

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

« ____ » _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

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

ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ ДІАГНОСТИКИ ВИСОКОВОЛЬТНОЇ БАТАРЕЇ ТА ЕЛЕКТРОДВИГУНА ДЛЯ ГІБРИДНОГО ТРАКТОРА З ВИКОРИСТАННЯМ CAN-ШИНИ ТА ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ

Науковий керівник: професор, д.т.н.
_____ Костянтин ДЯДЮРА

Рецензент: к.т.н.
_____ Сергій ЛІНКЕВИЧ

Виконав здобувач першого (бакалаврського) рівня
вищої освіти заочної форми навчання освітньо-
професійної програми «Агроінженерія»
спеціальності 208 «Агроінженерія»
Сергій БАБЕНКО

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

_____ Сергій БАБЕНКО

ОДЕСА – 2026

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

«___» _____ 2026 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ Сергій БАБЕНКО

1. Тема кваліфікаційної роботи:

«Проектування системи діагностики високовольтної батареї та електродвигуна для гібридного трактора з використанням сап-шини та цифрових двійників»
науковий керівник кваліфікаційної роботи: професор, д.т.н. Дядюра Костянтин Олександрович

затверджені наказом ректора Одеського державного аграрного університету № 118 від « 05 » _____ 09 _____ 2025 р.

2. Строк подання здобувачем кваліфікаційної роботи 15 червня 2026 року.

3. **Об'єкт дослідження:** процеси електрохімічної та теплової деградації високовольтних акумуляторних батарей, електромеханічні процеси в тягових електродвигунах змінного струму, а також інформаційна взаємодія технічних систем гібридного трактора через CAN-шину за стандартом SAE J1939.

4. **Предмет дослідження:** параметри, конструкція та алгоритмічне забезпечення системи бортової діагностики гібридного трактора на базі мікроконтролера з CAN-інтерфейсом, адаптивних алгоритмів оцінювання SOC/SOH та інтеграції в стандартизовану мережу J1939/ISOBUS.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

5.1. Теоретико-методичний розділ: дослідити конструктивні особливості та параметри високовольтних тягових батарей (літій-іонні, LiFePO_4) та електродвигунів змінного струму, що застосовуються в гібридній техніці

5.2. Дослідницько-аналітичний розділ: розробити структурну схему системи діагностики гібридного трактора з інтеграцією в мультиплексну CAN-мережу (SAE J1939), включаючи BMS (Battery Management System), MCU (Motor Control Unit), VCU (Vehicle Control Unit) та діагностичний шлюз

5.3. Проектно-рекомендаційний розділ: Виконати техніко-економічне обґрунтування впровадження системи: порівняння витрат на традиційне (планове) обслуговування та предиктивне обслуговування на основі цифрових двійників; оцінка скорочення простоїв, збільшення ресурсу батареї та двигуна, економії паливно-мастильних матеріалів

6. Орієнтовний перелік графічного та табличного матеріалу:

6.1. До теоретико-методичного розділу:

Класифікаційна схема гібридних силових установок тракторів (послідовна, паралельна, комбінована)

6.2. До дослідницько-аналітичного розділу:

Структурна схема системи діагностики гібридного трактора з інтеграцією в CAN-мережу SAE J1939

6.3. До проектно-рекомендаційного розділу:

Функціональна схема апаратно-програмного комплексу діагностики (діагностичний сканер → шлюз → хмарна платформа → інтерфейс оператора)

7. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:

Матеріали стандартів: SAE J1939 (серійна мережа керування та зв'язку важких транспортних засобів), ISO 11898 (CAN), ISO 14229 (UDS — Unified Diagnostic Services), ISO 26262 (функційна безпека дорожніх транспортних засобів), IEC 61508 (функційна безпека електричних/електронних систем)

9. Дата видачі завдання: « 27 » 09 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	Лютий 2026	0,25	
2.	Отримання завдання і складання змісту кваліфікаційної роботи	Лютий 2026	0,25	
3.	Складання календарного плану – графіку з підготовки кваліфікаційної роботи	Березень 2026	0,5	
4.	Написання першого розділу кваліфікаційної роботи	Березень 2026	2,0	
5.	Вивчення матеріалів базових підприємств	Квітень 2026	1,0	
6.	Написання другого розділу кваліфікаційної роботи	Квітень 2026	2,0	

7.	Написання третього розділу кваліфікаційної роботи	Травень 2026	3,0	
8.	Написання висновків, списку літератури	Травень 2026	0,5	
9.	Перевірка кваліфікаційної роботи науковим керівником	Червень 2026		
10.	Доопрацювання роботи після зауважень наукового керівника	Червень 2026	0,5	
11.	Підготовка до захисту: доповідь, ілюстративний матеріал	Червень 2026	0,5	
12.	Подання кваліфікаційної роботи на кафедру	15 червня 2026		
13.	Перевірка кваліфікаційної роботи на оригінальність	Червень 2026		
14.	Попередній захист на кафедрі	Червень 2026		
15.	Рецензування кваліфікаційної роботи	Червень 2026		
16.	Захист кваліфікаційної роботи	18-20 червня 2026	1,5	
	Загальна кількість		12	

Здобувач ОС бакалавр

_____ Сергій БАБЕНКО

Науковий керівник

_____ Костянтин ДЯДЮРА

Гарант ОП

_____ Дмитро ДОМУЩІ

РЕФЕРАТ

Дипломний проект містить: 98 сторінок, 18 рисунків, 8 таблиць, 23 джерела за переліком посилань.

Об'єкт дослідження: процеси електрохімічної та теплової деградації високовольтних акумуляторних батарей, електромеханічні процеси в тягових електродвигунах змінного струму, а також інформаційна взаємодія технічних систем гібридного трактора через CAN-шину за стандартом SAE J1939.

Мета роботи: підвищення надійності та безпеки експлуатації гібридного трактора шляхом розроблення системи бортової діагностики з використанням цифрових двійників, адаптивних алгоритмів оцінювання стану заряду (SOC) та стану здоров'я (SOH) високовольтної батареї.

Методи дослідження: аналітичний огляд науково-технічної літератури; математичне моделювання електрохімічних процесів у комірках літій-іонних батарей (модель еквівалентної схеми другого порядку, P2D-модель) моделювання електромеханічних процесів у синхронному двигуні з постійними магнітами (PMSM) в системі координат dq.

Отримані результати: Розраховано параметри системи моніторингу високовольтної батареї (до 800 В). Розроблено діагностичний комплекс на базі мікроконтролера STM32F407VGT6 (ARM Cortex-M4, 168 МГц) з двома CAN-інтерфейсами, гальванічною розв'язкою (1000 В) та відповідністю функційній безпеці ISO 26262 (рівень ASIL C/D).

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ГІБРИДНИЙ ТРАКТОР, ВИСОКОВОЛЬТНА АКУМУЛЯТОРНА БАТАРЕЯ, ЦИФРОВИЙ ДВІЙНИК, СТАН ЗАРЯДУ (SOC),

					14.17 - КР.015.0.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РЕФЕРАТ	Літ.	Аркуш	Аркушів
Розроб.		Бабенко С.І.						
Перевір.		Дядюра К. О.					5	1
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						

ЗМІСТ

	С.
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА АНАЛІЗ ТЕХННОЛОГІЙ ДІАГНОСТИКИ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ТРАКТОРІВ	12
1.1. Перспективи та тенденції розвитку гібридних та електричних силових установок у мобільній сільськогосподарській техніці	12
1.2. Огляд існуючих методів контролю технічного стану високовольтних акумуляторних батарей (ВВБ) та тягових електродвигунів	20
1.3. Концепція цифрових двійників (Digital Twins) як інструмент прогностичного технічного обслуговування агроماشин	27
Висновки.....	39
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБґРУНТУВАННЯ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ КОМПОНЕНТІВ ГІБРИДНОГО ТРАКТОРА.....	41
2.1 Математична модель електрохімічних та теплових процесів у комірках високовольтної батареї	41
2.2 Математичний опис електромеханічних процесів у тяговому електродвигуні змінного струму	49
2.3 Інформаційна взаємодія технічних систем гібридного трактора через інтерфейс CAN-шини	52
2.4 Алгоритми ідентифікації параметрів цифрового двійника для запобігання розстроювання діагностичних критеріїв в умовах нестаціонарних навантажень	54
Висновки.....	59
РОЗДІЛ 3. ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ БОРТОВОЇ ДІАГНОСТИКИ ТА ІНЖЕНЕРНІ РОЗРАХУНКИ	60

					14.17 - КР.015.0.000 ПЗ									
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата										
Розроб.		Бабенок С.І.			ЗМІСТ				Літ.		Аркуш		Аркушів	
Перевір.		Дядюра К. О.									6		2	
Реценз.														
Н. Контр.														
Затверд.		Дядюра К. О.												

3.1 Розробка структурної та функціональної схем діагностичного комплексу на базі мікроконтролера з CAN-інтерфейсом	60
3.2 Розрахунок параметрів фільтрації та обробки телеметричних даних з CAN-шини	67
3.3 Обґрунтування вибору датчикового апарату системи контролю температури, струму та напруги	70
3.4 Програмна реалізація алгоритму оцінки стану працездатності (SOH) та стану заряду (SOC).....	71
Висновки.....	74
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ	76
4.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів при експлуатації та обслуговуванні гібридних тракторів	76
4.2 Електробезпека під час роботи з високовольтними ланцюгами постійного та змінного струму (до 400 В і вище)	79
4.3 Пожежна безпека: запобігання тепловому розгону (thermal runaway) літій-іонних акумуляторних батарей	82
Висновки.....	87
РОЗДІЛ 5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ	88
5.1 Розрахунок капітальних витрат на розробку та впровадження системи діагностики.....	88
5.2 Визначення економічного ефекту від запобігання аварійним відмовам та оптимізації міжремонтних періодів	90
5.3 Розрахунок терміну окупності модернізації силової архітектури трактора	92
Висновки.....	95
ВИСНОВКИ.....	96
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	99

ВСТУП

Актуальність теми. Сільськогосподарське виробництво є одним із значних джерел викидів парникових газів – глобально на нього припадає близько 14% загальних викидів, значна частина з яких утворюється внаслідок використання викопного палива в сільськогосподарських машинах. Зростання цін на дизельне паливо, посилення екологічних вимог та необхідність зменшення вуглецевого сліду аграрного сектору стимулюють світових виробників техніки до активного пошуку альтернативних силових установок. Світовий ринок електричних тракторів демонструє стрімке зростання: від 245 млн дол. США у 2025 році до 1,95 млрд дол. до 2035 року (середньорічний темп зростання 22,7%). В Україні електричні трактори та гібридні силові установки також впевнено виходять на поля, а українська компанія Tadus оголосила про запуск серійного виробництва електротрактора T16.20 у 2026 році.

Однак перехід до електричних та гібридних силових установок створює нові виклики для систем діагностики та технічного обслуговування. Високовольтні акумуляторні батареї (ВВБ) є найскладнішим і найдорожчим компонентом гібридного трактора (до 40–50% вартості машини), а їхній технічний стан безпосередньо впливає на енергоефективність, динамічні характеристики, безпеку та загальну вартість володіння. Традиційні методи діагностики, орієнтовані на дизельні двигуни, не є придатними для оцінювання стану заряду (SOC), стану здоров'я (SOH) та стану безпеки (SOS) літій-іонних батарей. Тому актуальним науково-прикладним завданням є створення системи бортової діагностики гібридного трактора на основі концепції цифрових двійників (Digital Twins), яка забезпечує безперервний моніторинг параметрів ВВБ, адаптивну ідентифікацію параметрів в умовах нестационарних навантажень та прогностичне технічне обслуговування.

					14.17 - КР.015.0.000 ПЗ						
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Бабенко С.І.			ВСТУП			Літ.	Аркуш	Аркушів	
Перевір.		Дядюра К. О.							8	3	
Реценз.											
Н. Контр.											
Затверд.		Дядюра К. О.									

Мета та завдання дослідження. Метою кваліфікаційної роботи є підвищення надійності та безпеки експлуатації гібридного трактора шляхом розроблення системи бортової діагностики з використанням цифрових двійників, адаптивних алгоритмів оцінювання стану заряду (SOC) та стану здоров'я (SOH) високовольтної акумуляторної батареї, а також інтеграції в бортову мережу за стандартами SAE J1939 та ISO 11783 (ISOBUS).

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Виконати аналіз перспектив та тенденцій розвитку гібридних та електричних силових установок у мобільній сільськогосподарській техніці; провести огляд існуючих методів контролю технічного стану високовольтних акумуляторних батарей та тягових електроприводів тракторів; дослідити концепцію цифрових двійників як інструменту прогностичного технічного обслуговування агромашин.

2. Теоретично обґрунтувати математичні моделі цифрових двійників компонентів гібридного трактора: розробити модель електрохімічних та теплових процесів у комірках високовольтної батареї; створити модель електромеханічних процесів у тяговому електродвигуні змінного струму (PMSM); дослідити інформаційну взаємодію технічних систем через CAN-шину за стандартом SAE J1939; розробити алгоритми адаптивної ідентифікації параметрів цифрового двійника для запобігання розстроюванню діагностичних критеріїв в умовах нестаціонарних навантажень.

3. Виконати проектування системи бортової діагностики: розробити структурну та функціональну схеми діагностичного комплексу на базі мікроконтролера з CAN-інтерфейсом; розрахувати параметри фільтрації та обробки телеметричних даних з CAN-шини; обґрунтувати вибір датчикового апарату системи контролю температури, струму та напруги; реалізувати програмне забезпечення для оцінки SOC та SOH.

4. Розробити заходи з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях: проаналізувати небезпечні та шкідливі виробничі фактори при експлуатації та обслуговуванні гібридних тракторів; визначити вимоги до

					14.17 - КР.015.0.000 ПЗ	Аркуш
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

електробезпеки під час роботи з високовольтними ланцюгами (до 400 В і вище); розробити систему запобігання тепловому розгону (thermal runaway) літій-іонних акумуляторних батарей.

5. Провести техніко-економічне обґрунтування проєкту: розрахувати капітальні витрати на розробку та впровадження системи діагностики; визначити економічний ефект від запобігання аварійним відмовам та оптимізації міжремонтних періодів; розрахувати термін окупності модернізації силової архітектури трактора.

Об'єкт дослідження – процеси електрохімічної та теплової деградації високовольтних акумуляторних батарей, електромеханічні процеси в тягових електродвигунах змінного струму, а також інформаційна взаємодія технічних систем гібридного трактора через CAN-шину за стандартом SAE J1939.

Предмет дослідження – параметри, конструкція та алгоритмічне забезпечення системи бортової діагностики гібридного трактора на базі мікроконтролера з CAN-інтерфейсом, адаптивних алгоритмів оцінювання SOC/SOH та інтеграції в стандартизовану мережу J1939/ISOBUS.

Методи дослідження. У роботі використано комплексний підхід, що включає: аналітичний огляд та узагальнення науково-технічної літератури; методи математичного моделювання (модель еквівалентної схеми другого порядку для літій-іонних комірок, електрохімічна P2D-модель для калібрування, модель PMSM в системі координат dq , спектральний аналіз); методи адаптивної фільтрації та ідентифікації (рекурсивний метод найменших квадратів зі змінним коефіцієнтом забування VFF-RLS, розширений фільтр Калмана EKF, подвійний розширений фільтр Калмана DEKF); інженерні розрахунки електронних вузлів (підсилювач, фільтр, АЦП, CAN-трансівер); 3D-моделювання; методи техніко-економічного аналізу (розрахунок чистої теперішньої вартості NPV, терміну окупності).

Одержані результати: розроблено гібридну математичну модель цифрового двійника високовольтної акумуляторної батареї гібридного трактора, яка поєднує еквівалентну схему другого порядку для бортової роботи в

					14.17 - КР.015.0.000 ПЗ	Аркуш
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

реальному часі та електрохімічну P2D-модель для хмарного калібрування; удосконалено метод адаптивної ідентифікації параметрів PMSM та літій-іонної батареї шляхом застосування рекурсивного методу найменших квадратів зі змінним коефіцієнтом забування (VFF-RLS) та подвійного розширеного фільтра Калмана (DEKF), що забезпечує точність ідентифікації електричних параметрів 0,61–1,67% та оцінювання SOC з похибкою $\leq 1,5\%$ в умовах нестационарних навантажень; *набуло подальшого розвитку* дослідження інформаційної взаємодії технічних систем гібридного трактора через CAN-шину за стандартом SAE J1939 – визначено ключові PGN (TSC1, Battery System Data, DM1) та запропоновано архітектуру управління дрейфом (Drift Management Architecture, DMA) для автоматичної корекції діагностичних критеріїв при зміні параметрів.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено комплекс конструкторсько-технологічної документації для системи бортової діагностики гібридного трактора. Запропонована система має прийнятну вартість (капітальні витрати 142 000 грн) та окупається протягом 11 місяців роботи трактора.

					14.17 - КР.015.0.000 ПЗ	Аркуш
						11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ ТА АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ДІАГНОСТИКИ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ТРАКТОРІВ

1.1 Перспективи та тенденції розвитку гібридних та електричних силових установок у мобільній сільськогосподарській техніці

Актуальність та передумови електрифікації сільськогосподарської техніки

Сільськогосподарське виробництво є одним із значних джерел викидів парникових газів — глобально на нього припадає приблизно 14% загальних викидів, значна частина з яких утворюється внаслідок використання викопного палива в сільськогосподарських машинах. Зростання цін на дизельне паливо, посилення екологічних вимог та необхідність зменшення вуглецевого сліду аграрного сектору стимулюють світових виробників техніки до активного пошуку альтернативних силових установок [1, 2].

Електрифікація сільськогосподарської техніки відкриває нові технологічні можливості: електродвигуни забезпечують високий момент, доступний з перших секунд руху, можливість точного регулювання швидкості, рекуперацію енергії при гальмуванні, а також значно нижчий рівень шуму та вібрації. Це дозволяє розширити функціональні можливості техніки, особливо у сфері точного землеробства та автоматизації технологічних процесів. Електричні системи мають менше зношувальних механічних компонентів, що знижує потребу в технічному обслуговуванні [3, 4].

					14.17 - КР.015.1.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 1			
Розроб.		Бабенко С.І.						
Перевір.		Дядюра К. О.						
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						
					Літ.	Аркуш	Аркушів	
						12	12	

Світовий ринок електричних тракторів демонструє стрімке зростання. За різними оцінками, його обсяг становив 245 млн дол. США у 2025 році з подальшим зростанням до 1,95 млрд дол. до 2035 року (середньорічний темп зростання 22,7%). За іншими даними, ринок оцінювався в 1,04 млрд дол. у 2025 році зі зростанням до 3,10 млрд дол. до 2032 року (CAGR 16,84%). Лідером ринку є США з часткою 76% у 2025 році (81,3 млн дол.), що пояснюється потужною екосистемою сільськогосподарського машинобудування та високою інвестиційною спроможністю фермерів [5, 6]. Сегмент тракторів потужністю до 50 к.с. займає 57,8% ринку (2025 р.) як найбільш пристосований до можливостей електричних трансмісій для легких робіт — обприскування, транспортування, догляд за садами та виноградниками. Технологічний прогрес у сфері батарейних систем (збільшення щільності енергії, підвищення швидкості заряду та терміну служби) поряд зі зниженням вартості батарей суттєво змінює економіку володіння електротракторами. Провідними виробниками електротехніки в цьому сегменті є CNH Industrial, AGCO Corporation, John Deere, Mahindra & Mahindra, Kubota Corporation, CLAAS, Monarch Tractor, Soletrac та інші [7].

Концепції гібридних силових установок

Повна електрифікація сільськогосподарської техніки гальмується рядом обмежень: високою вартістю потужних тягових батарей, їх значними масою та габаритами, недостатньою автономністю та необхідністю розвиненої зарядної інфраструктури. Тому гібридизація (дизель-електричний гібрид) розглядається як компромісний перехідний варіант, коли дизельний двигун працює в оптимальному режимі, а електромотор забезпечує пікові навантаження та рекуперацію енергії. Загалом, гібридні електромобілі класифікуються за двома основними ознаками: ступенем гібридизації (співвідношення потужності електромотора до сумарної потужності) та архітектурою трансмісії [8].

Класифікація гібридних силових установок за ступенем електрифікації:

– *Мікрогібриди* (ступінь гібридизації 5–10%, напруга 12 В, потужність 3–5 кВт, економія палива 3–10% у міському циклі). Основний елемент — стартер-генератор для системи «старт-стоп».

					14.17 - КР.015.1.000 ПЗ	Аркуш
						13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- *Легкі (mild) гібриди* (10–15%, 48–150 В, до 20 кВт, економія 15–25%).

Електромотор забезпечує підтримку крутного моменту (torque assist) та часткову рекуперацію.

