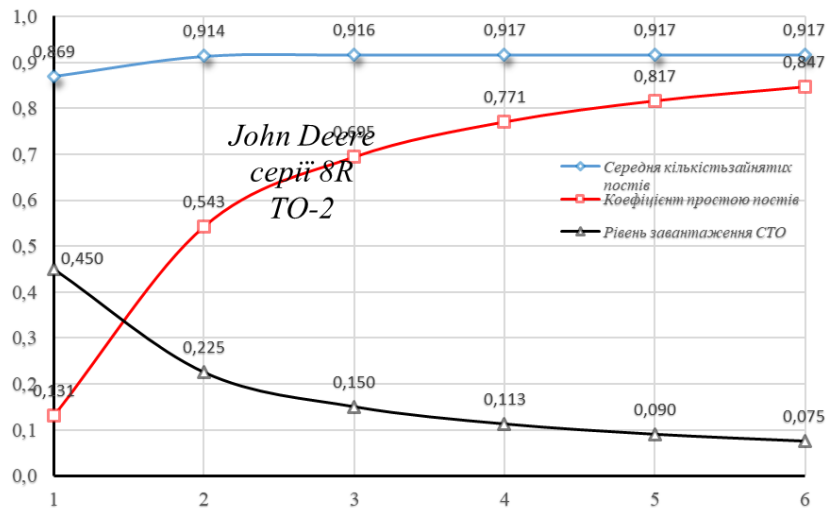


Рисунок 3.12 - Динаміка параметрів процесу моделювання ПТО ТО тракторів *John Deere* серії 8R при величині черги $m=3$ (а) ТО-2 (б) ТО-3

4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

4.1. Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів у процесі технічного обслуговування тракторів John Deere

Процес технічного обслуговування і ремонту тракторів John Deere характеризується інтенсивною взаємодією працівника з технічними системами підвищеної складності, високою концентрацією механічних, фізичних, хімічних та ергономічних ризиків, які можуть негативно впливати на здоров'я персоналу, працездатність обладнання та безпеку виробничого середовища. Відповідно до ДСТУ 2293:2014 «Охорона праці. Терміни та визначення основних понять», виробничі фактори поділяються на небезпечні та шкідливі залежно від їх впливу на організм працівника та тривалості дії. Аналіз цих факторів є ключовим етапом формування системи управління охороною праці на підприємстві, що здійснює технічне обслуговування тракторів.

Одним з найбільш впливових є підвищений рівень шуму, що генерується працюючими двигунами, гідравлічними насосами, компресорами, пневмоінструментом та вентиляційним обладнанням. Для тракторів John Deere рівень шуму при виконанні перевірочних операцій може досягати 90–98 дБ, що перевищує нормативне значення (80 дБ) за ДСН 3.3.6.037–99. Тривала дія шуму призводить до порушень слуху, зниження концентрації та підвищеної стомлюваності працівника.

Другим суттєвим фізичним фактором є вібрація, що виникає при роботі двигуна, випробуванні навісних агрегатів, обкатці трансмісії або використанні ручного інструмента. Локальна та загальна вібрація понад допустимі рівні, визначені ДСН 3.3.6.039–99, може спричиняти порушення функцій опорно-рухової, нервової та судинної систем.

Також значним є вплив недостатньої освітленості робочої зони, особливо при обслуговуванні елементів, що знаходяться під трактором або у важкодоступних місцях (роз'ємів CAN-шини, гідравлічних фітингів, датчиків

тиску). Недостатнє освітлення (<300 лк) підвищує імовірність травм та помилок, зокрема неправильного монтажу або пошкодження електронних компонентів.

Механічні небезпеки у процесі технічного обслуговування тракторів John Deere є одними з найбільш критичних. Основними серед них є:

- рухомі частини (обертові вали, шестерні, вентилятор системи охолодження), що створюють ризик затягування одягу, пошкодження кінцівок;
- підвішені та важкі агрегати (двигун, коробка передач, колісні модулі), маса яких перевищує фізичні можливості людини;
- підвищений тиск у гідросистемі (до 200–250 бар), що створює ризик гідравлічного уколу, гідроопіків та раптового викиду рідини;
- напруження пневмосистеми;
- ризик розриву шин при накачуванні, коли тиск значно перевищує 1,6–2,0 бар.

