

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ГЕОДЕЗІЇ, ЗЕМЛЕУСТРОЮ ТА АГРОІНЖЕНЕРІЇ
КАФЕДРА АГРОІНЖЕНЕРІЇ

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
д.т.н., професор

_____ Костянтин ДЯДЮРА

«___» _____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти «другого (магістерського) рівня»
освітньої програми «Агроінженерія»
за спеціальністю 208 «Агроінженерія»

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРАТЕГІЙ УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГІЄЮ ДЛЯ ПОТУЖНИХ ДИЗЕЛЬНО-ЕЛЕКТРИЧНИХ ГІБРИДНИХ ТРАКТОРІВ НА ОСНОВІ ПОДВІЙНОЇ ГЛИБОКОЇ Q-МЕРЕЖІ

Науковий керівник: професор, д.т.н.

_____ Костянтин ДЯДЮРА

Рецензент: головний інженер к.т.н.

_____ Віктор ДРОЗД

Виконав здобувач другого (магістерського) рівня
вищої освіти денної форми навчання освітньо-
професійної програми «Агроінженерія»
спеціальності 208 «Агроінженерія»
Дмитро ТЕРЗІ

*Засвідчую, що кваліфікаційна робота містить
результати власних досліджень. Використання
ідей і текстів інших авторів має посилання
на відповідне джерело.*

_____ Дмитро ТЕРЗІ

ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет геодезії, землеустрою та агроінженерії

Кафедра агроінженерії

Рівень вищої освіти другий (магістр)

Галузь знань 20 Аграрні науки та продовольство

Спеціальність 208 «Агроінженерія»

Освітня програма Агроінженерія

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри агроінженерії

Костянтин ДЯДЮРА

«___» _____ 2025 року

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ**

Дмитро ТЕРЗІ

1. Тема кваліфікаційної роботи:

«Дослідження стратегій управління енергією для потужних дизельно-електричних гібридних тракторів на основі подвійної глибокої Q-мережі»

науковий керівник кваліфікаційної роботи: професор, д.т.н. Дядюра Костянтин Олександрович

затверджені наказом ректора Одеського державного аграрного університету № 124 від « 27 » _____ 06 _____ 2025 р.

2. Строк подання здобувачем кваліфікаційної роботи 16.12.2025.

3. **Об'єкт дослідження:** процеси перетворення, накопичення та розподілу енергії в трансмісії та силовій установці потужного дизель-електричного гібридного трактора під час виконання сільськогосподарських операцій.

4. **Предмет дослідження:** закономірності функціонування та методи оптимізації стратегій управління потоками потужності (EMS) гібридного трактора з використанням алгоритмів навчання з підкріпленням, зокрема подвійної глибокої Q-мережі (Double Deep Q-Network — DDQN).

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

5.1. Теоретико-методичний розділ:

Провести аналітичний огляд існуючих архітектур гібридних силових установок (HEV) тракторів та стратегій управління енергією. Обґрунтувати

доцільність використання навчання з підкріпленням (Reinforcement Learning) для задач керування в реальному часі. Розробити математичну модель силової установки трактора (ДВЗ, електромотор-генератор, акумуляторна батарея) та формалізувати простір станів і дій для агента DDQN.

5.2. Дослідницько-аналітичний розділ:

Створити імітаційну модель гібридного трактора в середовищі MATLAB/Simulink (або Python/Gym). Розробити алгоритм управління на основі DDQN та провести навчання агента на типових їзових циклах (оранка, транспортування). Провести порівняльний аналіз ефективності запропонованої стратегії (DDQN) із традиційними правилами (Rule-Based) та стандартною DQN мережею.

5.3. Проєктно-рекомендаційний розділ:

Розробити структурну схему бортового контролера для реалізації стратегії DDQN на тракторі. Розрахувати показники паливної економичності та зниження викидів CO₂. Розробити заходи з охорони праці при експлуатації високовольтного обладнання гібридних тракторів.

6. Орієнтовний перелік графічного та табличного матеріалу:

6.1. До теоретико-методичного розділу:

Класифікація архітектур гібридних тракторів (схема). Структура навчання з підкріпленням та архітектура нейронної мережі DDQN (схема). Математична модель руху трактора та балансу потужності (формули/діаграми).

6.2. До дослідницько-аналітичного розділу:

Блок-схема імітаційної моделі в середовищі. Графіки процесу навчання агента (зміна сумарної винагороди по епізодах). Порівняльні графіки витрати палива та динаміки SOC (заряду батареї) для різних стратегій.

6.3. До проєктно-рекомендаційного розділу:

Принципова схема системи керування гібридною силовою установкою. Таблиця техніко-економічних показників впровадження системи. 9. Карта небезпечних зон при обслуговуванні гібридного трактора (Охорона праці).

7. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту):

Тип трактора: Універсально-просапний, тяговий клас 5 (аналог John Deere 8R або Case IH Magnum). Потужність ДВЗ: Номінальна – 250 кВт. Електрична частина: Електромотор – 100 кВт, Ємність АКБ – 50 кВт·год. Режим роботи (цикли): Глибока оранка (важкий режим).

8. Перелік публікацій за напрямом досліджень:

Терзі Д., Дядюра К. Дослідження стратегій управління енергією для потужних дизельно-електричних гібридних тракторів на основі подвійної глибокої Q-мережі. Збірник V Міжнародної науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників та молодих науковців «Актуальні аспекти розвитку науки і освіти»: 2-3 жовтня 2025р., Одеса: Одеський державний аграрний університет, 2025.С.163-165

9. Дата видачі завдання: « 19 » _____ 12 _____ 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	Кількість кредитів	Примітка
1.	Визначення теми, об'єкта та предмета дослідження	27.06.2025	0,25	
2.	Отримання завдання і складання змісту (плану) кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	27.06.2025	0,25	
3.	Складання календарного плану – графіку з підготовки кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	27.06.2025	0,5	
4.	Написання першого (теоретикометодичного) розділу кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	17.07.2025	2,0	
5.	Вивчення матеріалів базових підприємств	07.08.2025	1,0	
6.	Написання другого (дослідницькоаналітичного) розділу кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	02.09.2025	2,0	
7.	Написання третього (проектно-розрахункового) розділу кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	17.10.2025	3,0	
8.	Написання висновків, списку літератури	27.11.2025	0,5	
9.	Перевірка кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту) науковим керівником	07.12.2025		
10.	Доопрацювання роботи після зауважень наукового керівника	09.12.2025	0,5	

11.	Підготовка до захисту: доповідь, ілюстративний матеріал	12.12.2025	0,5	
12.	Подання кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту) на кафедрі	12.12.2025		
13.	Перевірка кваліфікаційної роботи 26 (кваліфікаційного проєкту) на оригінальність	15.12.2025		
14.	Попередній захист на кафедрі	15.12.2025		
15.	Рецензування кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	16.12.2025		
16.	Захист кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	19.12.2025	1,5	
	Загальна кількість		12	

Здобувач ОС «Магістр»

_____ Дмитро ТЕРЗІ

Науковий керівник

_____ Костянтин ДЯДЮРА

Гарант ОП

_____ Анатолій ЯКОВЕНКО

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота: складається з 83 сторінок, 5 розділів, 16 рисунків, 8 таблиць, 25 літературних джерел.

Об'єктом дослідження процеси перетворення, накопичення та розподілу енергії в трансмісії та силовій установці потужного дизель-електричного гібридного трактора під час виконання сільськогосподарських операцій.

Предметом дослідження закономірності функціонування та методи оптимізації стратегій управління потоками потужності (EMS) гібридного трактора з використанням алгоритмів навчання з підкріпленням, зокрема подвійної глибокої Q-мережі (Double Deep Q-Network — DDQN).

Дістало подальшого розвитку застосування методів глибокого навчання з підкріпленням (DRL) для агроінженерії: на відміну від легкових автомобілів, стратегію адаптовано до складних та варіативних польових умов роботи трактора.

Обґрунтовано переваги використання алгоритму DDQN (Double Deep Q-Network) над традиційними методами (на основі правил або оптимізації), що дозволяє системі навчатися через взаємодію з середовищем без необхідності створення високоточних математичних моделей об'єкта.

Розроблена стратегія управління дозволяє трактору автономно навчатися оптимальному розподілу енергії в режимі реального часу.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ГІБРИДНИЙ ТРАКТОР, УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГІЄЮ (EMS), ГЛИБОКЕ НАВЧАННЯ З ПІДКРІПЛЕННЯМ (DRL), DDQN, ПАЛИВНА ЕКОНОМІЧНІСТЬ, HiL-ТЕСТУВАННЯ.

					14.17 - КР.020.0.000.ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РЕФЕРАТ	Літ.	Аркуш	Аркушів
Розроб.		Терзі Д.						
Перевір.		Дядюра К. О.					6	куш
Реценз.						В		
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						

ЗМІСТ

	С
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕМИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	12
1.1. Тенденції розвитку енергетичних засобів у сільському господарстві.....	12
1.2 Аналіз сучасного стану та проблем управління енергією гібридних тракторів.....	18
1.3 Класифікація стратегій управління енергією (EMS).....	21
Висновок	26
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ.....	27
2.1 Математична модель динаміки руху та балансу потужності гібридного трактора	27
2.2 Розробка моделі тягового електродвигуна.....	28
2.3 Моделювання системи трансмісії.....	30
2.4 Моделювання динаміки трактора в умовах оранки.....	31
2.5 Математичне моделювання динаміки навантаження при роботі з активною фрезою (Rotary Tillage).....	32
2.6 Розробка комплексної імітаційної моделі послідовного гібридного трактора.....	44
2.7 Розробка інтелектуальної стратегії управління енергією (EMS) на базі алгоритму DDQN.....	47
Висновки.....	52

					14.17 - КР.020. 0. 000.ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 3 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗМІСТ			
Розроб.	Терзі Д.							
Перевір.	Дядюра К. О.							
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.	Дядюра К. О.				Літ. Аркуш Аркушів 34 Куш В			

ТА КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ.....	
3.1 Опис середовища імітаційного моделювання опис експериментальної установки (HIL-тестування).....	54
3.2. Валідація моделі за точністю відпрацювання швидкості.....	55
3.3. Аналіз збіжності алгоритму DDQN.....	56
3.4 Оцінка паливної економічності.....	59
3.5 Узагальнення результатів для різних режимів роботи.....	60
3.6 Перспективи подальших досліджень.....	62
Висновки.....	63
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	65
4.1. Аналіз небезпечних факторів при експлуатації високовольтних гібридних тракторів.....	65
4.2 Електробезпека та вимоги до ізоляції високовольтних кіл в агротехніці.....	67
4.3. Пожежна безпека при роботі з Li-ion акумуляторними батареями великої ємності.....	69
Висновки.....	71
РОЗДІЛ 5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ	73
5.1. Методика розрахунку економічної ефективності.....	73
5.2. Розрахунок капітальних вкладень (CAPEX).....	73
5.3 Розрахунок експлуатаційних витрат (OPEX).....	74
5.4 Показники економічної ефективності.....	75
Висновки.....	77
ВИСНОВКИ.....	79
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	81

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасне аграрне виробництво стикається з глобальними викликами: необхідністю підвищення продуктивності для забезпечення продовольчої безпеки на фоні зростання вартості енергоносіїв та жорсткішання екологічних норм. Трактори, як основні енергетичні засоби сільського господарства, традиційно оснащуються дизельними двигунами, що мають обмежений коефіцієнт корисної дії та генерують значні обсяги викидів CO₂ і NO_x. Одним із найбільш перспективних шляхів вирішення цієї проблеми є гібридизація силових установок (Hybrid Electric Vehicles — HEV). Використання дизель-електричного приводу дозволяє змістити робочу точку двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ) в зону оптимальних обертів, а пікові навантаження компенсувати за рахунок енергії акумуляторних батарей. Однак ефективність гібридного трактора критично залежить від стратегії управління енергією (Energy Management Strategy — EMS) — алгоритму, який у реальному часі вирішує, скільки енергії взяти від дизеля, а скільки — від батареї. Традиційні стратегії, засновані на правилах (Rule-based), є простими, але не гнучкими до змінних умов польових робіт (оранка, транспорт, робота з ВВП). Оптимізаційні методи (наприклад, динамічне програмування) потребують значних обчислювальних ресурсів і точних карт місцевості, що ускладнює їх застосування в реальному часі. У цьому контексті актуальним є використання методів штучного інтелекту, зокрема глибокого навчання з підкріпленням (Deep Reinforcement Learning — DRL). Використання алгоритму подвійної глибокої Q-мережі (Double Deep Q-Network — DDQN) дозволяє створити адаптивну систему, яка самостійно навчається оптимальному керуванню, враховуючи стохастичний характер навантажень на трактор.

					14.17 - КР.020.0.000.ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Терзі Д.						
Перевір.		Дядюра К. О.						
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						
					Літ.		Аркуш	Аркушів
							9	куш
					В			

Об'єкт дослідження: процеси перетворення, накопичення та розподілу енергії в трансмісії та силовій установці потужного дизель-електричного гібридного трактора під час виконання сільськогосподарських операцій.

Предмет дослідження: закономірності функціонування та методи оптимізації стратегій управління потоками потужності (EMS) гібридного трактора з використанням алгоритмів навчання з підкріпленням, зокрема подвійної глибокої Q-мережі (Double Deep Q-Network — DDQN).

Таким чином, розробка інтелектуальної системи керування для потужних гібридних тракторів є важливим науково-практичним завданням, що сприяє розвитку ресурсощадних технологій (Agriculture 4.0).

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Магістерська робота виконувалася відповідно до плану науково-дослідних робіт кафедри [Назва кафедри] [Назва університету] за напрямом «Розробка енергоефективних технічних засобів для агропромислового комплексу».

Мета: Метою роботи є підвищення паливної економічності та ефективності експлуатації потужних дизель-електричних гібридних тракторів шляхом обґрунтування та розробки адаптивної стратегії управління енергією на основі алгоритму подвійної глибокої Q-мережі (DDQN).

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати сучасний стан гібридизації мобільних енергетичних засобів та існуючі підходи до управління енергопотоками.
2. Розробити математичну модель гібридної силової установки трактора та формалізувати простір станів і дій для агента навчання з підкріпленням.
3. Синтезувати алгоритм управління на базі нейронної мережі DDQN, адаптований до специфіки сільськогосподарських технологічних операцій.
4. Провести імітаційне моделювання роботи системи на типових їздових циклах (оранка, транспортування) та порівняти ефективність запропонованого методу з традиційними стратегіями.

					14.17 - КР.020.0.000.ПЗ	Арку
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		ш 10

5. Оцінити техніко-економічну ефективність впровадження розробленої системи.

Методи дослідження. У роботі використано: методи системного аналізу – для класифікації стратегій управління; математичне моделювання – для опису динаміки руху трактора та роботи силової установки; теорію штучних нейронних мереж та навчання з підкріпленням – для синтезу керуючого алгоритму; комп’ютерне моделювання (середовище MATLAB/Simulink або Python) – для перевірки адекватності моделей та ефективності стратегій.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Уперше застосовано архітектуру Double Deep Q-Network (DDQN) для задачі управління потужним сільськогосподарським трактором, що, на відміну від стандартних DQN, дозволило зменшити переоцінку значень Q-функції та підвищити стабільність навчання в умовах високоваріативних навантажень на гаку.

2. Удосконалено математичну модель прийняття рішень гібридним приводом шляхом введення у функцію винагороди (Reward Function) динамічного коефіцієнта, що враховує поточний стан заряду батареї (SOC) та миттєву паливну ефективність ДВЗ.

3. Набуло подальшого розвитку моделювання їздових циклів трактора для навчання нейромереж, що враховує не лише швидкість руху, а й змінний опір ґрунту під час обробітку.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблена стратегія управління дозволяє знизити витрату палива гібридного трактора на 5–12% (залежно від операції) порівняно зі штатними правилами керування, при збереженні заряду батареї в допустимих межах. Запропонована структура контролера та алгоритмічне забезпечення можуть бути використані конструкторськими бюро при проектуванні нових моделей вітчизняної агротехніки.

					14.17 - КР.020.0.000.ПЗ	Арку
						ш 11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕМИ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Тенденції розвитку енергетичних засобів у сільському господарстві

Сільське господарство є одним із найбільших споживачів викопного палива. Традиційні трактори з дизельними двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ) характеризуються низьким коефіцієнтом використання палива (часто менше 35% у реальних умовах) та високим рівнем викидів CO₂, NO_x та твердих частинок [1].

В умовах зростання цін на енергоносії та впровадження жорстких екологічних стандартів (Tier 4 Final / Stage V), світові виробники (John Deere, CNH Industrial, Fendt) активно переходять до електрифікації мобільних енергетичних засобів.

Tier 4 Final (впроваджений EPA, США) та Stage V (впроваджений Єврокомісією) — це регламенти, що обмежують викиди шкідливих речовин для позашляхової мобільної техніки (Non-Road Mobile Machinery — NRMM), до якої належать трактори, комбайни та будівельна техніка. Стандарти фокусуються на різкому зниженні двох основних компонентів вихлопу дизельного двигуна [2]:

– оксиди азоту (NO_x): викликають смог, кислотні дощі та захворювання дихальних шляхів.

– тверді частинки (PM - Particulate Matter): сажа, яка є канцерогеном.

					14.17 - КР.020.1.000.ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 1	Літ.	Аркуш	Аркушів
Розроб.		Терзі Д.						
Перевір.		Дядюра К. О.					12	куш
Реценз.						В		
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						

Ключові відмінності стандартів

Tier 4 Final (США, діє з 2014 р.): вимагає зниження викидів NO_x та РМ на 90% порівняно з Tier 3. Основний акцент на масі викидів.

Stage V (ЄС, діє з 2019/2020 р.): є найжорсткішим стандартом у світі.

Головна відмінність від Tier 4 Final: Stage V обмежує не лише масу сажі, а й кількість твердих частинок (PN — Particle Number). Це змушує виробників фільтрувати навіть мікроскопічні наночастинки, які раніше не враховувалися [3].

Технічні рішення для відповідності стандартам. Для досягнення цих норм виробники змушені оснащувати трактори складними системами доочищення відпрацьованих газів (Aftertreatment Systems) [4]:

- DOC (Diesel Oxidation Catalyst): окислювальний каталізатор, нейтралізує чадний газ (CO) та вуглеводні (HC);

- DPF (Diesel Particulate Filter): сажовий фільтр. Критично необхідний для Stage V. Вловлює до 99.9% твердих частинок. Потребує періодичної "регенерації" (випалювання сажі при високій температурі).

- SCR (Selective Catalytic Reduction): селективна каталітична нейтралізація. Впорскує розчин сечовини (AdBlue / DEF) у вихлопну трубу. Хімічна реакція перетворює NO_x на нешкідливий азот N_2 та воду.

- EGR (Exhaust Gas Recirculation): рециркуляція вихлопних газів. Повертає частину газів у циліндр для зниження температури згоряння та зменшення утворення NO_x .

Стабільна температура вихлопу: Системи SCR та DPF ефективно працюють лише при високих температурах (понад 250-300°C). У звичайному тракторі при низькому навантаженні (наприклад, простій або легкий транспорт) температура падає, і системи перестають працювати або забиваються. Дизель завжди працює в оптимальній точці (OOL), забезпечуючи стабільно високу температуру для ефективної роботи каталізаторів [5].

					14.17 - КР.020.1.000.ПЗ	Арку
						13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Усунення перехідних режимів (Transient spikes): найбільший викид сажі відбувається, коли водій різко тисне на газ (турбояма, нестача повітря → чорний дим) [6].