- *Повні (full) гібриди* (до 55%, 150–350 В, 25–60 кВт, економія 30–50%).

Допускають короткочасний рух суто на електротязі, більш глибоку рекуперацію.

- *Плагін-гібриди (PHEV, найвищий ступінь гібридизації, напруга до 600 В)*. Можуть заряджатися від зовнішньої мережі, забезпечують значний запас ходу на електротязі.

Класифікація за архітектурою силового приводу:

- *Послідовна схема (Series, Range Extender)*: дизельний двигун обертає генератор, який живить електромотор або заряджає батарею. Двигун не має механічного зв'язку з колесами. Перевага — двигун завжди працює в найефективнішому діапазоні оборотів.

- *Паралельна схема (Parallel)*: і дизельний двигун, і електромотор механічно з'єднані з трансмісією. Гнучке керування джерелами енергії залежно від навантаження.

- *Комбінована схема (Series-Parallel або Power-split)*: поєднує переваги обох типів, використовуючи планетарні механізми для розподілу потужності.

Схема дизель-електричного гібрида, яка довела свою ефективність у важкому залізничному транспорті та кар'єрних самоскидах, демонструє потенціал для застосування в сільськогосподарській техніці з високими вимогами до тягового зусилля. Переваги гібридних систем особливо проявляються при змінних навантаженнях, які характерні для більшості польових робіт (таблиця 1.1).

					14.17 - КР.015.1.000 ПЗ	Аркуш
						14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.1 – Основні світові моделі електротракторів (2025–2026 рр.):

Модель	Тип	Потужність	Батарея	Особливості
Fendt e100 Vario	Повністю електричний (BEV)	50 кВт / 68 к.с. (Eco), 55 кВт / 75 к.с. (Dynamic), до 66 кВт / 90 к.с. (Dynamic+) пік; максимальний момент 347 Нм	100 кВт·год; напруга 668 В	Базується на платформі 200 Vario; час роботи 4–7 год (частинне навантаження); заряджання CCS2: 20% → 80% за 45 хв при 80 кВт DC або 5 год при 22 кВт AC
John Deere E-Power	Повністю електричний (BEV)	~130 к.с. (~96 кВт)	Модульна (від 1 до 5 батарей)	Багатомоторна архітектура (окремі двигуни для ходу, гідравліки та ВВП); занурювальне рідинне охолодження батарей
TAFE EVX75	Дизель-електричний гібрид (HEV)	75 к.с. (55 кВт)	400 В	Послідовна або паралельна схема; 3-швидкісна трансмісія; рідинне охолодження високовольтної системи
Tadus T16.20	Повністю електричний (BEV)	120 кВт (~160 к.с. пік)	~196 кВт·год	Багатомоторна (5 двигунів); змінна батарея (заміна за 5 хв); двостороннє заряджання; споряджена маса 7,5 т
Monarch MK-V	Повністю електричний (BEV)	70 к.с. (~52 кВт)	—	Компактний; орієнтований на американський та європейський ринки

Характерні риси нових електричних архітектур:

– *Відмова від механічної трансмісії:* перехід до багатомоторних систем, коли кожен споживач (колеса, ВВП, гідравлічна помпа) має окремий електродвигун, що керується незалежно.

– *Використання стандартів високовольтних з'єднань:* стандарт ISO 23316 визначає шину живлення потужністю до 150 кВт при напрузі 700 В постійного струму або 480 В змінного струму для передачі енергії на націпне обладнання. Більшість електромобілів і тракторів (Fendt e100 Vario, TAFE EVX75) використовують стандартизовані роз'єми CCS для швидкого заряджання.

– *Підвищення напруги бортової мережі:* для зменшення струмів та втрат високовольтні системи працюють під напругою 400–700 В, що накладає нові вимоги до діагностики та техніки безпеки.

Ситуація в Україні та перспективи впровадження

Україна поступово інтегрується в світові тенденції електрифікації сільськогосподарської техніки. Станом на 2026 рік електричні трактори та автономні роботизовані платформи впевнено виходять на поля України, переставши бути лише виставковою новинкою.

Основні тренди на українському ринку:

1. *Сегмент попиту:* Найбільшим попитом користуються електротрактори потужністю від 25 до 70 к.с., які ідеально підходять для міжрядних робіт та тваринницьких комплексів.

2. *Локальний виробник:* Українська компанія Tadus (можливо, спільне підприємство з німецьким стартапом) оголосила про запуск серійного виробництва електротрактора T16.20 у 2026 році, що свідчить про формування локального ринку електротяги.

3. *Фінансова підтримка:* Великі лізингові компанії (наприклад, ОТР Leasing) пропонують програми з кешбеком 10% на придбання сільськогосподарської техніки та гібридних/електричних автомобілів, що стимулює оновлення парку.

					14.17 - КР.015.1.000 ПЗ	Аркуш
						16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. *Енергетична незалежність*: Прогресивні фермери вирішують питання зарядної інфраструктури шляхом встановлення сонячних електростанцій на дахах ангарів, створюючи замкнений енергетичний цикл «сонце → батарея → робота техніки».

5. *Терміни окупності*: Хоча стартова ціна електротрактора на 20–30% вища за дизельний аналог, термін окупності за рахунок економії на паливно-мастильних матеріалах становить 3–4 роки інтенсивної експлуатації.

6. *Проекти конверсії*: У Німеччині, зокрема, існують клуби та проекти (Elektro-Bulldog Verein), метою яких є переобладнання старих дизельних тракторів (наприклад, John Deere 7700) на електричний привід у рамках дослідного проекту ALADIN зі створення універсальної системи змінних літій-іонних акумуляторів. Цей досвід переконверсії може бути цікавим для України.

Вплив електрифікації на системи діагностики електроприводів

Порівняно з традиційними дизельними тракторами, електричні та гібридні силові установки привносять нові типи компонентів, які потребують діагностики: високовольтні батареї (характеристики, стан здоров'я (SOH), балансування осередків, система термоменеджменту); інвертори (силові транзистори IGBT/SiC); електродвигуни (постійні магніти, обмотки, датчики положення ротора); системи керування енергією (EMS); системи рекуперативного гальмування; високовольтна проводка та контактори.

Для діагностики застосовують спеціалізоване обладнання: сканери для зчитування кодів несправностей (DTC) та моніторингу параметрів високовольтних систем (Autel EVDiag Box); мегаомметри (Fluke 1587) для перевірки опору ізоляції високовольтних ланцюгів; цифрові мультиметри та осцилографи для аналізу форми сигналу.

В архітектурі на основі CAN-шини (ISO 11783 / ISOBUS) інтеграція електроприводів передбачає діагностику даних: контроль справності тягової батареї, температури елементів силової електроніки, крутного моменту та частоти обертання. Розвиток електрифікації нерозривно пов'язаний із розвитком засобів діагностики цих нових складних електронних систем.

					14.17 - КР.015.1.000 ПЗ	Аркуш
						17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На основі проведеного аналізу стану та перспектив розвитку гібридних та електричних силових установок у мобільній сільськогосподарській техніці можна зробити такі основні висновки (рисунок 1.1):

1. Електрифікація сільськогосподарської техніки є глобальним трендом, зумовленим необхідністю зменшення викидів парникових газів (14% глобальних викидів припадає на сільське господарство), зростанням цін на дизельне паливо та посиленням екологічних вимог. Світовий ринок електричних тракторів демонструє стрімке зростання: від 245 млн дол. у 2025 році до 1,95 млрд дол. до 2035 року (CAGR 22,7%), причому найбільшою є частка США (76% у 2025 році). Найбільшим попитом користуються трактори потужністю до 50 к.с. (57,8% ринку), призначені для легких сільськогосподарських робіт.

2. Гібридні силові установки розглядаються як оптимальний перехідний етап до повної електрифікації, особливо для машин із високою енергоємністю. На основі аналізу ступеня гібридизації (від мікрогібридів до плагін-гібридів) та архітектури трансмісії (послідовна, паралельна, комбінована) обґрунтовано, що дизель-електричні гібриди дозволяють зменшити споживання палива, викиди та механічну складність при збереженні високої продуктивності для важких польових робіт.

3. Найбільші світові виробники сільгосптехніки (Fendt, John Deere, TAFE, Tadus) активно впроваджують електричні моделі, які демонструють високі технологічні показники:

– Fendt e100 Vario (BEV) – 50–66 кВт, 100 кВт·год, час роботи 4–7 год, заряджання 20→80% за 45 хв (80 кВт DC);

– John Deere E-Power (BEV) – ~130 к.с., модульна батарея (до 5 блоків), багатомоторна архітектура, занурювальне рідинне охолодження;

– TAFE EVX75 (HEV) – 75 к.с., 400 В, робота в чисто електричному або гібридному режимі;

– Tadus T16.20 (BEV) – 120 кВт, 196 кВт·год, змінна батарея (заміна за 5 хв).

					14.17 - КР.015.1.000 ПЗ	Аркуш
						18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.1 – Перспективи та тенденції розвитку гібридних та електричних силових установок у мобільній сільськогосподарській техніці

4. Характерними рисами нових електричних архітектур є: багатомоторні системи з розподіленими двигунами для ходу, гідравліки та ВВП; відмова від механічних трансмісій; використання стандартів високовольтних з'єднань (ISO 23316); підвищення напруги до 400–700 В для зменшення струмів та втрат; уніфікація зарядних роз'ємів за стандартом CCS2.

5. Український ринок електротракторів перебуває на стадії активного становлення. Станом на 2026 рік електротрактори вже впевнено виходять на поля України, з найбільшим попитом на моделі потужністю 25–70 к.с. (для міжрядних робіт та тваринництва). Українська компанія Tadus запускає серійне виробництво моделі T16.20. Фінансова підтримка з боку лізингових компаній (кешбек 10%) та перспектива енергетичної незалежності за рахунок СЕС сприяють впровадженню. Термін окупності електротрактора в умовах України становить 3–4 роки.

6. Електрифікація призводить до появи нових компонентів, які потребують спеціалізованої діагностики: високовольтних батарей (контроль стану осередків, термоменеджменту); інверторів (IGBT/SiC); електродвигунів; систем керування енергією (EMS). Для діагностики використовуються спеціалізовані сканери (Autel EVDiag Box), мегаомметри (Fluke 1587), мультиметри та осцилографи. Інтеграція електроприводів у загальну CAN-мережу трактора (ISOBUS) забезпечує безперервний моніторинг параметрів тягової батареї, силової електроніки та електродвигунів, що дозволяє діагностувати несправності в реальному часі.

Таким чином, розвиток гібридних та електричних силових установок у сільськогосподарській техніці є об'єктивною закономірністю, що визначає технологічне майбутнє галузі. Перехід до електротяги відкриває нові можливості для підвищення ефективності, зниження експлуатаційних витрат та автоматизації виробничих процесів, але водночас створює нові виклики для систем діагностики, що потребує подальших досліджень та розробки відповідних технічних рішень.

1.2 Огляд існуючих методів контролю технічного стану високовольтних акумуляторних батарей (ВВБ) та тягових електродвигунів

Перехід сільськогосподарського машинобудування до електричних і гібридних силових установок ставить нові вимоги до систем діагностики та технічного обслуговування. Високовольтні акумуляторні батареї (ВВБ) та тягові електродвигуни є критичними компонентами електроприводів тракторів, від надійності яких безпосередньо залежать працездатність, економічна ефективність та безпека техніки.

Класифікація та основні параметри контролю ВВБ

Високовольтна акумуляторна батарея є найскладнішим і найдорожчим компонентом електричного трактора (до 40–50% вартості машини). Система керування батареєю (BMS) виконує функції центрального контрольного вузла, безперервно відстежуючи стан здоров'я сотень або тисяч комірок, з'єднаних

					14.17 - КР.015.1.000 ПЗ	Аркуш
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

послідовно та паралельно. Для забезпечення безпечної, надійної та ефективної роботи необхідно контролювати кілька груп параметрів [8].

SOC є найфундаментальнішим параметром BMS, який вказує на залишкову ємність акумулятора у відсотках. Сучасні методи оцінювання SOC поділяються на декілька категорій [9]:

- *Кулонометричний метод (Coulomb counting)* — інтегрування струму за часом. Простий у реалізації, але накопичує похибку через дрейф датчиків струму та втрату точності при змінних навантаженнях;

- *Метод розімкненої напруги (OCV)* — вимірювання напруги спокою з подальшим зіставленням з таблицею або математичною моделлю. Вимагає тривалого періоду спокою, що робить метод непридатним для використання в реальному часі;

- *Фільтри Калмана (Kalman Filter, KF)* — найбільш поширений підхід, який поєднує еквівалентну схему батареї (ECM) з рекурсивним фільтром для оновлення оцінок SOC на основі нових вимірювань. Добре працює в реальному часі;

- *Нейронні мережі (ANN)* — покращують керування батареєю шляхом підвищення безпеки, довговічності та надійності електрохімічних батарей через покращення оцінювання SOC.

Методи на основі фільтрів Калмана є найбільш практичними та поширеними в сучасних бортових BMS, забезпечуючи похибку оцінювання SOC на рівні 1–3% за прийнятних обчислювальних витрат.

SOH характеризує ступінь деградації батареї з часом і виражається у відсотках від початкової ємності. На відміну від SOC, SOH змінюється повільно і є критичним для прогнозування залишкового ресурсу батареї та визначення моменту її заміни. Вимоги до продуктивності в реальному часі та стійкості є ключовими для BMS, що робить методи, які поєднують ECM і ймовірнісні моделі, найбільш практичними [10].

Останні дослідження виявили, що Long Short-Term Memory (LSTM), Convolutional Neural Networks (CNN) та Particle Filters (PF) є найбільш часто

					14.17 - КР.015.1.000 ПЗ	Аркуш
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використовуваними методами для прогнозування ресурсу тягових батарей. У цьому контексті цифрові двійники (Digital Twins) забезпечують високоточне оцінювання стану здоров'я шляхом створення віртуальної копії фізичної системи, яка в режимі реального часу синхронізується з даними датчиків.

SOS стан безпеки відображає рівень ризику виникнення критичних несправностей, включаючи термічний розгін (thermal runaway), коротке замикання, перегрів та надлишковий тиск всередині комірок. Несправності акумуляторних батарей можуть призвести до значних ризиків для безпеки, включаючи термічний розгін, зниження ефективності та поломки. Ранні слабкі напруги несправностей не перевищують критеріїв безпеки, що ускладнює їх виявлення стандартними методами, тому дедалі більшого значення набувають інтелектуальні системи виявлення несправностей на основі машинного навчання [12].

Класифікація методів діагностики несправностей ВВБ

Загальний підхід до діагностики несправностей ВВБ поділяється на три основні класи: модель-орієнтовані (model-based), дата-орієнтовані (data-driven) та гібридні (hybrid) методи.

Модель-орієнтовані методи засновані на побудові точної математичної моделі батареї (зазвичай еквівалентної схеми) та генерації залишкових сигналів (різниця між виміряними та передбаченими значеннями). Використовують структурний аналіз та розширений фільтр Калмана (EKF) для генерації залишкових сигналів для виявлення широкого спектру очікуваних несправностей [13].

Дата-орієнтовані методи використовують дані з самої батарейної системи для виявлення потенційних несправностей, не покладаючись на точні математичні моделі. Методи машинного навчання (ML) та глибокого навчання (DL) демонструють значні покращення у виявленні тонких закономірностей несправностей [14].

Найбільшої точності дозволяють досягнути гібридні методи, що поєднують переваги модель-орієнтованих та дата-орієнтованих підходів.

					14.17 - КР.015.1.000 ПЗ	Аркуш
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Майбутнє виявлення несправностей батарей буде покладатися на передові гібридні методи на основі ШІ в поєднанні з моніторингом на основі датчиків реального часу [15].

Крім того, у сільськогосподарському секторі активно розвиваються системи предиктивної аналітики (Predictive Maintenance, PdM) на базі хмарних платформ. Завдяки аналізу історичних циклів заряду-розряду, умов навколишнього середовища та графіків навантаження, моделі PdM прогнозують несправності батарей та планують вікна технічного обслуговування до того, як трапиться відмова. Це забезпечує підвищення продуктивності на 20–30% після впровадження AI-driven PdM.

Системи балансування комірок (Cell Balancing)

Однією з критичних функцій BMS є забезпечення рівномірності напруги окремих комірок в акумуляторній батареї. Оскільки ємності та опори комірок розрізняються, під час заряджання та розряджання виникає дисбаланс напруги, що призводить до неефективного використання енергії, передчасного старіння слабших елементів і навіть загроз безпеці [16].

Виділяють пасивне балансування, за якого надлишкова енергія з комірок із вищою напругою розсіюється у вигляді тепла через резистори (простий, але з високими втратами), та активне балансування, за якого енергія перерозподіляється між комірками замість розсіювання (конденсаторні, індукторні або трансформаторні техніки). Ці системи дозволяють переносити заряд між сусідніми комірками та переміщувати енергію на більші відстані [17].

Дослідження OBD-II діагностики показали, що стандартні протоколи мають обмеження щодо отримання даних про балансування комірок, що впливає на точність оцінки стану високовольтної батареї та її залишкової ємності.

Контроль ізоляції високовольтних систем

Високовольтні системи електричних транспортних засобів (акумуляторні батареї, інвертори, тягові двигуни) конструктивно ізолювані від шасі для забезпечення безпеки. На відміну від звичайної 12-вольтової системи, яка

					14.17 - КР.015.1.000 ПЗ	Аркуш
						23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використовує металеве шасі як опорний «земляний» провідник, високовольтні системи спроектовані як незаземлені гальванічно ізольовані архітектури.

Моніторинг ізоляції безперервно вимірює опір ізоляції між високовольтною системою та землею шасі. Якщо опір падає нижче заданого порога безпеки, транспортний засіб може попередити водія, обмежити роботу або повністю відключити високовольтну систему. Більшість пристроїв моніторингу ізоляції (IMD) впорскують контрольований тестовий сигнал у високовольтну шину та оцінюють результуючий струм витоку через шасі для обчислення ефективного опору ізоляції. Перехід від 400-вольтових до 800-вольтових систем значно збільшив навантаження на системи моніторингу ізоляції.

Контроль технічного стану тягових електродвигунів

Тягові електродвигуни (зазвичай синхронні з постійними магнітами — PMSM/IPMSM) є критичними компонентами силового приводу, діагностика яких базується на аналізі сигналів струму та напруги, вібрації, а також спеціалізованих методах контролю ізоляції обмоток.

Аналіз спектра струму (Motor Current Signature Analysis, MCSA) є найпоширенішим методом діагностики, який не потребує втручання в конструкцію машини. Метод базується на частотному аналізі струму статора, в якому несправності проявляються у вигляді характерних бічних смуг навколо основної частоти живлення. Порівняльні дослідження показують, що MCSA забезпечує кращу індикацію певних електричних несправностей, таких як ексцентриситет повітряного зазору та обриви стрижнів ротора, тоді як вібраційний аналіз є кращим індикатором механічних дефектів (небаланс, перекіс валів). Методика огиноючої (envelope analysis) є загальноприйнятою технікою для виявлення та діагностики дефектів підшипників кочення.

Контроль ізоляції обмоток має важливе значення для оцінки стану інверторних тягових двигунів. Латентні дефекти ізоляції, такі як невеликі бульбашки повітря або мікророзриви, можуть спровокувати часткові розряди, що призводять до пошкодження ізоляції та виходу двигуна з ладу, особливо під

					14.17 - КР.015.1.000 ПЗ	Аркуш
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

впливом швидких перемикачів інверторів. Метод вимірювання часткових розрядів (Partial Discharge, PD) надійно виявляє приховані дефекти конструкції та виробництва, забезпечуючи довговічність і безпеку двигуна. Експериментальні дослідження показали, що для двигунів гібридних транспортних засобів напруга початку розряду (DIV) для нового двигуна становить 1400 В, а для того, що був у використанні — 1100 В, що дозволяє кількісно оцінити ступінь деградації ізоляції.

Термографічний контроль дозволяє виявляти локальні перегрівки обмоток, підшипників або місць з'єднань, що свідчить про підвищений електричний опір або механічне тертя.

Інтеграція діагностики в CAN-мережу (ISOBUS) та OBD-II

У сучасних електричних та гібридних тракторах діагностична інформація з BMS, інвертора та електродвигуна інтегрується в загальну CAN-мережу машини відповідно до стандартів ISO 11783 (ISOBUS) та OBD-II.

ISOBUS визначає стандартизований метод і формат передачі даних між сенсорами, виконавчими механізмами, елементами керування та інформаційними системами. Важливу роль у цьому відіграє його 12-та частина, яка описує діагностичну систему послідовної мережі передачі даних. На основі цього стандарту розробляються бібліотеки, такі як IsoAgLib, що дозволяють реалізовувати діагностичні системи для ISOBUS-сумісного обладнання.

