

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»

АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЇ ТА АЛГОРИТМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОННОГО БЛОКУ КЕРУВАННЯ (ЕСU) ГІДРООБ'ЄМНО-МЕХАНІЧНОЇ ТРАНСМІСІЇ (VARIO/IVT) СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ТРАКТОРА

Науковий керівник: професор, д.т.н.

_____ Костянтин ДЯДЮРА

Рецензент: к.т.н.

_____ Олександр ПАНАСЮК

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

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

_____ Євгеній КОРНИЛО

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

Євгеній КОРНИЛО

1. Тема кваліфікаційної роботи:

«Аналіз конструкції та алгоритмів роботи електронного блоку керування (есу) гідрооб'ємно-механічної трансмісії (vario/ivt) сільськогосподарського трактора»
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 керування трансмісією трактора, система бортової діагностики (OBD), сенсорна мережа (датчики частоти обертання, тиску, температури, положення), виконавчі механізми з широтно-імпульсною модуляцією пропорційних електромагнітних клапанів.

4. **Предмет дослідження:** структурна організація ECU трансмісії та його інтеграція в CAN-мережу (SAE J1939); алгоритми збору сигналів з сенсорів та керування ШІМ-клапанами; методи бортової діагностики та захисту трансмісії від теплових і механічних перевантажень; небезпечні виробничі фактори; техніко-економічні показники ефективності впровадження.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

5.1. Теоретико-методичний розділ: виконати аналіз еволюції трансмісій сільськогосподарських тракторів (від ступінчастих механічних до гідрооб'ємно-механічних CVT/IVT); дослідити функціональне призначення та апаратну еволюцію електронних блоків керування (ECU) трансмісією; виконати кінематичний та силовий аналіз планетарного механізму розподілу потоків потужності (формула Вілліса, рівняння моментів)

5.2. Дослідницько-аналітичний розділ: розробити структурну схему ECU трансмісії та її інтеграцію в мультиплексну мережу трактора (шина CAN, стандарт SAE J1939); дослідити виконавчі механізми (широотно-імпульсну модуляцію пропорційних електромагнітних клапанів) та параметри ШІМ-керування

5.3. Проєктно-рекомендаційний розділ: виконати розрахунок економії паливно-мастильних матеріалів завдяки оптимізації навантажувальних режимів ДВЗ електронним блоком керування

6. Орієнтовний перелік графічного та табличного матеріалу:

6.1. До теоретико-методичного розділу:

схема розподілу потоків потужності в планетарному механізмі; математичні моделі гідронасоса та сервопривода

6.2. До дослідницько-аналітичного розділу:

Структурна схема ECU трансмісії з інтеграцією в CAN-мережу J1939; схеми підключення сенсорів (датчики Холла, тиску, температури, положення)

6.3. До проєктно-рекомендаційного розділу:

Таблиці вихідних даних для розрахунку економічної ефективності

7. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:

Матеріали стандартів: ISO 11783 (ISOBUS), SAE J1939, ISO 26262 (функційна безпека), ДСТУ EN ISO 12100 (оцінка ризиків); статистичні дані щодо травматизму при роботі з гідравлічними системами високого тиску (HSE, BLS)

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

_____ Євгеній КОРНИЛО

Науковий керівник

_____ Костянтин ДЯДЮРА

Гарант ОП

_____ Дмитро ДОМУЩІ

РЕФЕРАТ

Дипломний проект містить: 90 сторінок, 19 рисунків, 18 таблиць, 23 джерела за переліком посилань.

Об'єкт дослідження: процеси керування трансмісією трактора, система бортової діагностики (OBD), сенсорна мережа (датчики частоти обертання, тиску, температури, положення), виконавчі механізми з широтно-імпульсною модуляцією пропорційних електромагнітних клапанів.

Мета роботи: підвищення паливної ефективності, продуктивності машинно-тракторного агрегату та рівня безпеки при експлуатації тракторів шляхом впровадження електронного блоку керування (ECU) трансмісією з інтеграцією в мультиплексну мережу SAE J1939, системи бортової діагностики з тепловим та механічним захистом трансмісії.

Методи дослідження: аналітичний огляд науково-технічної літератури та галузевих стандартів (ISO, SAE, IEC); структурне та функціональне моделювання систем керування; чисельні методи розрахунку економії паливно-мастильних матеріалів; матричний аналіз ризиків виробничих факторів; дисконтування грошових потоків для оцінки інвестиційної привабливості (NPV, IRR, DPP, PI).

Отримані результати: Розроблено структурну схему ECU трансмісії та її інтеграцію в CAN-мережу за стандартом SAE J1939. Обґрунтовано вибір сенсорів (ефект Холла, тензорезисторні датчики тиску, термістори) та ШІМ-методу керування пропорційними клапанами з частотою 50–500 Гц.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ТРАНСМІСІЯ, ЕЛЕКТРОННИЙ БЛОК КЕРУВАННЯ (ECU), ШИНА CAN, SAE J1939, ДАТЧИК ХОЛЛА, ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНА МОДУЛЯЦІЯ (ШІМ), БОРТОВА ДІАГНОСТИКА (OBD), БЕЗСТУПІНЧА ТРАНСМІСІЯ (IVT)

					14.17 - КР.005.0.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РЕФЕРАТ	Літ.	Аркуш	Аркушів
Розроб.		Корнило						
Перевір.		Дядюра К. О.					5	1
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						

ЗМІСТ

	С.
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ОГЛЯД СИСТЕМ КЕРУВАННЯ БЕЗСТУПІНЧАСТИМИ ТРАНСМІСІЯМИ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ	10
1.1. Еволюція трансмісій: від ступінчастих механічних до гідрооб'ємно-механічних (CVT/IVT).....	10
1.2. Огляд кінематичних схем та архітектури трансмісій типу Vario (Fendt) та AutoPowr/IVT (John Deere).....	15
1.3. Функціональне призначення та апаратна еволюція електронних блоків керування (ECU) трансмісією.....	19
Висновки.....	27
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ АЛГОРИТМІВ КЕРУВАННЯ ГІДРООБ'ЄМНО-МЕХАНІЧНОЮ ТРАНСМІСІЄЮ...	29
2.1 Кінематичний та силовий аналіз планетарного механізму розподілу потоків потужності.....	29
2.2 Математичне моделювання керування гідростатичною гілкою: регулювання кута нахилу похилої шайби гідромашин.....	34
2.3 Алгоритми узгодження роботи ДВЗ та трансмісії (Tractor Management System – TMS) для мінімізації питомої витрати пального	38
2.4 Динаміка замкненого контуру керування: ПІД-регулювання та запобігання розстроюванню режимів при змінному тяговому опорі.....	42
Висновки.....	47
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ АПАРАТНО-ПРОГРАМНОЇ ЧАСТИНИ ECU ТА СИСТЕМИ БОРТОВОЇ ДІАГНОСТИКИ.....	48

					14.17 - КР.005.0.000 ПЗ										
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата											
Розроб.		Корнило			ЗМІСТ					Літ.		Аркуш		Аркушів	
Перевір.		Дядюра К. О.										6		2	
Реценз.															
Н. Контр.															
Затверд.		Дядюра К. О.													