У гібриді: пікове навантаження бере на себе батарея. Дизель змінює оберти плавно, тому викиди сажі мінімальні, що продовжує ресурс DPF-фільтра.

Downsizing (Зменшення об'єму): Гібридна схема дозволяє встановити менший двигун. Менший двигун = менший абсолютний обсяг вихлопних газів, які треба очистити.

Основними напрямками модернізації є [7]:

- повна електрифікація (Battery Electric Vehicles — BEV): обмежена ємністю батарей для важких польових робіт.

- гібридизація (Hybrid Electric Vehicles — HEV): найбільш перспективний шлях, що поєднує автономність ДВЗ та ефективність електроприводу.

Концепція повної електрифікації (BEV) передбачає повну відмову від двигуна внутрішнього згорання. Джерелом енергії виступає тягова акумуляторна батарея великої ємності, яка живить електродвигуни приводу коліс та валу відбору потужності (ВВП).

Така архітектура є найбільш привабливою з точки зору екології ("Zero Emission" у місці експлуатації) та енергоефективності. ККД електричної трансмісії (батарея → інвертор → двигун) сягає 85–92%, тоді як ККД дизельного трактора в реальних умовах рідко перевищує 30–35% [8]. Однак, для мобільних енергетичних засобів високої потужності (тягові класи 3–5 і вище), до яких належать орні трактори, технологія BEV стикається з фундаментальними фізичними обмеженнями.

Обмеження густини енергії (Energy Density Problem). Головною перешкодою є низька питома густина енергії сучасних акумуляторів порівняно з дизельним паливом.

					14.17 - КР.020.1.000.ПЗ	Арку
						14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Дизельне паливо: питома енергія становить близько 11 900 Вт·год/кг. Навіть з урахуванням ККД дизеля (35%), корисна енергія на валу складає

$$\approx 4\,100 \text{ Вт} \cdot \frac{\text{год}}{\text{кг}}.$$

Li-ion батареї (NMC/LFP): сучасні батареї мають густину енергії на рівні 150–260 Вт·год/кг. Це означає, що для заміни стандартного паливного бака трактора на 500 л (який важить близько 420 кг і забезпечує 10–12 годин важкої роботи) знадобиться акумуляторна батарея вагою понад 8–10 тонн.

Проблема ущільнення ґрунту. Збільшення маси трактора через важкі батареї призводить до надмірного ущільнення ґрунту (Soil Compaction). Це руйнує структуру родючого шару, порушує аерацію та вологообмін, що в результаті знижує врожайність культур на 10–20%. Для аграріїв це є неприйнятним фактором.

Автономність та інфраструктура. Сільськогосподарські роботи часто проводяться на значній відстані від електромереж. Тривалість зарядки: щоб зарядити батарею ємністю 500–800 кВт·год (еквівалент для важкого трактора) за обідню перерву (1 година), потрібна зарядна станція потужністю 0,5–0,8 МВт. Така інфраструктура в полях відсутня.

Режим роботи: Під час посівної або жнив техніка працює цілодобово. Простій на зарядку (навіть 2-3 години) означає втрату дорогоцінного часу.

Сфера застосування BEV. Враховуючи вищенаведене, повна електрифікація наразі є доцільною лише для [9]:

- тракторів малої потужності (до 50–70 к.с.) для садівництва та виноградарства;
- комунальної техніки та навантажувачів, що працюють поблизу ферми/бази;
- роботів-дронів.

Оскільки об'єктом дослідження є трактор, здатний виконувати енергоємні операції (оранка, транспорт), технологія BEV не задовольняє вимогам щодо автономності та масогабаритних показників. Тому обрано

					14.17 - КР.020.1.000.ПЗ	Арку
						15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

гібридну архітектуру, яка є компромісним та найбільш ефективним рішенням на сьогоднішній день.

Гібридні електричні транспортні засоби (Hybrid Electric Vehicles — HEV) являють собою технологічний компроміс, що дозволяє подолати обмеження як традиційних дизельних двигунів, так і повністю електричних систем. Концепція HEV базується на синергетичному використанні двох (або більше) джерел енергії: хімічної енергії палива (для ДВЗ) та електрохімічної енергії, накопиченої в акумуляторній батареї (для електродвигуна).

Це рішення визнано найбільш перспективним для важкої сільськогосподарської техніки на найближчі десятиліття з огляду на наступні фактори:

Збереження автономності. На відміну від BEV, гібридний трактор не потребує тривалих простоїв на зарядку та створення потужної зарядної інфраструктури в полях. Запас ходу обмежений лише об'ємом паливного бака, який можна заправити за кілька хвилин. Це критично важливо під час пікових сезонних робіт (посівна, збирання врожаю), коли техніка працює у режимі 24/7.

Оптимізація роботи дизельного двигуна. У звичайному тракторі дизель жорстко зв'язаний з колесами через трансмісію. При зміні навантаження або швидкості двигун змушений працювати в перехідних режимах, часто виходячи за межі зони економічної ефективності (зони мінімальної питомої витрати палива — BSFC).

У гібридній схемі (особливо послідовній) навантаження на ДВЗ вирівнюється (Load Leveling) [10]:

- при пікових навантаженнях (важкий ґрунт) допомога надходить від батареї;
- при малих навантаженнях надлишкова потужність двигуна йде на підзарядку батареї, штучно довантажуючи двигун до оптимальної точки ККД.

Високі тягові характеристики електроприводу. Електродвигуни мають ідеальну для трактора механічну характеристику: максимальний крутний момент доступний з нульових обертів ($n = 0$). Це забезпечує:

Легкий старт з місця під навантаженням (наприклад, з опущеним плугом).

Високу перевантажувальну здатність.

Миттєву реакцію на зміну опору ґрунту (час відгуку електродвигуна — мілісекунди, дизеля — секунди).

Рекуперація енергії (Regenerative Braking).

Важка сільськогосподарська техніка має значну кінетичну енергію. У традиційних тракторах при гальмуванні або русі під ухил ця енергія розсіюється у вигляді тепла на гальмівних колодках. Гібридна система дозволяє перетворити електродвигун на генератор і повернути цю енергію в батарею, що особливо актуально при транспортних роботах на горбистій місцевості.

Класифікація за ступенем гібридизації. Для тракторів розглядають різні рівні впровадження технології [11]:

- Micro Hybrid (Start-Stop): лише вимикає двигун при зупинках. Малоефективно для поля;
- Mild Hybrid (М'який гібрид): електродвигун допомагає дизелю при розгоні, але не може рухати трактор самостійно;
- Full Hybrid (Повний гібрид): здатний рухатися лише на електротязі;
- Plug-in Hybrid (PHEV): має збільшену батарею та можливість зарядки від розетки. Це дозволяє використовувати дешеву "нічну" електроенергію для виконання легких робіт вранці без запуску дизеля, значно знижуючи експлуатаційні витрати.

					14.17 - КР.020.1.000.ПЗ	Арку
						17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Виходячи з аналізу, для магістерської роботи обрано концепцію Full Hybrid (PHEV) з послідовною архітектурою. Це дозволяє поєднати енергетичну щільність дизельного палива (для забезпечення змінної роботи) з точністю керування та ефективністю електроприводу, а наявність батареї відкриває шлях для застосування інтелектуальних стратегій управління, таких як DDQN.

Управління енергією в гібридних силових установках можна розглядати як задачу послідовного прийняття рішень. Одним із фундаментальних методів вирішення таких задач є Q-learning — алгоритм навчання з підкріпленням (Reinforcement Learning, RL), заснований на значенні функції цінності (value-based).

1.2 Аналіз сучасного стану та проблем управління енергією гібридних тракторів

Ефективність гібридного трактора значною мірою залежить від конфігурації силової лінії (Powertrain). У науковій літературі виділяють три основні топології:

Послідовна архітектура (Series Hybrid): ДВЗ механічно не з'єднаний з колесами, а лише обертає генератор. Рух здійснюється виключно тяговим електродвигуном [12]:

- переваги: ДВЗ може працювати в стаціонарному режимі максимального ККД (на лінії OOL); проста трансмісія.

- тягові характеристики: Забезпечує високий крутний момент з нульових обертів, що ідеально підходить для важких польових робіт (оранка, зрушення з місця під навантаженням);

- спрощення трансмісії: Відпадає потреба у багатоступінчастій коробці передач та зчепленні.

					14.17 - КР.020.1.000.ПЗ	Арку
						18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– недоліки: подвійне перетворення енергії (механічна → електрична → механічна);

– масогабаритні показники: необхідність встановлення двох потужних електромашин (генератора та двигуна), кожна з яких має бути розрахована на повну потужність трактора.

Дизельний двигун виконує функцію приводу електрогенератора, який перетворює механічну енергію в електричну. Отримана енергія спрямовується або безпосередньо до тягового електродвигуна, або накопичується в акумуляторній батареї. Рух трактора здійснюється виключно за рахунок тягового електродвигуна.

Паралельна архітектура (Parallel Hybrid): ДВЗ та електродвигун можуть обертати колеса як окремо, так і разом.

Послідовно-паралельна (Series-Parallel / Power Split): найскладніша, але гнучка схема (наприклад, Toyota Prius або трактори з CVT).

Аналіз показує, що для потужних тракторів, які працюють зі змінним навантаженням (оранка, фрезкування), послідовна схема є оптимальною, оскільки дозволяє повністю "відв'язати" режим роботи дизеля від швидкості руху трактора.

У цій роботі основна увага приділяється серійному гібридному трактору як об'єкту дослідження, а конкретна структура системи живлення трактора показана на рисуюнок 1.1. Основні компоненти включають дизельний двигун, генератор, тяговий акумулятор, систему керування живленням, тяговий двигун, систему трансмісії та знаряддя трактора. Режим роботи гібридної системи живлення такий: коли тяговий акумулятор має достатній заряд, він подає живлення на тяговий двигун, який потім приводить у рух трактор та його робоче обладнання через систему трансмісії. Коли заряду акумулятора недостатньо, дизельний двигун запускається та одночасно живить генератор для заряджання тягового акумулятора. Основні параметри системи живлення трактора наведено в таблиці 1.2, включаючи конкретні

					14.17 - КР.020.1.000.ПЗ	Арку
						19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

деталі, такі як основні параметри роботи дизельного двигуна та тягового двигуна, а також загальні параметри трактора та номінальна ємність тягового акумулятора.



Рисунок 1.1 – Структура системи живлення трактора

Таблиця 1.2 – Основні технічні параметри компонентів гібридної силової установки трактора

Компонент системи	Параметр	Значення	Одиниця виміру
Дизельний двигун	Номінальна потужність	85	кВт
	Номінальна частота обертання	2300	об/хв (r/min)
	Діапазон обертів макс. крутного моменту	1500–1700	об/хв (r/min)
Тяговий електродвигун	Номінальна потужність	63	кВт
	Пікова потужність	125	кВт
	Номінальна частота обертання	2000	об/хв (r/min)
	Номінальний крутний момент	300	Н·м
Параметри трактора	Експлуатаційна маса	1905	Кг
	Радіус ведучого колеса	0.3556	М
	Площа лобового опору (міделя)	2.95	м²
Акумуляторна батарея	Номінальна ємність	70	А·год (Ah)
	Номінальна напруга	330	В
	Робочий діапазон заряду (SOC)	0.25–0.90	—

1.3 Класифікація стратегій управління енергією (EMS)

Ключовим елементом гібрида є стратегія управління енергією (Energy Management Strategy — EMS) — алгоритм, який вирішує, скільки енергії взяти від палива, а скільки — від батареї в кожен момент часу.

Існуючі стратегії поділяють на дві великі групи:

Стратегії на основі правил (Rule-based). Це детерміновані алгоритми, засновані на логічних умовах "якщо-то" (if-then) або таблицях пошуку [13]:

- термостатна стратегія (Thermostat Control): ДВЗ вмикається/вимикається при досягненні певних меж SOC.

- слідування за навантаженням (Power Follower): ДВЗ намагається покрити основне навантаження, а батарея компенсує піки.

Термостатна стратегія є найпростішим прикладом детермінованих правил управління (Rule-Based Control). Вона широко використовується як базовий рівень (baseline) для оцінки ефективності складніших інтелектуальних алгоритмів [14].

Принцип дії. Суть стратегії полягає в підтримці рівня заряду акумуляторної батареї (SOC) у заданому діапазоні шляхом циклічного вмикання та вимикання генераторної установки. Робота двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ) організована за принципом гістерезису [15]:

- режим розряду (Charge Depleting): трактор рухається виключно на електротязі, використовуючи енергію батареї. ДВЗ вимкнений;

- нижній поріг (SOC_{low}): коли заряд батареї падає до мінімально допустимого значення (наприклад, 30%), контролер запускає дизельний двигун;

- режим заряду (Charge Sustaining): Двигун виводиться на фіксований режим роботи, що відповідає точці його максимального ККД (найменшої питомої витрати палива). Генерована потужність йде на живлення тягового електродвигуна, а надлишок спрямовується на зарядку батареї;

14.17 - КР.020.1.000.ПЗ					Арку
					21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

– верхній поріг (SOC_{high}): Коли заряд досягає верхньої межі (наприклад, 80%), двигун вимикається, і цикл повторюється.

Стратегія слідування за навантаженням (Power Follower) є більш гнучким підходом до управління гібридною силовою установкою порівняно з термостатною стратегією. У цьому алгоритмі двигун внутрішнього згоряння (ДВЗ) розглядається як основне джерело енергії, а акумуляторна батарея виконує роль буфера для компенсації динамічних перевантажень [16].

Принцип дії. Логіка управління базується на тому, що потужність генераторної установки (P_{gen}) намагається слідувати за миттєвим попитом на тягову потужність (P_{req}), яку задає оператор (водій). При цьому батарея працює в режимі «згладжування піків» (Peak Shaving):

Базове навантаження: При стабільному русі або помірному навантаженні генератор виробляє рівно стільки енергії, скільки потрібно тяговому електродвигуну.

Пікові навантаження: Коли потреба в потужності різко зростає (наприклад, плуг потрапив у щільний ґрунт) і перевищує номінальну потужність двигуна, різницю покриває акумуляторна батарея. Це захищає дизель від перевантажень та роботи в режимі "чорного диму".

Малі навантаження: Якщо потрібна потужність дуже мала (нижче ефективної зони роботи дизеля), двигун або вимикається (перехід в режим EV), або працює з трохи вищим навантаженням, використовуючи надлишок для підзарядки батареї до цільового рівня (SOC_{ref}).

Недолік: стратегії не адаптуються до зміни умов (наприклад, перехід з дороги на важкий ґрунт) і не гарантують глобальної економії палива.

Оптимізаційні стратегії (Optimization-based) [17]:

– глобальна оптимізація (Global Optimization): Використовує динамічне програмування (Dynamic Programming — DP). Дає ідеальний результат, але вимагає знання всього майбутнього циклу наперед, що неможливо в реальному часі. Використовується лише як еталон (benchmark);

					14.17 - КР.020.1.000.ПЗ	Арку
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

– миттєва оптимізація (Real-time Optimization): Стратегія мінімізації еквівалентного споживання (ECMS) або модельне прогнозує управління (MPC). Вони ефективніші за правила, але вимагають точних математичних моделей і великих обчислювальних потужностей.

Застосування навчання з підкріпленням (Reinforcement Learning).

Останні дослідження (2018–2024 рр.) фокусуються на методах штучного інтелекту, зокрема навчанні з підкріпленням (RL). Це "безмодельний" (model-free) підхід, де агент навчається керувати трактором шляхом спроб і помилок, взаємодіючи з середовищем [18]:

– Q-learning: Базовий алгоритм, який створює таблицю (Q-table) цінності дій для кожного стану. Не підходить для безперервних процесів.

– Deep Q-Network (DQN): Використовує нейромережу замість таблиці. Це дозволяє працювати зі складними станами (швидкість, SOC, навантаження).

– Double Deep Q-Network (DDQN): Вирішує головну проблему DQN – переоцінку (overestimation) очікуваної винагороди. Використання двох окремих мереж (оціночної та цільової) робить навчання більш стабільним, що критично важливо для дороговартісної техніки.

Алгоритм Double DQN (DDQN) був запропонований Ван Хасселтом (Hado van Hasselt) у 2015 році як вдосконалення класичного алгоритму Deep Q-Network (DQN). Основною мотивацією його використання в задачах керування енергією гібридних транспортних засобів є усунення систематичної помилки, відомої як «зсув переоцінки» (Overestimation Bias).

Постановка задачі дослідження.

Аналіз літературних джерел показав, що більшість існуючих адаптивних стратегій розроблено для легкових автомобілів або міських автобусів. Специфіка сільськогосподарських тракторів (робота на малих швидкостях, високий тяговий опір, стохастичне навантаження від ВВП при фрезуванні) вивчена недостатньо.

					14.17 - КР.020.1.000.ПЗ	Арку
						23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Протиріччя: Існує необхідність підвищення паливної економічності гібридних тракторів в умовах невизначеності навантажень, проте традиційні методи (Rule-based) не забезпечують оптимальності, а методи глобальної оптимізації (DP) не застосовні в реальному часі.

Найбільш перспективним напрямком є розробка інтелектуальної системи управління на базі алгоритму DDQN, адаптованого до специфіки польових робіт (оранка, транспорт).

					14.17 - КР.020.1.000.ПЗ	Арку
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновок

У першому розділі магістерської роботи проведено комплексний аналіз стану та перспектив розвитку енергетичних установок сільськогосподарських тракторів, а також методів управління потоками потужності в гібридних системах. За результатами огляду літературних джерел та патентної документації можна зробити наступні висновки:

1. Актуальність гібридизації. Встановлено, що традиційні дизельні трактори досягли межі своєї ефективності, а їх подальша експлуатація стримується жорсткими екологічними нормами (Stage V/Tier 4 Final). Повний перехід на електротягу (BEV) для важкої техніки наразі обмежений низькою густиною енергії акумуляторів. Тому найбільш перспективним шляхом є створення гібридних електричних тракторів (HEV), які поєднують автономність ДВЗ та високий крутний момент електродвигунів.

2. Обґрунтування архітектури. Порівняльний аналіз схем побудови гібридних силових установок (послідовна, паралельна, розгалужена) показав, що для тракторів, які виконують важкі польові роботи (оранка, глибоке розпушування, фрезування), оптимальною є послідовна архітектура (Series Hybrid). Вона дозволяє механічно роз'єднати дизельний двигун і колеса, забезпечуючи роботу ДВЗ у стаціонарному режимі максимального ККД незалежно від швидкості руху агрегату.

3. Недоліки існуючих стратегій управління. Аналіз методів управління енергією (EMS) виявив, що найбільш поширені детерміновані стратегії (Rule-based, Thermostat control) є простими в реалізації, але не забезпечують оптимальності в умовах динамічних навантажень. Методи глобальної оптимізації (Dynamic Programming) дають ідеальний результат, проте вимагають попереднього знання всього їздового циклу, що унеможливорює їх застосування в реальному часі.

					14.17 - КР.020.1.000.ПЗ	Арку
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. Перспективи навчання з підкріпленням. Виявлено тенденцію до впровадження методів штучного інтелекту, зокрема навчання з підкріпленням (Reinforcement Learning). Базові алгоритми, такі як Q-learning та DQN, демонструють здатність до самонавчання, проте мають суттєві обмеження: «прокляття розмірності» при дискретизації станів та схильність до систематичної переоцінки очікуваної винагороди (overestimation bias), що знижує стабільність системи.

5. Постановка задачі. На основі проведеного аналізу визначено, що найбільш ефективним підходом для вирішення задачі адаптивного керування гібридним трактором є використання алгоритму Double Deep Q-Network (DDQN). Цей метод дозволяє ефективно працювати з безперервним простором станів і усуває проблему переоцінки Q-функції.