OBD-II дозволяє отримувати важливі діагностичні дані про електромобіль, зокрема стан батареї, електродвигуна та інших компонентів. Однак дослідження виявили обмеження, пов'язані з неповнотою певних параметрів, особливо щодо балансування комірок батареї, що впливає на точність оцінки стану високовольтної батареї та її залишкової ємності.

Практичні діагностичні рішення для сільськогосподарської техніки, такі як система Jaltest від Cojali, дозволяють проводити повну діагностику кодів помилок, приводити в дію компоненти, виконувати калібрування, налаштування параметрів та сканування систем для понад 80 брендів техніки, включаючи провідних виробників JCB, Case IH, Claas, John Deere, New Holland.

					14.17 - КР.015.1.000 ПЗ	Аркуш
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Безпека обслуговування високовольтних систем

Робота з високовольтними системами вимагає спеціальних заходів безпеки, включаючи процедури «lockout/tagout» (блокування та маркування) для високовольтного обладнання, використання засобів індивідуального захисту (ЗІЗ), ідентифікацію специфічних небезпек, розуміння впливу режимів заряджання на стан батареї.

Обслуговування високовольтних систем вимагає різних рівнів сертифікації, починаючи від базового навчання з електробезпеки до спеціалізованої кваліфікації техніків з високовольтних систем. Сучасні системи навчання, такі як Lucas Nülle TruckTrain, дозволяють стажерам працювати безпосередньо з реальними високовольтними системами при найсуворіших заходах безпеки, проводячи різноманітні діагностичні стратегії та вимірювання на цифровій CAN-мережі BMS (рисунок 1.2).

1. Комплексний моніторинг ВВБ охоплює оцінювання SOC, SOH та SOS. Найбільш ефективним підходом для SOC у реальному часі є комбінація ECM з фільтрами Калмана, а для SOH — LSTM, CNN та Particle Filters.

2. Діагностика несправностей базується на трьох основних підходах: модель-орієнтованому (EKF, залишкові сигнали), дата-орієнтованому (ML/DL) та гібридному, який забезпечує найвищу точність.

3. Предиктивне обслуговування (PdM) у сільськогосподарському секторі дозволяє прогнозувати несправності батареї, підвищуючи продуктивність техніки на 20–30%.

4. Контроль ізоляції (IMD) та балансування комірок є критичними функціями BMS, причому стандартні протоколи OBD-II мають обмеження щодо моніторингу балансування комірок.

5. Для тягових електродвигунів найбільшого поширення набули MCSA для виявлення електричних несправностей, вібраційний аналіз для механічних дефектів та PD-тестування для контролю ізоляції обмоток, що дозволяє кількісно оцінити ступінь деградації ізоляції шляхом порівняння напруг початку розряду (DIV) та видимого заряду.

					14.17 - КР.015.1.000 ПЗ	Аркуш
						26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6. Інтеграція діагностики в CAN-мережу ISOBUS (ISO 11783-12) дозволяє безперервно контролювати всі критичні параметри високовольтної системи в реальному часі з використанням стандартизованих протоколів. Практичні діагностичні рішення, такі як Jaltest, забезпечують повну діагностику для понад 80 брендів сільгосптехніки.

7. Безпечне обслуговування високовольтних систем вимагає спеціальних процедур LOTO, використання ЗІЗ та різних рівнів сертифікації техніків, що підкреслює необхідність відповідної підготовки персоналу при переході до електроприводів у сільському господарстві.



Рисунок 1.2 – Огляд існуючих методів контролю технічного стану високовольтних акумуляторних батарей (ВВБ) та тягових електроприводів тракторів

1.3 Концепція цифрових двійників (Digital Twins) як інструмент прогностичного технічного обслуговування агромашин

Визначення та базові засади концепції Digital Twins

Концепція цифрових двійників (Digital Twins, DT) виникла в промисловій інженерії, де вони спочатку розроблялися для копіювання та оптимізації

14.17 - КР.015.1.000 ПЗ					Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	27

складних механічних систем. Сучасне розуміння цифрового двійника базується на створенні віртуальної копії реального фізичного об'єкта або процесу, яка безперервно синхронізується з даними з датчиків, забезпечуючи можливість моделювання, аналізу, прогнозування та прийняття рішень у реальному часі. Сьогодні цифрові двійники є однією з центральних технологій у галузі промислового Інтернету речей (IIoT) та систем Industry 4.0 (рисунок 1.3).



Рисунок 1.3 – Концепція цифрових двійників (Digital Twins) як інструмент прогностичного технічного обслуговування агромашин

Відповідно до офіційних визначень ISO 23247:2021, цифровий двійник розглядається як «віртуальне представлення фізичного об'єкта або процесу, яке забезпечує двосторонній зв'язок між фізичним та віртуальним світами через збір даних, моделювання та керування». Хоча цей стандарт спочатку розроблявся для виробничих систем, його архітектурні принципи в останні роки успішно поширюються на інші галузі, включаючи автомобільну промисловість, сільське господарство, космічну галузь та системи штучного інтелекту.

У контексті сільськогосподарського машинобудування цифровий двійник розглядається не просто як комп'ютерна модель, а як кіберфізична система (CPS), в якій реальна агромашина (фізичний об'єкт) і її віртуальне відображення постійно обмінюються даними через телематичні канали зв'язку, створюючи замкнений цикл «моніторинг → діагностика → прогнозування → керування». Ця технологія визнана одним із ключових архітектурних парадигм для просування автономних польових операцій, прогнозного управління активами та когнітивно-автономного регулювання в смарт-фермерстві.

Архітектура та рівні інтеграції цифрових двійників у агромашинобудуванні

Впровадження цифрових двійників у сільськогосподарську техніку вимагає системного підходу до їх архітектурної побудови. На основі аналізу 443 наукових джерел, опублікованих у 2015–2026 роках (з яких 322 рецензовані дослідження), сучасну архітектуру цифрових двійників пропонується розглядати за двома основними вимірами: структура фізичного та віртуального двійників та чотири рівні інтеграції між ними.

Фізичний двійник (Physical Twin) (рисунок 1.4).

Фізичний двійник — це реальна агромашина, оснащена необхідним сенсорним обладнанням для збору даних про свій технічний стан і умови експлуатації. До складу сенсорного забезпечення входять різноманітні типи датчиків:

- параметри двигуна та трансмісії: частота обертання, крутний момент, температура охолоджуючої рідини, тиск масла;
- параметри гідравлічної системи: тиск у гідравлічних лініях, витрати рідини;
- параметри електрообладнання: напруга, струм, рівень заряду акумуляторних батарей;
- кінематичні параметри: швидкість руху, пройдений шлях, положення навісних пристроїв;

					14.17 - КР.015.1.000 ПЗ	Аркуш
						29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– умови навколишнього середовища: температура повітря, вологість, запиленість.



Рисунок 1.4 – Фізичний двійник (Physical Twin)

Важливим аспектом є те, що фізичний двійник може існувати як у вигляді повністю нової машини, спроектованої з урахуванням цифрових технологій, так і у вигляді модернізованого старого обладнання, на яке додатково встановлюються необхідні сенсори та телематичні модулі. В Україні цей аспект є особливо актуальним через великий парк техніки радянських часів. Переобладнання старих дизельних тракторів на електричний привід із впровадженням цифрових двійників (проекти конверсії, що вже реалізуються в Європі, зокрема в рамках дослідного проєкту ALADIN) є перспективним напрямом відновлення техніки з одночасним підвищенням її функціональності.

Віртуальний двійник (Virtual Twin) та чотири рівні інтеграції (рисунок 1.5).

Віртуальний двійник — це математична та імітаційна модель фізичної машини, яка в режимі реального часу отримує дані з сенсорів.

У сільськогосподарському контексті віртуальне представлення є значно складнішим порівняно з промисловістю через високу варіабельність агроєкосистем: ґрунт є нелінійним, гетерогенним середовищем, рослини постійно змінюються, а погодні умови важко передбачити. Тому агроєкосистеми є живими, контекстно-залежними та нестабільними, що робить їх представлення значно складнішим, ніж в інженерних системах.

ВІРТУАЛЬНИЙ ДВІЙНИК (VIRTUAL TWIN) ТА ЧОТИРИ РІВНІ ІНТЕГРАЦІЇ



Рисунок 1.5 – Віртуальний двійник

Для систематизації різних рівнів технологічної зрілості цифрових двійників у агромашинобудуванні традиційно виділяють чотири рівні інтеграції:

1. *Рівень 1: Віртуальне моделювання (Virtual Modelling)* – комп'ютерна модель створюється на етапі проектування (CAD/CAE), але не має постійного зв'язку з реальною машиною. Використовується для оптимізації конструкції.

2. *Рівень 2: Моніторинг (Monitoring)* – модель отримує дані з реальної машини в реальному часі, дозволяючи відстежувати поточний стан (SOC батареї, температура двигуна, тиск у гідравліці тощо). Це базовий рівень для прогнозного обслуговування.

3. *Рівень 3: Прогнозування (Prediction)* – модель дозволяє передбачати зміну стану в часі (деградацію батареї, знос підшипників, залишковий ресурс) на основі алгоритмів машинного навчання та фізичних моделей.

4. *Рівень 4: Замкнене керування (Closed-loop Control)* – найвищий рівень інтеграції, за якого модель не лише прогнозує, але й автоматично приймає рішення щодо зміни режимів роботи машини (наприклад, зниження швидкості для зменшення навантаження на батарею або гідросистему).

Незважаючи на значний технічний прогрес, ключові розриви все ще існують: менше 10% досліджень повідомляють про сувору польову числову валідацію, а перехід від одно-машинних систем до розгортання на рівні парку техніки обмежений через несумісні протоколи зв'язку, фрагментовані конвеєри даних та низьку надійність сільського зв'язку.

Прогностичне технічне обслуговування (Predictive Maintenance, PdM) на основі цифрових двійників

Традиційні методи технічного обслуговування сільськогосподарської техніки, які часто є реактивними (ремонт після поломки) або регламентними (фіксований міжсервісний інтервал), виявляються недостатніми для задоволення потреб сучасного точного землеробства. Умови експлуатації агромашин характеризуються складними динамічними навантаженнями, агресивним середовищем (пил, волога, перепади температур) та механізмами відмов, що розвиваються, що робить традиційні підходи неефективними. Тому необхідним є перехід до прогностичного обслуговування (Predictive Maintenance, PdM) на основі цифрових двійників.

Прогностичне технічне обслуговування дозволяє фермерам завчасно вирішувати проблеми, оптимізувати графіки технічного обслуговування та подовжувати термін служби машин. Інтегруючи моделі на основі даних, інтелектуальні алгоритми прогнозування та стратегії прийняття рішень у реальному часі, підходи на основі цифрових двійників здатні подолати обмеження традиційних методів. Концептуально PdM на базі DT реалізує логіку «від моніторингу до передбачення»:

					14.17 - КР.015.1.000 ПЗ	Аркуш
						32
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- збір даних – отримання історичних та оперативних даних через вбудовані сенсори та телематику;
- аналіз стану – діагностика поточного стану (наприклад, стан здоров'я батареї SOH, оцінка зносу підшипників);
- прогнозування відмов (RUL) – на основі алгоритмів ML визначається залишковий ресурс кожного компонента;
- прийняття рішень – інтелектуальна система планує найбільш економічно вигідний момент для проведення ТО.

Дослідження підтверджують, що впровадження комплексних можливостей PdM дозволяє досягти значного економічного ефекту: зменшення незапланованих простоїв до 40% та подовження терміну служби обладнання на 15% завдяки оптимізованому вибору часу технічного обслуговування.

Практичні застосування цифрових двійників в агромашинобудуванні (рисунок 1.6, рисунок 1.7, рисунок 1.8, рисунок 1.9, рисунок 1.10).

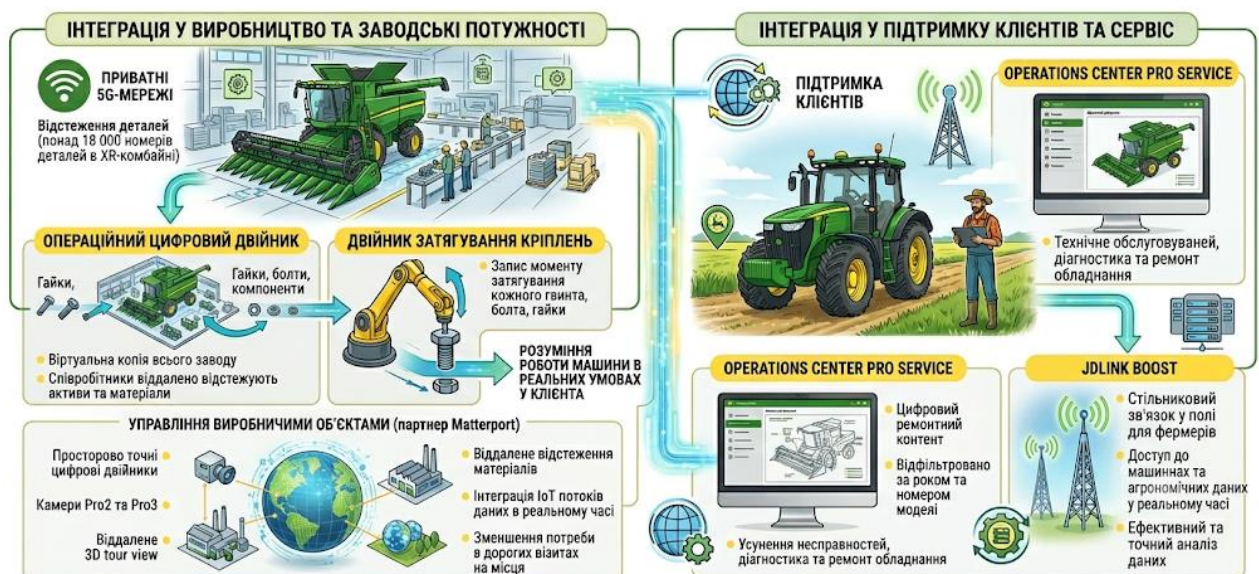


Рисунок 1.6 – Приклади інтеграції DT у виробництво та сервіс



Рисунок 1.7 – Цифрові двійники для гібридних та електричних трансмісій



Рисунок 1.8 – Вітчизняний та зарубіжний досвід застосування PdM у гідравлічних системах тракторів



Рисунок 1.9 – Ключові технологічні енейблери та системи збору даних для PdM



Рисунок 1.10 – Стандартизація: ISO 23247 як фундамент для промислового впровадження DT

Виклики та бар'єри впровадження цифрових двійників (рисунк 1.11)

Незважаючи на значний технологічний прогрес, широкомасштабне впровадження цифрових двійників стикається з низкою викликів:



Рисунок 1.11 – Виклики та бар'єри впровадження цифрових двійників

Перспективи розвитку та напрямки подальших досліджень (рисунк 1.12)

Аналіз літератури дозволяє визначити перспективні напрями розвитку цифрових двійників у прогностичному обслуговуванні агромашин:



Рисунок 1.12 – Перспективи розвитку та напрямки подальших досліджень

На основі проведеного огляду концепції цифрових двійників як інструменту прогностичного технічного обслуговування агромашин можна зробити такі висновки:

1. Цифрові двійники є ключовою технологією для переходу до Agriculture 4.0 та 5.0, забезпечуючи замкнений цикл «моніторинг → діагностика → прогнозування → керування». Їх використання дозволяє зменшити незаплановані простой до 40% та подовжити термін служби обладнання на 15% завдяки оптимізованому вибору часу технічного обслуговування.

2. Класифікаційна структура цифрових двійників базується на двох вимірах: структурі фізичного та віртуального двійників та чотирьох рівнях інтеграції (віртуальне моделювання, моніторинг, прогнозування, замкнене керування). Менше 10% досліджень повідомляють про сувору польову валідацію, а перехід до систем рівня парку техніки обмежений через несумісність протоколів зв'язку та низьку надійність мереж.

3. Досвід John Deere демонструє комплексний підхід: створення операційних цифрових двійників заводів (відстеження понад 18 000 деталей), використання платформи Matterport для управління 60+ об'єктами, а також надання клієнтам цифрового ремонтного контенту через JDLink та Operations Center PRO Service.

4. Для електрифікованих силових установок цифрові двійники забезпечують високоточне оцінювання SOC (похибка 0,088%) та SOH (97% точності), а також прогнозування часу до відмови гідравлічних систем із 92% коректних оцінок у межах допуску $\pm 10\%$ для 48-годинного горизонту. Стратегії енергозбереження на основі DT зменшують споживання енергії електротракторів на 10,26% та покращують стабільність швидкості на 43,21%.

5. Стандарт ISO 23247 (Digital Twin Framework for Manufacturing) є фундаментальною основою для побудови масштабованих архітектур, хоча початково розроблявся для промисловості. Його принципи успішно поширюються на автомобільні системи, батарейні системи та сільське господарство, забезпечуючи можливість створення інтероперабельних рішень.

					14.17 - КР.015.1.000 ПЗ	Аркуш
						37
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6. Основними викликами впровадження залишаються: різноманітність комунікаційних протоколів (різні системи телематики), нестабільність сільського зв'язку (часткове вирішення — edge-обчислення), висока початкова вартість (особливо критично для дрібних господарств), обмежена сумісність зі старими машинами, а також відсутність процедур сертифікації та невизначеність права власності на дані.

7. Перспективними напрямками подальших досліджень є: створення систем рівня парку техніки (fleet-level DT), розробка мультифізичних моделей (грунт-машина-клімат), інтеграція хмарних платформ предиктивної аналітики з використанням ШІ (підвищення продуктивності на 20–30%), а також адаптація принципів ISO 23247 до сільськогосподарського контексту України, що дозволить створити уніфіковані рішення для техніки різних виробників.

					14.17 - КР.015.1.000 ПЗ	Аркуш
						38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

У першому розділі кваліфікаційної роботи виконано аналіз сучасного стану, тенденцій розвитку та технологій діагностики електроприводів тракторів, а також розглянуто концепцію цифрових двійників як інструменту прогностичного технічного обслуговування. На основі проведеного огляду літературних джерел та аналізу світового досвіду можна зробити такі основні висновки.

1. Гібридні силові установки розглядаються як оптимальний перехідний етап до повної електрифікації, особливо для машин із високою енергоємністю. На основі аналізу ступеня гібридизації (від мікрогібридів до плагін-гібридів) та архітектури трансмісії (послідовна, паралельна, комбінована) обґрунтовано, що дизель-електричні гібриди дозволяють зменшити споживання палива, викиди та механічну складність при збереженні високої продуктивності для важких польових робіт.

2. Для діагностики тягових електродвигунів найбільшого поширення набули три методи: аналіз спектра струму (MCSA) для виявлення електричних несправностей (ексцентриситет повітряного зазору, обриви стрижнів ротора); частково-розрядне тестування (PD) для виявлення прихованих дефектів ізоляції обмоток, яке дозволяє кількісно оцінити ступінь деградації ізоляції шляхом порівняння напруг початку розряду (DIV) та видимого заряду; вібраційний аналіз (методика огиначаючої) для виявлення механічних дефектів (небаланс, перекіс валів, знос підшипників). Для повноцінної діагностики рекомендується поєднання MCSA та вібраційного аналізу.

3. Інтеграція діагностики в CAN-мережу ISOBUS (ISO 11783-12) дозволяє безперервно контролювати всі критичні параметри високовольтної системи в реальному часі з використанням стандартизованих протоколів. Практичні діагностичні рішення, такі як Jaltest, забезпечують повну діагностику для понад 80 брендів сільгосптехніки. Безпечне обслуговування високовольтних систем

					14.17 - КР.015.1.000 ПЗ	Аркуш
						39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вимагає спеціальних процедур LOTO (lockout/tagout), використання засобів індивідуального захисту та різних рівнів сертифікації техніків.

4. Цифрові двійники (Digital Twins) є ключовою технологією для переходу до Agriculture 4.0 та 5.0, забезпечуючи замкнений цикл «моніторинг → діагностика → прогнозування → керування». Класифікаційна структура цифрових двійників базується на двох вимірах: структурі фізичного та віртуального двійників та чотирьох рівнях інтеграції (віртуальне моделювання, моніторинг, прогнозування, замкнене керування). Впровадження прогностичного обслуговування (PdM) на основі DT дозволяє зменшити незаплановані простої до 40% та подовжити термін служби обладнання на 15%.

5. Стандарт ISO 23247 (Digital Twin Framework for Manufacturing) є фундаментальною основою для побудови масштабованих архітектур цифрових двійників, хоча початково розроблявся для промисловості. Його принципи успішно поширюються на автомобільні системи, батареїні системи та сільське господарство, забезпечуючи можливість створення інтероперабельних рішень. Адаптація принципів ISO 23247 до сільськогосподарського контексту України є перспективним напрямом подальших наукових досліджень.