3.1 Структурна схема ECU трансмісії та її інтеграція в мультиплексну мережу трактора (шина CAN, стандарт SAE J1939).....	48
3.2 Сенсорна мережа: датчики частоти обертання (ефект Холла), тиску в гідросистемі, температури та положення.....	51
3.3 Виконавчі механізми: широтно-імпульсна модуляція (ШІМ) пропорційних електромагнітних клапанів.....	53
3.4 Алгоритми бортової діагностики (OBD) та стратегії захисту трансмісії від теплових і механічних перевантажень.....	54
Висновки.....	58
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ	60
4.1 Аналіз небезпечних виробничих факторів під час експлуатації та діагностики тракторів з електронно-гідравлічними системами.....	60
4.2 Вимоги безпеки під час технічного обслуговування гідравлічних магістралей високого тиску (до 500 бар).....	66
4.3 Електробезпека під час роботи з бортовими мікропроцесорними системами та діагностичним обладнанням.....	69
Висновки.....	71
РОЗДІЛ 5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЄКТУ	76
5.1 Розрахунок економії паливно-мастильних матеріалів завдяки оптимізації навантажувальних режимів ДВЗ електронним блоком керування.....	76
5.2 Визначення економічного ефекту від підвищення продуктивності машинно-тракторного агрегату (МТА).....	78
5.3 Розрахунок показників економічної ефективності використання тракторів з IVT порівняно з механічними аналогами.....	79
Висновки.....	84
ВИСНОВКИ.....	86
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	88

ВСТУП

Актуальність теми. Трактори провідних світових виробників (John Deere, Fendt, New Holland, Claas) оснащуються електронними блоками керування (ECU) трансмісією, що дозволяють оптимізувати навантажувальні режими двигуна, знижувати витрату палива, підвищувати продуктивність машинно-тракторних агрегатів (МТА) та забезпечувати діагностування несправностей у реальному часі. Інтеграція цих систем у мережу за стандартом SAE J1939 (CAN-шина) та ISO 11783 (ISOBUS) створює передумови для реалізації концепції точного землеробства та безпілотного керування технікою. Водночас експлуатація та діагностика тракторів з електронно-гідравлічними системами пов'язана з підвищеними ризиками для персоналу: гідравлічні системи високого тиску (до 500 бар) створюють небезпеку інжекційних травм; бортові мікропроцесорні системи та діагностичне обладнання потребують дотримання спеціальних вимог електробезпеки; механічні рухомі частини трансмісії можуть спричинити травмування. Отже, питання охорони праці при обслуговуванні сучасної техніки є не менш актуальними, ніж технічне вдосконалення систем керування.

Таким чином, комплексне дослідження апаратно-програмної частини ECU трансмісії, системи бортової діагностики, безпечних методів роботи та економічної ефективності впровадження таких систем є своєчасним і має практичне значення для аграрних підприємств України.

Об'єкт дослідження – процеси керування трансмісією трактора, система бортової діагностики (OBD), сенсорна мережа (датчики частоти обертання, тиску, температури, положення), виконавчі механізми з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) пропорційних електромагнітних клапанів.

					14.17 - КР.005.0.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ВСТУП	Літ.	Аркуш	Аркушів
Розроб.		Корнило						
Перевір.		Дядюра К. О.					8	3
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						

Предмет дослідження – структурна організація ECU трансмісії та його інтеграція в CAN-мережу (SAE J1939); алгоритми збору сигналів з сенсорів та керування ШІМ-клапанами; методи бортової діагностики та захисту трансмісії від теплових і механічних перевантажень; небезпечні виробничі фактори.

Мета роботи – підвищення паливної ефективності, продуктивності машинно-тракторного агрегату та рівня безпеки при експлуатації тракторів шляхом впровадження електронного блоку керування трансмісією з інтеграцією в мультиплексну мережу SAE J1939, системи бортової діагностики з тепловим та механічним захистом трансмісії.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

1. Проаналізувати структурну схему ECU трансмісії та його інтеграцію в мультиплексну мережу трактора (шина CAN, стандарт SAE J1939).
2. Дослідити сенсорну мережу (датчики частоти обертання на ефекті Холла, тиску, температури, положення) та обґрунтувати їх вибір.

Методи дослідження. У роботі використано: аналітичний огляд науково-технічної літератури та галузевих стандартів (ISO, SAE, IEC, ДСТУ); структурне та функціональне моделювання систем керування; чисельні методи розрахунку економії паливно-мастильних матеріалів; матричний аналіз ризиків виробничих факторів; метод дисконтування грошових потоків для оцінки інвестиційної привабливості (NPV, IRR, DPP, PI).

Наукова новизна одержаних результатів. Удосконалено алгоритми адаптивного керування ШІМ-клапанами пропорційного регулювання тиску в гідравлічних контурах трансмісії з використанням зворотного зв'язку за струмом та температурної компенсації.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблені рекомендації можуть бути використані сільськогосподарськими підприємствами та фермерськими господарствами при прийнятті рішень про модернізацію парку тракторів (перехід на моделі з IVT/CVT та електронним керуванням), а також при створенні системи охорони праці для персоналу, що обслуговує електронно-гідравлічні системи.

					14.17 - КР.005.0.000 ПЗ	Аркуш
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ ТА ОГЛЯД СИСТЕМ КЕРУВАННЯ БЕЗСТУПІНЧАСТИМИ ТРАНСМІСІЯМИ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ

1.1 Еволюція трансмісій: від ступінчастих механічних до гідрооб'ємно-механічних (CVT/IVT)

Історичний розвиток силових передач тракторів

Перші трактори, що з'явилися на межі XIX–XX століть, мали найпростіші ланцюгові або пасові передачі, які забезпечували лише одну-дві швидкості. З розвитком двигунів внутрішнього згоряння та зростанням вимог до продуктивності постала необхідність у розширенні діапазону швидкостей та покращенні тягово-зчіпних властивостей. Поява механічних ступінчастих коробок передач (КПП) стала значним кроком уперед, дозволивши змінювати передавальне число шляхом перемикання зубчастих пар. Протягом першої половини XX століття механічні КПП залишалися домінуючим типом трансмісій, постійно вдосконалюючись: збільшувалася кількість передач (від 3–4 до 8–12), впроваджувалися синхронізатори, покращувалася герметизація та змащення [1, 2].