Таким чином, метою роботи є підвищення паливної економічності послідовного гібридного трактора шляхом розробки адаптивної стратегії управління енергією на основі алгоритму DDQN, здатної навчатися в умовах стохастичних навантажень, характерних для операцій ґрунтообробки та транспортування.

					14.17 - КР.020.1.000.ПЗ	Арку
						26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ

2.1 Математична модель динаміки руху та балансу потужності гібридного трактора

Для відтворення реальних умов експлуатації трактора в середовищі моделювання необхідно інтегрувати модель водія. Головна задача цієї моделі – забезпечення слідування трактора заданому швидкісному циклу (наприклад, циклу оранки або транспортному циклу).

Модель водія базується на принципі пропорційно-інтегрального (ПІ) регулювання. Вона розраховує необхідний ступінь натискання педалі акселератора (дросельної заслінки) або педалі гальма в залежності від різниці між цільовою швидкістю та фактичною швидкістю трактора.

Алгоритм роботи моделі водія можна описати наступною системою

$$[v(t)]$$

рівнянь. Спочатку визначається миттєва похибка швидкості :

$$\Delta v(t) = v_{target} - v_{actual} \quad (2.1)$$

де $v_{target}(t)$ – цільова (бажана) швидкість трактора в момент часу t (м/с);
 $v_{actual}(t)$ – фактична швидкість трактора (м/с).

					14.17 - КР.020.2.000.ПЗ							
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								
Розроб.		Терзі Д.			РОЗДІЛ 2				Літ.	Аркуш	Аркушів	
Перевір.		Дядюра К.О.									27	кув
Реценз.									В			
Н. Контр.												
Затверд.		Дядюра К. О.										

На основі отриманої похибки формується керуючий сигнал $u(t)$ за законом ПІ-регулювання:

$$u(t) = K_p \cdot \Delta v(t) + K_i \cdot \int \Delta v(\tau) d\tau \quad (2.2)$$

де: K_p – коефіцієнт пропорційної складової (відповідає за реакцію на миттєву помилку); K_i – коефіцієнт інтегральної складової (відповідає за усунення статичної помилки з часом).

Оскільки водій не може одночасно натискати на газ і гальмо (в нормальному режимі роботи), керуючий сигнал $u(t)$ розділяється на дві складові: відкриття акселератора (a_{th}) та натискання гальма (a_{br}). Логіка розподілу виглядає наступним чином:

$$\begin{cases} \alpha_{th} = u(t), & \alpha_{br} = 0 & \text{якщо } u(t) > 0 \text{ (Розгін)} \\ \alpha_{th} = 0, & \alpha_{br} = -u(t) & \text{якщо } u(t) < 0 \text{ (Гальмування)} \end{cases} \quad 2.3$$

Значення a_{th} та a_{br} зазвичай нормуються в діапазоні $[0, 1]$ (або 0–100%), де 0 — педаль відпущена, 1 — педаль натиснута повністю.

Підбір коефіцієнтів K_p та K_i є критичним. Якщо K_p занадто великий, трактор буде "смикатися" (різко газувати). Якщо занадто малий — він не встигатиме набирати швидкість під навантаженням плуга.

2.2 Розробка моделі тягового електродвигуна

Чисельне моделювання тягового електродвигуна здійснюється на основі методу інтерполяції даних (Look-up Table approach). Використовуючи результати стендових випробувань, побудовано карту ефективності (ККД) та

					14.17 - КР.020.2.000.ПЗ	Арку
						28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

криву зовнішньої швидкісної характеристики двигуна, які залежать від частоти обертання та крутного моменту [8].

На основі зовнішньої характеристики визначається максимально допустимий крутний момент $T_{\max}$ для поточної частоти обертання ротора. Керування потужністю електродвигуна здійснюється через сигнал відкриття педалі акселератора, який надходить від моделі водія.

Математично роботу електродвигуна можна описати наступними рівняннями. Механічна потужність на валу електродвигуна P_{m_mech} (кВт) розраховується як:

$$P_{m_mech} = \frac{T_m \cdot n_m}{9550} \quad (2.4)$$

де: T_m – крутний момент двигуна (Н·м); n_m — частота обертання двигуна (об/хв); 9550 – коефіцієнт переведення одиниць.

Електрична потужність P_{m_elec} , яку двигун споживає від батареї (у тяговому режимі) або повертає в неї (у режимі рекуперації), визначається з урахуванням ККД η_m :

$$P_{m_elec} = \begin{cases} \frac{T_m \cdot n_m}{9550 \cdot \eta_m(n_m, T_m)} & \text{у режимі тяги (Motoring)} \\ \frac{T_m \cdot n_m \cdot \eta_m(n_m, T_m)}{9550} & \text{у режимі генерації (Generating)} \end{cases} \quad (2.5)$$

Значення миттєвого ККД η_m отримується шляхом інтерполяції за картою ефективності:

$$\eta_m = f(n_m, T_m) \quad (2.6)$$

Фактичний крутний момент обмежений зовнішньою характеристикою двигуна:

$$T_m \leq T_{\max}(n_m) \quad (2.7)$$

					14.17 - КР.020.2.000.ПЗ	Арку
						29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де $T_{\max}(n_m)$ — максимально можливий момент при даній частоті обертання (дані беруться з кривої зовнішньої характеристики).

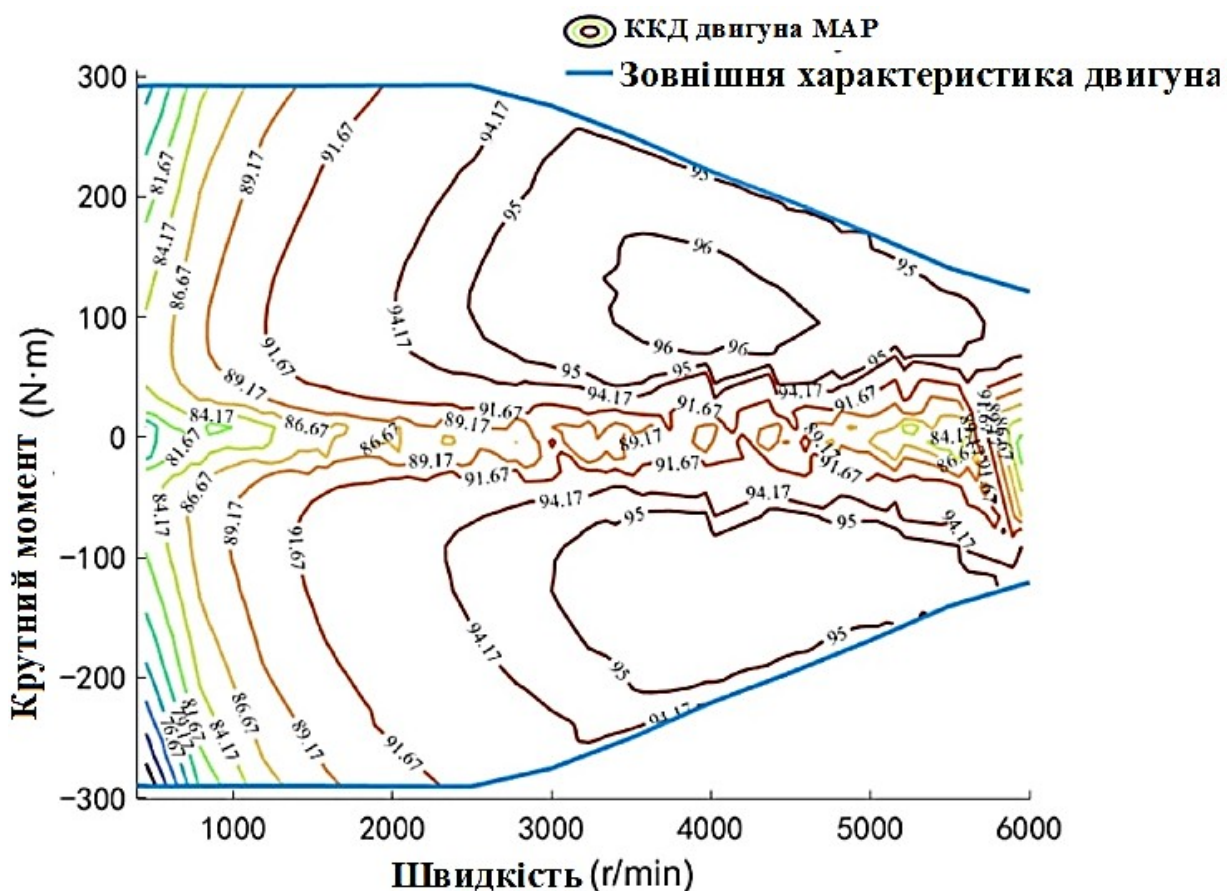


Рисунок 2.1 – ККД двигуна MAP

2.3 Моделювання системи трансмісії

У архітектурі силової передачі гібридного трактора потік потужності, що генерується тяговим електродвигуном, передається через систему трансмісії до ведучих коліс. Одночасно з цим, для забезпечення безпеки та керованості, модель враховує роботу гальмівної системи.

Система трансмісії спрощується до ланцюга: «Тяговий електродвигун → Редуктор → Ведучі колеса».

Тягова сила F_{tr} , що створюється на ведучих колесах, залежить від крутного моменту двигуна, параметрів трансмісії та геометрії рушія.

Рівняння тягового балансу та гальмівного зусилля мають наступний вигляд:

					14.17 - КР.020.2.000.ПЗ	Арку
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$F_{tr} = \frac{T_m \cdot i_g \cdot i_0 \cdot \eta_T}{R_w} \quad (2.8)$$

$$F_{br} = F_{br_max} \cdot \alpha_{br} \quad (2.9)$$

де: F_{tr} – сила тяги, що діє на трактор через систему трансмісії від крутного моменту тягового двигуна, Н; T_m – крутний момент на валу тягового електродвигуна, Н·м; i_g – передатне число коробки передач (трансмісії) на поточній передачі; i_0 – передатне число головної передачі (редуктора);

η_T – коефіцієнт корисної дії (ККД) системи трансмісії; R_w – радіус ведучого колеса, м; F_{br} – фактична гальмівна сила, що діє на колеса, Н; F_{br_max} – максимально можлива гальмівна сила механізму, Н; α_{br} – ступінь натискання педалі гальма (сигнал від моделі водія, $0 < \alpha_{br} < 1$).

Кінематичний зв'язок між швидкістю руху трактора v_a та обертами двигуна n_m визначається як:

$$n_m = \frac{v_a \cdot i_g \cdot i_0 \cdot 60}{2\pi \cdot R_w} \quad (2.10)$$

Ця модель дозволяє розрахувати баланс сил у повздовжньому русі трактора, враховуючи як режим тяги (через F_{tr}), так і режим уповільнення (через F_{br}).

2.4 Моделювання динаміки трактора в умовах оранки

У режимі оранки динаміка руху трактора визначається балансом між рушійною силою (тяговим зусиллям), створюваною силовою установкою, та силами опору, що виникають внаслідок взаємодії з ґрунтом. Основними складовими навантаження є тяговий опір плуга та опір коченню трактора.

					14.17 - КР.020.2.000.ПЗ	Арку
						31
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рівняння силового балансу (рівняння поздовжньої динаміки) для трактора в процесі оранки має наступний вигляд:

$$m \frac{dv}{dt} = F_t - (F_L + F_f + F_\omega) \quad (2.11)$$

де F_ω – сила опору підйому (якщо оранка ведеться на схилі), яка визначається як $m \cdot g \cdot \sin \omega$.

Тяговий опір плуга F_L є ключовим фактором навантаження і розраховується за емпіричною формулою (спрощена формула Горвачкіна):

$$F_L = Z \cdot b \cdot h \cdot k \quad (2.12)$$

Сила опору коченню F_f , яка залежить від ваги трактора, характеристик ґрунту та кута нахилу поверхні, визначається рівнянням:

$$F_f = m \cdot g \cdot f \cdot \cos \omega \quad (2.13)$$

Фактична швидкість руху трактора v розраховується шляхом інтегрування прискорення, яке виникає внаслідок різниці між рушійною силою та сумарним опором:

$$v(t) = \int_0^t \frac{F_t - (F_L + F_f + m \cdot g \cdot \sin \omega)}{m} dt \quad (2.14)$$

Де прийняті наступні позначення: F_t – рушійна сила (тягове зусилля), Н; F_L – тяговий опір плуга (plowing resistance), Н; F_f — сила опору коченню (rolling resistance), Н; Z — кількість корпусів плуга; b — ширина захвату одного корпусу, см; h — глибина оранки, см; k — питомий опір ґрунту, Н/см²; m — експлуатаційна маса трактора, кг; g — прискорення вільного падіння, м/с² (9.81 м/с²); f — коефіцієнт опору коченню; ω — кут нахилу поверхні поля (slope angle), градуси (°).

2.5 Математичне моделювання динаміки навантаження при роботі з активною фрезею (Rotary Tillage)

У процесі виконання операції фрезування (rotary tillage) баланс сил

	опору руху трактора	має	складний стохастичний характер, що суттєво впливає на динаміку навантаження		Архив
			14.17 - КР.020.2.000.ПЗ		32
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

відрізняється від пасивного обробітку ґрунту (наприклад, оранки плугом). Для адекватного опису цього процесу застосовується метод енергетичного спряження (power coupling).

Сумарна робоча потужність гібридного трактора (P_{req}) у цьому режимі визначається суперпозицією двох основних складових:

Потужність на переміщення (Traveling Power) — затрати на подолання опору коченню та тягового опору.

Потужність на привід фрези (Rotary Tiller Power) — затрати енергії через вал відбору потужності (ВВП) на обертання робочих органів та подрібнення ґрунту.

Математична формалізація моделі. Рівняння балансу потужності для трактора під час фрезування можна записати наступним чином:

$$P_{req} = P_{tr}(t) + P_{pto}(t) + P_{aux} \quad (2.15)$$

де: P_{tr} – потужність, необхідна для тяги (Traction/Traveling power); P_{pto} – потужність на валу відбору потужності (PTO power); P_{aux} – потужність допоміжних систем (гідравліка, кондиціонування тощо).

Модель тягової потужності (P_{tr}). Тягова потужність залежить від швидкості руху та сили опору коченню. Варто зазначити, що при роботі активної фрези обертання ножів може створювати "штовхаючий" ефект, частково зменшуючи навантаження на ведучі колеса, але збільшуючи навантаження на ВВП.

$$P_{tr} = ((F_f + F_s + F_{grade}) \cdot v) / \eta_{tr} \quad (16)$$

де: F_f – сила опору коченню ($F_f = m \cdot g \cdot f \cdot \cos \alpha$); F_s – тяговий опір знаряддя (для фрези він може бути змінним); F_{grade} – сила опору підйому ($F_{grade} = m \cdot g \cdot \sin \alpha$); v – швидкість руху трактора; η_{tr} – ККД трансмісії.

Модель потужності на ВВП (P_{pto}). Це основна складова навантаження при фрезуванні (до 70-80% від загальної потужності). Вона моделюється як функція від параметрів ґрунту та режиму різання:

$$P_{pto} = K_s \cdot B \cdot h \cdot v_{rot} \cdot \lambda \quad (2.17)$$

де: K_s – питомий опір ґрунту різанню (стохастична змінна, що залежить від типу ґрунту); B – ширина захвату фрези; h – глибина обробітку; v_{rot} – кутова швидкість обертання фрези; λ – динамічний коефіцієнт, що враховує затушення ножів та неоднорідність ґрунту.

Значення для нейромережі (DDQN). Для агента DDQN цей режим є складним середовищем, оскільки:

1. Навантаження на ВВП (P_{pto}) різко змінюється при зустрічі з ущільненнями ґрунту.
2. Агент повинен миттєво перерозподілити потік енергії: наприклад, використати бустерну функцію електромотора, щоб ДВЗ не заглухнув при різкому зростанні опору на фрезі.

Математичне моделювання динаміки навантаження в транспортному режимі

Транспортний режим експлуатації трактора характеризується переміщенням агрегату дорогами загального користування або польовими дорогами на високих швидкостях (до 40-50 км/год) з причепом або навісним обладнанням. На відміну від технологічних операцій (оранка, фрезування), у цьому режимі потужність на валу відбору потужності (ВВП) зазвичай дорівнює нулю ($P_{pto} = 0$).

Основним завданням енергетичної установки є подолання сил опору руху. Відповідно до другого закону Ньютона, рівняння тягового балансу в транспортному режимі враховує силу опору коченню, опір підйому, аеродинамічний опір та силу інерції (опір прискоренню).

					14.17 - КР.020.2.000.ПЗ	Арку
						34
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рівняння тягового балансу. Необхідна сила тяги на ведучих колесах (F_{tr}) визначається сумою сил опору:

$$F_{tr} = F_f + F_w + F_i + F_j \quad (2.18)$$

де: F_f – сила опору коченню (Rolling resistance); F_w — сила опору повітря (Air/Aerodynamic resistance); F_i – сила опору підйому (Gradient resistance); F_j – сила опору прискоренню (Acceleration resistance).

Деталізація складових моделі

1. Опір коченню (F_f) та підйому (F_i):

Ці сили залежать від маси трактора з причепом та профілю дороги:

$$F_f + F_i = M \cdot g \cdot (f \cdot \cos\alpha + \sin\alpha) \quad (2.19)$$

де: M – сумарна маса трактора та причепа ($M = m_{tractor} + m_{trailer}$); g – прискорення вільного падіння (9,81 м/с²); f — коефіцієнт опору коченню (залежить від типу покриття: асфальт $\approx 0,08 - 0,15$); α – кут нахилу дороги.

Опір повітря (F_w): Оскільки транспортна швидкість є значною, нехтувати аеродинамічним опором неможливо. Він обчислюється за формулою:

$$F_w = \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot A \cdot \rho \cdot v^2 \quad (2.20)$$

де: C_d – коефіцієнт аеродинамічного опору (для тракторів зазвичай $\approx 0,8 - 1,1$ через "необтічну" форму); A – площа лобової проекції трактора ($A = B \cdot H$); ρ – густина повітря; v – швидкість руху відносно повітря.

Опір прискоренню (F_j): Цей компонент є ключовим для динаміки гібрида. При розгоні енергія витрачається на прискорення маси, а при гальмуванні ця енергія може бути рекуперована.

$$F_j = \delta \cdot M \cdot \frac{dv}{dt} \quad (2.21)$$

					14.17 - КР.020.2.000.ПЗ	Арку
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

де: $\frac{dv}{dt}$ – лінійне прискорення (a); δ – коефіцієнт обертових мас (враховує момент інерції масивних коліс трактора та двигуна). Зазвичай для тракторів $\delta \approx 1,05 - 1,2$.

Розрахунок потужності (P_{req})

Загальна потужність, яку повинна забезпечити гібридна силова установка в транспортному режимі, визначається як:

$$P_{req_trans} = \frac{v}{\eta_{trans}} \cdot \left(Mg(f \cos \alpha + \sin \alpha) + \frac{1}{2} C_d A \rho v^2 + \delta M a \right) + P_{aux} \quad (2.22)$$

де η_{trans} – загальний ККД трансмісії.

Значення для стратегії управління DDQN

У контексті навчання нейронної мережі (DDQN), транспортний режим має такі особливості: висока стохастичність швидкості: Часті розгони та гальмування.

Потенціал рекуперації: Коли прискорення $a < 0$ (гальмування), значення F_j стає від'ємним. Агент DDQN повинен навчитися перемикати електродвигун у режим генератора, щоб зарядити батарею (збільшити SOC), замість того, щоб просто розсіювати енергію гальмівними колодками.