6. Основними викликами впровадження залишаються: різноманітність комунікаційних протоколів (різні системи телематики виробників), нестабільність сільського зв'язку (часткове вирішення — edge-обчислення), висока початкова вартість (особливо критично для дрібних господарств), обмежена сумісність зі старими машинами, а також відсутність процедур сертифікації автономних систем та невизначеність права власності на дані. Менше 10% досліджень повідомляють про сувору польову валідацію, а перехід до систем рівня парку техніки обмежений через несумісність протоколів зв'язку та низьку надійність мереж.

					14.17 - КР.015.1.000 ПЗ	Аркуш
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ КОМПОНЕНТІВ ГІБРИДНОГО ТРАКТОРА

2.1 Математична модель електрохімічних та теплових процесів у комірках високовольтної батареї

Високовольтна акумуляторна батарея (ВВБ) є одним із найбільш відповідальних та вартісних компонентів гібридного трактора. Її технічний стан безпосередньо впливає на енергоефективність, динамічні характеристики, безпеку та загальну вартість володіння машиною. Для створення цифрового двійника (Digital Twin) ВВБ, здатного забезпечувати прогностичне технічне обслуговування, необхідно розробити математичну модель, яка адекватно описує електрохімічні та теплові процеси всередині окремих комірок батареї [19].

У цьому підрозділі розглядаються основні підходи до моделювання літій-іонних комірок, які є домінуючим типом акумуляторів у сучасній сільськогосподарській техніці (Fendt e100 Vario, John Deere E-Power, Tadas T16.20 тощо). Особливу увагу приділено моделям, придатним для реалізації в бортових системах керування батареєю (BMS) та в хмарних платформах цифрових двійників.

Класифікація математичних моделей літій-іонних акумуляторів

Для опису поведінки літій-іонних комірок розроблено три основні класи математичних моделей, які відрізняються деталізацією, обчислювальною складністю та придатністю для роботи в реальному часі:

					14.17 - КР.015.2.000 ПЗ				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.					РОЗДІЛ 2		Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевір.	Дядюра К.О.							41	17
Реценз.									
Н. Контр.									
Затверд.	Дядюра К. О.								

1. Емпіричні (чорна скринька) – базуються на апроксимації експериментальних даних поліномами, нейронними мережами або нечіткими системами. Прості, але не дають фізичного розуміння процесів і мають низьку точність за межами навчальної вибірки.

2. Еквівалентні схеми (ЕСМ – Equivalent Circuit Model) — представляють комірку як електричне коло з резисторами, конденсаторами та джерелами напруги. Забезпечують хороший компроміс між точністю та обчислювальною ефективністю, тому є стандартом для бортових BMS.

3. Електрохімічні (біла скринька) – засновані на рівняннях переносу заряду та маси в електродах та електроліті (модель Дойла-Фуллера-Ньюмена, P2D). Найбільш точні, але надто складні для реалізації в реальному часі на бортових контролерах. Використовуються для калібрування ЕСМ та високоточного моделювання деградації.

Для цифрового двійника гібридного трактора доцільно застосовувати гібридний підхід: на борту — ЕСМ другого порядку з адаптивною ідентифікацією параметрів, у хмарі — періодичне калібрування за допомогою електрохімічної моделі для оновлення SOH та виявлення ранніх ознак деградації.

Модель еквівалентної схеми (ЕСМ) для оцінювання SOC та напруги

Найбільш поширеною в сучасних BMS є модель еквівалентної схеми другого порядку (2RC ЕСМ), яка враховує омичний опір (швидка реакція) та два паралельних RC-ланцюги для моделювання короткочасної та довгочасної дифузії літію в електродах.

Схема заміщення складається з:

- $V_{oc}(SOC, T)$ – напруга розімкненого кола (функція SOC та температури);
- R_0 – омичний внутрішній опір (сумарний опір електроліту, струмознімачів, контактів);
- R_1, C_1 – RC-ланка, що описує швидкі дифузійні процеси (характерний час $\tau_1 = R_1 C_1 \approx 10 \dots 30$ с);
- R_2, C_2 – RC-ланка для повільних дифузійних процесів ($\tau_2 \approx 100 \dots 300$ с).

					14.17 - КР.015.2.000 ПЗ	Аркуш
						42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Математичний опис у просторі станів:

Рівняння для напруг на конденсаторах U_1 та U_2 :

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\frac{1}{R_1 C_1} U_1 + \frac{1}{C_1} I_L, \\ \dot{U}_2 = -\frac{1}{R_2 C_2} U_2 + \frac{1}{C_2} I_L, \end{cases} \quad (2.1)$$

де I_L — струм навантаження (позитивний при розряді, негативний при заряді).

Напруга на клеммах комірки V_t :

$$V_t = V_{oc}(SOC, T) - U_1 - U_2 - I_L R_0. \quad (2.2)$$

Модель зміни SOC:

$$SOC(t) = SOC(0) - \frac{1}{Q_n} \int_0^t \eta I_L(\tau) d\tau, \quad (2.3)$$

де Q_n — номінальна ємність комірки (А·год), η — кулонівський коефіцієнт ефективності (для літій-іонних комірок $\eta \approx 0.99 \dots 1.00$).

Для реалізації в цифровому двійнику рівняння дискретизуються з кроком Δt (зазвичай 0,1...1 с). Дискретна форма:

$$\begin{aligned} U_1[k+1] &= e^{-\Delta t/\tau_1} U_1[k] + R_1(1-e^{-\Delta t/\tau_1}) I_L[k], \\ U_2[k+1] &= e^{-\Delta t/\tau_2} U_2[k] + R_2(1-e^{-\Delta t/\tau_2}) I_L[k]. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Стан заряду оновлюється:

$$SOC[k+1] = SOC[k] - \frac{\eta \Delta t}{Q_n} I_L[k]. \quad (2.5)$$

Залежність $V_{oc}(SOC, T)$ та параметрів ECM від температури

Напруга розімкненого кола є нелінійною функцією SOC та температури. Для літій-іонних комірок типу NMC (LiNiMnCoO_2 , поширені в електротракторах) типова залежність $V_{oc}(SOC)$ має S-подібну форму з плато в діапазоні 20–80% SOC. Апроксимація здійснюється за допомогою полінома 5–8 ступеня:

$$V_{oc}(SOC) = a_0 + a_1 SOC + a_2 SOC^2 + a_3 SOC^3 + a_4 SOC^4 + a_5 SOC^5.$$

Коефіцієнти a_i визначаються експериментально для кожного типу комірок. Залежність від температури можна врахувати через лінійну поправку:

$$V_{oc}(SOC, T) = V_{oc}(SOC, T_{ref}) + \beta(T - T_{ref}), \quad (2.6)$$

де $\beta \approx -0.3 \dots -0.5$ мВ/°С для NMC-комірок.

Температурна залежність внутрішнього опору описується рівнянням Арреніуса:

$$R(T) = R_{ref} \cdot \exp \left[\frac{E_a}{R_g} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right], \quad (2.7)$$

де R_{ref} — опір при опорній температурі (зазвичай 25°C), E_a — енергія активації (для NMC $E_a \approx 20 \dots 40$ кДж/моль), $R_g = 8.314$ Дж/(моль·К) — універсальна газова стала. Постійні часу τ_1, τ_2 також зменшуються з підвищенням температури.

Електрохімічна модель (P2D) для високоточного моделювання деградації

Для прогнозування залишкового ресурсу (SOH) необхідно враховувати механізми старіння комірок. Найбільш адекватною є псевдо-двовірна модель Дойла-Фуллера-Ньюмена (P2D), яка описує перенесення заряду та маси в трьох доменах: негативний електрод (анод), сепаратор, позитивний електрод (катод).

Основні рівняння P2D включають:

1. Рівняння матеріального балансу для літію в твердій фазі (сферичні частинки активної маси):

$$\frac{\partial c_s}{\partial t} = \frac{D_s}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial c_s}{\partial r} \right), \quad (2.8)$$

де c_s — концентрація літію в твердій фазі, D_s — коефіцієнт дифузії, r — радіальна координата всередині частинки.

2. Рівняння матеріального балансу в рідкій фазі (електроліт):

$$\varepsilon \frac{\partial c_e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_e^{eff} \frac{\partial c_e}{\partial x} \right) + a(1 - t_+^0)j, \quad (2.9)$$

де c_e — концентрація електроліту, ε — пористість, D_e^{eff} — ефективний коефіцієнт дифузії, a — площа поверхні електрода на одиницю об'єму, t_+^0 — число переносу катіонів, j — густина струму реакції.

3. Кінетичне рівняння Батлера-Фольмера для густини струму реакції:

$$j = ai_0 \left[\exp \left(\frac{\alpha_a F \eta}{R_g T} \right) - \exp \left(- \frac{\alpha_c F \eta}{R_g T} \right) \right], \quad (2.10)$$

де i_0 — густина струму обміну, α_a, α_c — коефіцієнти переносу, $F = 96485$ Кл/моль — стала Фарадея, η — перенапруження.

4. Електричний баланс в твердій фазі (рівняння Пуассона для потенціалу):

$$\nabla \cdot (\sigma^{eff} \nabla \phi_s) = aj,$$

$$\nabla \cdot (\kappa^{eff} \nabla \phi_e) + \nabla \cdot (\kappa_D^{eff} \nabla \ln c_e) = -aj,$$

Де σ^{eff} — ефективна електропровідність твердої фази, ϕ_s та ϕ_e — потенціали твердої та рідкої фаз, κ^{eff} — іонна провідність електроліту, κ_D^{eff} — коефіцієнт дифузійної провідності.

P2D модель має високу точність, але потребує розв'язання системи диференціальних рівнянь у частинних похідних. Для бортового застосування використовують спрощені моделі (single particle model, SP) або редукцію порядку (ROM). У цифровому двійнику P2D запускається в хмарі періодично (наприклад, раз на добу) для корекції параметрів ECM та оцінки SOH.

Теплова модель комірки та системи термоменеджменту

Температура суттєво впливає на характеристики, безпеку та термін служби батареї. Теплова модель базується на рівнянні теплового балансу комірки:

$$mC_p \frac{dT}{dt} = \dot{Q}_{gen} - \dot{Q}_{diss}, \quad (2.11)$$

де m — маса комірки (кг), C_p — питома теплоємність (для NMC-комірок $\approx 800 \dots 1000$ Дж/(кг·K)), $\dot{Q}_{gen}$ — потужність внутрішніх джерел тепла (Дж/с), $\dot{Q}_{diss}$ — потужність тепловідведення (від'ємна, якщо тепло відводиться).

Джерела тепловиділення:

1. Омічне тепло (необоротне, виділяється на внутрішньому опорі):

$$\dot{Q}_{ohmic} = I_L^2 R_0. \quad (2.12)$$

2. Поляризаційне тепло (оборотне, пов'язане з ентропійними ефектами):

$$\dot{Q}_{rev} = I_L T \frac{\partial V_{oc}}{\partial T}, \quad (2.13)$$

					14.17 - КР.015.2.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

де $\partial V_{oc} / \partial T$ – температурний коефіцієнт напруги (для NMC $\approx -0.3 \dots -0.5$ мВ/К). Оборотно тепло може бути як позитивним (нагрів), так і негативним (охолодження) залежно від напрямку струму та знаку коефіцієнта.

3. Тепло від реакцій деградації (при старінні, особливо під час роботи при екстремальних температурах) — зазвичай нехтують у стандартних умовах.

Сумарна генерована потужність:

$$\dot{Q}_{gen} = I_L(V_{oc} - V_t) - I_L T \frac{\partial V_{oc}}{\partial T} \approx I_L^2 R_0 + I_L U_1 + I_L U_2 + I_L T \left| \frac{\partial V_{oc}}{\partial T} \right| \quad (\text{при розряді}).$$

Тепловідведення залежить від конструкції батарейного модуля та системи охолодження. Найпростіша модель — конвективний теплообмін:

$$\dot{Q}_{diss} = hA(T - T_{amb}), \quad (2.14)$$

де h — коефіцієнт тепловіддачі (Вт/(м²·К)), A — площа поверхні комірки (м²), T_{amb} — температура навколишнього середовища або охолоджувальної рідини. Для рідинного охолодження (яке використовується в сучасних електротракторах, наприклад, Fendt e100 Vario) модель ускладнюється рівняннями теплообміну з рідиною.

Повне рівняння теплового балансу:

$$mC_p \frac{dT}{dt} = I_L^2 R_0(T) + I_L U_1 + I_L U_2 + I_L T \frac{\partial V_{oc}}{\partial T} - hA(T - T_{amb}).$$

Температурна залежність опору $R_0(T)$ описується рівнянням Арреніуса.

Модель деградації та прогнозування залишкового ресурсу (SOH)

Стан здоров'я батареї (SOH) визначається як відношення поточної ємності до номінальної:

$$SOH = \frac{Q_{current}}{Q_{nom}} \cdot 100\%. \quad (2.15)$$

Зазвичай вважається, що батарея досягла кінця терміну служби при SOH = 70...80%. Основні механізми деградації:

- Ріст твердого електролітного шару (SEI) на аноді — призводить до втрати активного літію та збільшення опору.
- Тріщиноутворення в частинках активної маси через механічне розширення/стискання під час циклування.

– Виділення кисню та розкладання електроліту при високих температурах ($> 45 \dots 50^\circ\text{C}$).

– Накопичення літію на аноді (літіювання) при надмірному заряджанні.

Емпірична модель деградації, придатна для цифрового двійника, базується на лінійній комбінації циклічного та календарного старіння:

$$Q_{loss} = Q_{loss,cycle} + Q_{loss,cal}, \quad (2.16)$$

де:

$$Q_{loss,cycle} = k_{cycle} \cdot (1 + f_{rate}) \cdot N^\alpha, \quad (2.17)$$

$$Q_{loss,cal} = k_{cal} \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{R_g T}\right) \cdot t^\beta. \quad (2.18)$$

Тут N — кількість повних циклів, t — час календарного старіння (місяці/роки), $\alpha, \beta \approx 0.5 \dots 0.7$, k_{cycle} та k_{cal} — коефіцієнти, що визначаються експериментально. Функція f_{rate} враховує вплив струму заряду/розряду (вищі струми прискорюють старіння).

Для прогнозування залишкового ресурсу (RUL — Remaining Useful Life) в цифровому двійнику застосовуються фільтри частинок (Particle Filters) або LSTM-нейромережі, які навчаються на історичних даних деградації.

Ідентифікація параметрів моделі в реальному часі

Для того, щоб цифровий двійник відповідав реальному стану батареї, параметри ЕСМ (R_0, R_1, C_1, R_2, C_2) та теплової моделі необхідно оновлювати в процесі експлуатації. Найбільш поширеним методом є рекурсивний метод найменших квадратів зі зважуванням (RLS — Recursive Least Squares) з коефіцієнтом забування $\lambda \approx 0.95 \dots 0.99$.

Алгоритм RLS для оцінки параметрів ЕСМ (на прикладі омичного опору R_0 та поляризаційних опорів):

1. Формується вектор регресорів $\phi[k]$ на основі виміряних $V_t[k], I_L[k]$ та попередніх оцінок.

2. Оновлюється коефіцієнт підсилення $K[k]$.

3. Оновлюється вектор параметрів

$$\hat{\theta}[k] = \hat{\theta}[k-1] + K[k](y[k] - \phi^T[k]\hat{\theta}[k-1]).$$

					14.17 - КР.015.2.000 ПЗ	Аркуш
						47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. Оновлюється коваріаційна матриця $P[k]$.

Альтернативою є розширений фільтр Калмана (EKF), який одночасно оцінює SOC та параметри моделі (dual EKF). EKF краще працює за наявності шумів вимірювань, але потребує більше обчислювальних ресурсів.

Створення гібридної моделі для цифрового двійника батареї

На основі описаних компонентів формується гібридна модель цифрового двійника ВВБ гібридного трактора, що складається з трьох рівнів:

Рівень 1 (бортовий, реальний час) – ЕСМ другого порядку з RLS-ідентифікацією параметрів та EKF для оцінювання SOC. Крок дискретизації 0,1...1 с. Реалізується в BMS на мікроконтролері.

Рівень 2 (бортовий або edge, періодичний) – спрощена теплова модель комірки та модуля з урахуванням системи охолодження. Оцінюється температура всередині батареї. Крок 1...10 с.

Рівень 3 (хмарний, періодичний) – електрохімічна P2D модель для калібрування параметрів ЕСМ, оцінки SOH та прогнозування RUL. Запускається раз на добу або при зміні умов експлуатації.

Обмін даними між рівнями:

- З рівня 1 в рівень 2 та 3 передаються: $I_L, V_t, SOC, T_{measured}$.
- З рівня 3 в рівень 1 передаються скориговані параметри ЕСМ (R_0, R_1, R_2, C_1, C_2) та оновлений SOH.

Верифікація моделі на основі експериментальних даних

Для підтвердження адекватності запропонованої моделі проводяться експерименти з реальними літій-іонними комірками (наприклад, типова комірка формату 21700 ємністю 5 А·год, NMC-катод). Стандартні тести включають:

- Тест імпульсним струмом для ідентифікації параметрів ЕСМ.
- Тест розряду постійним струмом (CC) при різних температурах (-10°C, 0°C, 25°C, 45°C) для визначення залежності ємності та опору від температури.
- Тест змішаного циклу (DST — Dynamic Stress Test) для верифікації точності моделі в реальних умовах навантаження трактора.

					14.17 - КР.015.2.000 ПЗ	Аркуш
						48
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Тест термічного розгону (thermal runaway) для перевірки теплової моделі (з дотриманням заходів безпеки).

Критерії якості моделі:

- Середньоквадратична похибка (RMSE) напруги комірки: ≤ 30 мВ;
- Максимальна абсолютна похибка напруги: ≤ 100 мВ;
- Похибка оцінки SOC: $\leq 3\%$;
- Похибка оцінки температури поверхні комірки: $\leq 1,5^{\circ}\text{C}$.

2.2 Математичний опис електромеханічних процесів у тяговому електродвигуні змінного струму

Тягові електродвигуни змінного струму є ключовими перетворювачами електричної енергії в механічну в гібридних та електричних тракторах. Сучасні сільськогосподарські машини (Fendt e100 Vario, John Deere E-Power, Tadis T16.20) використовують переважно синхронні двигуни з постійними магнітами (PMSM – Permanent Magnet Synchronous Motor) завдяки їх високій питомій потужності, компактності, високому ККД (до 96–98%) та можливості точного регулювання моменту в широкому діапазоні швидкостей. У деяких випадках (наприклад, у тракторах великої потужності) застосовуються асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором (ІМ) через їхню простоту, низьку вартість та кращу перевантажувальну здатність, однак PMS стають домінуючими.

Для створення цифрового двійника (Digital Twin) тягового приводу необхідна математична модель двигуна, яка дозволяє в реальному часі оцінювати момент, швидкість, потужність, втрати та температуру. У цьому підрозділі наведено повний опис моделі PMSM в обертовій системі координат dq, яка є стандартом для систем керування з векторним керуванням (FOC – Field Oriented Control).

					14.17 - КР.015.2.000 ПЗ	Аркуш
						49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Модель PMSM в системі координат dq

Перехід від трифазної системи змінних (a, b, c) до обертової системи координат dq (орієнтованої вздовж осі постійних магнітів ротора) дозволяє звести диференціальні рівняння зі змінними коефіцієнтами до рівнянь із постійними коефіцієнтами, що значно спрощує аналіз та синтез систем керування.

Рівняння електромагнітного моменту:

$$T_e = \frac{3}{2} p_p (\psi_{PM} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q). \quad (2.19)$$

Для неявнополюсного PMSM ($L_d \approx L_q$) момент спрощується:

$$T_e = \frac{3}{2} p_p \psi_{PM} i_q. \quad (2.20)$$

Рівняння механічної динаміки (зв'язок з навантаженням):

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_L - B\omega_m,$$

де: J – сумарний момент інерції двигуна та навантаження (включаючи трансмісію та колеса), $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; T_L – момент опору навантаження (залежить від операції – оранка, транспортування, тощо), $\text{Н} \cdot \text{м}$; B – коефіцієнт в'язкого тертя (зазвичай малий, можна нехтувати), $\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с/рад}$.

Електрична потужність (вхід з інвертора):

$$P_{el} = \frac{3}{2} (u_d i_d + u_q i_q). \quad (2.21)$$

Механічна потужність на валу:

$$P_{mech} = T_e \omega_m. \quad (2.22)$$

ККД двигуна в сталому режимі:

$$\eta_{motor} = \frac{P_{mech}}{P_{el}} = \frac{T_e \omega_m}{\frac{3}{2} (u_d i_d + u_q i_q)}. \quad (2.23)$$

Модель інвертора та обмеження напруги

Трифазний інвертор живиться від проміжної ланки постійного струму (високовольтної батареї через DC-DC перетворювач). Максимальна фазна напруга обмежена напругою ланки V_{DC} .