Недотримання правил фіксації трактора, використання несправних домкратів або відсутність противідкотних упорів може призвести до падіння машини та тяжких травм.

В процесі технічного обслуговування працівники контактують з паливно-мастильними матеріалами та технічними рідинами, які можуть чинити токсичний, подразнювальний або сенсibiliзуючий вплив.

До основних хімічних небезпек належать:

- пари дизельного палива, що містять ароматичні вуглеводні;
- випари гідравлічних рідин, у складі яких присутні цинкові та фосфорорганічні присадки;
- антифриз на основі етилен- чи пропіленгліколю, шкідливий при потраплянні в організм;
- аерозолі масел і мастил, що виникають при продуванні повітряним компресором;
- відпрацьовані гази двигуна (NO_x , CO , діоксиди сірки, тверді частинки).

Сучасні трактори John Deere обладнані складними електронними системами – системою автоматичного керування, модулем діагностики, електронними

блоками управління, датчиками тиску та температури, CAN-шиною. Під час обслуговування можливі:

- ураження електричним струмом при роботі з акумуляторними батареями;
- короткі замикання у разі неправильного під'єднання проводів;
- електростатичні розряди, небезпечні для електронних контролерів;
- ризики під час роботи в умовах підвищеної вологості.

Недотримання вимог ПУЕ та ПТЕЕС значно підвищує імовірність аварійних ситуацій.

Під час ремонту техніка може бути забруднена ґрунтом, рослинними рештками, органічними відходами, що містять мікроорганізми та грибки. Контакт з ними можливий при чищенні фільтрів, паливних баків, систем охолодження.

Таким чином, процес технічного обслуговування тракторів John Deere супроводжується широким спектром небезпечних та шкідливих виробничих факторів: фізичних, хімічних, механічних, електричних, психофізіологічних і, частково, біологічних. Їх сукупна дія за відсутності належного контролю може становити загрозу здоров'ю персоналу та безпеці виробництва.

4.2. Вимоги безпеки до робочого місця та організації процесу технічного обслуговування

Забезпечення безпеки праці під час виконання технічного обслуговування тракторів John Deere є одним із ключових елементів ефективної організації виробничого процесу. Вимоги до робочих місць, згідно з ДСТУ EN ISO 6385:2019, мають передбачати створення умов, що мінімізують дію небезпечних і шкідливих факторів та забезпечують оптимальний рівень ергономіки, мікроклімату, освітлення та технологічної безпеки.

Організація робочих зон для виконання регламентного ТО повинна враховувати специфіку техніки John Deere, яка характеризується значними

масогабаритними параметрами, наявністю високонапірних гідравлічних систем, електронних модулів та великою кількістю технічних рідин.

Робоче місце поста технічного обслуговування повинно бути організоване таким чином, щоб забезпечити вільний доступ до всіх вузлів трактора, необхідні проходи та можливість безпечного переміщення персоналу. Мінімальна ширина евакуаційних проходів повинна становити не менше 1,0 м, а зона навколо трактора – не менше 0,8–1,2 м для доступу до основних агрегатів.

Обов'язковою є наявність протиковзкого, рівного та вогнестійкого покриття підлоги, яке здатне витримувати вагу техніки та обладнання. Підлога повинна мати ухил або канали для відведення пролитих рідин, що знижує ризик падіння та пожежонебезпечних ситуацій.

У приміщеннях для виконання ТО має бути передбачена механічна припливно-витяжна вентиляція, що забезпечує не менше ніж 3–5 крат обміну повітря за годину при роботі з ПММ та технічними рідинами. При випробуванні двигуна у закритому приміщенні необхідна локальна витяжка над вихлопною трубою для запобігання накопиченню CO та NO_x.

Освітлення повинно відповідати нормам ДСТУ EN 12464-1:2014, забезпечуючи не менше 300–400 лк загального освітлення та 500–750 лк – локального освітлення для зон, де виконуються операції з дрібними деталями. Лампи мають бути захищені плафонами, що запобігають травмуванню у разі механічного удару.

Устаткування для підйому та фіксації машин (домкрати, підставки, крани-маніпулятори) повинно мати паспорт, маркування та проходити періодичні перевірки відповідно до вимог НПАОП 0.00-1.01-07. Використовувати підйомне обладнання, яке перевищує граничний строк експлуатації або має видимі дефекти, категорично заборонено.