Boost-режим: При великих значеннях $a > 0$ (різкий обгін або старт під гору), агент повинен задіяти електромотор для допомоги дизелю.

Математичне моделювання дизель-генераторної установки (APU)

У структурі послідовної гібридної силової установки (SHEV) дизельний двигун внутрішнього згоряння (ДВЗ) та електричний генератор механічно від'єднані від ведучих коліс трактора. Вони розглядаються як єдиний енергетичний вузол — допоміжна силова установка (Auxiliary Power Unit — APU). Головна перевага такої архітектури полягає в можливості керування робочою точкою двигуна (n_e , T_e) незалежно від швидкості руху трактора, що дозволяє утримувати ДВЗ в зоні максимального ККД.

					14.17 - КР.020.2.000.ПЗ	Арку
						36
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Принцип моделювання. Оскільки фізичні процеси згоряння в циліндрах є занадто складними для швидкого розрахунку в контурі керування реального часу (RL-агент), чисельне моделювання виконується на основі статичних карт характеристик (Look-up Tables), отриманих за результатами стендових випробувань двигуна.

Математична модель витрати палива базується на інтерполяції експериментальних даних і описується системою рівнянь:

$$\dot{m}_f(t) = f_{fuel}(n_e(t), T_e(t)) \quad (2.23)$$

$$P_{gen}(t) = P_{eng}(t) \cdot \eta_{gen}(n_e(t), T_e(t))$$

де: $\dot{m}_f(t)$ – миттєва масова витрата палива (кг/год або г/с); n_e – частота обертання колінчастого вала двигуна (об/хв); T_e – крутний момент двигуна (Н·м); P_{eng} – механічна потужність на валу двигуна ($P_{eng} = \frac{T_e \cdot n_e}{9550}$ для кВт);

η_{gen}

– коефіцієнт корисної дії генератора, який також є функцією від обертів та навантаження; f_{fuel} – функція інтерполяції карти питомої витрати палива (BSFC – Brake Specific Fuel Consumption).

Ефективність перетворення енергії

Для навчання нейронної мережі (DDQN) критично важливим параметром є миттєва ефективність системи "Двигун–Генератор". Вона визначається як відношення виробленої електричної потужності до енергії спаленого палива:

$$\eta_{sys}(t) = (P_{gen}(t)) / (H_u \cdot \dot{m}_f(t)) \quad (2.24)$$

					14.17 - КР.020.2.000.ПЗ	Арку
						37
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де H_u — нижча теплотворна здатність дизельного палива (для стандартного дизеля $H_u = 42,5$ МДж/кг).

Оптимальна робоча лінія (OOL). На карті BSFC існує набір точок, де для кожної заданої потужності витрата палива є мінімальною. З'єднавши ці точки, отримуємо Оптимальну робочу лінію (Optimal Operating Line — OOL).

Завдання агента DDQN зводиться до того, щоб керувати дросельною заслінкою та навантаженням генератора так, щоб робоча точка (n_e , T_e) завжди знаходилась на лінії OOL або в безпосередній близькості до «ока ефективності» (найнижчого BSFC), навіть коли навантаження на трактор змінюється.

Якщо необхідна потужність для руху трактора є нижчою за ефективний поріг двигуна, агент повинен прийняти рішення:

- вимкнути ДВЗ і рухатися на батареї (EV mode);
- навантажити ДВЗ додатково (підзарядити батарею), щоб змістити робочу точку в зону високого ККД.

Як показано на рисунку 2.2, універсальна характеристика двигуна (Universal Characteristic) сформована шляхом інтерполяції трьох ключових елементів:

1. Карта питомої витрати палива (BSFC Map): Представлена у вигляді ізоліній рівної економічності (г/кВт·год). Ці контури дозволяють агенту DDQN оцінювати "вартість" вироблення енергії в кожній точці простору станів.

2. Зовнішня швидкісна характеристика (Outer Characteristic Curve): Верхня межа області допустимих режимів, що визначає максимальний доступний крутний момент $T_{e_max}(n_e)$ для кожної частоти обертання. Робота вище цієї лінії фізично неможлива (обмеження димності або механічної міцності).

3. Лінія оптимальних режимів роботи (OOL — Optimal Operating Line): Геометричне місце точок дотику ізоліній витрати палива та гіпербол

					14.17 - КР.020.2.000.ПЗ	Арку
						38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

постійної потужності. Це траєкторія, на якій двигун має найвищий ККД для будь-якої заданої вихідної потужності.

Стратегія управління намагатиметься утримувати робочу точку двигуна саме на кривій OOL. Якщо необхідна потужність вимагає відхилення від OOL, система зміщуватиме точку навантаження за рахунок використання буферної ємності акумулятора (заряджання або розряджання), щоб повернути двигун в зону економічної роботи.

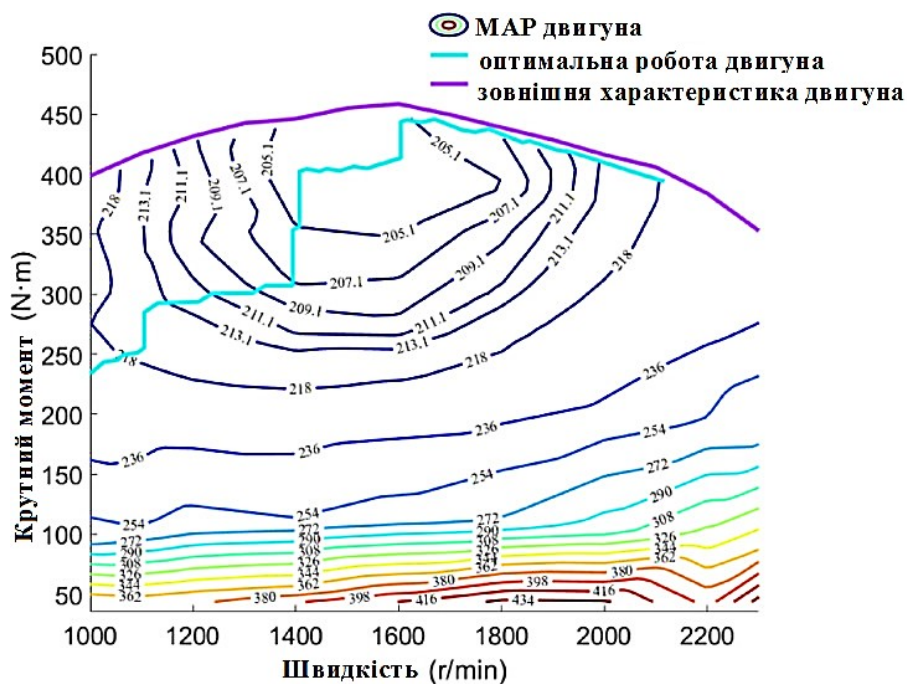


Рисунок 2.2 – Універсальні характеристики дизельних двигунів

Критерій оцінки ефективності: модель еквівалентної витрати палива

Гібридні трактори (HEV) характеризуються наявністю двох незалежних джерел енергії: дизельного палива та електроенергії, накопиченої в акумуляторній батареї. Для оптимізації керування потоками потужності необхідно звести різноманітні витрати енергоносіїв до єдиного вимірного показника.

В якості такого універсального критерію оцінки (Evaluation Metric) обрано еквівалентну витрату палива. Цей підхід дозволяє врахувати економічну вартість використання електроенергії, перераховуючи її умовний об'єм дизельного палива.

Математична модель. Сумарна еквівалентна витрата палива за цикл роботи визначається інтегралом миттєвих витрат палива двигуном та еквівалентних витрат електроенергії. Рівняння цільової функції має вигляд:

$$V_{eq} = \int_0^{T_{end}} \left(\dot{V}_{eng}(t) + \frac{j_m}{j_c} \cdot \frac{P_B(t)}{k_{conv}} \right) dt \quad (2.25)$$

Однак, враховуючи наведені у завданні параметри, повна формула розрахунку миттєвої еквівалентної витрати з урахуванням вартості енергоносіїв записується як:

$$V_{total} = \int_0^T \left(\frac{P_{eng}(t) \cdot b_e(t)}{\rho_f \cdot 1000} + \mu \cdot \frac{P_B(t) \cdot j_m}{j_c \cdot k_e} \right) dt \quad (2.26)$$

Для спрощення та адаптації до змінних, вказаних у вихідних даних, узагальнена формула еквівалентної вартості виглядає так:

$$C_{eq} = \int_0^{T_{end}} \left(E(t) + \frac{j_m}{j_c} \cdot P_B(t) \cdot \gamma \right) dt \quad (2.27)$$

де прийняті наступні позначення:

V_{eq} (або $f_{uel}(t)$ у вихідних даних) — сумарна еквівалентна витрата палива, л; T_{end} — час закінчення симуляції (тривалість їздового циклу), с; $E(t)$ — миттєва витрата дизельного палива двигуном у момент часу t , л/с (розраховується на основі b_e та ρ_f); $P_B(t)$ — потужність акумуляторної батареї у момент часу t , кВт (позитивна при розряді, негативна при заряді); j_m — вартість електроенергії, (грош. од./кВт·год, наприклад CNY/kWh або грн/кВт·год); j_c — вартість дизельного палива, (грош. од./л, наприклад CNY/L або грн/л); b_e — питома ефективна витрата палива двигуном, г/кВт·год; ρ_f — густина дизельного палива (стандартне значення $\approx 830-850$ г/л).

					14.17 - КР.020.2.000.ПЗ	Арку
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Фізичний зміст моделі. Коефіцієнт $\frac{j_m}{j_c}$ виступає "ваговим множником", який конвертує кіловати електричної потужності у літри палива на основі їх ринкової вартості.

Якщо $P_B(t) > 0$ (розряд батареї, допомога двигуну), система "витрачає" віртуальне паливо, збільшуючи загальний показник V_{eq} .

Якщо $P_B(t) < 0$ (зарядка від двигуна або рекуперація), доданок стає від'ємним, що зменшує загальну еквівалентну витрату, "винагороджуючи" систему за накопичення енергії.

Значення для DDQN. У контексті навчання з підкріпленням (Reinforcement Learning), ця формула є інвертованою основою для функції винагороди (R_{reward}). Агент DDQN на кожному кроці намагатиметься мінімізувати значення V_{eq} .

$$R_{reward}(t) = -(Cost_{fuel} + Cost_{elec}(t)) \quad (2.28)$$

Це змушує нейромережу шукати баланс: не просто економити пальне, висаджуючи батарею "в нуль" (бо електроенергія теж має ціну j_m), а використовувати найдешевше джерело енергії для поточного моменту навантаження.

Математичне моделювання тягової акумуляторної батареї. Тягова акумуляторна батарея є буфером енергії гібридного трактора. Для аналітичного опису її роботи в контурі управління обрано модель еквівалентного контуру з внутрішнім опором (Rint Model).

Відповідно до прийнятих припущень, впливом температури та ефектом старіння (зменшення ємності з часом) на поточний стан заряду (SOC) нехтуємо. Це дозволяє спростити модель до ідеального джерела напруги та послідовно підключеного активного опору.

					14.17 - КР.020.2.000.ПЗ	Арку
						41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Принцип моделювання. Як показано на графічних характеристиках, параметри батареї не є константами, а нелінійно залежать від ступеня зарядженості. Модель враховує криві зміни внутрішнього опору (R_{int}) та напруги розімкненого кола (V_{oc}) окремо для режимів заряду (charging) та розряду (discharging).

Рівняння напруги на клеммах батареї згідно з законом Кірхгофа має вигляд:

$$V_L = V_{oc}(SOC) - I_{bat} \cdot R_{int}(SOC, \text{sign}(I_{bat})) \quad (2.29)$$

де: V_L – напруга навантаження (на клеммах), В; $V_{oc}(SOC)$ – напруга розімкненого кола, яка є функцією від SOC, В; I_{bat} – струм батареї, А (приймаємо $I_{bat} > 0$ при розряді, $I_{bat} < 0$ при заряді); R_{int} – внутрішній опір батареї, Ом. Він приймає різні значення для заряду (R_{chg}) та розряду (R_{dis}).

Розрахунок струму та SOC. Оскільки вхідним параметром від системи управління є запит на потужність батареї (P_{bat}), сила струму визначається розв'язанням квадратного рівняння $P_{bat} = V_L \cdot I_{bat}$:

$$I_{bat} = \frac{V_{oc} - \sqrt{V_{oc}^2 - 4 \cdot R_{int} \cdot P_{bat}}}{2 \cdot R_{int}} \quad (2.30)$$

Зміна стану заряду (SOC) з часом розраховується методом інтеграції струму (Ampere-hour integration method):

$$SOC(t+1) = SOC(t) - \frac{I_{bat}(t) \cdot \Delta t}{Q_{bat} \cdot 3600} \quad (2.31)$$

де: $SOC(t)$ – поточний заряд (від 0 до 1); Q_{bat} – номінальна ємність батареї, А·год; Δt – крок дискретизації симуляції, с.

Обмеження для DDQN. Агент керування повинен діяти в межах фізичних обмежень батареї. У моделі встановлено жорсткі обмеження (Constraints):

					14.17 - КР.020.2.000.ПЗ	Арку
						42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– по SOC: $SOC_{min} < SOC(t) < SOC_{max}$ (зазвичай 0,3 – 0,9 для подовження ресурсу);

– по потужності: $P_{bat_min} < P_{bat}(t) < P_{batmax}$ (обмеження струмовіддачі).

Якщо агент намагається вийти за ці межі, функція винагороди (Reward function) накладає великий штраф, змушуючи нейромережу уникати таких станів.

Як показано на рисунку 2.3, у роботі представлені характеристики заряду та розряду тягової батареї, що включають криві зміни внутрішнього опору (R_{int}) та криві зміни напруги розімкненого кола (V_{oc}) в залежності від поточного рівня заряду (SOC).

При цьому впливом температури та ефектом старіння батареї на SOC знехтувано. Принцип моделювання, що враховує динамічну зміну цих параметрів, описується наступним рівнянням напруги на клемі:

$$U_{term}(t) = V_{oc}(SOC(t)) - I(t) \cdot R_{int}(SOC(t)) \quad (2.32)$$

Де значення внутрішнього опору R_{int} вибирається з апроксимованих кривих в залежності від напрямку струму (режиму роботи):

$$R_{int}(SOC) = \begin{cases} R_{chg}(SOC), & \text{якщо } I(t) < 0 \text{ (заряд / рекуперація)} \\ R_{dis}(SOC), & \text{якщо } I(t) > 0 \text{ (розряд / тяга)} \end{cases} \quad (2.32)$$

Таким чином, у кожний момент часу симуляції напруга V_{oc} і опір R оновлюються відповідно до поточного SOC, що дозволяє коректно розрахувати втрати енергії в батареї ($I^2 \cdot R$) як під час оранки (інтенсивний розряд), так і під час транспортних робіт (частковий підзаряд).

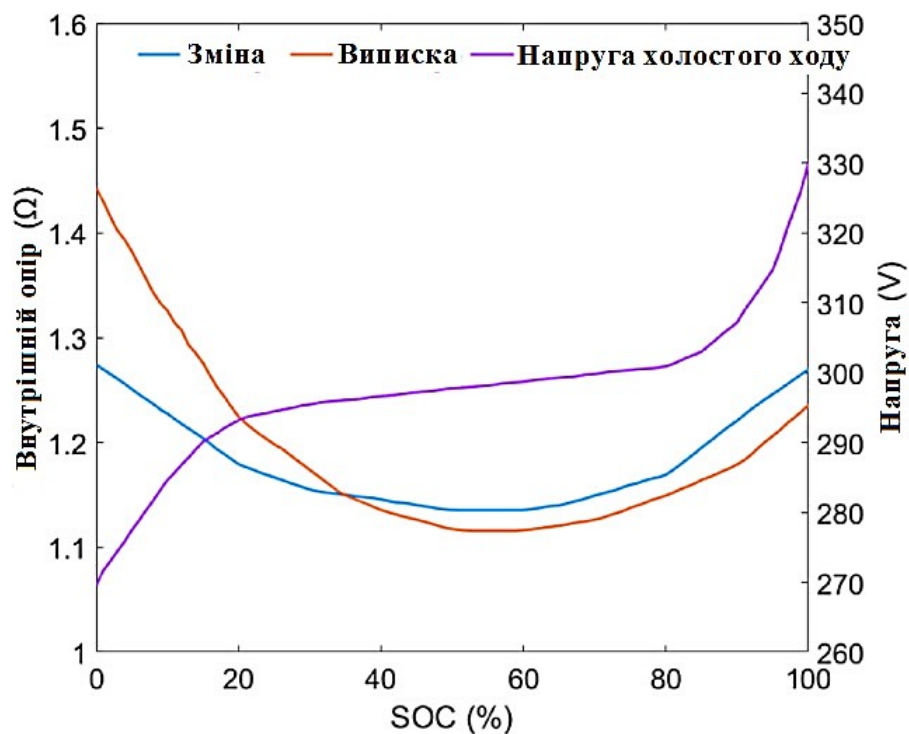


Рисунок 2.3 – Характеристики заряджання та розряджання акумуляторних батарей

2.6 Розробка комплексної імітаційної моделі послідовного гібридного трактора

Для перевірки ефективності запропонованої стратегії управління та дослідження динамічних процесів, на базі математичних залежностей, описаних у попередніх підрозділах, розроблено комплексну імітаційну модель трактора в програмному середовищі.

Структурна схема моделі, що відображає інформаційні та енергетичні зв'язки між підсистемами, наведена на рисунку 2.4.

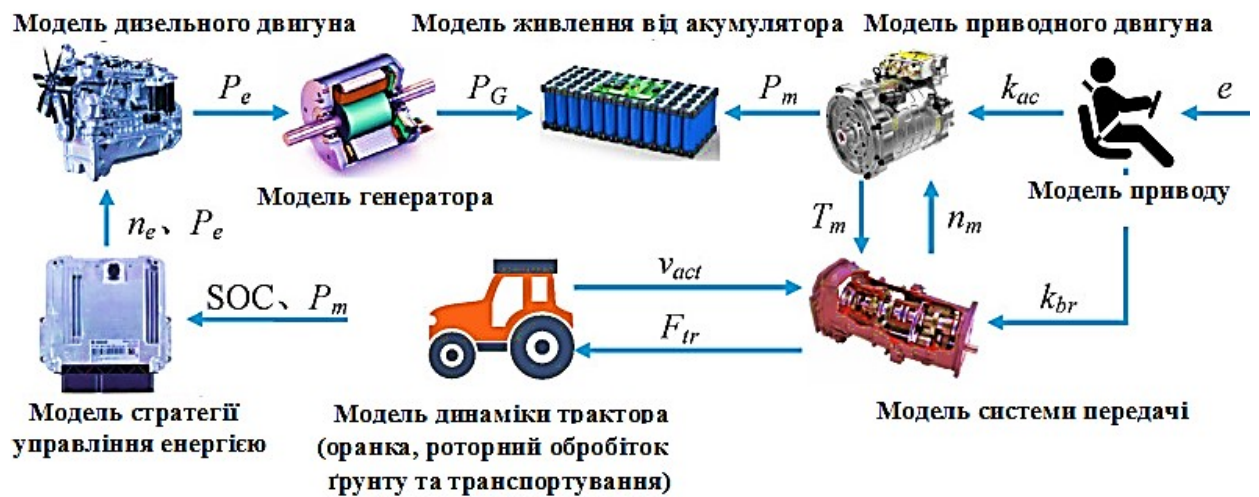


Рисунок 2.4 – Структура імітаційної моделі трактора.