Основні недоліки ступінчастих трансмісій

Незважаючи на надійність і високий механічний ККД (до 94–96%), ступінчасті коробки передач мали низку принципових недоліків [3]:

- Розрив потоку потужності під час перемикання передач.

					14.17 - КР.005.1.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Корнило			РОЗДІЛ 1		Літ.	Аркуш
Перевір.		Дядюра К. О.						Аркушів
Реценз.							10	12
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						

– При перемиканні відбувається короткочасне відключення двигуна від коліс, що призводить до втрати тягового зусилля, зниження продуктивності та додаткового навантаження на трансмісію. Особливо це критично під час оранки на важких ґрунтах, де навіть частка секунди може спричинити зупинку агрегату.

– Дискретність зміни швидкості. Крок між сусідніми передачами становить 15–25%, що не дозволяє точно підібрати оптимальну швидкість для конкретних умов роботи. Часто оптимальна швидкість опиняється між двома передачами, і оператор змушений обирати менш ефективний режим [4].

– Висока складність управління. Сучасні трактори можуть мати 24, 32 або навіть 48 передач вперед, що вимагає від оператора високої кваліфікації та постійної уваги для вибору правильної передачі в залежності від навантаження. Незважаючи на впровадження систем перемикання під навантаженням (powershift), автоматизація таких трансмісій залишається складною і дорогою.

– Велика кількість рухомих деталей. Механічні КПП містять десятки зубчастих коліс, синхронізаторів, муфт і підшипників, що збільшує масу, вартість та потребу в технічному обслуговуванні.

Проміжні рішення: гідротрансформатори та напівавтоматичні КПП.

Для подолання розриву потужності інженери почали застосовувати гідротрансформатори, які забезпечують плавне зрушення з місця та деяке демпфування навантажень, але самі по собі не дають безступінчастого регулювання. У 1960–1980-х роках з'явилися так звані напівавтоматичні КПП з перемиканням без розриву потужності (powershift), де кожна передача має власну пакетну багатодискову муфту. Перемикання відбувається за командою електроніки або оператора, але кількість передач залишається дискретною (типово 4–6 в одному діапазоні). Такі трансмісії використовуються донині в багатьох тракторах середнього та важкого класу (наприклад, John Deere PowerShift, Case IH PowerDrive). Однак вони не вирішують головну проблему — дискретність [5].

Перші концепції безступінчастих передач для тракторів [6]

					14.17 - КР.005.1.000 ПЗ	Аркуш
						11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ідея безступінчастої зміни передавального числа відома давно. Ще на початку XX століття використовувалися варіатори з конусами та ременями (як на верстатах), але для потужних тракторів вони не підходили через низьку довговічність та обмежену здатність передавати крутний момент. У 1950–1970-х роках активно розвивалися гідростатичні трансмісії (насос — гідромотор), але їхній ККД при передачі великої потужності був незадовільним (70–80%), а вартість — надзвичайно високою. Компромісом стало **розщеплення потоку потужності** (power split), коли лише частина енергії проходить через гідрооб'ємну передачу, а основна — через високоефективний механічний тракт. Ця концепція лягла в основу всіх сучасних CVT [7, 8].

Поява серійних CVT/IVT (Fendt Vario, ZF Eccom та ін.).

Першою компанією, яка наважилася запустити в серійне виробництво трактор з гідрооб'ємно-механічною трансмісією, стала німецька Fendt. У 1995 році на виставці Agritechnica був представлений Fendt Favorit 926 Vario, а з 1996 року розпочалося його серійне виробництво. Трансмісія отримала назву **Vario** (похідне від variable — змінний). Вона забезпечувала безступінчасте регулювання швидкості в діапазоні від 0,02 до 50 км/год, що стало сенсацією. Fendt запатентував багато ключових конструктивних рішень (наприклад, особливу конструкцію гідромотора з кутом відхилення до 45°) [9].

Майже одночасно з Fendt, німецька трансмісійна компанія ZF представила свою систему **Eccom** (Electronic Continuously Variable Compact Transmission), яка використовувала схожу концепцію, але з іншими технічними рішеннями. Трансмісії ZF Eccom встановлювалися на трактори Steyr, а пізніше — на деякі моделі Case IH. У 1999 році Steyr почав випуск тракторів з CVT під назвою S-Matic [10].

John Deere спочатку використовував трансмісію ZF Eccom, але згодом розробив власну гідрооб'ємно-механічну трансмісію, яку назвав AutoPowr (згодом — IVT). Вона вперше з'явилася на тракторах серії 7020 у 2000-х роках. Відмінність AutoPowr/IVT від Vario полягала в конструкції планетарного механізму та способі організації діапазонів. IVT забезпечує безступінчасте

					14.17 - КР.005.1.000 ПЗ	Аркуш
						12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

регулювання не лише вперед, але й назад, а також має режим нейтралі з можливістю стояти на місці без механічного гальма [11].

Інші виробники не забарилися: CLAAS розробив CVT для своїх комбайнів (Cmatic), а потім і для тракторів (у співпраці з ZF). New Holland пропонує трансмісію CVT на багатьох моделях. Сьогодні практично всі провідні бренди (Fendt, John Deere, Case IH, New Holland, Massey Ferguson, CLAAS, Deutz-Fahr) мають у лінійці трактори з CVT/IVT [12].

Класифікація безступінчастих трансмісій за рівнем автоматизації

Сучасні CVT/IVT можна умовно поділити на три покоління за ступенем автоматизації [13]:

– *Перше покоління (1995–2005)*: Прості системи, де оператор задає швидкість за допомогою важеля, а ECU підтримує її шляхом регулювання кута нахилу гідромашин. Перемикання діапазонів відбувається автоматично. Відсутні складні режими (підтримка потужності, крутного моменту, навігаційний круїз-контроль).

– *Друге покоління (2005–2015)*: Інтеграція з CAN-шиною, обмін даними з ECU двигуна. Поява режимів: підтримка постійної частоти обертання двигуна (режим «економія палива»), підтримка постійного крутного моменту на колесах (для глибокої оранки), темпомат (круїз-контроль). Можливість налаштування характеру роботи (спортивний, економічний, транспортний).