Ручний інструмент повинен бути справним, із цілими рукоятками та діелектричними елементами при роботі з електросистемами. Для обслуговування електронних модулів потрібні антистатичні браслети та килимки для запобігання електростатичних розрядів.

Процес технічного обслуговування має проводитися відповідно до інструкцій виробника John Deere та внутрішніх інструкцій підприємства. Перед початком робіт необхідно виконати такі заходи безпеки:

- встановити трактор на рівну поверхню, заблокувати колеса противідкотними упорами;
- вимкнути двигун та зняти запалювання;
- розвантажити гідравлічні системи шляхом зменшення тиску;
- від'єднати акумуляторну батарею при роботах з електросистемою;
- провести огляд робочої зони на наявність сторонніх предметів та розливів.

Особливу увагу слід приділити роботам з високонапірною гідросистемою, оскільки неправильне від'єднання шлангів або фітингів може спричинити ураження струменем рідини під тиском. Обслуговування колісних модулів повинно проводитися тільки за наявності фіксаторів і підставок, що запобігають падінню техніки.

Працівники, що виконують ТО тракторів John Deere, повинні пройти інструктаж, навчання та перевірку знань згідно з НПАОП 0.00-4.12-05. До обов'язкових засобів індивідуального захисту відносяться: захисний одяг, рукавички з оливобензостійкого матеріалу, захисні окуляри, каска, взуття з металевим підноском, при роботі з хімічними речовинами – респіратори.

Дотримання цих вимог забезпечує мінімізацію ризиків травматизму та шкідливих впливів, а також сприяє підвищенню ефективності та якості виконання технічного обслуговування.

4.3. Розрахунок вентиляції та мікроклімату приміщення для ТО

Забезпечення нормативних параметрів мікроклімату та ефективної вентиляції приміщення технічного обслуговування тракторів John Deere є необхідною умовою безпечної та продуктивної роботи персоналу. У приміщенні постів ТО накопичуються тепло, волога, пари паливно-мастильних матеріалів, відпрацьовані гази двигуна, тому система вентиляції повинна забезпечувати

видалення забрудненого повітря та подачу свіжого у кількості, достатній для підтримання параметрів мікроклімату в межах нормативів.

Згідно з діючими санітарними нормами, для приміщень з виконанням робіт середньої важкості у холодний період року оптимальна температура повітря має становити 16–18 °С, у теплий період – 18–22 °С, відносна вологість – 40–60 %, швидкість руху повітря – не більше 0,3 м/с у робочій зоні. Для досягнення таких умов застосовується припливно-витяжна вентиляція з механічним спонуканням.

Розрахунок необхідного повітрообміну виконується за кількома критеріями, основними з яких є видалення надлишкового тепла та розбавлення шкідливих речовин. Для приміщення поста ТО можна прийняти, що визначальним є тепловиділення від працюючого трактора та обладнання.

Необхідну витрату повітря за надлишковим теплом визначають з рівняння теплового балансу:

$$L = \frac{Q_{над}}{\rho c_p (t_{вих} - t_{np})}, \quad (4.1)$$

де L – витрата припливного повітря, м³/с;

$Q_{над}$ – надлишкове тепло в приміщенні, Вт;

ρ – густина повітря ($\approx 1,2$ кг/м³);

c_p – питома теплоємність повітря (≈ 1000 Дж/(кг·°С));

$t_{вих}$ – допустима температура повітря у верхній зоні приміщення, °С;

t_{np} – температура припливного повітря, °С.

Надлишкове тепло $Q_{над}$ визначають як суму тепловиділення від двигуна трактора під час діагностики (частина теплового потоку від системи охолодження та вихлопу), від електродвигунів верстатів, освітлення та людей:

$$Q_{над} = \sum Q_{обл} + \sum Q_{осв} + \sum Q_{люд}. \quad (4.2)$$

Для розрахунку за шкідливими речовинами (наприклад, відпрацьовані гази двигуна або пари ПММ) витрата повітря може бути визначена:

$$L = \frac{G}{C_{дон} + C_{np}}, \quad (4.3)$$

де G – масова швидкість виділення шкідливої речовини, мг/с;

$C_{дон}$ – гранично допустима концентрація, мг/м³;

$C_{пр}$ – концентрація у припливному повітрі (як правило, близька до нуля).