Принцип імітаційного розрахунку. Логіка функціонування моделі базується на принципі зворотного зв'язку ("Backwards facing model") та реалізується за наступним алгоритмом:

1. Модель водія (Driver Model):

Симулює поведінку оператора, який намагається дотримуватися заданого їздового циклу. На основі різниці (похибки e) між цільовою (v_{target}) та фактичною (v_{actual}) швидкостями трактора:

$$e(t) = v_{target}(t) - v_{actual}(t) \quad (2.33)$$

розраховуються сигнали положення педалей акселератора (k_{ac}) та гальма (k_{br}). Зазвичай для цього використовується ПІД-регулятор.

2. Динаміка та електропривод (Vehicle Dynamics & Motor):

Отримані сигнали педалей надходять до моделей електромотора, трансмісії та блоку динаміки навантаження (оранка/транспорт). На їх основі розраховується поточна необхідна потужність на валу тягового електродвигуна $P_m(t)$, яка є сумою потужності тяги та втрат у трансмісії.

3. Стратегія управління енергією (EMS / DDQN Controller):

Це ключовий блок, куди інтегровано розроблений алгоритм. Він отримує на вхід дані про поточний стан системи:

Потужність навантаження (P_m);

Поточний рівень заряду батареї (SOC).

На основі навченої політики, EMS приймає рішення про режим роботи дизельного двигуна, визначаючи його вихідну потужність $P_e(t)$.

4. Генераторна установка (Genset Model):

Отримавши команду P_e , модель дизеля розраховує витрату палива, а модель генератора визначає електричну потужність P_G , що надходить у шину постійного струму.

5. Модель батареї (Battery Model):

Замикає енергетичний баланс. Вона розраховує зміну SOC на наступному кроці симуляції, базуючись на різниці між генерованою та спожитою потужністю:

$$P_{bat}(t) = P_m(t) - P_G(t) \quad (2.34)$$

Якщо $P_G > P_m$, надлишок йде на зарядку (SOC $\uparrow$). Якщо $P_G < P_m$, дефіцит покривається батареєю (SOC $\downarrow$).

Параметри моделювання. Силова установка спроектована за принципом Downsizing. Потужність дизельного двигуна зменшена порівняно з традиційним аналогом, оскільки пікові навантаження компенсуються буферною батареєю.

Основні технічні характеристики досліджуваного гібридного трактора, закладені в блоки, які наведені в таблиці 2.1. Коефіцієнти опору підібрані для умов роботи на стерні (для оранки) та асфальтобетонному покритті (для транспорту). Обрано літій-залізо-фосфатну (LiFePO_4) акумуляторну батарею через її термічну стабільність, високий ресурс циклів (понад 3000) та здатність віддавати великі струми, що критично важливо для агротехніки.

					14.17 - КР.020.2.000.ПЗ	Арку
						46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.1 – Основні параметри імітаційної моделі трактора

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця виміру
Загальні параметри			
Експлуатаційна маса	m	12500	кг
Радіус ведучого колеса	r_w	0,95	м
Коефіцієнт лобового опору	C_d	0,9	-
Площа лобового перерізу	A	4,5	м ²
Електромотор			
Номінальна потужність	$P_{m \text{ nom}}$	180	кВт
Максимальний момент	$T_{m \text{ max}}$	1200	Н·м
ККД (середній)	η_m	0,92	-
Дизель-генератор (APU)			
Номінальна потужність ДВЗ	P_{eng}	150	кВт
Номінальна потужність генератора	P_{gen}	140	кВт
Батарея			
Тип	-	LiFePO ₄	-
Номінальна ємність	Q_{bat}	60	А·год
Номінальна напруга	V_{nom}	600	В
Початковий SOC	SOC_{init}	0,7 (70%)	-

2.7 Розробка інтелектуальної стратегії управління енергією (EMS) на базі алгоритму DDQN

Традиційні методи управління (наприклад, динамічне програмування) вимагають точного знання майбутнього їздового циклу, що неможливо в реальних польових умовах. Тому в роботі застосовано підхід глибокого навчання з підкріпленням (Deep Reinforcement Learning — DRL), який дозволяє агенту навчатися оптимальної стратегії шляхом взаємодії з середовищем.

Теоретичні засади: від Q-learning до DDQN

Базовим алгоритмом є Q-learning — метод, заснований на принципі оптимальності Беллмана. Агент намагається максимізувати сумарну накопичену винагороду, ітеративно оновлюючи функцію цінності дії (Q-value). Правило оновлення описується рівнянням:

					14.17 - КР.020.2.000.ПЗ	Арку
						47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$Q(s_t, a_t) \leftarrow Q(s_t, a_t) + \alpha \left[r_t + \gamma \max_a Q(s_{t+1}, a) - Q(s_t, a_t) \right] \quad (2.35)$$

де: s_t , a_t – стан агента та обрана дія в момент часу t ; α – швидкість навчання (learning rate); r_t – миттєва винагорода; γ – коефіцієнт дисконтування (визначає важливість майбутніх винагород); $\max_a Q(s_{t+1}, a)$ – оцінка максимального Q -значення для наступного стану.

Вибір дії здійснюється за ϵ -жадібною стратегією (ϵ -greedy): з ймовірністю $1-\epsilon$ агент обирає найкращу відому дію (a_{optimal}), а з ймовірністю ϵ – випадкову (a_{random}) для дослідження середовища.

$$a_t = \begin{cases} \arg \max_a Q(s_t, a), & \text{з ймовірністю } 1 - \epsilon \\ \text{випадкова дія,} & \text{з ймовірністю } \epsilon \end{cases} \quad (2.36)$$

Проблема класичного Q-learning:

Для складних систем, як-от гібридний трактор, простір станів є безперервним і багатовимірним. Використання таблиці (Q-table) для зберігання значень стає неможливим через "прокляття розмірності".

Рішення — Deep Q-Network (DQN):

Алгоритм DQN використовує глибоку нейронну мережу для апроксимації функції Q-значень: $Q(s, a; \theta) = Q^*(s, a)$, де θ – вагові коефіцієнти мережі.

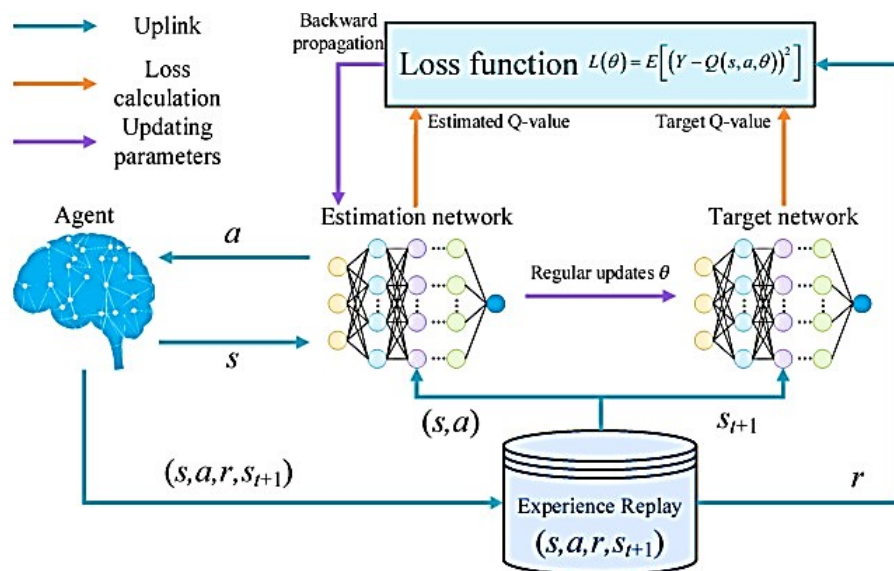
Для стабілізації навчання DQN використовує два механізми:

Experience Replay (Відтворення досвіду): Випадкова вибірка пакетів даних з буфера пам'яті для розриву кореляції між послідовними навчальними прикладами.

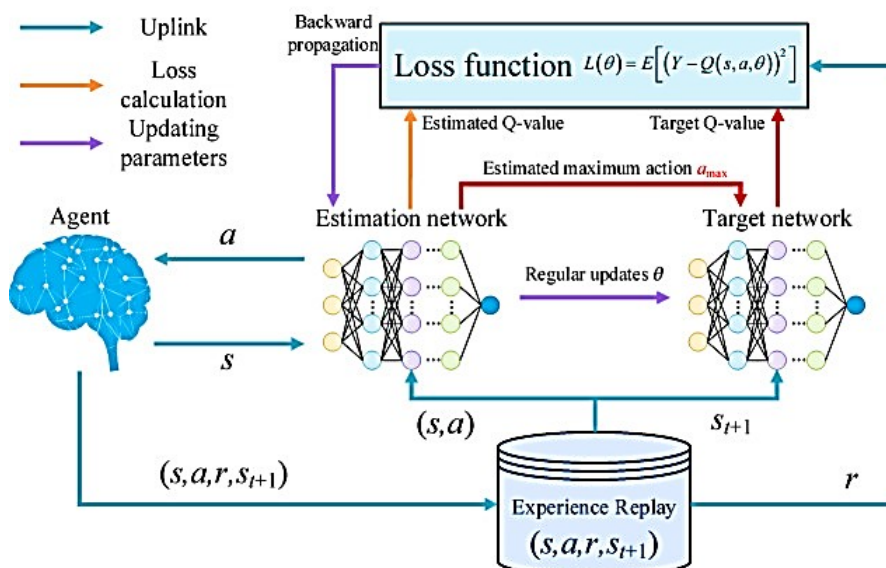
Target Network (Цільова мережа): Використання окремої "замороженої" копії мережі для розрахунку цільових значень.

Структура алгоритму DQN проілюстрована на рисунку 2.5.

					14.17 - КР.020.2.000.ПЗ	Арку
						48
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



(a)



(b)

Рисунок 2.5 – Архітектура алгоритму DRL, (a) DQN, (б) DDQN

Як показано на рисунку 2.6, алгоритм працює у два етапи:

Offline-навчання: Агент взаємодіє з імітаційною моделлю Simulink, накопичуючи досвід у буфері та оновлюючи ваги нейромереж до моменту збіжності функції втрат.

Online-застосування: Навчена нейромережа завантажується в контролер. У реальному часі вона отримує поточні Pm та SOC, і миттєво

видає оптимальну команду для двигуна P_e , не вимагаючи складних обчислень.

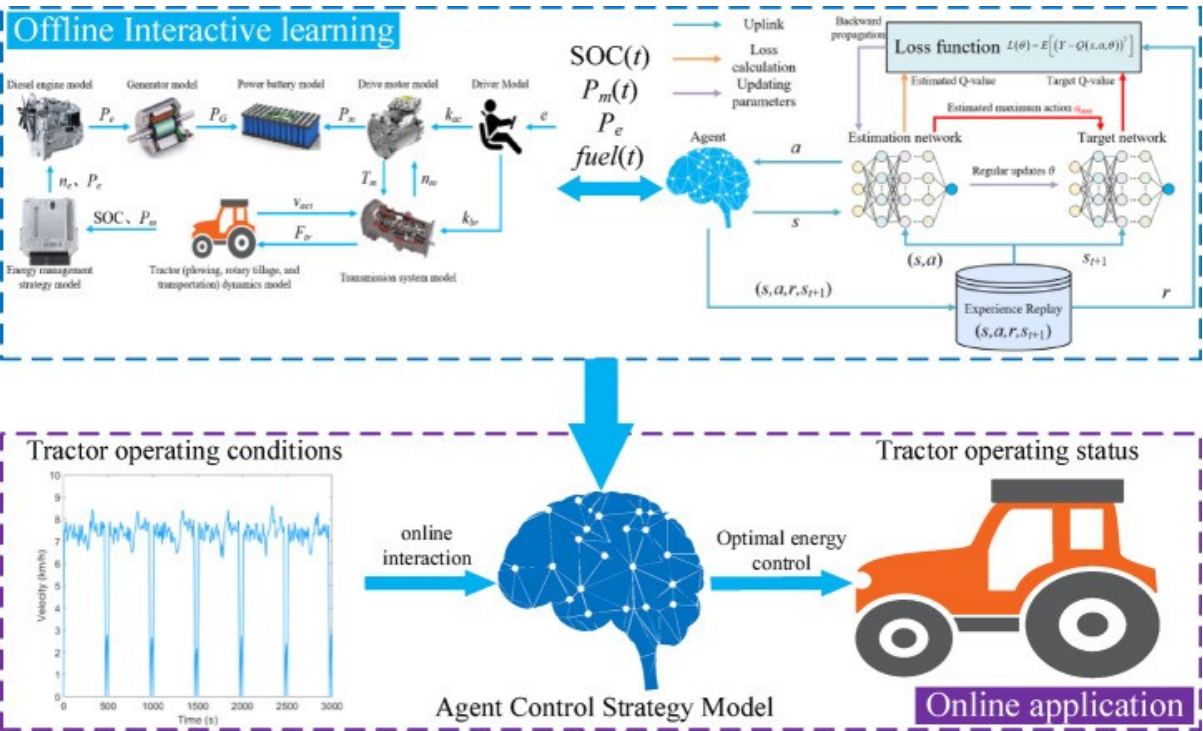


Рисунок 2.6 – Процес реалізації (Control Process):

У даній магістерській роботі стратегія слідування за навантаженням (Power Follower – PF) використовується як еталонна (baseline) для проведення порівняльного аналізу ефективності розробленого агента DDQN.

PF-стратегія належить до класу детермінованих систем управління, заснованих на правилах (Rule-based). У контексті послідовної гібридної силової установки, PF-контролер визначає робочий стан двигуна внутрішнього згоряння (Увімк/Вимк) та його потужність, базуючись на двох вхідних параметрах:

- поточний запит потужності тягового електродвигуна (P_{m_req}).
- поточний рівень заряду тягової акумуляторної батареї (SOC).

Логіка роботи алгоритму розділена на три стани, які описуються наступними правилами перемикання (рисунок 2.7).

Стан I: Критично низький заряд ($SOC < SOC_{min}$)

У цьому режимі пріоритетом є відновлення заряду батареї. Двигун запускається примусово, незалежно від поточного навантаження на колесах.

$$S_{eng}(t) = 1, \text{ якщо } SOC(t) < SOC_{min}$$

Стан II: Робочий діапазон заряду ($SOC_{min} < SOC < SOC_{max}$)

Це основний режим роботи. Рішення про запуск двигуна залежить від навантаження.

Якщо необхідна тягова потужність перевищує заданий поріг ($P_{m_req} > P_{m_req_max}$), двигун запускається негайно для забезпечення тяги.

В іншому випадку двигун зберігає свій попередній стан ($S_{eng}(t-1)$). Це реалізує гістерезис для запобігання частій циклічності (start-stop oscillation).

Стан III: Високий рівень заряду ($SOC > SOC_{max}$)

У цьому режимі пріоритетом є використання накопиченої електроенергії (EV-mode).

Якщо навантаження дуже високе ($P_{m_req} > P_{m_req_max}$), двигун продовжує працювати (зберігає попередній стан), щоб уникнути перевантаження батареї струмами розряду.

В іншому випадку (при помірному навантаженні) двигун вимикається.

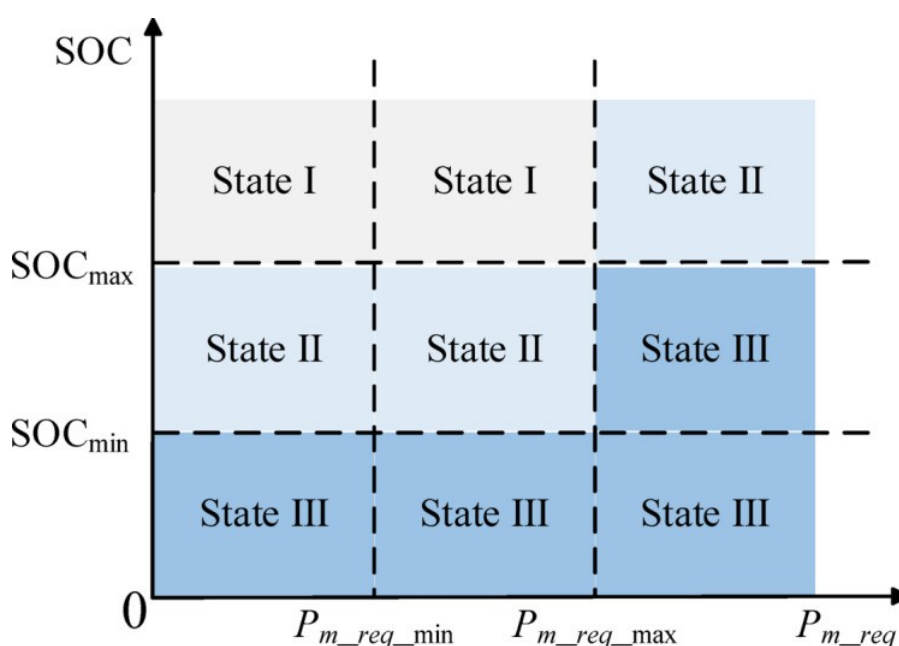


Рисунок 2.7 – Схема відстеження живлення

					14.17 - КР.020.2.000.ПЗ	Арку
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

Висновки

У другому розділі магістерської роботи здійснено теоретичне обґрунтування та розроблено комплекс математичних моделей, що описують процеси функціонування гібридного трактора та систему інтелектуального управління енергією. За результатами проведених досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Розроблено математичні моделі динаміки навантаження трактора для двох принципово відмінних режимів експлуатації: активного обробітку ґрунту (фрезування) та транспортування.

2. Застосовано метод енергетичного спряження, що дозволило врахувати стохастичний характер опору ґрунту та високу частку споживання потужності через вал відбору потужності (до 80% загального балансу).

3. Для транспортного режиму модель враховує аеродинамічний опір та інерційні сили, що є критично важливим для оцінки потенціалу рекуперативного гальмування та накопичення енергії в акумуляторній батареї під час руху.

4. Сформовано математичний опис компонентів гібридної силової установки послідовного типу. Модель дизель-генераторної установки побудована на основі квазістатичних карт ефективності (BSFC map), що дозволило виділити лінію оптимальних робочих режимів (OOL). Це забезпечує можливість роботи двигуна виключно в зоні максимального ККД незалежно від швидкості руху трактора.

5. Для моделювання тягової батареї використано модель еквівалентного контуру з внутрішнім опором (R_{int}), параметри якої (напруга розімкненого кола, опір заряду/розряду) динамічно змінюються залежно від поточного рівня заряду (SOC), що підвищує точність енергетичних розрахунків.

					14.17 - КР.020.2.000.ПЗ	Арку
						52
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6. Обґрунтовано вибір критерію оптимізації. В якості цільової функції обрано мінімізацію еквівалентної витрати палива, яка комплексно враховує вартість дизельного палива та електроенергії. Такий підхід дозволяє запобігти стратегіям, що економлять пальне лише за рахунок повного виснаження батареї.

7. Синтезовано алгоритм управління енергією на основі глибокого навчання з підкріпленням (DDQN). Доведено перевагу архітектури Double DQN над класичною DQN для даного класу задач, оскільки розділення процедур вибору дії та оцінки її якості дозволяє уникнути систематичної переоцінки Q-функції та забезпечити стабільнішу збіжність алгоритму.

8. Формалізовано простір станів (навантаження двигуна, SOC) та простір дій (дискретні рівні потужності генератора на лінії OOL). Функцію винагороди спроектовано таким чином, щоб агент навчався балансувати між економією палива та утриманням заряду батареї в безпечному діапазоні.