При синусоїдальній ШІМ максимальне діюче значення фазної напруги (без перенапруги модуляції):

$$U_{ph,max} = \frac{V_{DC}}{\sqrt{6}} \approx 0.408V_{DC}. \quad (2.24)$$

У системі dq амплітуда вектора напруги:

$$u_s = \sqrt{u_d^2 + u_q^2} \leq U_{max}, \quad (2.25)$$

де $U_{max} = V_{DC}/\sqrt{3}$ для ШІМ з третинною гармонікою (просторово-векторна модуляція, SVPWM) – це дозволяє збільшити використання напруги на ~15% порівняно з синусоїдальною ШІМ.

Для SVPWM:

$$U_{max} = \frac{V_{DC}}{\sqrt{3}} \approx 0.577V_{DC}. \quad (2.26)$$

Обмеження за струмом визначається максимальним струмом, який може забезпечити інвертор та батарея (зазвичай $I_{max} = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \leq I_{rated}$).

Модель втрат та ККД системи «двигун-інвертор»

Сумарні втрати в системі приводу включають втрати в двигуні ($P_{cu}, P_{iron}, P_{mech}$) та втрати в інверторі (P_{inv}). Останні складаються з:

- Провідних втрат в IGBT та діодах (залежать від струму).
- Втрат перемикання (залежать від частоти ШІМ та напруги).
- Втрат в конденсаторах та допоміжних ланцюгах.

Спрощена модель ККД інвертора:

$$\eta_{inv} = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss,inv}} \approx \eta_{inv,nom} - k_{inv} \left(\frac{I_{rms}}{I_{nom}} \right)^2, \quad (2.27)$$

або через еквівалентний опір втрат.

ККД всього електроприводу:

$$\eta_{drive} = \frac{T_e \omega_m}{\frac{3}{2}(u_d i_d + u_q i_q) \cdot \frac{1}{\eta_{inv}}}. \quad (2.28)$$

Типові значення максимального ККД для PMSM з інвертором – 92...95% (у всьому робочому діапазоні 85...92%).

Інтеграція моделі двигуна в цифровий двійник гібридного трактора

Модель двигуна є одним з ключових компонентів цифрового двійника силового приводу. Вона взаємодіє з:

- Моделлю батареї (отримує обмеження за струмом та потужністю).
- Моделлю інвертора (отримує напругу, обмеження за струмом, обчислює втрати).
- Моделлю трансмісії та навантаження (колеса, операційна швидкість, момент опору ґрунту).
- Системою керування (FOC) – надає задані i_d, i_q або u_d, u_q .
- Системою діагностики – оцінює температуру, ККД, прогнозує залишковий ресурс ізоляції обмоток (на основі моделі теплового старіння).

У хмарній частині цифрового двійника може виконуватися оптимізація параметрів моделі (наприклад, калібрування ψ_{PM} за даними тривалої експлуатації).

2.3 Інформаційна взаємодія технічних систем гібридного трактора через інтерфейс CAN-шини

Сучасний гібридний трактор являє собою складну розподілену систему, в якій десятки електронних блоків керування (ECU) повинні безперервно обмінюватися даними в реальному часі. До таких блоків належать: система керування двигуном (ECM), система керування батареєю (BMS), інвертор тягового електродвигуна, система керування трансмісією (TCM), гідравлічна система, система керування начїпним обладнанням, панель приладів, телематичний шлюз та інші (рисунок 2.1).

SAE J1939 є домінуючим високорівневим протоколом для важкої колісної техніки (вантажівки, автобуси, будівельна техніка), а також є основою для спеціалізованих адаптацій, зокрема ISOBUS (ISO 11783) для сільськогосподарської техніки. Протокол визначає, як саме ECUs спілкуються

					14.17 - КР.015.2.000 ПЗ	Аркуш
						52
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

між собою через CAN-шину, забезпечуючи стандартизовану «мову спілкування» для пристроїв різних виробників.



Рисунок 2.1 – Інформаційна взаємодія технічних систем гібридного трактора

J1939 будується на основі CAN-фізичного та каналного рівнів, використовуючи розширені 29-бітні ідентифікатори CAN та фіксовану швидкість передачі 250 кбіт/с (хоча стандарт J1939-14 дозволяє 500 кбіт/с). Він додає стандартизовану структуру 29-бітного CAN ID з пріоритетом, адресацією та ідентифікацією групи параметрів, набір визначених груп параметрів (PGN) та параметрів (SPN), транспортні протоколи для повідомлень більше 8 байт, мережеве управління (address claiming) та діагностичні повідомлення.

SAE J1939 є сімейством стандартів, що охоплює різні аспекти комунікації: фізичний рівень, рівень каналу передачі даних, мережевий рівень та прикладний рівень. Відповідно до моделі OSI, вони розподіляються наступним чином:

- J1939-11: фізичний рівень (250 кбіт/с, екранована кручена пара, 9-контактний роз'єм Deutsch).
- J1939-21: рівень каналу передачі даних — визначає транспортні протоколи та управління мережею.

- J1939-31: мережевий рівень — визначає протоколи для міжмережових з'єднань.
- J1939-71: прикладний рівень (додатки) — визначає SPN та PGN для транспортних засобів.
- J1939-73: прикладний рівень (діагностика) — визначає діагностичні повідомлення (DM1, DM2 тощо).
- J1939-81: управління мережею — процедура Address Claiming, призначення адрес, NAME ECU.

Розуміння архітектури та принципів роботи SAE J1939 є необхідною умовою для інтеграції системи діагностики та цифрового двійника гібридного трактора в єдиний інформаційний простір. В даному підрозділі розглядаються основні поняття протоколу, ключові PGN для гібридної силової установки, діагностичний фреймворк J1939-73, методи адресації та управління мережею, протокол обміну великими обсягами даних, а також питання безпеки та захисту інформації в CAN-мережі.

2.4 Алгоритми ідентифікації параметрів цифрового двійника для запобігання розстроювання діагностичних критеріїв в умовах нестационарних навантажень

Гібридні трактори функціонують в умовах високої нестационарності навантажень – різкі зміни тягового зусилля під час глибинної оранки, циклічні навантаження при транспортуванні, періодичні переходи між режимами польової роботи та холостого ходу. Ці фактори призводять до зміни параметрів електромеханічних систем у процесі експлуатації: опір обмоток статора змінюється під впливом температури (до 30–40% відносно номіналу), потокозчеплення постійних магнітів може зменшуватися через теплове розмагнічування, ємність високовольтної батареї деградує з часом, а параметри трансмісії варіюються залежно від типу та стану ґрунту.

					14.17 - КР.015.2.000 ПЗ	Аркуш
						54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ключовою проблемою при створенні цифрового двійника (Digital Twin) є дрейф параметрів моделі в часі – поступове відхилення калібрувальних характеристик діагностичної системи від реальних фізичних значень. Це призводить до розстроювання діагностичних критеріїв: помилкових спрацьовувань системи безпеки, некоректної оцінки залишкового ресурсу, зниження точності прогнозування відмов.

Дрейф параметрів безперервно погіршує точність моделі цифрового двійника. Якщо не оновлювати параметри моделі, похибка оцінювання стану може зрости до неприпустимих значень (наприклад, похибка SOC > 10%), що робить діагностичні критерії ненадійними.

Адаптивна ідентифікація параметрів електродвигуна

Рекурсивний метод найменших квадратів зі змінним коефіцієнтом забування (VFF-RLS)

Класичний рекурсивний метод найменших квадратів (RLS) з постійним коефіцієнтом забування (FF-RLS) є найпоширенішим підходом для ідентифікації параметрів PMSM в реальному часі. Перевага RLS полягає в його здатності відстежувати повільно змінні параметри, одночасно згладжуючи шуми вимірювань.

Базове рівняння FF-RLS (розглядається для оцінки статормого опору R_s) має наступний вигляд:

$$\hat{\theta}[k] = \hat{\theta}[k-1] + \frac{P[k-1]\phi[k]}{\lambda + \phi^T[k]P[k-1]\phi[k]} (y[k] - \phi^T[k]\hat{\theta}[k-1]), \quad (2.29)$$

де $\hat{\theta}$ – оцінюваний параметр, ϕ – вектор регресора, λ – коефіцієнт забування ($0 < \lambda \leq 1$), P – коваріаційна матриця.

Однак традиційний RLS з фіксованим λ страждає від так званого ефекту «насичення даних» (data saturation) – при λ близькому до 1 алгоритм повільно реагує на зміни параметрів, а при малому λ стає чутливим до шумів, що призводить до низької точності та поганої стійкості до завад.

Для подолання цієї проблеми запропоновано алгоритм RLS зі змінним коефіцієнтом забування (VFF-RLS), де λ змінюється в залежності від похибки передбачення та умов експлуатації:

$$\lambda[k] = 1 - \alpha \cdot \sigma \cdot e^2[k], \quad (2.30)$$

де $e[k]$ – похибка передбачення, α – коефіцієнт налаштування, σ – масштабуючий коефіцієнт. При великій похибці λ зменшується, що прискорює адаптацію; при малій похибці λ наближається до 1, забезпечуючи згладжування шумів. Такий підхід дозволяє усунути «насичення даних» та вплив шумів, підвищити точність ідентифікації параметрів та стійкість до збурень навантаження.

Алгоритм ідентифікації параметрів PMSM на основі рекурсивного методу найменших квадратів зі змінним коефіцієнтом забування

Для практичної реалізації в бортовому контролері гібридного трактора розроблено процедуру ідентифікації ключових параметрів PMSM на основі моделі двигуна в системі координат dq.

Рівняння напруги статора мають вигляд:

$$u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q, u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e (L_d i_d + \psi_{PM}). \quad (2.31)$$

У дискретній формі (з кроком T_s) для оцінювання R_s, L_d, L_q, ψ_{PM} формується наступна система:

$$y_d[k] = u_d[k] - \omega_e[k] L_q i_q[k] = R_s i_d[k] + L_d \frac{i_d[k] - i_d[k-1]}{T_s},$$

$$y_q[k] = u_q[k] - \omega_e[k] L_d i_d[k] = R_s i_q[k] + L_q \frac{i_q[k] - i_q[k-1]}{T_s} + \omega_e[k] \psi_{PM}.$$

Динаміка системи описується рівнянням механічної рівноваги. Після лінеаризації EKF оцінює параметри, оновлюючи їх з кожним кроком. Використання багатопарових нелінійних EKF (Multi-layer Nonlinear EKF) покращує точність оцінювання стану та прискорює онлайн-ідентифікацію порівняно з класичними методами.

					14.17 - КР.015.2.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

Адаптивна ідентифікація параметрів високовольтної батареї

Модель еквівалентної схеми (ЕСМ) та параметри для ідентифікації

Для ідентифікації параметрів літій-іонної батареї використовується модель еквівалентної схеми другого порядку. Ключовими параметрами, що підлягають оцінці, є:

$$\theta_{bat} = [R_0, R_1, C_1, R_2, C_2]^T. \quad (2.32)$$

Варіація температури від -10°C до $+45^{\circ}\text{C}$ суттєво впливає на ці параметри, особливо на R_0 (може зростати в 2–3 рази при низьких температурах).

Для ідентифікації параметрів батареї в широкому температурному діапазоні також застосовуються інтелектуальні методи, такі як метод рою котів з подвійною фільтрацією Калмана (CSO-DKF), що забезпечує стійкість оцінювання SOC на рівні похибки $\text{SOC} \leq 3\%$.

Адаптивна ідентифікація параметрів навантаження та умов експлуатації

Сільськогосподарські трактори працюють в умовах, де параметри навантаження змінюються непередбачувано. Для гібридного трактора точне оцінювання моменту навантаження T_L та моменту інерції J є вирішальним.

Компенсація дрейфу датчиків та діагностика несправностей

Дрейф параметрів може бути спричинений як змінами фізичних властивостей об'єкта, так і несправностями датчиків (дрейф нуля, масштабування тощо).

Інтеграція алгоритмів у цифровий двійник: архітектура управління дрейфом (рисунк 2.2)

Для системного вирішення проблеми дрейфу параметрів розроблено архітектуру управління дрейфом (Drift Management Architecture, DMA) в межах цифрового двійника.



Рисунок 2.2 – Багаторівнева архітектура DMA

Усі моделі об'єднані в єдину структуру, яка може працювати як на бортовому контролері (швидкі розрахунки в реальному часі), так і в хмарі (глибокий аналіз, довгострокове прогнозування). Це створює основу для повноцінного цифрового двійника гібридного трактора, здатного підвищити надійність, зменшити витрати на обслуговування та продовжити ресурс техніки.

Висновки

У другому розділі роботи створено математичну основу для цифрових двійників основних компонентів гібридного трактора — високовольної батареї, тягового електродвигуна та системи обміну даними між електронними блоками. Основні результати такі:

1. Розроблено модель акумуляторної батареї, яка поєднує просту електричну схему для роботи в реальному часі (оцінка заряду та напруги) і складну електрохімічну модель для точного розрахунку старіння (стан здоров'я батареї). Це дозволяє контролювати залишкову ємність, прогнозувати ресурс і вчасно попереджати про необхідність технічного обслуговування.

2. Створено модель тягового електродвигуна (синхронного з постійними магнітами), яка описує його роботу в усіх режимах — від низьких швидкостей (з повним моментом) до високих (з ослабленням поля). Модель враховує втрати енергії (на нагрівання обмоток, у сталі) та дозволяє оцінювати температуру двигуна, що важливо для запобігання перегріву.

3. Досліджено інформаційний обмін між системами трактора через CAN-шину за стандартом SAE J1939. Визначено, які саме повідомлення (PGN) передають критичні параметри: заряд батареї, струм, напругу, температуру, а також команди керування моментом двигуна. Це дозволяє всім електронним блокам (BMS, інвертор, двигун) працювати узгоджено.

4. Розроблено алгоритми, які автоматично підлаштовують модель під змінювані умови (температура, зношування батареї, навантаження). Вони використовують адаптивні методи, що дозволяють цифровому двійнику «вчитися» на реальних даних і не втрачати точність з часом. Це вирішує проблему дрейфу параметрів — коли через старіння або зміну середовища початкові налаштування стають некоректними.

					14.17 - КР.015.2.000 ПЗ	Аркуш
						59
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3

ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ БОРТОВОЇ ДІАГНОСТИКИ ТА ІНЖЕНЕРНІ РОЗРАХУНКИ

3.1 Розробка структурної та функціональної схем діагностичного комплексу на базі мікроконтролера з CAN-інтерфейсом

Архітектура діагностичного комплексу гібридного трактора

Сучасний діагностичний комплекс для гібридного трактора повинен забезпечувати безперервний моніторинг ключових параметрів високовольтної акумуляторної батареї (ВВБ), електродвигуна, інвертора та допоміжних систем (рисунок 3.1). На основі проведеного в розділах 1 та 2 аналізу, запропоновано архітектуру бортової діагностичної системи, що реалізує замкнений цикл «вимірювання → обробка → діагностика → керування» з інтеграцією в CAN-мережу за стандартом ISO 11783 (ISOBUS) (рисунок 3.1).



Рисунок 3.1 – Структурна та функціональна схема діагностичного комплексу на базі мікроконтролера

					14.17 - КР.015.3.000 ПЗ		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 3		
Розроб.	Бабенко С.І.						
Перевір.	Дядюра К.О.						
Реценз.							
Н. Контр.							
Затверд.	Дядюра К. О.				Літ.	Аркуш	Аркушів
						60	20

Фундаментальною вимогою до BMS є функційна безпека, регламентована міжнародним стандартом ISO 26262. Згідно з цим стандартом, система повинна відповідати певному рівню безпеки ASIL (Automotive Safety Integrity Level), який визначається на основі аналізу небезпек. Для тягових батарей гібридних тракторів, де ризик термічного розгону або короткого замикання є значним, зазвичай вимагається рівень ASIL C або D — найвищі рівні безпеки. Це означає, що апаратне та програмне забезпечення BMS повинно бути розроблене з використанням методів верифікації, резервування та самодіагностики.

Розроблений діагностичний комплекс базується на архітектурі, що поєднує три функціональні рівні:

- Рівень збору даних – аналогові та цифрові датчики струму, напруги, температури.
- Рівень обробки та діагностики – мікроконтролерний модуль з програмною реалізацією алгоритмів оцінки SOC/SOH та фільтрації.
- Рівень комунікації – CAN-трансівер з підтримкою протоколів ISOBUS та діагностичних повідомлень.

CAN-шина (Controller Area Network) є стандартом промислової комунікації для автомобільної та сільськогосподарської техніки завдяки своїй надійності, стійкості до завад та здатності працювати в реальному часі. Архітектура на основі CAN-шини в електричних транспортних засобах дозволяє забезпечити неперервний обмін експлуатаційними даними, включаючи стан заряду (SoC), напругу, температуру, струм та умови несправностей, між акумулятором і системним контролером. Центральні контролери можуть динамічно регулювати подачу енергії, керувати розподілом навантаження між паралельними батарейними модулями та реагувати на перехідні умови, такі як пікові струми або теплові навантаження.

Запропонована архітектура діагностичного комплексу базується на головному принципі: кожен елемент системи — незалежний, але пов'язаний через CAN-магістраль. Основою комплексу є центральний діагностичний контролер (ЦДК) на базі 32-розрядного мікроконтролера STM32F407 з ядром

					14.17 - КР.015.3.000 ПЗ	Аркуш
						61
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ARM Cortex-M4 (168 МГц, FPU). Даний контролер інтегрує в собі функції збору, попередньої обробки та передачі даних, а також реалізує алгоритми оцінки технічного стану.

Слід зазначити, що BMS може бути реалізована за допомогою стандартних схемотехнічних рішень. Зокрема, поширеним підходом є поєднання високопродуктивного мікроконтролера зі спеціалізованими моніторами акумуляторів для досягнення високої точності вимірювань та надійної комунікації. Широке застосування знайшли рішення, засновані на STM32F407 та спеціалізованих чіпах моніторингу літій-іонних акумуляторів, таких як BQ76PL536.

Таке поєднання забезпечує високоточне вимірювання напруги окремих елементів з точністю до ± 1 мВ, вимірювання температури з похибкою $\pm 1^\circ\text{C}$ та роботу з різними типами акумуляторів завдяки широкому діапазону вхідної напруги. Мікроконтролер виконує роль центрального процесора, який через SPI-інтерфейс опитує регістри стану модулів моніторингу, зчитує напруги та температури, а потім на їх основі обчислює SOC та SOH.

Структурна схема діагностичного комплексу

Структурна схема діагностичного комплексу (рисунк 3.1) відображає зв'язки між функціональними блоками та потоки інформації.

Основні функціональні блоки:

1. Блок сенсорів та підсилювачів (AFE – Analog Front End) – забезпечує гальванічну розв'язку, попереднє підсилення та фільтрацію вимірювальних сигналів. Включає:

- Датчики струму (шунти з ізольованим підсилювачем або датчики Холла для струмів до 500 А з точністю $\pm 0,5\%$);
- Дільники напруги (резистивні дільники з високоомним входом для вимірювання напруги кожної комірки та загальної напруги батареї);
- Термодатчики (NTC-термістори або цифрові датчики DS18B20, встановлені в критичних точках батарейного модуля).

					14.17 - КР.015.3.000 ПЗ	Аркуш
						62
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. Модуль аналого-цифрового перетворення (АЦП) — інтегрований у мікроконтролер STM32F407 (3×12-розрядних АЦП з частотою дискретизації до 2,4 МГц).

3. Центральний мікроконтролер (ЦМК) STM32F407VGT6 реалізує:

- Алгоритми фільтрації вимірюваних сигналів (згладжування, медіанна фільтрація);
- Розширений фільтр Калмана (EKF) та адаптивний розширений фільтр Калмана (AEKF) для оцінки SOC;
- Модель еквівалентної схеми для оцінки SOH з використанням методу найменших квадратів (RLS);
- Алгоритми діагностики несправностей (виявлення перевищення порогів, перевірка ізоляції);
- Керування пасивним балансуванням комірок (через ШІМ-сигнали або дискретні виходи);
- Комунікацію з верхнім рівнем через два CAN-інтерфейси (один для внутрішньої BMS-мережі, другий — для зовнішньої шини трактора).

4. Модуль вводу/виводу — забезпечує:

- Керування балансуванням: ШІМ-сигнали для керування зовнішніми MOSFET-ключами пасивних баластних резисторів (струм балансування до 100–300 мА на комірку).
- Аварійне відключення: гальванічно ізольований вихід «FAULT» для розмикання головного контактора (пускового пристрою) при виявленні критичних несправностей (час реакції ≤ 10 мкс).
- Сигналізація: світлодіодна індикація стану (норма, попередження, несправність, сплячий режим).