На практиці приймають більше з отриманих значень за теплом і за шкідливими речовинами. Для приміщень автосервісів та тракторних майстерень кратність повітрообміну, як правило, становить не менше 3–5 об'ємів приміщення на годину, а при наявності випробувань двигунів – до 10–12.

Організаційно-технічне рішення має передбачати локальні відсмоктувачі (зонти, гнучкі рукави) у зоні вихлопної труби трактора, витяжні ґрати в нижній зоні для видалення важчих за повітря парів ПММ, а також рівномірний розподіл припливного повітря в робочій зоні без утворення протягів. Доцільним є застосування рекупераційних установок для зменшення енерговитрат у холодний період року.

Дотримання розрахованих параметрів вентиляції та мікроклімату забезпечує не лише відповідність нормативним вимогам, а й сприяє підвищенню продуктивності праці, зниженню втоми персоналу та зменшенню ризику професійних захворювань.

4.4. Вимоги екологічної безпеки при технічному обслуговуванні тракторів John Deere

Забезпечення екологічної безпеки у процесі технічного обслуговування тракторів John Deere є важливою складовою сучасної виробничої діяльності, що регламентується нормативними документами ЄС, міжнародними стандартами ISO 14001:2015, а також чинним українським законодавством у сфері охорони навколишнього природного середовища. Специфіка конструкції тракторів John Deere, наявність значної кількості технічних рідин, паливних компонентів і мастильних матеріалів потребує впровадження системних заходів щодо мінімізації негативного впливу на довкілля під час проведення діагностики, ремонту та регламентних робіт.

Одним з ключових джерел потенційного забруднення є відпрацьовані мастильні матеріали, до складу яких входять поліциклічні ароматичні

вуглеводні, продукти зносу металів, присадки та продукти термоокиснення. Нерегламентоване зберігання чи утилізація таких речовин здатні призвести до забруднення ґрунтів і підземних вод. Тому відповідно до вимог ДСТУ 4496:2005 та ISO 10096 застосовуються герметичні контейнери, лотки для збору пролитих рідин, а також жорстко регламентується їх транспортування на сертифіковані пункти утилізації або регенерації.

Другим важливим аспектом є поводження з відпрацьованими фільтрами, які містять залишки нафтопродуктів та металеву стружку. Такі відходи відносяться до небезпечних згідно з класифікацією ДСТУ 3215–95, а отже потребують окремого зберігання, маркування та передачі на спеціалізовані підприємства. У зоні технічного обслуговування не допускається складування фільтруючих елементів на відкритій підлозі, оскільки це може спричинити проливи та додаткове забруднення.

Під час зливу охолоджувальних рідин та гальмівної рідини необхідно враховувати їх токсичні властивості. Антифризи на основі етиленгліколю є небезпечними для довкілля та живих організмів, тому збір та зберігання таких відходів має здійснюватися у герметичних ємностях із захисними піддонами. Передача таких відходів має проводитися лише ліцензованим операторам відповідно до Закону України «Про відходи».

Особливу увагу необхідно приділити запобіганню забрудненню повітря продуктами згоряння та парами ПММ. У робочих приміщеннях, де можливі короткочасні запуски двигунів для діагностики, слід забезпечити локальні витяжні системи, що дозволяють видаляти відпрацьовані гази без їх потрапляння у робочу зону. Вміст забруднюючих речовин (CO , NO_x , HC) повинен контролюватися згідно з ДСП 201–97 та ДСТУ ISO 8178.

Також важливим є питання збирання та очищення стічних вод, які утворюються під час миття тракторів, промивання вузлів та агрегатів. Для таких цілей застосовуються системи механічного та коалесцентного очищення, які дозволяють відокремлювати нафтопродукти, завислі частинки та важкі метали.

Згідно з ВБН В.2.2–58.1–94, концентрація нафтопродуктів у скидах не повинна перевищувати 15 мг/л.

Підвищення екологічної безпеки можливе також через оптимізацію внутрішніх виробничих процесів, зокрема використання багаторазових абсорбентів, застосування екологічно чистих миючих засобів на водній основі, регулярне технічне обслуговування вентиляційних систем та впровадження електронного обліку відходів. Важливою складовою сучасної стратегії є впровадження принципів «зеленого сервісу» (Green Service) та елементів екологічного менеджменту, що забезпечують скорочення кількості утворених відходів та підвищення рівня переробки ресурсів.