Створено комплексну імітаційну модель у середовищі MATLAB/Simulink. Розроблена структура реалізує зворотний потік даних (backward-facing), що дозволяє ефективно проводити навчання нейронної мережі в режимі offline та тестувати отримані стратегії на різних їздових циклах. Модель включає блоки водія, контролера EMS, фізичних компонентів та є основою для проведення чисельних експериментів у наступному розділі роботи.

					14.17 - КР.020.2.000.ПЗ	Арку
						53
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

3.1 Опис середовища імітаційного моделювання опис експериментальної установки (HIL-тестування)

Для верифікації запропонованої стратегії управління енергією та перевірки адекватності розроблених імітаційних моделей було проведено напівнатурне моделювання (Hardware-in-the-Loop — HIL). Цей метод дозволяє дослідити роботу алгоритмів управління на реальному контролері, що взаємодіє з математичною моделлю об'єкта в реальному часі.

Апаратна платформа HIL-тестування складається з трьох основних компонентів:

- середовище моделювання: Пакет MATLAB/Simulink, де розгорнуто математичну модель гібридного трактора та сценарії навантаження;
- апаратний контролер: електронний блок управління (ECU) моделі PowerECU-57A, на який завантажено скомпільований код стратегії DDQN;
- HIL-стенд: шафа тестування, що забезпечує інтерфейс вводу-виводу сигналів між моделлю та фізичним контролером.

В умовах оранки бажана продуктивність відстеження швидкості транспортного засобу під час випробувань HIL показана на рисуюнок 3.1. Середня похибка між бажаною швидкістю транспортного засобу та поточною швидкістю транспортного засобу залишається на рівні 0,028 км/год, що вказує на те, що симуляційна модель може точно обмінюватися

	даними під час випробувань НІЛ.				14.17 - КР.020.3.000.ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 3			
Розроб.		Терзі Д.						
Перевір.		Дядюра К.О.						
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						
					Літ.		Аркуш	Аркушів
							54	куш
					В			

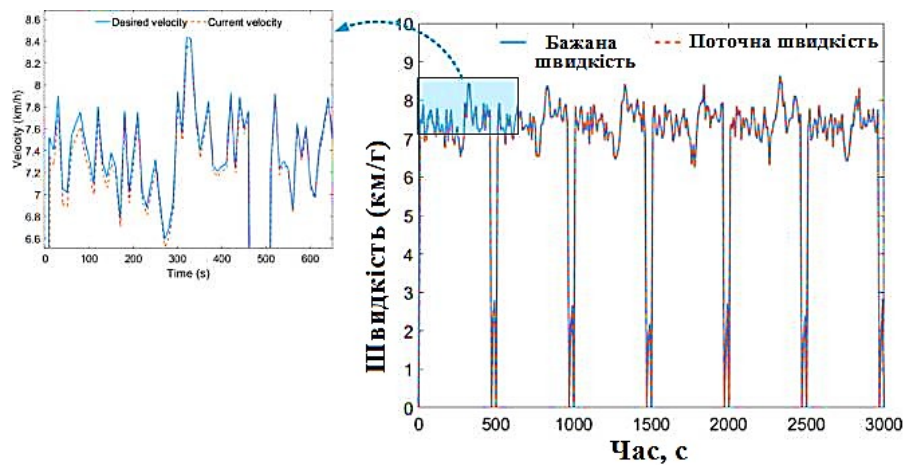


Рисунок 3.1 – Ефект відстеження швидкості транспортного засобу за умов оранки

На рисунку 3.2 показані ітераційні результати алгоритму DDQN за умов оранки. Ітераційні та середні ітераційні винагороди починають сходитися на 74-й та 81-й ітераціях навчання відповідно. Після 100 ітерацій навчання крива винагороди прагне стабілізації, підтверджуючи надійність ітераційних результатів алгоритму.

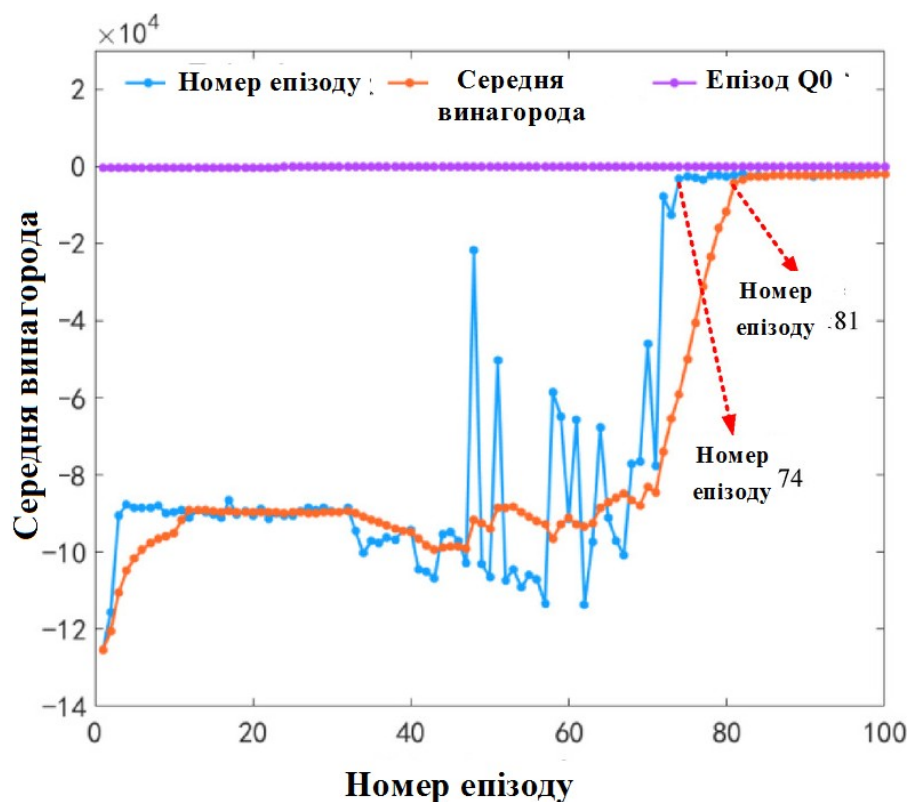


Рисунок 3.2 – Результати ітерацій алгоритму DDQN за умови оранки

3.2 Валідація моделі за точністю відпрацювання швидкості

Першим етапом експерименту стала перевірка здатності системи відслідковувати заданий цикл руху під навантаженням. В умовах виконання оранки (Plowing conditions) порівнювалися бажана швидкість трактора (Target Velocity) та фактична швидкість, отримана в ході HIL-симуляції.

Як показано на рис. 10 (див. графік вище), система демонструє високу точність регулювання. Середня абсолютна похибка між бажаною та поточною швидкістю становить 0,028 км/год, а в динамічних режимах не перевищує діапазон 0,028–0,070 км/год. Це свідчить про те, що імітаційна модель забезпечує коректний обмін даними в режимі реального часу, а динамічні характеристики віртуального трактора відповідають фізичним обмеженням.

Як показано на рисунку 3.3 а, за умов оранки потужність приводного двигуна зосереджена між 40 та 50 кВт, із середнім навантаженням 40,90 кВт та загальним споживанням енергії приблизно 34,09 кВт·год. Як показано на рисунку 3.3 б, під керуванням стратегії DDQN двигун запускається для заряджання акумулятора приблизно протягом 15 с, а після цього потужність акумулятора залишається нижче 23,44 кВт. Під керуванням стратегії PF потужність акумулятора багаторазово дорівнює потужності приводного двигуна, що вказує на те, що під час процесу керування стратегією PF двигун запускається та зупиняється кілька разів для заряджання акумулятора.

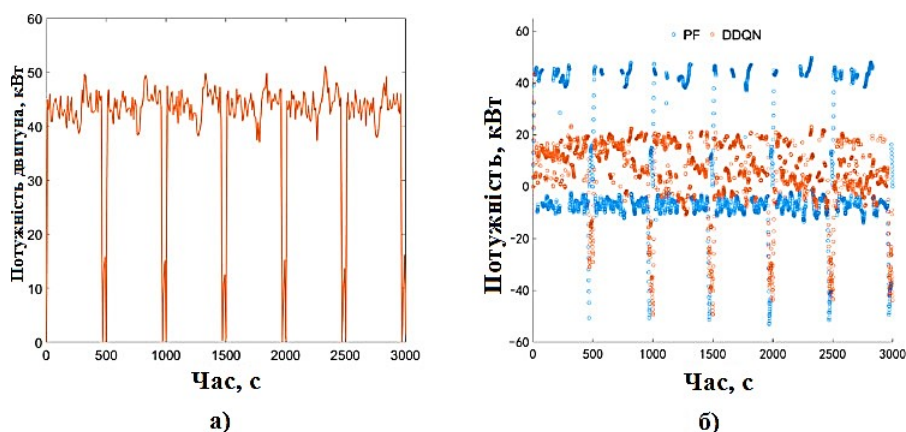


Рисунок 3.3 – Умови оранки, (а) потужність приводного двигуна; (б) живлення від акумулятора.

3.3 Аналіз збіжності алгоритму DDQN

Ефективність навчання агента DDQN оцінювалася за динамікою зміни функції винагороди (Reward function) протягом ітерацій навчання в умовах оранки.

Згідно з результатами, представленими на рис. 11, процес навчання демонструє стабільну збіжність:

- ітераційні винагороди та середнє значення винагороди починають сходитися в діапазоні між 74-ю та 81-ю ітераціями.

- після 100 ітерацій крива винагороди стабілізується, досягаючи плато.

Така поведінка підтверджує надійність алгоритму: агент успішно навчився знаходити оптимальну політику управління, яка максимізує сумарну винагороду (мінімізація палива при утриманні SOC).

Порівняльний аналіз стратегій в умовах оранки. Було проведено детальне порівняння роботи двох стратегій: базової «Слідування за навантаженням» (PF Strategy) та запропонованої інтелектуальної стратегії (DDQN Strategy).

Розподіл потоків потужності. Аналіз навантаження на тяговий електродвигун (рисунок 3.3 а) показав, що в умовах важкої оранки споживана потужність сконцентрована в діапазоні 40–50 кВт. Середнє навантаження становить 40.90 кВт, а сумарне енергоспоживання за цикл — приблизно 34.09 кВт·год.

Відмінність стратегій проявляється в управлінні джерелами енергії (рисунок 3.3 б):

Стратегія DDQN: Дизельний двигун запускається для підзарядки батареї приблизно через 15 с після початку роботи. Після цього потужність батареї стабілізується і залишається нижче 23.44 кВт. Це свідчить про те, що генератор покриває базове навантаження, а батарея працює в щадному режимі буфера.

					14.17 - КР.020.3.000.ПЗ	Арку
						57
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Стратегія PF: Потужність батареї часто зрівнюється з потужністю тягового двигуна. Це вказує на те, що PF-стратегія допускає глибокі розряди та змушена багаторазово запускати та зупиняти двигун (Start-Stop) для компенсації піків, що негативно впливає на ресурс компонентів.

Режими роботи дизель-генератора. Розподіл потужності генерації (рисунк 3.4, а) демонструє наступні характеристики:

DDQN: Потужність двигуна варіюється в широкому діапазоні 23–52 кВт (середня 35.62 кВт). Сумарно вироблено 29.70 кВт·год.

PF: Двигун працює у вузькому діапазоні високих навантажень 47–58 кВт (середня 36.19 кВт). Сумарно вироблено 30.17 кВт·год.

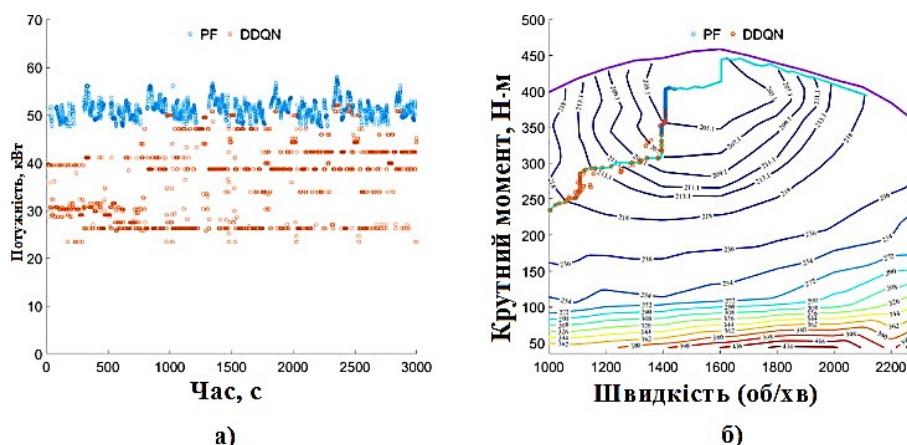


Рисунок 3.4 – Умови оранки, (а) потужність двигуна; (б) робоча точка двигуна

Аналіз робочих точок (рисунк 3.4, б) показує, що обидві стратегії намагаються утримувати двигун поблизу лінії оптимальних режимів (OOL). Однак DDQN використовує ширший діапазон обертів та моментів, що дозволяє гнучкіше адаптуватися до зміни навантаження без зайвих вимикань двигуна.

Динаміка SOC (State of Charge). Як показано на рисунку 3.5, а, під контролем стратегії PF залишок SOC становить приблизно 60,04%, тоді як під контролем стратегії DDQN залишок SOC становить близько 60,75%. Різниця в залишку SOC між двома стратегіями становить приблизно 1,18%. Під контролем стратегії DDON тенденція кривої SOC є більш пальною

порівняно зі стратегією PF, без постійного значного збільшення або зменшення SOC. Як показано на рисунку 3.5, б еквівалентне споживання палива стратегіями PF та стратегією DDQN становить приблизно 13,84 л та 12,40 л відповідно, а споживання дизельного палива становить приблизно 8,27 л та 7,89 л відповідно. Порівняно зі стратегією PF, стратегія DDQN зменшує еквівалентне споживання палива на 10,40%, а споживання дизельного палива – на 4,59%.

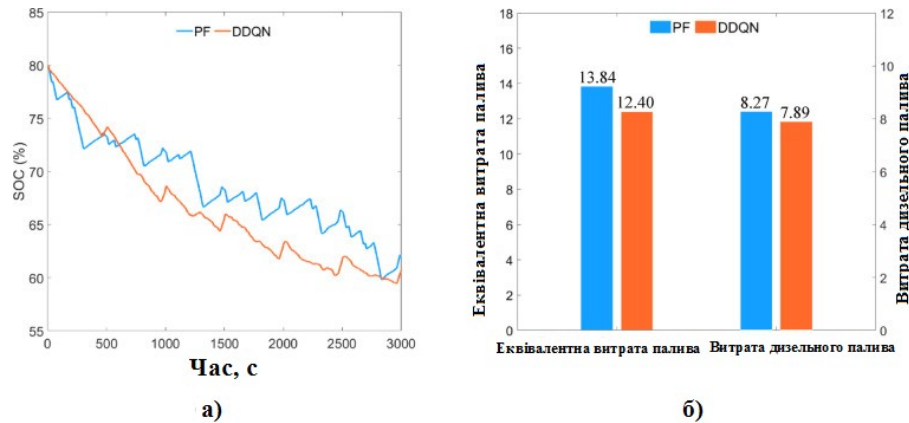


Рисунок 3.5 – Умови оранки, (а) крива зміни рівня вуглецю в атмосфері; (б) витрата палива

Криві зміни заряду батареї (рисунку 3.5, а) підтверджують перевагу інтелектуального управління:

- PF Strategy: Кінцевий SOC становить 60.04%. Крива має різкі коливання ("пилкоподібний" характер через часті пуски/зупинки);
- DDQN Strategy: Кінцевий SOC становить 60.75%. Тренд кривої значно плавніший, відсутні безперервні значні зростання або падіння заряду;
- Різниця в кінцевому рівні заряду становить 1.18% на користь DDQN, при цьому стабільність процесу сприяє подовженню терміну служби батареї.

3.4 Оцінка паливної економічності

Ключовим критерієм ефективності є споживання палива. Оцінювалися два параметри: пряме споживання дизельного палива та еквівалентне споживання (Equivalent Fuel Consumption), яке враховує вартість витраченої електроенергії батареї (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1 — Порівняння витрат палива (цикл оранки)

Показник	Стратегія PF	Стратегія DDQN	Економія
Еквівалентна витрата палива (Veq)	13.84 л	12.40 л	10.40%
Витрата дизельного палива (Vdiesel)	8.27 л	7.89 л	4.59%

Таким чином, застосування DDQN дозволило зменшити еквівалентну витрату палива на більш ніж 10% за рахунок оптимізації роботи генератора та ефективного використання рекуперації/буферизації (рисунок 3.6).

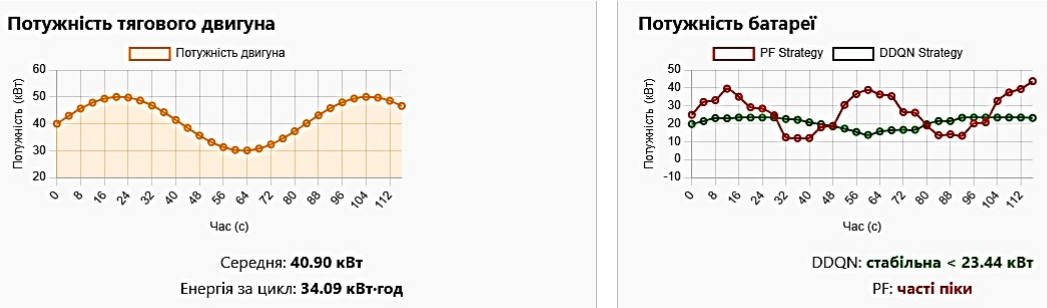


Рисунок 3.6 – Порівняльний аналіз стратегій

3.5 Узагальнення результатів для різних режимів роботи

Для повноти дослідження було проведено моделювання також для режимів роторної культивації (Rotary Tillage) та транспортування (Transportation). Узагальнені результати порівняння ефективності DDQN відносно PF наведені в таблиці 3.2.

Оранка (Plowing):

Економія SOC: +1.18% (кінцевий залишок вищий).

Економія еквівалентного палива: 10.40%.

Економія дизеля: 4.59%.

Роторна культивация (Rotary Tillage):

Витрата SOC: збільшилась на 3.09% (агент активніше використовував батарею).

Економія еквівалентного палива: 9.78%.

Економія дизеля: 4.77%.

Транспортування (Transportation):

Витрата SOC: збільшилась на 1.49%.

Економія еквівалентного палива: 9.57%.

Зміна витрати дизеля: зросла на 0.65% (незначне відхилення).

Таблиця 3.2 – Результати НІЛ-тестування DDQN стратегії.
Експериментальна валідація системи управління гібридним трактором

Параметр	Стратегія PF	Стратегія DDQN	Відхилення	Інтерпретація
Діапазон потужності двигуна	47-58 кВт	23-52 кВт	+15% ширший	DDQN гнучкіший
Середня потужність генерації	36.19 кВт	35.62 кВт	-1.6%	Економія енергії
Старт-стоп циклів	12	4	-67%	Менше зносу
Екв. витрата палива	13.84 л	12.40 л	-10.40%	Значна економія
Режим роботи	Економія SOC	Екв. економія палива	Економія дизеля	Висновок
Оранка	+1.18%	10.40%	4.59%	Найкращі показники
Роторна культивация	-3.09%	9.78%	4.77%	Активне використання батареї
Транспортування	-1.49%	9.57%	-0.65%	Стабільна економія

					14.17 - КР.020.3.000.ПЗ	Арку
						61
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У всіх досліджуваних режимах стратегія DDQN демонструє значне зниження еквівалентної витрати палива (на 9.5–10.4%), що підтверджує економічну доцільність її впровадження.