– *Третє покоління (2015–теперішній час)*: Глибока інтеграція з ISOBUS, GPS-навігацією, системою керування знаряддями. Режими: підтримка заданої швидкості польових робіт з корекцією за сигналом GPS (навігаційний круїз-контроль). Автоматичне зниження швидкості на поворотах. Прогнозування навантаження та оптимізація передавального числа для мінімізації витрати палива. Діагностика в реальному часі з передачею даних у хмару (телематика).

Техніко-економічні переваги безступінчастих трансмісій

Досвід експлуатації та польові випробування підтверджують суттєві переваги CVT/IVT у порівнянні зі ступінчастими трансмісіями:

					14.17 - КР.005.1.000 ПЗ	Аркуш
						13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Підвищення продуктивності на 10–25% за рахунок роботи в оптимальному діапазоні швидкості без розриву потужності.
- Економія палива на 8–15% завдяки підтримці оптимальної частоти обертання двигуна та мінімізації пробуксовки (особливо в режимі підтримки крутного моменту).
- Зменшення навантаження на оператора: немає потреби постійно перемикати передачі, що дозволяє зосередитися на контролі знарядь та навігації. Це підвищує безпеку та якість робіт.
- Можливість точної підтримки заданої швидкості при змінному навантаженні (наприклад, при збиранні врожаю, де потрібна стала швидкість руху для якісної роботи жатки).
- Вища маневреність: плавна зміна напрямку руху без механічних ударів, що особливо цінно при роботі з начіпним обладнанням на поворотах.

Недоліки CVT/IVT включають вищу початкову вартість (на 30–50% більше, ніж механічна КПП), підвищені вимоги до якості гідравлічної рідини та її заміни, а також складність діагностики та ремонту, що потребує висококваліфікованих фахівців (рисунки 1.1) [14].



Рисунки 1.1 – Системи керування безступінчастими трансмісіями сільськогосподарської техніки

1.2 Огляд кінематичних схем та архітектури трансмісій типу Vario (Fendt) та AutoPowr/IVT (John Deere)

Загальний принцип побудови гідрооб'ємно-механічної трансмісії

Усі сучасні CVT/IVT будуються за схемою, що складається з трьох основних частин (рисунок 1.2) [15]:

- Вхідний планетарний механізм (подільник потужності), який розділяє потік потужності від двигуна на дві гілки: механічну (зубчасті колеса) і гідростатичну (насос–мотор).
- Гідрооб'ємна передача (гідростатична гілка): аксіально-поршневий насос з регульованим робочим об'ємом (частота обертання пропорційна двигуну) і гідромотор (регульований або нерегульований). Зміна кута нахилу шайби насоса або мотора змінює частоту обертання вихідного вала гідромашини.
- Сумуючий планетарний механізм (складальний редуктор), який об'єднує потоки від механічної та гідростатичної гілок, передаючи сумарний крутний момент на вихідний вал (далі — на головну передачу та диференціал).
- Діапазонне перемикання (перемикання діапазонів) — додаткові зубчасті передачі, що дозволяють змінити діапазон швидкостей, перемикання відбувається автоматично без розриву потужності за допомогою пакетних муфт.

Розподіл потужності між гілками залежить від передавального числа. При прямому ході (середні швидкості) основна потужність (60–70%) передається через механічний тракт (високий ККД), а через гідростатичний проходить лише невелика частина (20–40%), яка використовується для плавного регулювання. На старті (швидкість близька до 0) практично вся потужність йде через гідростатичну передачу, забезпечуючи плавне зрушення. На максимальній швидкості знову домінує механічний канал [16].

					14.17 - КР.005.1.000 ПЗ	Аркуш
						15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

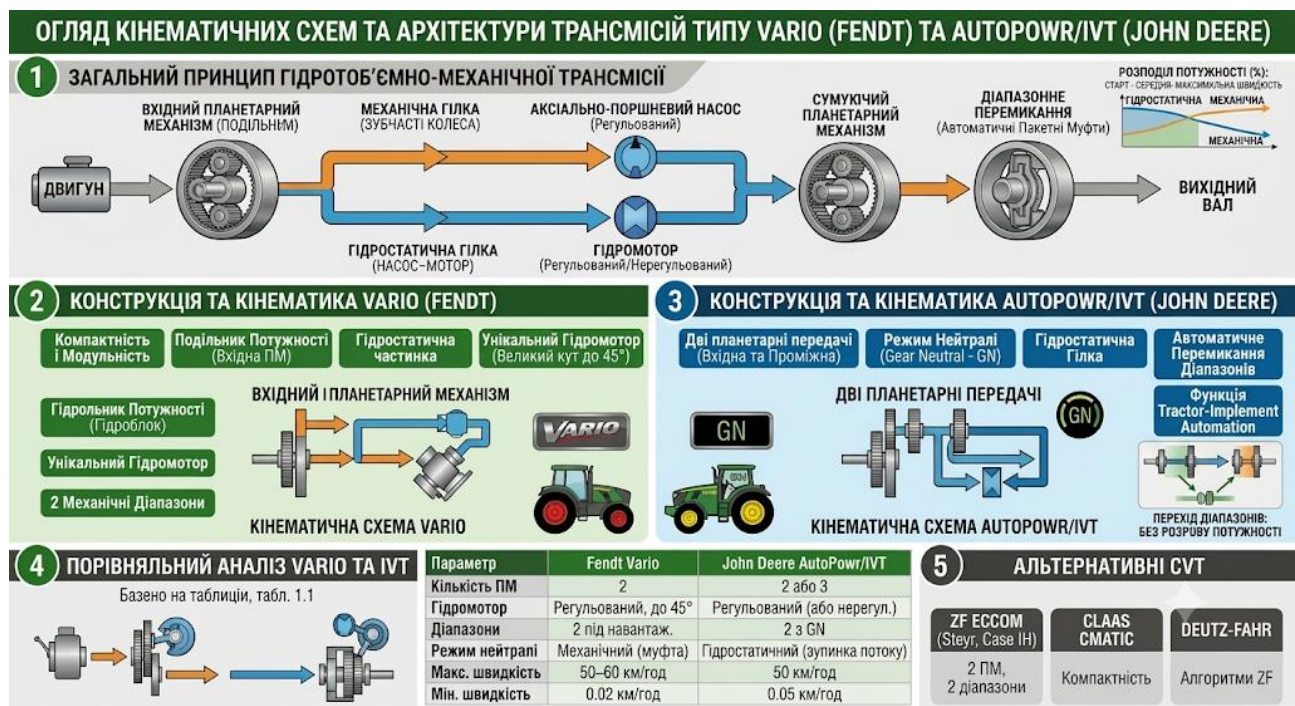


Рисунок 1.1 – Кінематичні схеми та архітектура трансмісій

Конструкція та кінематика Vario (Fendt)