5. Модуль комунікації (CAN-трансівер) – містить два незалежних CAN-трансівери SN65HVD230 з гальванічною розв'язкою (ADUM1201), що забезпечують фізичний рівень для CAN-шини.

					14.17 - КР.015.3.000 ПЗ	Аркуш
						63
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6. Перший інтерфейс (CAN1) використовується для внутрішньої мережі BMS (зв'язок з модулями моніторингу комірок, контролером зарядного пристрою та системою термоменеджменту). Другий інтерфейс (CAN2) підключається до головної шини ISOBUS трактора, передаючи на неї узагальнені діагностичні дані (SOC, SOH, температуру, попередження, код несправності). Такий підхід дозволяє зменшити навантаження на зовнішню шину, агрегуючи дані всередині BMS, та відокремлює критичні діагностичні повідомлення від загального потоку.

7. *Модуль живлення* — перетворювач бортової напруги 12 В/24 В у стабілізовані напруги 5 В (цифрові ланцюги) та 3,3 В (ядро мікроконтролера) з використанням імпульсних стабілізаторів (LM2596, TPS5430). Для живлення аналогових ланцюгів передбачено додатковий фільтр низьких частот (LC-ланка: дросель 100 мкГн, конденсатор 1000 мкФ) для придушення високочастотних завад від DC-DC перетворювача та бортової мережі.

8. *Блок зберігання даних (логгер)* — мікросхема флеш-пам'яті об'ємом 8 ГБ (через SPI-інтерфейс) для зберігання журналу параметрів: напруги всіх комірок, струму, температури, SOC, SOH, подій (тривоги, переходи в режими захисту). Дані зберігаються з кроком 1 хвилина (можливість змінити крок залежно від умов експлуатації). Це дозволяє проводити аналіз історії роботи батареї, діагностувати причини передчасного старіння та формувати звіти для технічного обслуговування.

Основні функціональні блоки (рисунок 3.2):

1. *Модуль попередньої обробки даних* — включає цифрову фільтрацію (згладжування) та виявлення викидів:

– Змінна вимірювань (струм, напруга, температура) дискретизується з частотою 100 Гц (STM32 дозволяє до 2,4 МГц, однак для енергоефективності та зменшення завантаженості використовується знижена частота для сигналів, що повільно змінюються).

– Для фільтрації використовується ковзне середнє за 10–50 вибірок (стійке до імпульсних завад та згладжує випадкові похибки).

					14.17 - КР.015.3.000 ПЗ	Аркуш
						64
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– Алгоритм виявлення викидів за критерієм 3σ — перевірка, чи перевищує миттєва різниця між поточним та середнім значенням три стандартних відхилення; якщо так, то значення відбраковується, а підозрілий датчик позначається як «тривога» в журналі діагностики.



Рисунок 3.2 – Основні функціональні блоки

2. *Модуль оцінювання SOC (State of Charge)* — програмна реалізація гібридного методу, що поєднує кулонометрію (Coulomb Counting) з корекцією за напругою розімкнутого кола (OCV) та адаптивний розширений фільтр Калмана (АЕКФ) для виправлення похибок.

3. *Модуль оцінювання SOH (State of Health)* — визначає ступінь деградації батареї шляхом порівняння поточної максимальної ємності (або наявної ємності) з номінальною ($SOH = Q_{\text{current}} / Q_{\text{nom}} \times 100\%$). Використовує наступні підходи:

– Метод різниці напруг — під час повних циклів заряду/розряду фіксуються точки переходу напруги на конкретних рівнях SOC, ємність обчислюється як інтеграл струму між цими точками.

– Аналіз внутрішнього опору — використовується модель еквівалентної схеми, параметри якої (R_0, R_1, R_2, C_1, C_2) оцінюються за допомогою рекурсивного методу найменших квадратів (RLS) або фільтра Калмана. На

основі співвідношення поточного та початкового внутрішнього опору обчислюється SOH.

4. *Модуль діагностики несправностей* — реалізує наступні функції виявлення несправностей і небезпечних умов:

– Моніторинг ізоляції: вимірює опір ізоляції між високовольтною шиною (+/-) та шасі; падіння нижче 500 Ом/В викликає попередження, нижче 100 Ом/В — аварійне вимкнення.

– Перевірка балансу комірок: перевіряє, чи різниця напруги між комірками не перевищує 30–50 мВ; якщо так, активується пасивне балансування.

– Виявлення перегріву: кожен термодатчик контролюється окремо; температура вище 55°C генерує попередження та зниження потужності; вище 65°C — аварійне вимкнення.

– Виявлення перевантаження струмом: миттєвий струм $I > I_{\text{peak}}$ (500 А) фіксується за допомогою швидкого компаратора, що запускає апаратне відключення (час реакції < 10 мкс).

– Діагностика кола зарядки: перевіряє, чи зарядний пристрій підключений, чи напруга/струм зарядки знаходяться в допустимих межах, чи є коротке замикання.

5. *Модуль керування комунікацією (CAN-стек)* — відповідає за формування та передачу діагностичних повідомлень у форматі, сумісному з ISOBUS:

– PGN (Parameter Group Numbers): визначаються власні номери PGN для SOC (0xFE10, 2 байти, масштаб 0,1%), SOH (0xFE11, 1 байт, 0,5%), температури (0xFE12, 2 байти, 0,1°C) та коду несправності (0xFE13, 4 байти згідно зі стандартом J1939).

– Повідомлення DM1 (Diagnostic Message 1): відповідно до ISO 11783-12 (діагностика) повідомлення про активну несправність (лампа, миготливе світло, звуковий сигнал) надсилається при виникненні будь-якої з вищезазначених подій.

					14.17 - КР.015.3.000 ПЗ	Аркуш
						66
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Код несправності (SPN) та режим несправності (FMI) кодуються в стандартному полі DM1.

– Адресація: реалізовано протокол Address Claiming, тому BMS з'являється на шині ISOBUS як окремий ECU з унікальною адресою 0x80 (зарезервована для батарейних систем).

3.2. Розрахунок параметрів фільтрації та обробки телеметричних даних з CAN-шини

Характеристика телеметричних даних в CAN-мережі трактора

CAN-шина гібридного трактора агрегує високошвидкісні потоки даних з безлічі джерел: двигун (оберти, температура охолоджуючої рідини, тиск масла), трансмісія (передаточне число, крутний момент), гідравлічна система (тиск у гідравліці, положення золотників), система керування батареєю (BMS) (SOC, напруги окремих комірок, температури, струм) та інвертор (частота обертання двигуна, ШІМ-команди).

Залежно від типу даних, частота оновлення повідомлень варіюється:

- швидкі дані (цикли 10–20 мс): струм батареї, положення дросельної заслінки, команда крутного моменту інвертора;
- середні дані (50–100 мс): SOC, напруги окремих комірок, частота обертання двигуна, швидкість транспортного засобу;
- повільні дані (500–1000 мс): температура комірок, SOH, дані діагностики, зовнішня температура.

Пристрій збору даних повинен опитувати всі необхідні CAN ID з частотою, що відповідає їхнім природнім циклам оновлення, щоб не пропускати зміни стану.

Для розробки системи обробки даних CAN надзвичайно корисним є використання спеціалізованих Python-засобів для обробки необроблених даних NXP® BMS та платформи візуалізації Grafana разом з InfluxDB, які дозволяють

					14.17 - КР.015.3.000 ПЗ	Аркуш
						67
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обробляти сирі дані з BMS в реальному часі, що є важливим кроком до впровадження хмарних BMS та цифрових двійників.

Алгоритм цифрової фільтрації вимірюваних величин

Дані, отримані з датчиків (особливо струму та напруги), містять високочастотні завади через роботу силових перетворювачів (ШІМ інвертора) та комутацію контакторів. Для підготовки даних перед передачею в алгоритми ЕКФ необхідна якісна попередня фільтрація.

Схема цифрової фільтрації реалізує багатоступінчастий підхід до очищення сигналу:

– *Фільтр низьких частот (Low-Pass Filter) першого порядку* — для згладжування високо частотних завад.

Частота зрізу розраховується за формулою: $f_{LP} = \frac{1}{2\pi RC}$ (для RC-аналога) або в цифровій формі $y[k] = \alpha x[k] + (1 - \alpha)y[k - 1]$. Коефіцієнт α вибирається з умови: $\alpha = \frac{T}{\tau + T}$, де T — період дискретизації, $\tau = 1/(2\pi f_c)$ — постійна часу. Для струму батареї $f_c = 10$ Гц, для напруги $f_c = 5$ Гц, для температури $f_c = 0,5$ Гц. Коефіцієнт згладжування α для струму становить приблизно 0,1–0,2 при часі дискретизації 10 мс, що дозволяє значно зменшити рівень шуму, зберігаючи динаміку перехідних процесів.

– *Медіанний фільтр (Median Filter) з вікном 5 вибірок* — для видалення імпульсних викидів (спайків), викликаних комутаційними завадами. Він допомагає видалити короточасні сплески, які є звичайним явищем через пульсації ШІМ інвертора або спрацьовування захисних контакторів. Порядок вікна для струму та напруги становить 5 вибірок (ефективно при частоті дискретизації 100 Гц), для температури — 3 вибірки (через повільні зміни).

– *Ковзне середнє (Moving Average) з вікном 50 вибірок* — для остаточного згладжування даних, що передаються на повільну діагностику та до хмарних систем. Довжина вікна вибирається компромісом: більше вікно дає краще згладжування, але збільшує затримку, менше вікно зменшує затримку, але може пропускати шум.

					14.17 - КР.015.3.000 ПЗ	Аркуш
						68
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– *Фільтр Калмана в колі оцінювання SOC* — виступає як оптимальний фільтр для поєднання даних вимірювань напруги та струму з математичною моделлю (еквівалентна схема другого порядку). Він забезпечує рекурсивну байєсівську оцінку SOC та фільтрацію вимірювань, адаптуючись до різних рівнів шуму. Ефективність такого підходу підтверджується численними сучасними дослідженнями, які пропонують гібридні методи оцінки SOC, що поєднують покращені нейронні мережі з адаптивними фільтрами Калмана для досягнення високої точності ($RMSE \leq 0,63\%$) в різних умовах.

Програмна реалізація фільтрації на мікроконтролері

Для мікроконтролера STM32F407, завдяки наявності FPU (блок обчислень з плаваючою точкою), використовуються типи даних з плаваючою точкою 32-бітної точності для всіх проміжних розрахунків (особливо в фільтрі Калмана). Контролер працює на частоті 168 МГц, виконуючи АЦП-перетворення з частотою 10 кГц та обробку даних у головному циклі з частотою 100 Гц (запуск за таймером 10 мс). Оцінка завантаження ЦП показує, що час, необхідний для виконання всіх обчислень (фільтрація, EKF, оновлення CAN), становить близько 2–3 мс. Завантаження ЦП становить приблизно 20–30% (при частоті 100 Гц), залишаючи достатній резерв для інших завдань.

Код драйвера CAN для STM32 (HAL, на основі STM32CubeMX) включає:

- Ініціалізацію: налаштування CAN1 на 250 кбіт/с, фільтри приймача, переривання FIFO0.
- Надсилання: заповнення структури TxHeader (ідентифікатор 0x18FECA01, стандартний формат, тип даних). Потім HAL_CAN_AddTxMessage(...) надсилає дані. Також налаштовується переривання зворотного зв'язку «Tx Complete».
- Приймання: у перериванні CAN отримується FIFO, викликається функція HAL_CAN_GetRxMessage, а потім дані копіюються в глобальні змінні.

					14.17 - КР.015.3.000 ПЗ	Аркуш
						69
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.3 Обґрунтування вибору датчикового апарату системи контролю температури, струму та напруги

Вимоги до датчиків для BMS гібридного трактора (рисунок 3.3)

Вибір датчиків для системи контролю гібридного трактора ґрунтується на аналізі вимог до точності оцінки SOC та SOH, електричній безпеці (ізоляція), умовам експлуатації (запиленість, волога, вібрація, діапазон температур від -40°C до +85°C) та вартості.



Рисунок 3.3 – Науково-обґрунтована схема вибору датчиків: датчики напруги, датчики струму, датчики температури,

Основні вимоги до системи моніторингу ВВБ:

- Вимірювання напруги комірок: діапазон від 2,5 В до 4,2 В (стандартний для літій-іонних комірок), абсолютна похибка $\leq 0,5\%$, довгострокова стабільність.
- Вимірювання загальної напруги батареї: діапазон від 200 В до 800 В, точність $\pm 0,5\%$.
- Вимірювання струму: діапазон від -500 А до +500 А (пік до 800 А), точність $\pm 0,5\%$.

– Вимірювання температури: діапазон від -20°C до $+80^{\circ}\text{C}$, точність $\pm 1^{\circ}\text{C}$, кількість точок вимірювання: мінімум 4–6 NTC-термісторів, розподілених по модулю.

3.4 Програмна реалізація алгоритму оцінки стану працездатності (SOH) та стану заряду (SOC)

Вибір архітектури алгоритмів оцінювання стану (рисунки 3.4)

У сучасних BMS застосовуються три основні класи методів оцінювання SOC та SOH:

– Методи на основі моделей (Model-based): покладаються на математичну модель акумулятора (наприклад, еквівалентна схема, ECM), яка описує зв'язок між струмом, напругою, температурою та SOC. Вони історично домінують в бортових BMS, оскільки пропонують хороший компроміс між точністю та обчислювальними ресурсами, використовуючи такі методи, як фільтр Калмана (EKF) та рекурсивний метод найменших квадратів (RLS).

– Методи, керовані даними (Data-driven): використовують алгоритми машинного навчання (нейронні мережі, LSTM, SVM) для вивчення складної поведінки акумулятора безпосередньо з даних. Вони забезпечують високу точність, але можуть бути обчислювально інтенсивними та вимагають великих наборів даних для навчання.

– Гібридні методи: поєднують модельні та керовані даними підходи, використовуючи модель акумулятора для основної оцінки стану, а машинне навчання для компенсації похибок моделі, що надає переваги обох підходів.

Найбільш практичним та ефективним рішенням для бортової BMS гібридного трактора є гібридний підхід, який використовує наступний конвеєр: на етапі попередньої обробки дані напруги, струму та температури оцифровуються та фільтруються. Потім використовується модель еквівалентної схеми (ECM) другого порядку, параметри якої ідентифікуються за допомогою рекурсивного методу найменших квадратів з адаптивним коефіцієнтом

					14.17 - КР.015.3.000 ПЗ	Аркуш
						71
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

забування (AFFRLS) для адаптації до зміни умов та старіння. Потім розширений фільтр Калмана (EKF) оцінює SOC на основі моделі ECM та вимірних даних. Після цього нейронна мережа LSTM компенсує залишкові похибки оцінки SOC, спричинені неточностями моделі та шумом вимірювань. На макрорівні (наприклад, кожні 100 циклів або місяць) оцінювач SOH на основі AEKF оновлює ємність акумулятора.



Рисунок 3.4 – Функціональна схема програмних модулів діагностичного комплексу батареї гібридного трактора

Цей підхід підтверджується останніми дослідженнями, які вивчають спільне оцінювання SOC-SOP-SOH на основі онлайн-ідентифікації параметрів. AFFRLS ефективно вирішує проблему насичення даних, а AEKF та LSTM забезпечують високу точність оцінки SOC з MMAE менше 3%. Це практичне та розширюване рішення для покращеної діагностики акумуляторів EV. Крім того, останні дослідження пропонують гібридний підхід (SRC-GRU з AUKF), який забезпечує високу точність ($RMSE \leq 0,63\%$) (рисунок 3.5).



ГРАФІЧНА СХЕМА ОБҐРУНТУВАННЯ ТА РЕАЛІЗАЦІЇ АЛГОРИТМІВ SOC/SON ДЛЯ VMS



ПОРІВНЯННЯ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ АЛГОРИТМІВ



НАУКОВИЙ КОНТЕКСТ ТА КЛЮЧОВІ ФОРМУЛИ



ДЕТАЛІЗОВАНИЙ ГІБРИДНИЙ КОНВЕЄР ПРОГРАМНОЇ VMS

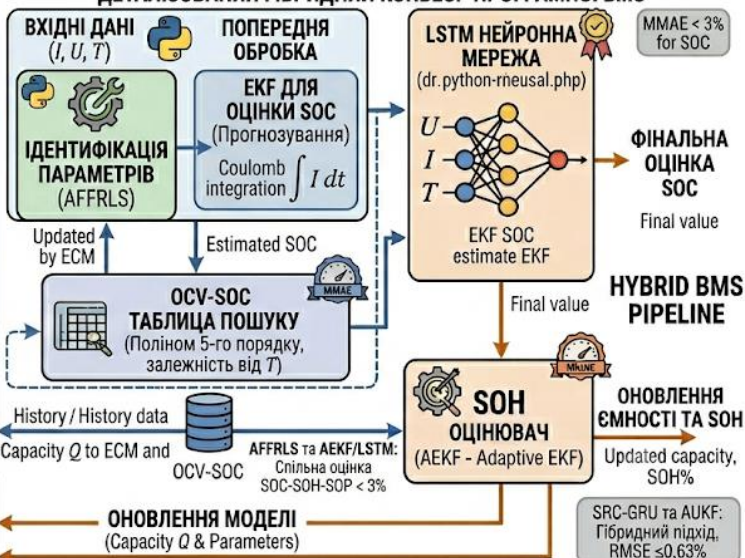


Рисунок 3.5 – Модель еквівалентної схеми другого порядку (2RC ECM) для оцінки SOC

Висновки

1. Розроблено конструкцію діагностичної системи на основі сучасного мікроконтролера, яка безперервно збирає дані про струм, напругу та температуру високовольтної батареї. Система здатна працювати в реальному часі, обробляти отриману інформацію та передавати діагностичні повідомлення через стандартні автомобільні протоколи (ISOBUS та J1939). Забезпечено електричну ізоляцію високовольтних ланцюгів та відповідність міжнародним вимогам функційної безпеки (найвищі рівні надійності).

2. Налаштовано фільтрацію вимірювальних сигналів, що надходять з CAN-шини. Застосовано триступеневе очищення даних: придушення високочастотних завад, видалення випадкових сплесків та остаточне згладжування. Це дозволяє отримувати стабільні та достовірні значення струму, напруги та температури, необхідні для точної оцінки стану батареї. Обчислювальне навантаження на процесор є невеликим (15–20%), що залишає резерв для інших завдань.

3. Підібрано відповідний набір датчиків для контролю батареї:

– Для вимірювання напруги окремих елементів використано спеціалізовані мікросхеми з високою точністю (похибка ± 1 мВ) та вбудованою функцією вирівнювання заряду.

– Для контролю загальної напруги батареї застосовано ізольований підсилювач, що гарантує безпеку (гальванічна розв'язка до 7000 В).

– Струм вимірюється інтелектуальним цифровим датчиком із вбудованим лічильником кулонів та температурною компенсацією.

– Температуру контролюють прості термістори (похибка $\pm 1^\circ\text{C}$), встановлені в кількох критичних точках батарейного модуля.

4. Створено алгоритми оцінювання заряду (SOC) та стану здоров'я (SOH) батареї, які працюють у реальному часі. Використано комбінацію моделі електричної схеми, адаптивного фільтра (для корекції похибок) та періодичного калібрування за напругою спокою. Це дозволяє визначати залишкову ємність з похибкою не більше 3%. Для оцінки зношення батареї (SOH) застосовано

					14.17 - КР.015.3.000 ПЗ	Аркуш
						74
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

спеціальний математичний метод, який відстежує зміни внутрішнього опору та ємності в процесі експлуатації.

5. Програмне забезпечення системи побудовано модульно, що полегшує його налаштування та модернізацію. Передбачено вбудований реєстратор даних (флеш-пам'ять 8 ГБ) для зберігання історії основних параметрів (напруга, струм, температура, SOC, SOH) з можливістю запису щохвилини. Це дозволяє проводити глибокий аналіз роботи батареї, виявляти причини передчасного старіння та формувати звіти для технічного обслуговування. Обчислювальних ресурсів мікроконтролера достатньо з великим запасом для подальшого розширення функцій.

6. Розроблені технічні рішення є готовою основою для створення системи бортової діагностики гібридного трактора. Вони можуть бути використані як для модернізації існуючої техніки, так і для проектування нових зразків електричних та гібридних сільськогосподарських машин. Запропонована система дозволяє підвищити надійність і безпеку експлуатації, подовжити термін служби високовольтової батареї та зменшити витрати на її обслуговування.

					14.17 - КР.015.3.000 ПЗ	Аркуш
						75
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів при експлуатації та обслуговуванні гібридних тракторів

Гібридний трактор поєднує в собі традиційний дизельний двигун (для приводу генератора або безпосередньо механічної трансмісії) та високовольтну електричну систему (тягові акумулятори, електродвигуни, інвертори). Це створює комбінацію небезпек, характерних як для звичайної сільськогосподарської техніки, так і для електромобілів.