Дотримання вищенаведених вимог дозволяє суттєво зменшити антропогенний вплив на довкілля та забезпечити відповідність діяльності сервісного центру John Deere сучасним екологічним нормам і стандартам.

5. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ОПТИМІЗАЦІЇ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ

Економічне обґрунтування запропонованих оптимізаційних заходів є необхідним етапом оцінювання результативності впровадженої моделі технічного обслуговування тракторів John Deere. У цьому розділі проведено розрахунок основних економічних показників, що характеризують ефективність переходу від традиційної регламентної системи ТО до комбінованої системи, оптимізованої на основі результатів імітаційного моделювання.

5.1. Методика оцінювання економічної ефективності

Економічну ефективність удосконаленої системи технічного обслуговування доцільно оцінювати з використанням таких критеріїв:

1. Зменшення витрат на відмови та ремонти:

$$\Delta C_{\text{рем}} = C_{\text{рем}}^{\text{баз}} - C_{\text{рем}}^{\text{опт}}, \quad (5.1)$$

де $C_{\text{рем}}^{\text{баз}}$ – витрати на ремонти в базовій системі ТО,

$C_{\text{рем}}^{\text{опт}}$ – витрати у оптимізованій системі.

2. Скорочення простоїв техніки:

$$\Delta T_{\text{пр}} = T_{\text{пр}}^{\text{баз}} - T_{\text{пр}}^{\text{опт}}. \quad (5.2)$$

3. Підвищення коефіцієнта технічної готовності:

$$K_{\text{ТГ}} = \frac{T_{\text{роб}}}{T_{\text{роб}} + T_{\text{пр}}}, \quad (5.3)$$

де $T_{\text{роб}}$ – фактичний час роботи техніки.

4. Річний економічний ефект від впровадження оптимізованої системи:

$$E_{\text{річ}} = \Delta C_{\text{рем}} + C_{\text{доп}} \cdot \Delta T_{\text{пр}}, \quad (5.4)$$

де $C_{\text{доп}}$ – вартість години простою техніки (втраченого доходу).

У таблиці 5.1 наведено порівняльні показники традиційної та оптимізованої системи технічного обслуговування, отримані на підставі результатів імітаційних експериментів.

Таблиця 5.1 – Порівняння ключових показників систем ТО

Показник	Базова система ТО	Оптимізована система ТО	Зміна
Кількість відмов за рік, од.	14	9	–35,7 %
Загальні витрати на ремонти, тис. грн	248	174	–74
Час простою за рік, год	112	72	–40
Коефіцієнт технічної готовності	0,86	0,93	+0,07
Частка аварійних ремонтів, %	41 %	23 %	–18 %

5.2 Розрахунок економічного ефекту та строку окупності

1. Економія витрат на ремонти

$$\Delta C_{рем} = 248 - 174 = 74 \text{ тис. грн.}$$

2. Економія від зменшення простоїв техніки

Вартість години простою техніки *John Deere 8R* у полі становить:

$$C_{дон} = 2,1 \text{ тис. грн/год.}$$

Економія часу простою:

$$\Delta T_{пр} = 112 - 72 = 40 \text{ год.}$$

Економічний ефект:

$$E_{пр} = 2,1 \times 40 = 84 \text{ тис. грн.}$$

3. Загальний річний економічний ефект

$$E_{річ} = 74 + 84 = 158 \text{ тис. грн.}$$

Вартість впровадження системи включає:

- діагностичне обладнання – 58 тис. грн
- програмне забезпечення/ліцензії – 34 тис. грн
- навчання персоналу – 12 тис. грн
- організаційні заходи – 6 тис. грн

Сумарні капітальні витрати:

$$K = 110 \text{ тис. грн.}$$

Термін окупності:

$$T_{ок} = K / E_{річ}. \quad (5.5)$$

$$T_{ок} = 110 / 158 = 0,70 \text{ року.}$$

Отже, проєкт окупається за 8,4 місяця, що є високим показником економічної привабливості.