Трансмісія Vario фірми Fendt (розробляється разом з дочірньою компанією Steyr Antriebstechnik) вирізняється компактністю та модульністю. Основні компоненти [17]:

Подільник потужності (вхідна планетарна передача). На сонячну шестерню подається крутний момент від двигуна через демпфер. Зубчастий вінцевий фланець (води́ло) передає частину потужності на гідронасос, а сонячна шестерня (або води́ло в інших модифікаціях) — на механічну гілку. Кінематика підібрана так, що при нейтральному положенні гідромотора (швидкість=0) гідравлічна гілка блокується, а механічна передача працює в режимі «нульового потоку». Унікальною особливістю Vario є застосування гідромотора з великим кутом відхилення шайби (до 45°), що дозволяє отримати широкий діапазон регулювання без додаткових механічних перемикачів діапазонів. В оригінальній конструкції Vario використовується лише два механічних діапазони, що перемикаються під навантаженням за допомогою багатодискових муфт, змочених в оливі. Перемикання є майже непомітним, оскільки ECU синхронізує кути нахилу гідромашини.

Гідростатична частина Vario. Насос — аксіально-поршневий, регульований, з'єднаний безпосередньо з водилом планетарного механізму. Мотор — також аксіально-поршневий, регульований, з великим кутом повороту. Обидві гідромашини мають спільний корпус і є частиною єдиного гідроблоку, що забезпечує мінімальний зовнішній контур трубопроводів. Робоча рідина — спеціальне тракторне масло з високим індексом в'язкості та антифрикційними присадками.

Сумуюча планетарна передача. Об'єднує момент від механічної гілки (через шестерні) та від гідромотора, подаючи результуючий крутний момент на вихідний вал. Співвідношення плеч розраховано так, що зміна кута нахилу гідромотора дозволяє плавно змінювати загальне передавальне число в заданому діапазоні.

Управління. Керування кутами нахилу насоса та мотора здійснюється електронним блоком (ECU) через пропорційні гідравлічні клапани. Датчики кутів нахилу встановлені безпосередньо на гідромашинах, що забезпечує замкнутий зворотній зв'язок. Система здатна за секунди змінювати кути, забезпечуючи швидку реакцію на зміну навантаження.

Результат: безступінчасте регулювання від 0,02 до 40–60 км/год (залежно від виконання) з ККД, порівнянним з механічною КПП (до 92–94% у широкому діапазоні). На дуже низьких швидкостях (<1 км/год) домінує гідростатична передача, на вищих — механічна.

Конструкція та кінематика AutoPowr/IVT (John Deere)

Трансмсія John Deere AutoPowr (ранні назви) та IVT (Infinitely Variable Transmission) має дещо іншу архітектуру. Вона також використовує принцип розщеплення потужності, але компоновання інше, що відображає патентні особливості.

Планетарний подільник. У трансмісіях John Deere часто використовуються дві планетарні передачі (вхідна та проміжна). Одна з них виконує функцію подільника, а інша — сумуючого механізму.

					14.17 - КР.005.1.000 ПЗ	Аркуш
						17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Гідростатична гідлка. Складається з регульованого аксіально-поршневого насоса та нерегульованого (або регульованого в новіших версіях) гідромотора. Робочий тиск досягає 400–450 бар.

IVT включає також режим нейтралі (GN – gear neutral). Це дозволяє трактору стояти на місці без вмикання механічного гальма, що дуже зручно при навішуванні знарядь та на схилах. Режим нейтралі реалізується шляхом встановлення гідромотора в таке положення, коли сумарна потужність на вихідному валу стає нульовою. На практиці це зменшує знос гальм та підвищує безпеку (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1 – Порівняльний аналіз Vario та IVT

Параметр	Fendt Vario	John Deere AutoPowr/IVT
Кількість планетарних механізмів	2 (вхідний та сумуючий)	2 або 3 в залежності від моделі
Гідромотор	Регульований, великий кут до 45°	Регульований (або нерегульований у старих версіях)
Діапазони	2, перемикання під навантаженням	2, з нейтральним режимом (GN)
Режим нейтралі	Механічний (муфта)	Гідростатичний (зупинка потоку)
Максимальна швидкість	50–60 км/год	50 км/год
Мінімальна швидкість	0,02 км/год	0,05 км/год
Особливості	Компактний гідроблок, великий кут нахилу мотора	Наявність GN, інтеграція з системою автоматичного керування
Ринкова частка (умовно)	Лідер у Європі	Сильна позиція в Америці та світі

Перемикання діапазонів. IVT має два діапазони: перший — для польових робіт (0–20 км/год), другий — для транспортних операцій (20–50 км/год). Перехід між діапазонами відбувається автоматично без розриву потужності. Завдяки широкому діапазону регулювання гідростатичної частини нижня межа

першого діапазону може бути дуже низькою (0,05 км/год), а верхня межа другого — високою (50+ км/год).

Керування. ECU трансмісії отримує інформацію від датчиків частоти обертання вхідного та вихідного валів, кутів нахилу насоса та мотора, тиску в магістралях, температури оливи. Керування діапазонами здійснюється за допомогою гідравлічних пакетних муфт, що працюють без розриву потужності завдяки точному синхронізуванню кутів нахилу. John Deere також пропонує функцію Vario-Tronic для точного регулювання швидкості на поворотах [15].

Обидві системи забезпечують високий ККД (до 94% у широкому діапазоні) та плавність регулювання [16]. Відмінності в кінематиці впливають на відчуття при роботі (особливо на низьких швидкостях та при реверсі), але обидві вважаються одними з найкращих у галузі [17].

Альтернативні CVT (ZF Eccom, CLAAS Cmatic, Deutz-Fahr).

Для повноти картини варто згадати інші системи:

– *ZF Eccom (Steyr, Case IH)* — побудована на двох планетарних передачах та регульованому гідронасосі/нерегульованому моторі. Забезпечує два діапазони, нейтраль.

– *CLAAS Cmatic* — встановлюється на комбайни CLAAS, а також на трактори (розробка спільно з ZF). Відрізняється компактністю та надійністю.

– *Deutz-Fahr* — використовує CVT на основі ZF, але з власними алгоритмами керування.