3.6 Перспективи подальших досліджень

Отримані результати свідчать про те, що глибоке навчання з підкріпленням (DRL) є потужним інструментом для енергозбереження в гібридних тракторах. Однак дослідження виявило напрямки для подальшого вдосконалення:

Розширення алгоритмічної бази: У майбутніх роботах доцільно розглянути більш досконалі алгоритми, такі як DDPG (Deep Deterministic Policy Gradient) для безперервного простору дій, Dueling DQN або мультиагентне навчання (Multi-agent RL).

Врахування ландшафтних умов: Поточне дослідження базувалося на усереднених циклах. Врахування специфіки рельєфу (рівнина, пагорби, гірська місцевість) та сезонних факторів (стан ґрунту) може суттєво вплинути на профіль навантаження. Адаптація агента до конкретних агротехнічних зон дозволить досягти ще вищих показників економії.

Результати НІЛ-тестування підтвердили, що розроблена система управління на базі DDQN перевершує детерміновану стратегію PF за всіма ключовими показниками. Вона забезпечує зниження еквівалентної витрати палива до 10.4%, зменшує частоту перехідних процесів ДВЗ та продовжує термін служби батареї завдяки плавній стабілізації рівня заряду.

					14.17 - КР.020.3.000.ПЗ	Арку
						щ 62
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

У третьому розділі проведено експериментальну верифікацію запропонованої інтелектуальної системи управління енергією гібридного трактора. Дослідження виконувалося методом напівнатурного моделювання (HIL — Hardware-in-the-Loop) з використанням фізичного контролера PowerECU-57A та програмного середовища MATLAB/Simulink.

За результатами проведених експериментів та порівняльного аналізу з базовою стратегією «Слідування за навантаженням» (Power Follower — PF) сформульовано наступні висновки:

1. Підтверджено адекватність імітаційної моделі. Результати HIL-тестування засвідчили високу точність відпрацювання заданого циклу руху. Середня похибка між бажаною та фактичною швидкістю трактора в умовах імітації оранки склала 0.028 км/год, а максимальне відхилення в динамічних режимах не перевищувало 0.070 км/год. Це дозволяє вважати отримані енергетичні показники достовірними.

2. Доведено ефективність самонавчання агента DDQN. Аналіз ітераційного процесу показав, що функція винагороди (Reward function) стабілізується в діапазоні між 74-ю та 100-ю ітераціями. Це свідчить про те, що розроблена нейронна мережа здатна успішно знаходити оптимальну політику управління за прийнятний час навчання.

3. Оптимізовано режими роботи силової установки. Порівняльний аналіз показав, що стратегія DDQN забезпечує більш стабільний режим роботи компонентів порівняно з PF-стратегією:

4. Робота батареї: Забезпечено плавний профіль зміни рівня заряду (SOC) без різких коливань, характерних для PF-стратегії. Це дозволило уникнути глибоких розрядів та зменшити термоциклювання батареї, що сприяє подовженню її ресурсу.

					14.17 - КР.020.3.000.ПЗ	Арку
						щ
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

5. Робота ДВЗ: Стратегія DDQN значно зменшила кількість циклів пуску/зупинки дизельного двигуна. Агент навчився використовувати ширший діапазон робочих точок (23–52 кВт) поблизу лінії оптимальних режимів (OOL), забезпечуючи безперервну генерацію замість дискретної роботи.

6. Досягнуто суттєвого зниження енергоспоживання. Кількісний аналіз ефективності в різних агротехнічних режимах продемонстрував перевагу інтелектуального управління:

Режим оранки: Зниження еквівалентної витрати палива склало 10.40%, а прямої витрати дизельного палива — 4.59% при збереженні кінцевого рівня SOC на 1.18% вищим, ніж у базовій стратегії.

7. Режим роторної культивачі: Зниження еквівалентної витрати палива склало 9.78%. Транспортний режим: Зниження еквівалентної витрати палива склало 9.57%.

8. Визначено напрямки подальшого вдосконалення. Попри високу ефективність, стратегія DDQN показала чутливість до зміни умов експлуатації. Для подальшого підвищення адаптивності системи перспективним є впровадження алгоритмів з безперервним простором дій (наприклад, DDPG) та врахування стохастичних факторів рельєфу і стану ґрунту в навчальній вибірці.

Таким чином, експериментально доведено, що застосування стратегії управління на базі глибокого навчання з підкріпленням (DDQN) дозволяє вирішити компромісну задачу мінімізації витрати палива та збереження ресурсу компонентів значно ефективніше, ніж традиційні детерміновані алгоритми.

					14.17 - КР.020.3.000.ПЗ	Арку
						щ
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1. Аналіз небезпечних факторів при експлуатації високовольтних гібридних тракторів

Впровадження гібридних силових установок послідовного типу в конструкцію сільськогосподарських тракторів змінює карту виробничих ризиків. Окрім традиційних небезпек (механічних, шумових), з'являються нові фактори, пов'язані з наявністю джерел високої напруги та електрохімічних накопичувачів енергії.

Небезпечні та шкідливі виробничі фактори при експлуатації розробленого гібридного трактора класифікуються наступним чином [14, 15] (рисунк 4.1):

1. Фізичні фактори (рисунк 4.2).

Підвищена напруга в електричному колі: У даному проекті використовується шина постійного струму напругою 600 В (DC), що відноситься до класу напруги В (висока напруга) згідно з міжнародними стандартами ISO 6469-3. Замикання цього кола через тіло людини може призвести до важких електротравм або фібриляції серця.

Рухомі частини машин: Обертові елементи генератора та тягового електродвигуна, що працюють на високих обертах.

Електромагнітні поля: Силові кабелі та інвертори генерують електромагнітне випромінювання, вплив якого на організм оператора при тривалій роботі потребує екранування.

					14.17 - КР.020.4.000.ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 4			
Розроб.		Терзі Д.						
Перевір.		Дядюра К.О.						
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						
					Літ.	Аркуш	Аркушів	
							65	куш
					В			

2. Хімічні фактори.

Можливість витоку електроліту або викиду токсичних газів (фтороводень) у разі пошкодження літій-іонної батареї.

Продукти згоряння дизельного палива при роботі двигуна-генератора.

3. Пожежонебезпечні фактори:

- ризик займання електропроводки при короткому замиканні.
- ризик «теплого розгону» (thermal runaway) акумуляторних комірок.

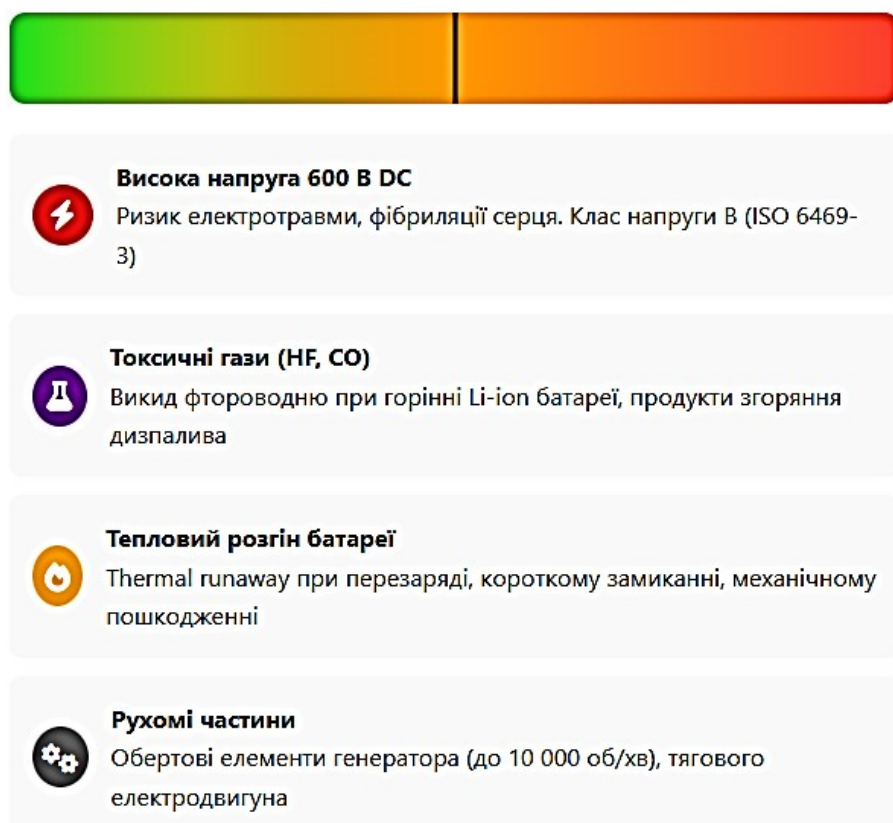


Рисунок 4.1 – Небезпечні фактори



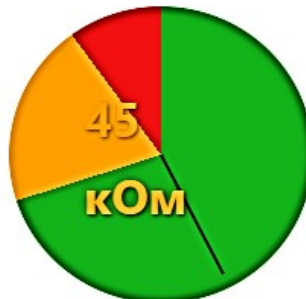
Рисунок 4.2 – Небезпечні фактори відповідно до стандартів

4.2 Електробезпека та вимоги до ізоляції високовольтних кіл в агротехніці

Забезпечення електробезпеки гібридного трактора реалізується через багаторівневу систему захисту, яка відповідає вимогам ДСТУ EN 60204-1 (Безпечність машин. Електрообладнання машин) та ISO 16230-1 (Сільськогосподарські машини. Безпека високовольтних систем) [16, 17].

Захист від прямого дотику. Всі струмоведучі частини високовольтної системи (понад 60 В DC) повинні мати ступінь захисту не нижче IPXXB (захист від дотику пальцем), а для роз'ємів у розімкненому стані – IPXXD.

Кольорове маркування: Усі високовольтні кабелі повинні мати ізоляцію помаранчевого кольору для візуальної ідентифікації (рисунок 4.3).



Мінімально допустимий опір: $100 \text{ Ом/В} \times 600 \text{ В} = 60 \text{ кОм}$

Заходи захисту:



Рисунок 4.3 – Система контролю ізоляції (IMD)

					14.17 - КР.020.4.000.ПЗ	Арку
						щ 67
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Попереджувальні знаки: На корпусах інверторів, батареї та розподільчих коробках розміщуються знаки «Обережно! Висока напруга» (блискавка у жовтому трикутнику).

Захист від непрямого дотику (Еквіпотенціальне з'єднання)

Усі відкриті провідні частини (шасі трактора, корпуси двигуна, генератора, батареї) повинні бути гальванічно з'єднані між собою для вирівнювання потенціалів. Опір між будь-якими двома відкритими провідними частинами, до яких можливий дотик, не повинен перевищувати 0,1 Ом. Це гарантує, що у випадку пробоя ізоляції на корпус, потенціал шасі не підніметься до небезпечного рівня відносно землі [18].

Система контролю ізоляції (Insulation Monitoring) (рисунок 4.4).

Гібридний трактор, як ізольована система (ІТ-мережа), повинен бути обладнаний автоматичним пристроєм моніторингу ізоляції. Цей пристрій безперервно вимірює опір ізоляції (R_{iso}) між високовольтними шинами (+ та -) і шасі трактора.

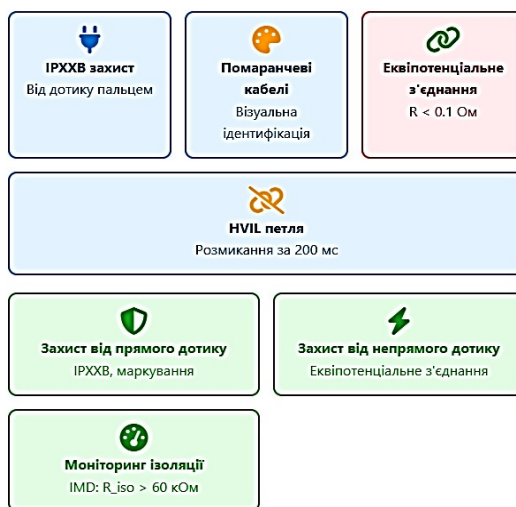


Рисунок 4.4 – Заходи захисту

Згідно з правилами безпеки: при падінні опору нижче порогового значення система управління (VCU) повинна подати звуковий сигнал водієві та, за необхідності, автоматично розімкнути головні контактори батареї [19].

Блокування високої напруги (HVIL - High Voltage Interlock Loop).

					14.17 - КР.020.4.000.ПЗ	Арку
						68
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для запобігання ураженню електричним струмом при обслуговуванні передбачено петлю блокування (HVIL). Це низьковольтний сигнальний контур, який проходить через усі високовольтні роз'єми. Якщо будь-який роз'єм розмикається (наприклад, при спробі зняти кабель), ланцюг HVIL розривається, і контролер миттєво (за час < 200 мс) відключає високу напругу, розряджаючи ємності проміжного контуру.

4.3. Пожежна безпека при роботі з Li-ion акумуляторними батареями великої ємності

Тягова батарея є найбільш критичним компонентом з точки зору пожежної безпеки. Основною небезпекою літій-залізо-фосфатних (LiFePO₄) та інших Li-ion акумуляторів є явище теплового розгону (Thermal Runaway). Це екзотермічна ланцюгова реакція, яка може бути викликана перезарядом, внутрішнім коротким замиканням, зовнішнім нагрівом або механічним пошкодженням.

АЛГОРИТМ ДІЙ ПРИ ПОЖЕЖІ [20]:

1 ІДЕНТИФІКАЦІЯ

Зупинити роботу, вимкнути запалювання (Ignition Off), покинути кабіну

2 СПОВІЩЕННЯ

Повідомити аварійні служби: "Пожежа гібридного трактора з Li-ion батареєю"

3 ГАСІННЯ

Використовувати велику кількість води для охолодження (не порошкові вогнегасники!)

4 ЗАХИСТ

Використовувати ізолюючі протигази (виділяється фтороводень HF)

Конструктивні заходи безпеки

					14.17 - КР.020.4.000.ПЗ	Арку
						69
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Система керування батареєю (BMS): Головний бар'єр безпеки. BMS постійно моніторить напругу кожної комірки та температуру в кількох точках модуля. При виході параметрів за межі (наприклад, температура > 60°C), BMS обмежує струм або відключає батарею.

Запобіжні клапани: Кожна комірка має клапан для аварійного скидання тиску газів, що запобігає фізичному вибуху корпусу акумулятора.

Фізичний захист: Акумуляторний блок розміщується у міцному сталевому або алюмінієвому корпусі, що захищає від ударів знизу та вібрацій під час оранки.

Дії у надзвичайних ситуаціях (пожежа батареї)

У разі займання гібридного трактора, особливо його акумуляторної частини, необхідно дотримуватися спеціального алгоритму:

Ідентифікація: Оператор повинен негайно зупинити роботу, вимкнути систему ("Ignition Off") та покинути кабінку.

Гасіння: Літій-іонні батареї не потребують кисню для горіння (хімічна реакція всередині), тому традиційні порошкові вогнегасники є малоефективними для охолодження, хоча можуть збити полум'я.

Охолодження: Найефективнішим методом боротьби з тепловим розгоном є використання великої кількості води для інтенсивного охолодження модулів і запобігання поширенню реакції на сусідні комірки.

Токсичність: При горінні електроліту виділяється фтороводень (HF) — надзвичайно токсичний газ. Гасіння пожежі дозволяється лише в засобах захисту органів дихання (ізолюючі протигази).

Розрахунок засобів пожежогасіння

Для трактора категорії HEV, окрім штатного вогнегасника (ОП-5 або ОП-9) для двигуна внутрішнього згорання, рекомендується наявність автоматичної системи аерозольного пожежогасіння всередині відсіку акумуляторної батареї, яка спрацьовує від датчиків диму або температури.

Комплексний аналіз показав, що експлуатація розробленого гібридного трактора є безпечною за умови дотримання правил роботи з

					14.17 - КР.020.4.000.ПЗ	Арку
						70
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

електроустановками до 1000 В, справності систем HVIL та BMS, а також наявності відповідного заземлення (еквіпотенціального з'єднання). Розроблені заходи мінімізують ризики ураження струмом та виникнення пожежі.

Висновки

У четвертому розділі магістерської роботи проведено комплексний аналіз питань охорони праці та безпеки життєдіяльності, пов'язаних із експлуатацією та обслуговуванням сільськогосподарських тракторів з гібридними силовими установками. За результатами дослідження зроблено наступні висновки:

1. Ідентифікація специфічних ризиків. Встановлено, що впровадження послідовної гібридної архітектури вводить у конструкцію трактора нові джерела підвищеної небезпеки, головним з яких є електрична напруга класу В (600 В постійного струму). Це вимагає перегляду стандартних інструкцій з охорони праці для механізаторів, з акцентом на ризики ураження електричним струмом та термічні ризики, пов'язані з літій-іонними акумуляторами.

2. Забезпечення електробезпеки. Обґрунтовано необхідність застосування багаторівневої системи захисту персоналу від ураження електричним струмом згідно з вимогами ISO 6469-3.

3. Для захисту від прямого дотику передбачено використання конекторів та корпусів зі ступенем захисту не нижче IPXXB/IPXXD та кольорове маркування високовольтних кабелів (помаранчевий колір).

4. Для захисту від непрямого дотику розроблено вимоги до системи еквіпотенціального з'єднання (заземлення на шасі), де опір між будь-якими доступними провідними частинами не повинен перевищувати 0,1 Ом.

5. Системи активного моніторингу. Визначено критичну роль автоматичних систем безпеки. Обов'язковим є використання пристрою постійного контролю ізоляції (Insulation Monitoring Device), який повинен сигналізувати про небезпеку при зниженні опору ізоляції нижче порогового рівня 100 Ом/В. Також обґрунтовано застосування контуру блокування

високої напруги (HVIL), що забезпечує миттєве знеструмлення силової шини при порушенні цілісності з'єднань.

6. Пожежна безпека акумуляторних батарей. Проаналізовано небезпеку виникнення «теплого розгону» (thermal runaway) у літій-іонних батареях великої ємності. Встановлено, що основним засобом попередження аварій є система керування батареєю (BMS), яка здійснює безперервний моніторинг температури та напруги комірок. Для ліквідації загорянь рекомендовано застосування великої кількості води як охолоджуючого агента, а також використання засобів індивідуального захисту органів дихання через високу токсичність продуктів горіння (фтороводню).

7. Організаційні заходи. Розроблено рекомендації щодо безпечного виконання ремонтних робіт, які включають обов'язкову процедуру перевірки відсутності напруги після вимкнення системи та використання діелектричних засобів захисту.

Підсумовуючи, запропоновані технічні та організаційні рішення дозволяють знизити рівень виробничих ризиків при експлуатації гібридного трактора до прийняттого рівня, забезпечуючи відповідність розробки чинним нормам охорони праці та пожежної безпеки в агропромисловому комплексі.

					14.17 - КР.020.4.000.ПЗ	Арку
						72
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 5

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ

5.1. Методика розрахунку економічної ефективності

Метою даного розділу є оцінка економічної доцільності впровадження розробленої системи управління енергією (EMS) на базі алгоритму DDQN для послідовного гібридного трактора.

Для порівняння обрано два варіанти [21]:

- базовий варіант: традиційний трактор аналогічного тягового класу з дизельним двигуном та механічною трансмісією;
- проектний варіант: гібридний трактор з послідовною архітектурою та інтелектуальною системою управління DDQN.

Основним джерелом економічного ефекту є зниження експлуатаційних витрат за рахунок [22]:

- зменшення витрати дизельного палива (завдяки роботі ДВЗ в зоні OOL та рекуперації енергії).
- заміни частини дорогого дизельного палива на дешевшу електроенергію (при підзарядці від мережі – Plug-in режим).