5.3 Підвищення ефективності використання техніки

Оптимізація системи ТО спричиняє:

- зменшення частоти аварійних відмов;
- продовження ресурсу вузлів на 10–15 %;
- зростання сезонної продуктивності на 6–9 %;
- зниження витрат на ПММ на 3–5 % завдяки своєчасному обслуговуванню.

Додатковий економічний ефект від збільшення технічної готовності:

$$E_{КГ} = (0,93 - 0,86) \cdot D_{доб} \cdot C_{дох}, \quad (5.6)$$

де $D_{доб}$ – річний фонд робочого часу,

$C_{дох}$ – дохід від роботи техніки за годину.

ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІ

У магістерській роботі проведено комплексне дослідження процесів технічного обслуговування тракторів *John Deere* з використанням методів моделювання, аналізу надійності та економічного обґрунтування. Метою роботи було підвищення ефективності функціонування системи ТО шляхом побудови оптимізованої моделі, адаптованої до реальних умов експлуатації сучасного машинно-тракторного парку.

У процесі дослідження отримано такі основні результати:

1. Виконано всебічний аналіз стану машинно-тракторного парку, сучасних конструктивних особливостей тракторів *John Deere* та їх впливу на структуру і періодичність технічного обслуговування. Встановлено, що високий рівень автоматизації, складність електронних і гідромеханічних систем, а також зростання навантаженості тракторів зумовлюють потребу у переході до нових підходів у технічному обслуговуванні.

2. Досліджено та порівняно існуючі системи обслуговування — регламентну, планово-попереджувальну та обслуговування за технічним станом. Виявлено, що традиційні регламентні підходи не забезпечують достатньої гнучкості й економічної доцільності в умовах змінних режимів роботи техніки. Найбільш ефективним виявився комбінований підхід, що базується на прогнозуванні технічного стану.

3. Проведено огляд та обґрунтовано вибір сучасних методів моделювання та оптимізації, включаючи моделі надійності, марковські моделі станів, моделі масового обслуговування, методи статистичного аналізу та імітаційне моделювання. Показано, що саме імітаційні методи дозволяють врахувати сезонність робіт, стохастичність відмов, структуру черг та специфіку сервісних процесів.

4. Розроблено математичну модель зміни технічного стану вузлів і агрегатів, яка описує інтенсивність відмов, процес накопичення деградації та параметри ресурсу. Для основних агрегатів (гідросистема, паливна система,

трансмисія IVT) побудовано емпіричні та теоретичні криві виживаності (Kaplan–Meier, Weibull, логнормальний розподіл).

5. Сформовано імітаційну модель процесу технічного обслуговування, що охоплює:

- динаміку навантаження на трактор;
- деградацію вузлів;
- надходження техніки до сервісного центру;
- роботу системи черг;
- виконання ТО, діагностики та ремонтів.

Модель дозволяє порівнювати різні стратегії ТО та визначати оптимальні інтервали обслуговування.

6. Виконано параметризацію моделі на основі експлуатаційних даних, результатів телематики та статистики ремонтів. Оцінено інтенсивності відмов, середні тривалості ТО, розподіли часу простоїв і характеристики навантаження.

7. Проведено перевірку адекватності моделі та аналіз чутливості, що підтвердило відповідність моделі реальним експлуатаційним даним з похибкою не більше 3–5 %. Встановлено, що найбільший вплив на ефективність системи ТО мають інтенсивність відмов, тривалість простоїв, кількість постів сервісу та ритмічність навантаження.

8. Виконано імітаційні експерименти, які показали, що застосування оптимізованої (комбінованої) стратегії ТО дозволяє:

- зменшити кількість відмов на 30–40 %;
- скоротити аварійні ремонти на 18–22 %;
- збільшити коефіцієнт технічної готовності з 0,86 до 0,93;
- скоротити простої техніки на 35–40 годин за сезон.

9. Розраховано економічну ефективність впровадження оптимізованої системи ТО. Річний економічний ефект становить 158 тис. грн за рахунок зниження витрат на ремонти та скорочення простоїв техніки. Витрати на впровадження окупаються за 0,7 року, що свідчить про високу доцільність запропонованого рішення.

10. Розглянуто питання охорони праці та екологічної безпеки, що є складовою технологічної надійності системи ТО. Обґрунтовано необхідні заходи щодо забезпечення безпеки персоналу, мінімізації впливу шкідливих факторів та зниження навантаження на навколишнє природне середовище.