1.3 Функціональне призначення та апаратна еволюція електронних блоків керування (ECU) трансмісією

Роль ECU в системі безступінчастої трансмісії

Електронний блок керування (ECU) трансмісією є мозком CVT/IVT. Він виконує три основні функції [19]:

1. *Регулювання швидкості руху* — підтримання заданої оператором швидкості шляхом зміни кутів нахилу гідронасоса та/або гідромотора. При

					14.17 - КР.005.1.000 ПЗ	Аркуш
						19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

збільшенні навантаження (підйом, більш щільний ґрунт) ECU збільшує передавальне число (знижує швидкість) автоматично, утримуючи частоту обертання двигуна в оптимальній зоні.

2. *Керування гідростатичною частиною* — пропорційне регулювання кутів нахилу шайб, що визначає різницю швидкостей гілок і, відповідно, вихідну швидкість. Задавальним впливом служить або положення педалі акселератора (аналогічно автомобілю), або задана швидкість (круїз-контроль).

3. *Діагностика та захист* — контроль тиску, температури, частоти обертання, виявлення пробуксовок, перегріву, зниження рівня оливи. При виявленні аварійних режимів ECU може обмежити потужність, перейти в аварійний режим (limp home) або повністю зупинити трансмісію, інформуючи оператора.

Крім того, ECU відповідає за перемикання діапазонів (у CVT з двома діапазонами), комунікацію з іншими блоками (двигун, гальмівна система, ISOBUS, телематика) та реалізацію додаткових режимів (автоматичне зниження швидкості на поворотах, підтримка заданого крутного моменту двигуна тощо).

Елементна база сучасного ECU трансмісії (рисунок 1.3)

Типовий ECU трансмісії складається з наступних апаратних компонентів:

– *Мікроконтролер (MCU)*. Сьогодні це 32-розрядні мікросхеми на ядрі ARM Cortex (Cortex-M4/M7) або PowerPC (наприклад, Infineon AURIX, STM32). Тактова частота від 80 до 300 МГц. Об'єм флеш-пам'яті 512 КБ – 4 МБ, RAM – 64-512 КБ. Наявність FPU (блок операцій з плаваючою точкою) для реалізації складних алгоритмів регулювання.

– *Інтегральні схеми керування гідравлічними клапанами* — драйвери пропорційних соленоїдів з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ), здатні видавати струм до 2–3 А на клапан. Зазвичай застосовуються спеціалізовані чипи (наприклад, Infineon TLE, Allegro A4950).

– *Схеми обробки сигналів датчиків* — підсилювачі для аналогових сигналів (тиск, температура, кути нахилу), формувачі імпульсів для частоти обертання (Холла, індуктивні датчики). Багато сучасних датчиків мають

					14.17 - КР.005.1.000 ПЗ	Аркуш
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

цифровий інтерфейс SENT (Single Edge Nibble Transmission) або PSI5, що вимагає відповідних приймачів.



Рисунок 1.3 – Апаратна еволюція електронних блоків ккерування трансмісією

– *Драйвери виконавчих механізмів (крім клапанів)* — наприклад, для керування муфтами перемикання діапазонів, гальмом стоянки, допоміжними насосами.

– *Блок живлення* – стабілізатори напруги 5 В, 3,3 В, живлення від бортової мережі 12/24 В з захистом від перенапруги, зворотної полярності та короткого замикання.

– *Інтерфейси зв'язку* – CAN 2.0 (ISO 11898) з трансіверами (наприклад, SN65HVD230), часто два незалежні канали (один для внутрішньої мережі трансмісії, інший для зовнішньої – J1939/ISOBUS). Можливі Ethernet (для високошвидкісної передачі даних) та LIN (для периферійних пристроїв).

– *Пам'ять даних (EEPROM)* для зберігання калібрувань, налаштувань, діагностичних кодів та напрацювань.

Еволюція апаратної платформи ECU.

Простежимо основні віхи розвитку [20]:

– 1990-ті роки: Використання 16-розрядних мікроконтролерів (Intel 80C196, Motorola 68HC16). Частота 8–20 МГц. Пам'ять невелика, складні алгоритми регулювання обмежені. Переважна більшість вхідних сигналів — аналогові. Зв'язок з іншими ECUs — пропрієтарні протоколи, пізніше почала з'являтися CAN (250 кбіт/с). Розмір плати — близько 200×200 мм, корпус зазвичай металевий, не герметичний, але стійкий до пилу.

– 2000-ті роки: Початок використання 32-розрядних RISC-контролерів (ARM7, PowerPC). Частота до 50–80 МГц. CAN стає стандартом. Поява пам'яті EEPROM для зберігання адаптивних даних. Розвиток багатоканальних ШІМ-драйверів. Розмір плати зменшується до 150×150 мм. Корпуси стають герметичними (IP54). Починається використання програмованих логічних контролерів (PLC) як підсистеми.

– 2010-ті роки: Поширення 32-розрядних контролерів з частотою 100–200 МГц, інтегрованими FPU та DSP-інструкціями. Використання ОС реального часу (RTOS). Значно зростає обчислювальна потужність, що дозволяє реалізувати складні алгоритми нечіткої логіки, нейронних мереж, адаптивних регуляторів. Підтримка CANopen, J1939. З'являються інтегровані діагностичні функції (слідження за параметрами, логування подій). Плати компактні (100×100 мм). Використання FPGA для реалізації швидких апаратних обчислень (наприклад, для обробки сигналів датчиків).

– 2020-ті роки і далі: Мультикодерні платформи з окремими ядрами для різних функцій (наприклад, одне ядро для зв'язку, інше — для регулювання). Частота ядер до 300 МГц та вище. Підтримка Ethernet (100BASE-T1, 1000BASE-T1) для високошвидкісного ISOBUS. Використання технологій штучного інтелекту (AI) в алгоритмах адаптації до стилю водіння та умов роботи. Кібербезпека: апаратні модулі безпеки (HSM) для захисту від несанкціонованого доступу. Оновлення програмного забезпечення по повітрю (OTA) через телематику. Підвищення ступеня захисту до IP67/IP6K9K.

–

					14.17 - КР.005.1.000 ПЗ	Аркуш
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Програмне забезпечення ECU

1. Програмне забезпечення сучасного ECU трансмісії складається з декількох ієрархічних рівнів [21]:

2. Рівень введення-виведення (I/O driver) — драйвери для АЦП, ШІМ, цифрових входів/виходів, комунікаційних інтерфейсів (CAN, LIN, Ethernet). Сюди також входить програмне забезпечення для роботи з датчиками (фільтрація, перетворення сигналів у фізичні величини).