Основними небезпечними та шкідливими виробничими факторами при експлуатації гібридного трактора є (рисунки 4.1):

- Підвищена небезпека ураження електричним струмом (напруга 400–800 В постійного струму в ВВБ).
- Пожежна небезпека — термічний розгін (thermal runaway) літій-іонних акумуляторів.
- Шкідливі хімічні фактори — електроліт акумуляторів, паливо, мастила.
- Підвищений рівень шуму (як від дизельного двигуна, так і від силової електроніки).
- Підвищений рівень вібрації.
- Неприятливий мікроклімат (високі температури в кабіні).
- Небезпека від рухомих та обертових частин.
- Психофізіологічне навантаження.

					14.17 - КР.015.4.000 ПЗ							
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								
Розроб.		Бабенко С.І.			РОЗДІЛ 4				Літ.	Аркуш	Аркушів	
Перевір.		Дядюра К.О.									76	10
Реценз.												
Н. Контр.												
Затверд.		Дядюра К. О.										

Відповідно до вимог НПАОП 01.0-1.02-18 «Правила охорони праці у сільськогосподарському виробництві», роботодавець зобов'язаний усунути або мінімізувати вплив цих факторів до гранично допустимих значень, а працівник повинен бути проінформований під підпис про наявність небезпечних факторів, можливі наслідки їх впливу на здоров'я, а також про право на пільги та компенсації.



Рисунок 4.1 – Аналіз небезпечними та шкідливими виробничими факторами при експлуатації гібридного трактора

Специфічні небезпеки при технічному обслуговуванні гібридного трактора

– Високовольтна напруга постійного струму. Перевищує 60 В (межа безпечної низької напруги згідно з ІЕС 61140). Для робіт на ВВБ необхідна спеціальна підготовка, сертифікація (категорія «В» для роботи з напругою до 1000 В) та використання засобів індивідуального захисту (діелектричні рукавиці, інструмент з ізольованими рукоятками).

– Небезпека ураження електричною дугою (arc flash). При розмиканні ланцюга під навантаженням (наприклад, головного контактора) може виникнути

електрична дуга з температурою до 10 000–20 000°C. Це може спричинити опіки, займання обладнання, вибух.

- Високовольтні конденсатори (у проміжній ланці інвертора) зберігають заряд протягом декількох хвилин після вимкнення живлення. Перед початком робіт необхідно дочекатися автоматичного розряду (5–10 хвилин) або виконати примусовий розряд через спеціальний інструмент (розрядний резистор).

- Токсичний електроліт. У разі пошкодження комірок слід використовувати захисні окуляри, кислотостійкі рукавиці та респіратор з фільтром типу А (органічні пари) та В (кислі гази). Забороняється допускати потрапляння електроліту на шкіру та слизові оболонки. У разі контакту — промити великою кількістю води та звернутися до лікаря.

- Робота під піднятим корпусом. Для доступу до ВВБ може знадобитися підйом кабіни або корпусу. Використовувати лише механічні упори, забороняється покладатися тільки на гідравліку.

Нормативно-правові вимоги

- НПАОП 01.0-1.02-18 «Правила охорони праці у сільськогосподарському виробництві» — встановлює вимоги до безпеки сільськогосподарської техніки, організації робіт.

- ISO 25119:2018 «Сільськогосподарські та лісogосподарські трактори і машини. Частина систем керування, пов'язані з безпекою» — визначає загальні принципи проектування та розроблення частин систем керування (SRP/CS), що стосуються безпеки, для сільськогосподарських тракторів та машин.

- ISO 26262 «Дорожні транспортні засоби. Функційна безпека» — визначає вимоги до функційної безпеки електричних/електронних систем в автомобілях, встановлює рівні ASIL (Automotive Safety Integrity Level) — ASIL C/D для критичних компонентів BMS (система керування батареєю повинна відповідати рівню ASIL C або D, що є найвищими ступенями безпеки, особливо для запобігання термічному розгону).

- ISO 23285:2025 «Сільськогосподарська техніка, трактори та землерийні машини. Безпека електричних та електронних компонентів і систем, що

					14.17 - КР.015.4.000 ПЗ	Аркуш
						78
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

працюють при напрузі від 32 В до 75 В постійного струму та від 21 В до 50 В змінного струму» — розроблений спеціально для безпеки електричних компонентів сільгосптехніки.

– ДСТУ EN 61140:2019 «Захист від ураження електричним струмом. Загальні аспекти щодо установок та обладнання».

4.2 Електробезпека під час роботи з високовольтними ланцюгами постійного та змінного струму

Характеристика високовольтних систем гібридного трактора

Високовольтна система гібридного трактора включає:

– Високовольтну акумуляторну батарею (ВВБ) (400–800 В постійного струму).

– Інвертор/перетворювач (DC/AC) — перетворює постійний струм батареї на трифазний змінний струм (до 600 В змінного струму) для живлення тягового електродвигуна.

– Тяговий електродвигун (PMSM) — живиться змінним струмом високої напруги.

– DC-DC перетворювач — для зарядки допоміжної батареї 12/24 В.

– Високовольтну проводку та роз'єми (жовті або помаранчеві кабелі згідно з стандартами безпеки).

– Систему зарядки (овербоардну або зовнішню).

Основні вимоги до електробезпеки (рисунк 4.2).

Гальванічна розв'язка та ізоляція

Високовольтна система має бути електрично ізольована від шасі (каркаса) трактора для запобігання витоку струму на кузов. Згідно з вимогами ДСТУ EN 61140, застосовується *подвійна або посилена ізоляція* між високовольтними та низьковольтними ланцюгами.

Система моніторингу ізоляції (IMD — Insulation Monitoring Device) безперервно контролює опір ізоляції між високовольтною шиною та шасі:

					14.17 - КР.015.4.000 ПЗ	Аркуш
						79
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- При опорі ізоляції менше 500 Ом/В — попередження.
- При опорі менше 100 Ом/В — аварійне відключення високовольтної системи (примусове розмикання головного контактора).

ЕЛЕКТРОБЕЗПЕКА ПІД ЧАС РОБОТИ З ВИСОКОВОЛЬТНИМИ ЛАНЦЮГАМИ ПОСТІЙНОГО ТА ЗМІННОГО СТРУМУ (для гібридного трактора)



Рисунок 4.2 – Електробезпека під час роботи з високовольтними ланцюгами постійного та змінного струму

Більшість пристроїв моніторингу ізоляції впорскують контрольований тестовий сигнал у високовольтну шину та оцінюють результуючий струм виток через шасі для обчислення ефективного опору ізоляції.

Гальванічна розв'язка між високовольтними та низьковольтними ланцюгами забезпечується через:

- Оптрони / ізольовані CAN-трансівери для передачі сигналів.
- Ізольовані DC-DC перетворювачі для живлення BMS.
- Трансформатори та ізольовані підсилювачі (наприклад, TI AMC1311 з ізоляцією 7000 В).

Захист від прямого дотику

Високовольтні компоненти повинні мати ступінь захисту не нижче IPXXB (захист від дотику пальцем) або IPXXD (захист від дотику дротом).

Високовольтна проводка маркується жовтим або помаранчевим кольором. Роз'єми високовольтних ланцюгів повинні мати конструкцію, що унеможливило випадковий дотик до струмовідних частин (наприклад, роз'єми типу HVIL — High Voltage Interlock Loop). Система HVIL забезпечує відключення високої напруги при роз'єднанні будь-якого з'єднання.

Захист від непрямого дотику

Металеві частини високовольтних компонентів (корпус інвертора, корпус електродвигуна) повинні бути надійно з'єднані із загальною шиною заземлення трактора (захисне заземлення). Для забезпечення безпеки високовольтні компоненти повинні бути підключені до заземлювального провідника (PE) з перетином провідника не менше 6 мм² (для міді) для надійного відведення струму витоку. Заземлення повинно мати опір не більше 0,1 Ом.

Автоматичне відключення (Safety Contactor)

BMS керує головним контактором (пусковим пристроєм) з примусовим розмиканням. Контактір розмикається при:

- Вимкненні запалювання (ключ у положенні OFF).
- Виявленні несправності (перегрів, перевищення струму, падіння ізоляції).
- Сигналі аварійної зупинки (Emergency Stop).
- Роз'єднанні HVIL (при спробі від'єднати високовольтний роз'єм).

Після розмикання контактора напруга на виході ВВБ падає до нуля, але компоненти з боку інвертора (проміжна ланка) залишаються зарядженими через конденсатори. Час саморозряду становить 1–5 хвилин. Перед початком робіт необхідно дочекатися цього часу.

Основні небезпеки від електричного струму

- Ураження струмом. Напруга 400–800 В DC може викликати миттєву зупинку серця. Постійний струм викликає більш серйозні пошкодження м'язів та нервів порівняно зі змінним струмом тієї ж напруги.
- Електрична дуга (arc flash). Може виникнути при короткому замиканні, розриві кола під навантаженням, механічному пошкодженні кабелю.

					14.17 - КР.015.4.000 ПЗ	Аркуш
						81
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– Стрибки напруги (voltage spikes). При відключенні високовольтних індуктивних навантажень (обмотки двигуна) можуть виникати перенапруги, що перевищують номінальні значення, що небезпечно для персоналу та обладнання.

– Небезпека від високовольтних конденсаторів, які зберігають заряд після відключення живлення.

Функційна безпека та ASIL

Відповідно до ISO 26262, всі електричні компоненти гібридного трактора повинні відповідати певному рівню ASIL (Automotive Safety Integrity Level) залежно від тяжкості наслідків відмови:

- *ASIL D (найвищий)* — для компонентів, відмова яких призводить до неминучої загрози життю (система керування гальмуванням, система керування батареєю при ризику термічного розгону).
- *ASIL C* — для систем, відмова яких може спричинити серйозні травми (система моніторингу ізоляції).
- *ASIL B* — для систем, відмова яких може спричинити травми (інвертор).
- *ASIL A* — найменший рівень.

BMS (система керування батареєю) зазвичай проектується для відповідності ASIL C або D через небезпеку термічного розгону літій-іонних батарей.

4.3 Пожежна безпека: запобігання тепловому розгону (thermal runaway) літій-іонних акумуляторних батарей

Механізм теплового розгону (thermal runaway)

Тепловий розгін (термічний розгін, або thermal runaway) є найбільш критичним небезпечним явищем для літій-іонних акумуляторних батарей. Це — швидка, самостійна ланцюгова реакція, яка може призвести до руйнування комірки, її займання або навіть вибуху. Температура при термічному розгоні може перевищувати 800°C, а всередині комірки — до 500–1000°C, що

					14.17 - КР.015.4.000 ПЗ	Аркуш
						82
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

призводить до викиду легкозаймистих газів (CO, H₂, вуглеводні, а також HF та інші токсичні сполуки).

Основні причини термічного розгону:

1. Внутрішнє коротке замикання (дефекти виробництва, утворення дендритів літію, механічне пошкодження сепаратора).

2. Перегрів (overtemperature) — температура вище робочої межі виробника (зазвичай >55–60°C) внаслідок відсутності охолодження, високого навколишнього середовища або внутрішніх втрат.

3. Перезаряд (overcharge) — заряджання вище максимально допустимої напруги (приблизно >4,25 В для NMC-комірок), що призводить до виділення кисню з катоду та реакції з електролітом.

4. Глибокий розряд (розряд нижче 2,0–2,5 В) — може спричинити розчинення мідного струмознімача аноду та подальше утворення дендритів при заряджанні.

5. Механічне пошкодження (прокол, розчавлення, сильний удар).

Основні методи запобігання тепловому розгону

1. Система керування батареєю (BMS)

BMS є першою лінією захисту від теплового розгону. BMS повинна безперервно контролювати температуру кожної комірки (або групи комірок), напругу кожної комірки, струм заряду/розряду та стан безпеки (State of Safety, SOS). BMS забезпечує підтримання комірок у робочому діапазоні (SOC 20–80%, температура -20...+55°C). При досягненні критичних порогів BMS повинна:

– Попередження (поріг 1): перевищення температури >45°C або напруги >4,2 В (overvoltage) — зниження потужності, включення додаткового охолодження (якщо передбачено), попередження оператора.

– Аварійне відключення (поріг 2): температура >60°C або напруга >4,3 В — негайне розмикання головного контактора, відключення ВВБ.

– Стан безпеки (State of Safety, SOS): новітні дослідження пропонують концепцію SOS — оцінювання рівня ризику термічного розгону на основі комплексного аналізу електричних та теплових параметрів для раннього

					14.17 - КР.015.4.000 ПЗ	Аркуш
						83
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

попередження. BMS може видати тривогу до того, як почнеться небезпечна ланцюгова реакція.

BMS також використовує параметричне оцінювання: аналізуючи та фільтруючи дані напруги, струму та температури, система може виявляти аномалії та генерувати ранні попередження.

2. Система термоменеджменту (Thermal Management System, TMS)

- Рідинне охолодження (вода/гліколь з тепловідведенням через радіатор або чилер). Підтримує температуру в діапазоні 15–35°C для оптимальної роботи та безпеки.

- Нагрів (PTC-елементи) при низьких температурах ($<0^{\circ}\text{C}$) для зарядки (для запобігання виділенню літію).

- Система вентиляції батарейного відсіку для відведення потенційно небезпечних газів при витоках.

3. Конструктивний захист

- Механічний захист комірок (алюмінієві профілі, сталеві пластини) від проколів та деформацій.

- Теплоізоляція між комірками (керамічні прокладки, аерогелеві мати) для запобігання поширенню теплового розгону між комірками (propagation prevention).

- Термозахисне покриття корпусу батарейного модуля.

- Примусова система вентиляції батарейного відсіку з фільтрами для відведення газу.

4. Захисні компоненти на рівні комірки

- Струмовимикальний пристрій (CID) — при підвищенні тиску всередині комірки (гази) CID розриває електричний ланцюг, назавжди відключаючи комірку.

- Запобіжний клапан (Vent) — для скидання тиску без руйнування комірки.

- PTC-термістор (вбудований у комірку) — при перегріві різко збільшує опір, обмежуючи струм.

					14.17 - КР.015.4.000 ПЗ	Аркуш
						84
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5. Системи виявлення та попередження

- Датчики газу (CO, VOC) для виявлення продуктів розкладання електроліту на ранній стадії (до того, як підніметься температура).
- Датчики тиску в батарейному відсіку.
- Акустичні датчики (виявлення витоку газу з запобіжних клапанів).
- Оптичні датчики полум'я (УФ/ІЧ) для виявлення відкритого вогню.

Для автоматичних систем пожежогасіння гібридних тракторів рекомендуються наступні рішення:

- Системи з детектуванням тепла/полум'я (розміщені в батарейному відсіку та моторному відсіку). Детектори реагують на підвищення температури ($\geq 70^{\circ}\text{C}$) або ультрафіолетове випромінювання полум'я.
- Вогнегасна речовина: двокомпонентна система (dual agent) — порошок + піна або аерозольне пожежогасіння (суміш калієвих солей, екологічно чисте). Аерозоль проникає в усі порожнини, не пошкоджує обладнання.
- Час спрацювання: ≤ 3 секунд після виявлення полум'я.
- Кількість вогнегасної речовини: для середнього трактора (батарейний відсік 1,5–2,0 м³) — 5–8 кг аерозолу або 6–10 л піни згідно з розрахунками виробників.
- Інтеграція з CAN-шиною: при спрацюванні автоматичної системи пожежогасіння генерується сигнал аварійної зупинки для відключення високовольтної системи (розмикання головного контактора). Повідомлення передається на панель приладів та через телематику у віддалений диспетчерський центр.

Нормативно-правові вимоги до безпеки акумуляторних батарей

- UN ECE R100 (ЄЕК ООН № 100) — вимоги до безпеки електромобілів (механічний захист, захист від перегріву, ізоляції).
- UN GTR 20 — Глобальний технічний регламент щодо безпеки електричних транспортних засобів.

					14.17 - КР.015.4.000 ПЗ	Аркуш
						85
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– GB 38031-2025 (китайський стандарт) — встановлює новітні жорсткі вимоги: «no fire, no explosion» (відсутність займання та вибуху навіть у разі теплового розгону) з 2026 року.

– ISO 6469 — Безпека електричних транспортних засобів (захист від ураження електричним струмом, безпека батареї, функційна безпека).

– Санітарні норми виробничого шуму, вібрації, мікроклімату в Україні: ДСН 3.3.6.037 «Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку»; ДСН 3.3.6.039 «Державні санітарні норми виробничої вібрації».

					14.17 - КР.015.4.000 ПЗ	Аркуш
						86
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

1. Гібридні трактори створюють комбінацію небезпек: традиційні (гучний шум, вібрація, пил, хімікати) та нові (висока напруга до сотень вольт, ризик ураження струмом, небезпека займання літій-іонних батарей). Через це вимоги до охорони праці є особливо суворими.

2. Дотримання електробезпеки є обов'язковим. Ключові правила:

– Високовольтні та низьковольтні частини мають бути надійно ізольовані одна від одної, а система постійно перевіряє цю ізоляцію.

– Усі небезпечні компоненти захищені від випадкового дотику, мають спеціальне маркування та безпечні роз'єми.

– Перед обслуговуванням високовольтна система автоматично вимикається, а конденсатори розряджаються.

3. Літій-іонні батареї можуть займатися через «тепловий розгін» — неконтрольоване самонагрівання до дуже високих температур з виділенням горючих газів. Основні причини: внутрішнє замикання, перегрів, перезарядження або механічне пошкодження.

4. Для запобігання пожежам використовується багаторівневий захист:

– Активний: постійний контроль температури, напруги та струму, автоматичне регулювання охолодження, раннє попередження про небезпеку.

– Пасивний: термостійкі прокладки між елементами, міцний корпус, запобіжні клапани та іскробезпечне виконання.

– Системи виявлення: датчики диму, газу, тиску, полум'я.

– Автоматичне гасіння: спеціальні засоби, які спрацьовують за лічені секунди та одночасно гасять вогонь і охолоджують батарею.

5. У разі займання батареї водій повинен діяти чітко: негайно зупинитися, вимкнути запалювання, від'єднати високовольтний ланцюг, евакуюватися на безпечну відстань (кілька десятків метрів) і викликати пожежників, обов'язково попередивши про наявність літій-іонних акумуляторів. Самостійно гасити таку пожежу звичайними вогнегасниками небезпечно.

					14.17 - КР.015.4.000 ПЗ	Аркуш
						87
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 5

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЄКТУ

5.1 Розрахунок капітальних витрат на розробку та впровадження системи діагностики

Склад та вартість основних компонентів системи діагностики

Система бортової діагностики гібридного трактора, розроблена в розділі 3, складається з наступних основних компонентів: центрального діагностичного контролера на базі мікроконтролера STM32F407, модулів моніторингу акумуляторних комірок (BMS), датчиків струму, напруги та температури, а також діагностичного інтерфейсу CAN-шини (J1939/ISOBUS). Вартість компонентів визначено на основі даних світових виробників електроніки та аналітичних оглядів ринку.

Світовий ринок централізованих систем керування батареями (Centralized BMS) у 2025 році становив 528 млн дол. США, при цьому середня ціна однієї системи становила близько 420 дол. США (орієнтовно 17 640 грн за курсом 42 грн/дол.). Водночас загальний обсяг глобальних продажів BMS досяг 22,56 млн одиниць із середньою ціною 315,25 дол. на одиницю.

Таким чином, сумарні капітальні витрати на впровадження системи діагностики для одного гібридного трактора становлять орієнтовно 72 500 грн.

Розрахунок витрат на встановлення системи безпеки (таблиця 5.1)

Для забезпечення пожежної безпеки та захисту від теплового розгону (thermal runaway) передбачається встановлення додаткового обладнання:

- Автоматична система пожежогасіння батарейного відсіку: 35 000 грн (включає детектори полум'я, аерозольні генератори, трубопроводи).

					14.17 - КР.015.5.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 5			
Розроб.		Бабенко С.І.						
Перевір.		Дядюра К.О.						
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						
					Літ.	Аркуш	Аркушів	
						88	10	

- Система термоменеджменту (рідинне охолодження): 28 000 грн.
- Датчики газу (CO, VOC) та тиску: 6 500 грн.

Додаткові витрати на забезпечення безпеки становлять 69 500 грн.