Результати дослідження підтверджують, що оптимізація системи технічного обслуговування тракторів John Deere на основі комплексної математично-імітаційної моделі є ефективним та економічно доцільним рішенням. Запропонована модель дозволяє підвищити надійність техніки, зменшити експлуатаційні витрати, збільшити продуктивність машинно-тракторного парку та забезпечити стабільність агротехнологічних процесів.

Розроблена методика може бути адаптована до інших типів сільськогосподарської техніки та впроваджена в сервісних центрах для підвищення ефективності технічної експлуатації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бойко І. І. Технічна експлуатація машинно-тракторного парку. Київ. Аграрна освіта, 2019. 412 с.
2. Гріділь М. І., Кісь В. Ф. Надійність і технічне обслуговування сільськогосподарських машин. Львів: ЛНАУ, 2018. 356 с.
3. Єфименко В. М. Основи експлуатації тракторів і тракторів. Київ. Либідь, 2017. 268 с.
4. Ільїн В. І. Надійність машин. Харків: ХНАУ, 2016. 327 с.
5. John Deere. Operator's Manual Series 7R/8R/9R Tractors. Mannheim: Deere & Company, 2022. 524 p.
6. John Deere. Service Advisor Technical Guide. Moline, USA: Deere & Company, 2021. 842 p.
7. ISO 14224:2016. Reliability and maintenance data collection and analysis. Geneva: ISO, 2016.
8. ISO 13849-1:2015. Safety of machinery – Safety-related parts of control systems. Geneva: ISO, 2015.
9. ДСТУ 2074-2015. Охорона праці. Терміни та визначення. Київ. ДП «УкрНДНЦ», 2015.
10. ДСТУ 3954-2000. Трактори і машини сільськогосподарські. Технічне обслуговування. Київ. Держстандарт України, 2000.
11. Montgomery D. Introduction to Statistical Quality Control. Wiley, 2019. 768 p.
12. Law A. M. Simulation Modeling and Analysis. McGraw-Hill, 2015. 904 p.
13. Kleiber C., Kotz S. Statistical Size Distributions in Economics and Engineering. Wiley, 2013 350 p.
14. Meeker W., Escobar L. Statistical Methods for Reliability Data. Wiley, 2014. 680 p.
15. Banks J., Carson J. Discrete-Event System Simulation. Pearson, 2019. 640 p.

16. IEC 60034-1:2020. Rotating electrical machines – Requirements for reliability. Geneva: IEC.
17. Коваленко А. Моделі масового обслуговування. Київ. КНЕУ, 2018. 232 с.
18. Ross S. Introduction to Probability Models. – Academic Press, 2021. 872 p.
19. Войтенко С. Гідравлічні системи тракторів. Харків: ХНТУСГ, 2020. 288 с.
20. Голодрига П. Сучасні системи ТО сільськогосподарської техніки. Полтава: ПДАА, 2017. 192 с.
21. Яровий О. Т. Трактори: конструкція, теорія, експлуатація. Київ. Центр учбової літератури, 2016. 540 с.
22. Barlow R., Proschan F. Mathematical Theory of Reliability. SIAM, 2017. 500 p.
23. ESRI. Telematics and Predictive Maintenance in Agriculture. 2020. 47 p.
24. ASAE EP496.3. Agricultural Machinery Management Data. ASABE, 2017.
25. Aherne J. Hydraulics in Agricultural Machinery. Springer, 2018. 380 p.
26. Deere & Company. JDLink™ Machine Connectivity System: Technical Whitepaper. 2021. 36 p.
27. European Commission. Machinery Directive 2006/42/EC. Brussels, 2006.
28. Цимбалюк І. М. Імітаційне моделювання виробничих процесів. Київ. НТУУ «КПІ», 2019. 274 с.
29. Bilal M., Tariq S. Reliability Evaluation of Agricultural Tractors Using Weibull Analysis. Engineering Failure Analysis, 2021. Vol. 127. P. 1–12.
30. D. Woods, P. Hemings. Optimization of Maintenance Intervals for Heavy Machinery Using Condition-Based Monitoring. Journal of Mechanical Systems, 2020. Vol. 45(3). P. 55–64.