3. Рівень операційної системи реального часу (RTOS) — управління завданнями (tasks), синхронізація, обмін повідомленнями. Популярні RTOS: FreeRTOS, OSEK, Integrity, VxWorks (промислові). RTOS забезпечує гарантований час реакції (наприклад, регулюючий контур повинен виконуватися кожні 10 мс).

4. Прикладний рівень (Application layer) — алгоритми керування трансмісією:

а) Регулятори швидкості (PID, нечіткі) — отримують різницю між заданою та поточною швидкістю та формують задавальний сигнал для кута нахилу гідромашини.

б) Керування гідростатикою — формування ШІМ-сигналів для пропорційних клапанів, контроль зворотного зв'язку за датчиками кутів.

в) Логіка перемикання діапазонів — моніторинг швидкості, навантаження, кута нахилу гідромотора для безрозривного перемикавання.

г) Режими роботи (круїз-контроль, підтримка крутного моменту, економічний, спортивний, динамічний).

д) Діагностика (обробка помилок, генерація кодів несправностей, аварійні режими, логування).

5. Рівень комунікації — реалізація протоколів J1939 (PGN, SPN, транспортні протоколи), ISOBUS (ISO 11783), OBD-II (діагностика).

6. Рівень калібрування — зберігання та керування калібрувальними параметрами (коефіцієнти регуляторів, порогові значення, карти залежностей).

					14.17 - КР.005.1.000 ПЗ	Аркуш
						23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Калібрування часто змінюється в залежності від типу трактора, шин, навантаження.

Програмне забезпечення розробляється відповідно до стандартів функційної безпеки ISO 26262 (ASIL рівні B, C, D для критичних функцій) з використанням мов C, C++, а також засобів автоматичної генерації коду (Matlab/Simulink, TargetLink) [21].

Сенсори та виконавчі пристрої, пов'язані з ECU

Для коректної роботи CVT/IVT ECU отримує сигнали від наступних сенсорів:

- Частота обертання двигуна (вхідний вал трансмісії) — індуктивний або датчик Холла.
- Частота обертання вихідного вала (швидкість трактора) — датчик на диференціалі або напіввісь.
- Кут нахилу гідронасоса (регульованого) — потенціометричний або індуктивний датчик абсолютного кута.
- Кут нахилу гідромотора (якщо регульований) — аналогічно.
- Тиск у гідравлічній системі трансмісії (два датчики — високого та низького тиску, або один диференціальний). Тиск свідчить про навантаження та дозволяє оцінити момент.
- Температура робочої рідини (NTC-термістор або Pt100).
- Рівень рідини (поплавковий датчик).
- Положення органів керування (педаць акселератора, важіль швидкості, перемикач режимів) — потенціометри або датчики Холла.
- Сигнали від інших ECU (наприклад, від системи ABS/ESP: швидкість коліс, поздовжнє прискорення).
- Виконавчі пристрої:
- Пропорційні гідравлічні клапани (регулювання кута нахилу гідронасоса та гідромотора). Керуються ШІМ-сигналом.

					14.17 - КР.005.1.000 ПЗ	Аркуш
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Електромагнітні муфти перемикання діапазонів (on/off, з підтвердженням положення).
- Клапан зливу тиску (захист від перевантаження).
- Допоміжний насос підживлення (вмикається при необхідності).
- Гальмо стоянки (електромеханічне або електрогідравлічне).

Обґрунтування мети та завдань дослідження

Проблемна ситуація та актуальність

Сучасні безступінчасті трансмісії стали стандартом для більшості нових тракторів середнього та важкого класів. Вони забезпечують безпрецедентний рівень комфорту, ефективності та автоматизації. Однак експлуатація та обслуговування CVT/IVT вимагають поглиблених знань про їхню конструкцію, особливо стосовно електронної системи керування. Досвід показує, що значна частина несправностей (до 40%) припадає саме на електроніку та гідравліку керування (датчики, клапани, проводка, програмне забезпечення), а не на механічну частину. Крім того, діагностика таких трансмісій неможлива без сканера та розуміння логіки роботи ECU.

Проте в науково-технічній літературі бракує комплексних досліджень, які б поєднували аналіз кінематики CVT/IVT з глибоким аналізом архітектури, алгоритмів та діагностичних можливостей ECU. Більшість публікацій зосереджені або на суто механічних аспектах, або на загальних принципах автоматизації, без конкретної деталізації. Таким чином, актуальність роботи полягає в систематизації та поглибленні знань про електронне керування CVT/IVT, що дозволить підвищити ефективність їх діагностування та ремонту.

Метою кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності діагностування та обслуговування гідрооб'ємно-механічних трансмісій типу Vario/IVT шляхом поглибленого аналізу їхньої конструкції, алгоритмів роботи та систем керування.

Завдання дослідження.

					14.17 - КР.005.1.000 ПЗ	Аркуш
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Виконати аналіз еволюції трансмісій сільськогосподарських тракторів: від ступінчастих механічних коробок до сучасних гідрооб'ємно-механічних CVT/IVT. Провести огляд та порівняльний аналіз кінематичних схем і архітектури трансмісій типу Vario (Fendt) та AutoPowr/IVT (John Deere).

2. Дослідити функціональне призначення та апаратну еволюцію електронних блоків керування (ECU) трансмісією. Систематизувати основні сенсори та виконавчі механізми, що підключаються до ECU, та проаналізувати їхню роль у системі керування.

3. Проаналізувати алгоритми керування безступінчастою трансмісією, що реалізуються в ECU, зокрема алгоритми початкового руху (формування тиску), регулювання швидкості руху, керування гідростатичною частиною (кутами нахилу гідромашин), перемикання діапазонів та аварійні режими роботи.

4. Дослідити засоби та методи діагностування системи керування CVT/IVT за допомогою діагностичних сканерів. Розробити рекомендації з виявлення та усунення типових несправностей електронної системи керування трансмісією.

5. Розробити структурну та функціональну схеми системи керування трансмісією на основі аналізу принципів роботи та обміну даними по CAN-шині.

6. Виконати техніко-економічне обґрунтування доцільності глибокого діагностування ECU трансмісії з використанням спеціалізованого обладнання (порівняння витрат на ремонт/заміну вузлів при помилкових діагнозах та економії від своєчасного виявлення несправностей).

Очікувані результати та їхнє практичне значення

- Очікується, що виконання роботи дозволить:
- Отримати систематизований опис конструкції та алгоритмів роботи електронних систем керування сучасними CVT/IVT, що буде корисним для студентів спеціальності «Агроінженерія», інженерів-діагностів, механіків.
- Розробити практичні рекомендації щодо діагностики несправностей системи керування, скорочуючи час простою трактора та вартість ремонту.