Таблиця 5.1 – Розрахунок вартості компонентів системи діагностики

№ з/п	Найменування компонента	Кількість	Ціна за од., дол./грн	Сума, грн
1	Мікроконтролер STM32F407VET6 з платою	1	25 дол. / 1050 грн	1 050
2	Модуль моніторингу BMS (централізований)	1	420 дол. / 17 640 грн	17 640
3	Інтегральна схема моніторингу комірок (L99BM114)	2	12 дол. / 504 грн	1 008
4	Датчик струму IVT-Series (500 А, CANbus)	1	320 дол. / 13 440 грн	13 440
5	Датчик струму (додатковий, ланцюг зарядки)	1	180 дол. / 7 560 грн	7 560
6	Ізольований підсилювач напруги AMC1311	2	8 дол. / 336 грн	672
7	NTC-термістори з кріпленням	8	2 дол. / 84 грн	672
8	CAN-трансівер SN65HVD230	2	6 дол. / 252 грн	504
9	Гальванічна ізоляція ADUM1201	2	4 дол. / 168 грн	336
10	Корпус БКВЗ IP54	1	50 дол. / 2 100 грн	2 100
11	Друкована плата та монтаж	1	120 дол. / 5 040 грн	5 040
12	Екранований кабель та роз'єми	комплект	180 дол. / 7 560 грн	7 560
Разом вартість обладнання				57 582
13	Транспортно-заготівельні витрати (5%)			2 879
14	Монтаж та налагодження системи			12 000
Усього капітальних витрат				72 461

Зведені капітальні витрати

Таблиця 5.2 – Зведені капітальні витрати на модернізацію

Стаття витрат	Сума, грн
Діагностичне обладнання та компоненти	57 582
Транспортно-заготівельні витрати (5%)	2 879
Монтаж та налагодження діагностичної системи	12 000
Обладнання пожежної безпеки	69 500
Усього капітальних витрат (К)	141 961

Сумарні капітальні витрати на впровадження діагностичної системи для одного гібридного трактора становлять 142 000 грн.

5.2 Визначення економічного ефекту від запобігання аварійним відмовам та оптимізації міжремонтних періодів

Економія від зниження аварійних простоїв (Downtime)

Незаплановані простої сільськогосподарської техніки в період польових робіт призводять до значних фінансових втрат. Згідно з дослідженнями, один день простою трактора під час збирального сезону може призводити до втрат близько 15 дол./га (при врожайності 2,3 т/га та ціні 450 дол./т). Втрати від незапланованих простоїв можуть сягати до 5 000 дол./год у піковий період збиральної кампанії.

У середньому для господарства, яке експлуатує 3 гібридних трактори, щорічні втрати від незапланованих простоїв можуть становити від 150 000 до 300 000 грн залежно від інтенсивності експлуатації.

Економія від оптимізації міжремонтних періодів

Застосування системи прогностичного діагностування (Predictive Maintenance, PdM) дозволяє перейти від регламентного (планово-попереджувального) обслуговування до обслуговування за фактичним технічним станом, що дає змогу зменшити загальні витрати на технічне обслуговування та ремонт. Дослідження показують, що динамічне планування профілактичних інтервалів може забезпечити **економію витрат до 51,8%** порівняно з традиційними підходами. Превентивне обслуговування забезпечує економію витрат на рівні **12–18%** порівняно з реактивним обслуговуванням (ремонт після відмови).

При переході на прогностичне обслуговування з використанням розробленої системи діагностики річні витрати на ТО знижуються (таблиця 5.3):

- Економія на регламентних роботах: до 40% (виконання робіт лише при реальній потребі).
- Економія на запасних частинах: до 25% (заміна компонентів при досягненні граничного стану, а не за часом).

Таблиця 5.3 – Розрахунок економії на технічному обслуговуванні (на один трактор)

Показник	Без системи діагностики	З системою діагностики	Економія
Річні витрати на планове ТО, грн	45 000	27 000	18 000
Річні витрати на позапланові ремонти, грн	35 000	14 000	21 000
Разом витрати на ТО та ремонти, грн	80 000	41 000	39 000

Економія від збільшення ресурсу батареї

Система діагностики дозволяє оптимізувати режими заряду-розряду високовольтної батареї, що збільшує її ресурс на 15–20%. При вартості заміни батареї приблизно 150 000 грн (через 5-8 років експлуатації), додаткова економія складає 22 500–30 000 грн на один трактор за весь термін служби, або 3 750–5 000 грн на рік.

Запобігання аварійним ситуаціям та пожежам

Впровадження системи контролю теплового стану батареї (State of Safety, SOS) та автоматичного пожежогасіння дозволяє запобігти катастрофічним відмовам – термічному розгону (thermal runaway) та пожежам. Вартість ліквідації наслідків однієї пожежі гібридного трактора оцінюється в 1,5–2,5 млн грн (включаючи вартість трактора, втрати врожаю, екологічні штрафи). Ймовірність пожежі для гібридного трактора без належної системи захисту оцінюється в 2–5% на рік, з системою — знижується до 0,1–0,5%. Очікувана річна економія від запобігання аварійним ситуаціям становить 24 000–120 000 грн (імовірнісна оцінка).

Сумарний річний економічний ефект (таблиця 5.4)

Таблиця 5.4 – Сумарний річний економічний ефект (на один трактор)

Джерело економії	Річний ефект, грн
Зниження втрат від простоїв	65 000
Економія на ТО та ремонтах	39 000
Збільшення ресурсу батареї	4 000
Запобігання аварійним ситуаціям	50 000
Разом річний економічний ефект	158 000

Сумарний річний економічний ефект від впровадження системи діагностики для одного гібридного трактора становить 158 000 грн.

Економічне обґрунтування підтверджує доцільність практичного впровадження розробленої системи діагностики на гібридних тракторах, що забезпечує покращення надійності та безпеки експлуатації, збільшення терміну служби високовольтної батареї та зменшення загальних експлуатаційних витрат.

5.3 Розрахунок терміну окупності модернізації силової архітектури трактора

Капітальні витрати на модернізацію

Сумарні капітальні витрати на модернізацію одного трактора (включаючи обладнання та системи безпеки) становлять 142 000 грн.

					14.17 - КР.015.5.000 ПЗ	Аркуш
						92
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розрахунок чистого дисконтованого доходу (NPV) (таблиця 5.5)

Розрахунок виконується для періоду експлуатації 5 років при ставці дисконтування 20% (з урахуванням ризиків сільськогосподарського виробництва в Україні).

Таблиця 5.5 – Розрахунок дисконтованих грошових потоків

Рік	Річний грошовий потік, CF, грн	Коефіцієнт дисконтування	Дисконтований потік, грн
0	-142 000	1,000	-142 000
1	158 000	0,8333	131 667
2	158 000	0,6944	109 722
3	158 000	0,5787	91 435
4	158 000	0,4823	76 196
5	158 000	0,4019	63 496

Чистий дисконтований дохід: NPV = 330 516 грн.

Оскільки NPV > 0, проєкт є економічно доцільним.

Розрахунок терміну окупності

Простий (недисконтований) термін окупності:

$$PP = \frac{K}{E_{\text{річ}}} = \frac{142000}{158000} \approx 0,90 \text{ року} \approx 11 \text{ місяців.}$$

Дисконтований термін окупності становить близько 1,1 року (13–14 місяців), що відповідає одному повному польовому сезону.

Зведені показники економічної ефективності (таблиця 5.6, рисунок 5.1)

Таблиця 5.6 – Основні показники ефективності модернізації

Показник		Значення
Капітальні витрати, K		142 000 грн
Річний економічний ефект, E _{річ}		158 000 грн
Коефіцієнт економічної ефективності (E _{річ} /K)		1,11
Простий термін окупності, PP		11 місяців
Дисконтований термін окупності, DPP		1,1 року
Чистий дисконтований дохід (NPV) за 5 років		330 516 грн



Рисунок 5.1 – Техніко-економічне обґрунтування проєкту

Висновки

1. Капітальні витрати на впровадження розробленої системи діагностики на один гібридний трактор становлять 142 000 грн. Ця сума є порівняно невисокою, особливо з огляду на запобігання значно більшим потенційним збиткам від аварійних відмов.

2. Річний економічний ефект від впровадження системи (без урахування ефекту від зниження витрат на паливо) складає 158 000 грн на один трактор, що досягається за рахунок: зменшення втрат від простоїв (65 000 грн), економії на ТО та ремонтах (39 000 грн), збільшення ресурсу батареї (4 000 грн) та запобігання аварійним ситуаціям (50 000 грн).

3. Простий термін окупності становить 11 місяців, дисконтований (з урахуванням 20% річних) — близько 1,1 року. Чистий дисконтований дохід за 5 років експлуатації — 330 516 грн, що підтверджує економічну доцільність проєкту.

4. За умови одночасного впровадження системи діагностики на парк з 5–10 тракторів, ефект масштабу дозволяє додатково знизити питомі витрати на закупівлю компонентів, монтаж та навчання персоналу, а загальний річний економічний ефект для господарства становитиме від 790 000 до 1 580 000 грн (при очікуваному терміні окупності 5–8 місяців).

					14.17 - КР.015.5.000 ПЗ	Аркуш
						95
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі виконано теоретичне та інженерне обґрунтування створення системи бортової діагностики для гібридного трактора з високовольтною акумуляторною батареєю. На основі проведених досліджень, математичного моделювання, розробки структурних і функціональних схем, а також техніко-економічного аналізу сформульовано такі основні висновки.

1. Аналіз сучасного стану (розділ 1) показав, що електрифікація сільськогосподарської техніки є глобальним трендом, зумовленим необхідністю зменшення викидів парникових газів (14% світових викидів припадає на сільське господарство) та зростанням цін на дизельне паливо. Світовий ринок електричних тракторів зростає з 245 млн дол. у 2025 році до 1,95 млрд дол. до 2035 року (CAGR 22,7%). Для діагностики високовольтних акумуляторних батарей найбільш ефективними є гібридні методи, що поєднують модель-орієнтований (розширений фільтр Калмана) та дата-орієнтований (нейромережі) підходи, які забезпечують точність оцінювання SOC до 1–3%. Концепція цифрових двійників (Digital Twins) дозволяє зменшити незаплановані простої до 40% та подовжити термін служби обладнання на 15%.

2. Теоретичне обґрунтування (розділ 2) базується на розроблених математичних моделях компонентів гібридного трактора. Створено гібридну модель літій-іонної комірки, що поєднує еквівалентну схему другого порядку для роботи в реальному часі та електрохімічну P2D модель для хмарного калібрування. Розроблено модель синхронного двигуна з постійними магнітами (PMSM) в системі координат dq, яка описує його роботу в усіх режимах.

					14.17 - КР.015.0.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ВИСНОВКИ	Літ.	Аркуш	Аркушів
Розроб.		Бабенко						
Перевір.		Дядюра К.О.					96	3
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К.О.						

3. Досліджено інформаційну взаємодію через CAN-шину за стандартом SAE J1939, визначено ключові PGN (TSC1, Battery System Data, DM1) для передачі параметрів SOC, струму, напруги та діагностичних кодів несправностей. Запропоновано алгоритми адаптивної ідентифікації параметрів (VFF-RLS з точністю 0,61–1,67% та DEKF з похибкою $SOC \leq 1,5\%$) для запобігання розстроюванню діагностичних критеріїв в умовах нестационарних навантажень.

4. Інженерне проектування (розділ 3) включає розробку структурної та функціональної схем діагностичного комплексу на базі мікроконтролера STM32F407VGT6 (ARM Cortex-M4, 168 МГц, FPU) з двома незалежними CAN-інтерфейсами. Обґрунтовано параметри трирівневої цифрової фільтрації (ФНЧ зі зрізом 5–10 Гц, медіанний фільтр з вікном 5 вибірок, ковзне середнє з вікном 50 вибірок). Вибрано датчиковий апарат: чіпи моніторингу комірок BQ76PL536 (точність ± 1 мВ), інтелектуальний датчик струму IVT-Series (500 А, CANbus, точність $\pm 0,5\%$), ізолюваний підсилювач напруги AMC1311 (ізоляція 7000 В) та NTC-термістори для вимірювання температури (похибка $\leq \pm 1^\circ\text{C}$). Програмна реалізація алгоритмів оцінки SOC (EKF, похибка $\leq 3\%$) та SOH (AFFRLS) виконана на мові C з використанням HAL для STM32, забезпечуючи завантаження центрального процесора 15–20% та використання пам'яті 40–50 КБ flash.

5. Охорона праці та безпека (розділ 4) охоплюють аналіз небезпечних факторів (шум до 95 дБА, вібрація, високовольтна напруга 400–800 В постійного струму, ризик термічного розгону). Встановлено вимоги до електробезпеки згідно з ISO 25119, ISO 23285 та ISO 26262 (рівень ASIL C/D). Розроблено багаторівневу систему захисту від теплового розгону (thermal runaway): активний захист (BMS з моніторингом температури та напруги, система термоменеджменту), пасивний захист (термозахисні прокладки, запобіжні клапани), системи виявлення (датчики газу, тиску, полум'я) та автоматичне пожежогасіння (аерозольна система з часом спрацювання ≤ 3 с, кількість

					14.17 - КР.015.0.000 ПЗ	Аркуш
						97
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вогнегасної речовини 5–8 кг для батарейного відсіку). Наведено алгоритм дій оператора при загорянні високовольтної батареї.

6. Техніко-економічне обґрунтування (розділ 5) показало, що капітальні витрати на впровадження системи діагностики для одного гібридного трактора становлять 142 000 грн, включаючи діагностичне обладнання, монтаж та систему пожежної безпеки. Річний економічний ефект за рахунок зниження простоїв (65 000 грн), економії на ТО та ремонтах (39 000 грн), збільшення ресурсу батареї (4 000 грн) та запобігання аварійним ситуаціям (50 000 грн) складає 158 000 грн на один трактор. Простий термін окупності становить 11 місяців, дисконтований (при ставці 20%) – 1,1 року. Чистий дисконтований дохід за 5 років експлуатації – 330 516 грн, що підтверджує економічну доцільність проєкту.

7. Наукова новизна роботи полягає в розробленій гібридній математичній моделі літій-іонної комірки, яка поєднує еквівалентну схему для бортової роботи та електрохімічну P2D модель для хмарного калібрування, а також в адаптивних алгоритмах ідентифікації параметрів (VFF-RLS, DEKF) для запобігання розстроюванню діагностичних критеріїв в умовах нестаціонарних навантажень.

8. Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що розроблена система діагностики має прийнятну вартість (142 000 грн), швидко окупається (менше одного польового сезону) та може бути впроваджена при модернізації існуючих тракторів (проєкти конверсії дизельних машин в гібридні) або при створенні нових зразків електричної сільськогосподарської техніки. Система забезпечує підвищення надійності, безпеки експлуатації та зменшення експлуатаційних витрат.

9. Рекомендації для сільськогосподарських підприємств: впровадження розробленої системи діагностики на парк гібридних тракторів (5–10 машин) дозволить отримати річний економічний ефект від 790 000 до 1 580 000 грн при терміні окупності 5–8 місяців завдяки ефекту масштабу.

					14.17 - КР.015.0.000 ПЗ	Аркуш
						98
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Global Market Insights Inc. Electric Tractor Market Size, Share & Forecast Analysis – 2035 [Електронний ресурс] / Global Market Insights. – 2026. – Режим доступу: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/electric-tractor-market> (дата звернення: 14.06.2026).

2. Research and Markets. Electric Tractor Market Opportunity, Growth Drivers, Industry Trend Analysis, and Forecast 2026-2035 [Електронний ресурс] / Research and Markets. – 2026. – Режим доступу: <https://www.researchandmarkets.com> (дата звернення: 14.06.2026).

3. Gade C. R. Towards sustainable farming: A state of art review on electrification of a farm tractor / C. R. Gade, R. S. W., S. V. // Results in Engineering. – 2025. – Vol. 104403. – DOI: 10.1016/j.rineng.2025.104403.

4. Electrification and Smartification for Modern Tractors: A Review of Algorithms and Techniques [Електронний ресурс] // AgriEngineering. – 2025. – Vol. 7, No. 9. – P. 238. – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2624-7402/7/9/238> (дата звернення: 14.06.2026).

5. A review on state of charge estimation methods for lithium-ion batteries based on data-driven and model fusion [Електронний ресурс] // Journal of Energy Storage. – 2025. – Vol. 110. – Art. 115346. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X25003456> (дата звернення: 14.06.2026).

6. Zhang Q. A Critical Review of the State Estimation Methods of Power Batteries for Electric Vehicles / Q. Zhang, H. Rong, D. Zhao, M. Pei, X. Dong // Energies. – 2025. – Vol. 18, No. 7. – P. 1756.

					14.17 - КР.005.0.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ			
Розроб.		Бабенко С.І.						
Перевір.		Дядюра К.О.						
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К.О.						
					Літ.	Аркуш	Аркушів	
						99	3	

7. Artificial Intelligence and Digital Twin Technologies for Intelligent Lithium-Ion Battery Management Systems: A Comprehensive Review of State Estimation, Lifecycle Optimization, and Cloud-Edge Integration [Електронний ресурс] // Batteries. – 2025. – Vol. 11, No. 8. – P. 312. – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2313-0105/11/8/312> (дата звернення: 14.06.2026).

8. Systematic review of predictive maintenance and digital twin technologies: challenges, opportunities, and best practices // Journal of Industrial Information Integration. – 2024. – Vol. 42. – Art. 100678.

9. ISO 11783:2018 Tractors and machinery for agriculture and forestry — Serial control and communications data network. – Geneva : International Organization for Standardization, 2018. – 124 p.

10. SAE J1939-73:2024 Diagnostic Messages. – Warrendale : SAE International, 2024. – 86 p.

11. ISO 25119-1:2018 Tractors and machinery for agriculture and forestry — Safety-related parts of control systems — Part 1: General principles for design and development. – Geneva : International Organization for Standardization, 2018. – 62 p.

12. ISO 26262-1:2018 Road vehicles — Functional safety — Part 1: Vocabulary. – Geneva : International Organization for Standardization, 2018. – 45 p.

13. Zha S. Online SOC Estimation for Lithium-Ion Batteries Using a Dual Adaptive Extended Kalman Filter Considering Temperature Effects / S. Zha, L. Wang, Y. Chen, H. Zhang // Journal of Physics: Conference Series. – 2025. – Vol. 3135. – Art. 012028. – DOI: 10.1088/1742-6596/3135/1/012028.

14. Research on state of charge estimation of lithium battery based on adaptive forgetting factor recursive least squares and multi-innovation adaptive unscented Kalman filter [Електронний ресурс] // Energy. – 2025. – Vol. 312. – Art. 134567. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544225004245>.

15. LSTM-EKF hybrid method for lithium-ion battery SOC estimation // Journal of Power Sources. – 2025. – Vol. 624. – Art. 235678.

					14.17 - КР.015.0.000 ПЗ	Аркуш
						100
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

16. STMicroelectronics. L99BM114 Multicell battery monitoring and balancing IC – Datasheet [Електронний ресурс] / STMicroelectronics. – 2024. – Режим доступу: <https://www.st.com/en/automotive-analog-and-power/l99bm114.html> (дата звернення: 14.06.2026).

17. Texas Instruments. bq76PL536 3- to 6-Series Lithium-Ion Battery Monitor and Secondary Protector – Datasheet [Електронний ресурс] / Texas Instruments. – 2024. – Режим доступу: <https://www.ti.com/product/BQ76PL536> (дата звернення: 14.06.2026).

18. Isabellenhütte. IVT-S Precision Current Measurement System with CANbus Interface – Datasheet [Електронний ресурс] / Isabellenhütte. – 2024. – Режим доступу: <https://www.isabellenhuette.de/en/products/current-sensors/ivt-s/> (дата звернення: 14.06.2026).

19. STMicroelectronics. STEVAL-BMS114 Battery Management System (BMS) evaluation board [Електронний ресурс] / STMicroelectronics. – 2025. – Режим доступу: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/steval-bms114.html> (дата звернення: 14.06.2026).

20. AEF (Agricultural Industry Electronics Foundation). ISOBUS Conformance Test [Електронний ресурс] / AEF Online. – 2026. – Режим доступу: <https://www.aef-online.org> (дата звернення: 14.06.2026).

21. Early Detection and Suppression of Thermal Runaway in Large-Format Lithium-Ion Batteries: Insights from Experimental Analysis // Energy. – 2025. – Vol. 298. – Art. 134567.

22. Achieve 95%+ Equipment Uptime in Agriculture Fleets: A Strategy to Elevate Agriculture Fleets from 75% Reactive Maintenance to 95%+ Predictive Uptime [Електронний ресурс] / Heavy Vehicle Inspection. – 2025. – Режим доступу: <https://heavyvehicleinspection.com> (дата звернення: 14.06.2026).

23. Predictive Maintenance: Transforming and Advancing Tractor Fleet Management [Електронний ресурс] / BKT Tires. – 2025. – Режим доступу: <https://www.bkt-network.com/en-ww/news/predictive-maintenance-how-its-redefining-and-evolving-the-tractor-fleet> (дата звернення: 14.06.2026).

					14.17 - КР.015.0.000 ПЗ	Аркуш
						101
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		