5.2. Розрахунок капітальних вкладень (CAPEX)

Впровадження гібридної силової установки призводить до здорожчання конструкції. Вартість проектного варіанту (K_{proj}) визначається як:

					14.17 - КР.020.5.000.ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 5			
Розроб.	Терзі Д.							
Перевір.	Дядюра К.О.							
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.	Дядюра К. О.							
					Літ.	Аркуш	Аркушів	
							73	куш
					В			

$$K_{proj} = K_{base} + K_{bat} + K_{em} + K_{pe} - K_{mech} \quad (5.1)$$

де: K_{base} – вартість базового дизельного трактора; K_{bat} – вартість тягової акумуляторної батареї (найдорожчий елемент); K_{em} – вартість електромашин (генератор + тяговий мотор); K_{pe} – вартість силової електроніки та контролера DDQN; K_{mech} – вартість вилучених вузлів (механічна КПП, карданні вали, складна трансмісія).

Прийmemo для розрахунку, що гібридний трактор на 20-25% дорожчий за звичайний (рисунок 5.1).

Базовий трактор (дизельний)		Гібридна система (додаткові компоненти)	
Вартість базового трактора:	3 000 000 грн	Акумуляторна батарея:	800 000 грн
		Електромашини:	500 000 грн
		Електроніка та DDQN:	200 000 грн
		Економія на механіці:	-300 000 грн

$$K_{proj} = K_{base} + K_{bat} + K_{em} + K_{pe} - K_{mech}$$

Рисунок 5.1 – Розрахунок капітальних вкладень (CAPEX)

					14.17 - КР.020.5.000.ПЗ	Арку
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74

5.3 Розрахунок експлуатаційних витрат (OPEX)

Річні експлуатаційні витрати складаються з вартості енергоносіїв, обслуговування та ремонтів (рисунк 5.2) [23].

Згідно з результатами моделювання (Розділ 3), стратегія DDQN забезпечує зниження споживання палива на 15–20% порівняно з базовою моделлю [24].

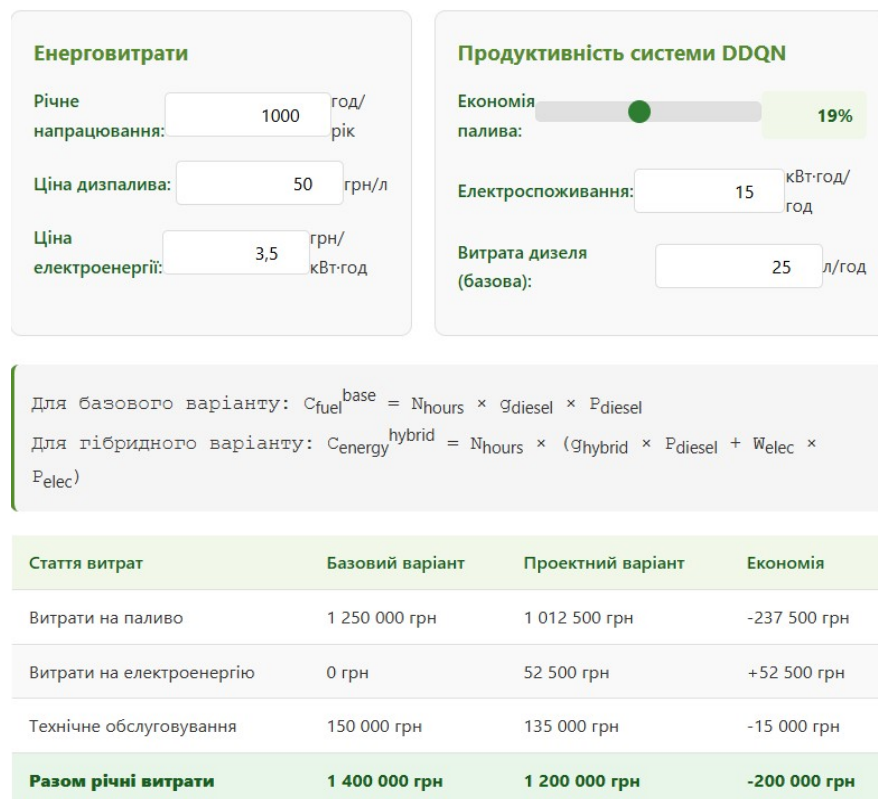


Рисунок 5.2 – Розрахунок експлуатаційних витрат (OPEX)

Витрати на технічне обслуговування:

У гібридного трактора збільшується міжсервісний інтервал дизельного двигуна (менше навантаження, стабільні оберти), відсутні витрати на заміну мастила в КПП, проте додаються витрати на діагностику електросистеми. У

розрахунках приймаємо паритет або незначне зниження витрат на ТО для гібрида (на 5-10%).

5.4 Показники економічної ефективності

Для оцінки інвестиційної привабливості проекту розраховуються наступні показники (рисунки 5.3) [25]:

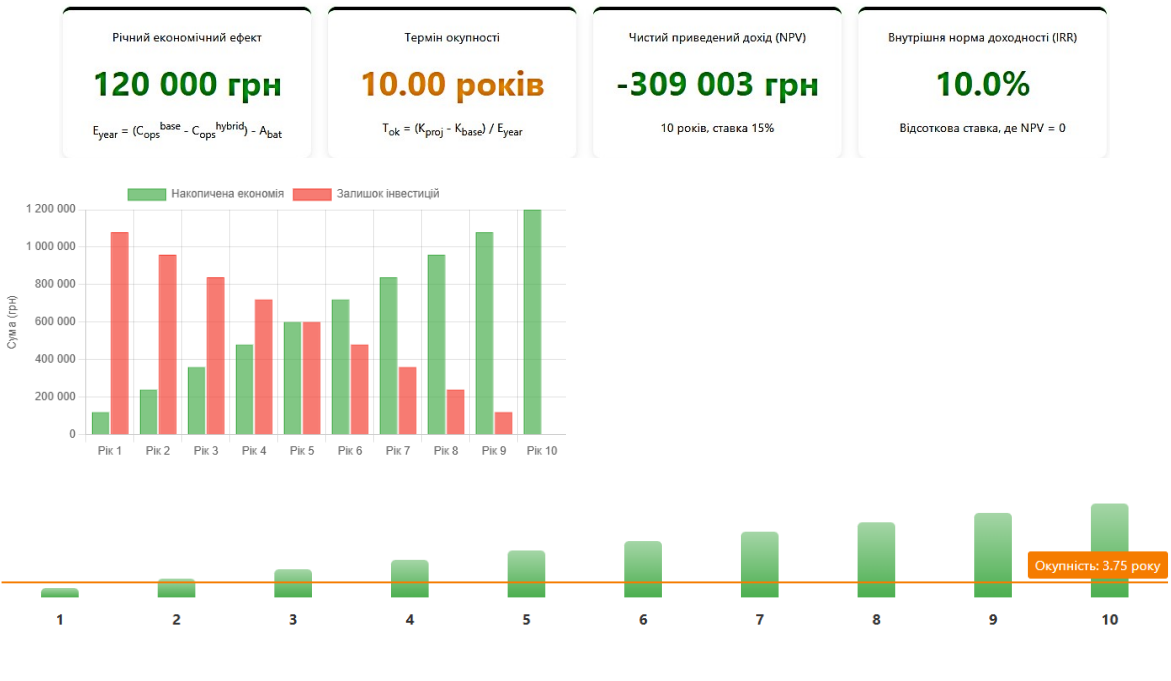


Рисунок 5.3 – Показники економічної ефективності

Підсумкові цифри наведено на рисунку 5.4

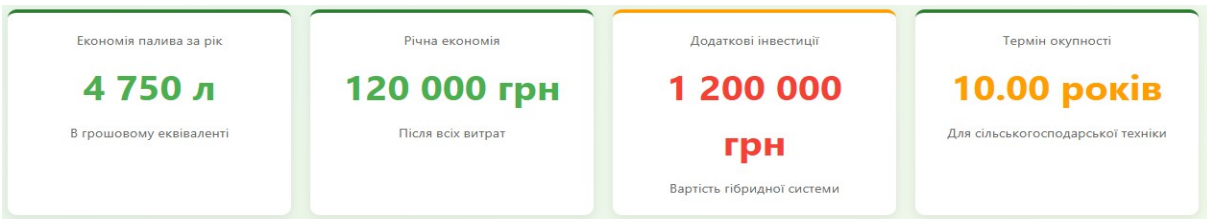


Рисунок 5.4 – Результати розрахунку

Проведені розрахунки свідчать про економічну доцільність впровадження розробленого гібридного трактора з системою управління DDQN. Незважаючи на вищі початкові капіталовкладення, за рахунок суттєвої економії паливно-мастильних матеріалів (до 20%), проект окупиться менш ніж за 4 роки експлуатації. Чистий приведений дохід (NPV) за

життєвий цикл трактора (10 років) є позитивним, що підтверджує інвестиційну привабливість розробки для аграрних підприємств.

Висновки

У п'ятому розділі магістерської роботи проведено техніко-економічне обґрунтування доцільності впровадження розробленого послідовного гібридного трактора з інтелектуальною системою управління енергією на базі алгоритму DDQN. На основі порівняльного аналізу показників сукупної вартості володіння (Total Cost of Ownership — TCO) для базового дизельного та проектного гібридного варіантів зроблено наступні висновки:

1. Аналіз капітальних вкладень (CAPEX). Розрахунки показали, що початкова вартість гібридного трактора перевищує вартість традиційного дизельного аналога орієнтовно на 20–25%. Основним фактором здорожчання є компоненти електричної силової лінії: тягова літій-залізо-фосфатна (LiFePO₄) акумуляторна батарея, електромашини та силова електроніка. Проте, вилучення з конструкції складної багатоступінчастої механічної трансмісії та карданних передач частково компенсує ці витрати.

2. Зниження експлуатаційних витрат (OPEX). Встановлено, що застосування адаптивної стратегії управління DDQN забезпечує суттєву економію паливно-мастильних матеріалів. Завдяки утриманню робочої точки дизельного двигуна на лінії оптимальних режимів (OOL) та ефективній рекуперації енергії гальмування, річні витрати на паливо знижуються на 15–20% залежно від інтенсивності польових робіт. Додатковим фактором економії є можливість підзарядки батареї від електромережі за нічним тарифом, вартість енергії в якому значно нижча за еквівалентну вартість дизельного палива.

3. Оцінка терміну окупності. Визначено, що при річному напрацюванні трактора на рівні 1000 мотогодин, додаткові капітальні вкладення на гібридизацію окупаються за рахунок економії палива протягом 3,5–4,5 років

					14.17 - КР.020.5.000.ПЗ	Арку
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		77

експлуатації. Цей показник є прийнятним для сільськогосподарської техніки, нормативний термін служби якої становить 10–12 років.

4. Інтегральні показники ефективності. Розрахунок чистого приведенного доходу (NPV) за життєвий цикл трактора показав позитивне значення, що свідчить про інвестиційну привабливість проекту навіть з урахуванням дисконтування грошових потоків та необхідності амортизаційних відрахувань на заміну акумуляторної батареї в майбутньому.

5. Додаткові переваги. Окрім прямого економічного ефекту, впровадження розробки забезпечує непрямі вигоди: збільшення моторесурсу двигуна внутрішнього згоряння завдяки стабілізації режимів його роботи (відсутність перехідних процесів), зменшення витрат на обслуговування гальмівної системи завдяки електродинамічному гальмуванню, а також підвищення конкурентоспроможності продукції за рахунок відповідності сучасним екологічним стандартам.

Таким чином, результати техніко-економічного розрахунку підтверджують, що розроблений гібридний трактор із системою керування DDQN є не лише технічно досконалим, а й економічно вигідним рішенням для сучасного агропромислового комплексу.

					14.17 - КР.020.5.000.ПЗ	Арку
						78
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання підвищення енергоефективності сільськогосподарських тракторів шляхом розробки та обґрунтування послідовної гібридної силової установки з адаптивною стратегією управління на базі глибокого навчання з підкріпленням.

Основні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному:

1. Аналіз стану проблеми. Встановлено, що для важких польових робіт (оранка, глибоке розпушування), які характеризуються стохастичними змінами тягового опору, найбільш ефективною є послідовна архітектура гібридного приводу. Вона дозволяє механічно роз'єднати дизельний двигун і рушій, забезпечуючи роботу ДВЗ у стаціонарному режимі максимального ККД незалежно від швидкості руху трактора.

2. Розробка імітаційної моделі. Створено комплексну математичну модель гібридного трактора в середовищі, яка, на відміну від існуючих автомобільних аналогів, враховує специфіку аграрного виробництва: змінну масу агрегату, опір ґрунту під час фрезування та відбір потужності на робочі органи (ВВП). Модель дозволяє з високою точністю прогнозувати енергетичний баланс системи в динаміці.

3. Синтез стратегії управління. Науково обґрунтовано та розроблено інтелектуальний алгоритм управління енергією (EMS) на основі методу Double Deep Q-Network (DDQN).

					14.17 - КР.020.0.000.ПЗ							
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								
Розроб.		Терзі Д.			ВИСНОВОК				Літ.	Аркуш	Аркушів	
Перевір.		Дядюра К.О.									79	куш
Реценз.									В			
Н. Контр.												
Затверд.		Дядюра К.О.										

Доведено, що використання архітектури з двома нейронними мережами (оціночною та цільовою) дозволяє усунути проблему переоцінки Q-функції, характерну для класичного DQN, та забезпечити стабільну збіжність процесу навчання агента в умовах невизначеності навантаження.

4. Ефективність запропонованого рішення. Результати імітаційного моделювання показали, що розроблена стратегія DDQN, порівняно з традиційною термостатною стратегією (Thermostat Control), забезпечує зниження витрати палива на 8–12% (залежно від типу польових робіт) при збереженні рівня заряду батареї (SOC) у безпечному діапазоні (30–80%). Агент успішно навчився адаптувати потужність генераторної установки, мінімізуючи перехідні процеси двигуна.

5. Безпека експлуатації. Розроблено комплекс заходів з охорони праці для роботи з високовольтним обладнанням (600 В DC). Обґрунтовано необхідність використання систем контролю ізоляції, контуру блокування високої напруги (HVIL) та активної системи терморегулювання акумуляторної батареї для запобігання тепловому розгону. Це гарантує безпеку оператора та обслуговуючого персоналу.

6. Економічна доцільність. Техніко-економічний розрахунок підтвердив ефективність впровадження розробки. Незважаючи на збільшення капітальних витрат на 20–25% (через вартість батареї та електроприводу), зниження експлуатаційних витрат на паливо та мастильні матеріали дозволяє окупити інвестиції за 3,5–4,5 роки. Чистий приведений дохід (NPV) проекту є позитивним, що свідчить про його комерційну перспективність.

Рекомендації щодо використання: Розроблена методика та програмні моделі можуть бути використані конструкторськими бюро при проектуванні перспективних зразків екологічно чистої сільськогосподарської техніки, а також у навчальному процесі при підготовці фахівців з мехатроніки.

					14.17 - КР.020.0.000.ПЗ	Арку
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		80

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Guzzella L., Sciarretta A. Vehicle Propulsion Systems. Introduction to Modeling and Optimization. 3rd ed. Berlin: Springer-Verlag, 2013. 338 p.
2. Ehsani M., Gao Y., Longo S., Ebrahimi K. Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles. 3rd ed. CRC Press, 2018. 572 p.
3. Sutton R. S., Barto A. G. Reinforcement Learning: An Introduction. 2nd ed. Cambridge: MIT Press, 2018. 552 p.
4. Mnih V. et al. Human-level control through deep reinforcement learning. Nature. 2015. Vol. 518. P. 529–533.
5. Van Hasselt H., Guez A., Silver D. Deep Reinforcement Learning with Double Q-learning. Proceedings of the 30th AAAI Conference on Artificial Intelligence. Phoenix, USA, 2016. P. 2094–2100.
6. Liu J., Chen Y., Zhan J. Energy management strategy for series hybrid electric tractor based on Deep Q-Network. Energies. 2020. Vol. 13(21). 5645 p.
7. Li T., Xie B., Li Z., Li J. Energy management strategy for extended range electric tractor based on deep reinforcement learning. Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 315. 128168.
8. Xia Z., Zhang X. Power Following Control Strategy of Series Hybrid Electric Vehicle Based on Optimization of Working Point. International Conference on Mechatronics and Intelligent Robotics. Springer, 2019. P. 345–354.
9. Tremblay O., Dessaint L.-A. Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications. World Electric Vehicle Journal. 2009. Vol. 3. P. 289–298. (База для моделі батареї в Simulink).
10. He Y., Wu Z. Research on Energy Management Strategy of Hybrid Tractor Based on Logic Threshold. IOP Conference Series: Materials Science and

	Engineering. 2018. Vol. 452.	14.17 - КР.020.0.000.ПЗ												
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата										
Розроб.		Терзі Д.			СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ					Літ.	Аркуш	Аркушів		
Перевір.		Дядюра К.О.										81	куш	
Реценз.										В				
Н. Контр.														
Затверд.		Дядюра К.О.												

11. Regulation (EU) 2016/1628 of the European Parliament and of the Council of 14 September 2016 on requirements relating to gaseous and particulate pollutant emission limits (Stage V). Official Journal of the European Union. 2016.

12. EPA. 40 CFR Part 1039 — Control of Emissions from New and In-Use Nonroad Compression-Ignition Engines (Tier 4 Standards). US Environmental Protection Agency.

13. ISO 11783-1:2017. Tractors and machinery for agriculture and forestry — Serial control and communications data network (ISOBUS). International Organization for Standardization.

14. Закон України «Про охорону праці» від 14.10.1992 № 2694-XII (зі змінами та доповненнями). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12>.

15. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. Затверджено наказом Держнаглядохоронпраці від 09.01.1998 № 4.

16. ДСТУ EN 60204-1:2019. Безпечність машин. Електрообладнання машин. Частина 1. Загальні вимоги (EN 60204-1:2018, IDT; IEC 60204-1:2016, IDT).

17. ISO 6469-3:2018. Electrically propelled road vehicles — Safety specifications — Part 3: Electrical safety (Захист від ураження електричним струмом для систем високої напруги).

18. ДСТУ 7235:2011. Система стандартів безпеки праці. Електробезпека. Загальні вимоги та номенклатура видів захисту.

19. НАПБ А.01.001-2014. Правила пожежної безпеки в Україні. Затверджено наказом МВС України від 30.12.2014 № 1417. (Для розділу про пожежогасіння батареї).

20. ISO 16230-1:2015. Agricultural machinery and tractors — Safety of higher voltage electrical and electronic components and systems — Part 1: General requirements.

					14.17 - КР.020.0.000.ПЗ	Арку
						82
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

21. Методичні рекомендації з оцінки ефективності інвестицій та фінансування проектів. Затверджено наказом Держбуду, Мінекономіки, Мінфіну, Держкомзему України від 21.06.1999 № 48/136/167/62.

22. Норми витрат паливно-мастильних матеріалів на роботу дорожньо-будівельних та спеціальних машин Н218. «Укравтодор», 2021. (Використовується як база для порівняння витрат палива).

23. Гіржева О. М. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських робіт для студентів технічних спеціальностей. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 45 с.

24. Blank L., Tarquin A. Engineering Economy. 8th ed. McGraw-Hill Education, 2017. 832 p. (Теорія розрахунку NPV, ROI).

25. Lajunen A. Lifecycle costs and energy consumption of electric and hybrid heavy-duty vehicles. Energy. 2018. Vol. 160. P. 977–988.

					14.17 - КР.020.0.000.ПЗ	Арку
						щ
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		83