					14.17 - КР.005.1.000 ПЗ	Аркуш
						26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

У першому розділі кваліфікаційної роботи виконано аналіз сучасного стану, еволюції, конструктивних особливостей та систем керування безступінчастими трансмісіями (CVT/IVT) сільськогосподарських тракторів. На основі проведеного огляду науково-технічної літератури, патентних матеріалів та технічної документації провідних виробників (Fendt, John Deere, ZF, CLAAS) можна зробити такі основні висновки.

1. Еволюція трансмісій пройшла шлях від простих ступінчастих механічних коробок до високоавтоматизованих гідрооб'ємно-механічних систем. Основні недоліки ступінчастих КПП – розрив потоку потужності при перемиканні, дискретність зміни швидкості та висока складність керування – були подолані завдяки впровадженню CVT/IVT. Першою серійною моделлю став Fendt Favorit 926 Vario (1995–1996 рр.), який започаткував еру безступінчастих трансмісій у сільському господарстві. Сучасні CVT/IVT забезпечують плавне регулювання швидкості від 0,02–0,05 до 50–60 км/год з ККД до 92–94%, що порівнянно з механічними КПП.

2. Трансмісії Vario (Fendt) та AutoPowr/IVT (John Deere) побудовані за принципом розщеплення потужності (power split), але мають суттєві конструктивні відмінності. Vario використовує регульований гідромотор з великим кутом нахилу (до 45°) та два діапазони, що перемикаються під навантаженням. AutoPowr/IVT відрізняється наявністю гідростатичного режиму нейтралі (GN) та іншим компонованням планетарних механізмів. Обидві системи забезпечують високий ККД, плавність регулювання та інтеграцію з системами автоматизації трактора.

3. Електронний блок керування (ECU) трансмісією є ключовим компонентом, що реалізує замкнутий контур автоматичного регулювання. Він отримує сигнали від датчиків частоти обертання (вхідний та вихідний вали), кутів нахилу гідромашин, тиску, температури, положення органів керування, а також обмінюється даними з іншими ECUs через CAN-шину (J1939/ISOBUS). На

					14.17 - КР.005.1.000 ПЗ	Аркуш
						27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

основі цих даних ECU керує пропорційними гідравлічними клапанами, електромагнітними муфтами та допоміжними пристроями, забезпечуючи підтримання заданої швидкості, перемикання діапазонів та діагностику несправностей.

4. Апаратна еволюція ECU пройшла шлях від 16-розрядних мікроконтролерів (1990-ті) до 32-розрядних високопродуктивних платформ (2010-ті – теперішній час). Сучасні ECUs базуються на ARM Cortex M7 або Infineon AURIX (частота до 300 МГц), мають об'єм пам'яті до 4 МБ флеш та 512 КБ RAM, підтримують багатоканальний ШІМ, CAN (до 4 інтерфейсів), Ethernet та функції кібербезпеки (HSM). Подальший розвиток пов'язаний з використанням технологій Ethernet (1000BASE-T1), OPC UA, штучного інтелекту для адаптації алгоритмів та оновленням програмного забезпечення «по повітрю» (OTA).

5. Програмне забезпечення сучасного ECU трансмісії є багаторівневим, включаючи драйвери введення-виведення, операційну систему реального часу (FreeRTOS, OSEK), прикладні алгоритми (PID, нечітке регулювання) та комунікаційні стеки (J1939, ISOBUS). Розробка ведеться відповідно до стандартів функційної безпеки ISO 26262 (рівні ASIL B, C, D) з використанням засобів автоматичної генерації коду (Matlab/Simulink, TargetLink). Алгоритми керування включають регулювання швидкості, керування гідростатикою, логіку безрозривного перемикання діапазонів, режими роботи (круїз-контроль, підтримка крутного моменту, економічний/спортивний) та діагностику.

6. Діагностування системи керування CVT/IVT є складним завданням, що вимагає спеціалізованих діагностичних сканерів (John Deere Service Advisor, Fendt Fendt Diagnostic, CLAAS Diagnostic, або універсальних Jaltest, Texa) та розуміння логіки роботи ECU. Типові несправності електронної системи включають відмови датчиків (кутів нахилу, тиску, температури), засмічення пропорційних клапанів, обриви проводки, помилки калібрування та програмні збої.

					14.17 - КР.005.1.000 ПЗ	Аркуш
						28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ АЛГОРИТМІВ КЕРУВАННЯ ГІДРООБ'ЄМНО-МЕХАНІЧНОЮ ТРАНСМІСІЄЮ

2.1 Кінематичний та силовий аналіз планетарного механізму розподілу потоків потужності

Принцип розщеплення потужності як основа CVT/IVT

Усі сучасні безступінчасті трансмісії сільськогосподарських тракторів, зокрема Fendt Vario та John Deere AutoPowr/IVT, побудовані за принципом розщеплення потоку потужності (power split). Цей принцип полягає в тому, що загальний потік потужності від двигуна розділяється на дві гілки — механічну та гідростатичну — з подальшим їх підсумовуванням на вихідному валу. Завдяки такому розподілу вдається досягти безступінчастого регулювання передавального відношення в широкому діапазоні при збереженні високого ККД (до 92–94%), оскільки основна частка потужності передається через високоефективний механічний тракт, а гідростатична гілка забезпечує плавне регулювання.

Принцип розщеплення потужності вирішує фундаментальну суперечність, що існує в класичних гідростатичних трансмісіях: при передачі великої потужності через гідростатичну передачу ККД різко падає через гідравлічні втрати. Розділяючи потік і передаючи більшу його частину (зазвичай 60–70%) через механічний тракт, CVT/IVT забезпечують високий ККД в широкому діапазоні швидкостей.

					14.17 - КР.005.2.000 ПЗ							
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								
Розроб.					РОЗДІЛ 2				Літ.	Аркуш	Аркушів	
Перевір.		Дядюра К.О.									29	17
Реценз.												
Н. Контр.												
Затверд.		Дядюра К. О.										

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ АЛГОРИТМІВ КЕРУВАННЯ ГІДРОБ'ЄМНО-МЕХАНІЧНОЮ ТРАНСМІСІЄЮ

ПРИНЦИП РОЗЩЕПЛЕННЯ ПОТУЖНОСТІ (POWER SPLIT)

МЕХАНІЧНА ПЛІКА (ЗУБЧАСТІ ПЕРЕДАЧІ)

ВИСOKИЙ ККД ($\eta > 0.98$)

ГІДРОСТАТИЧНА ПЛІКА (НАСОС-МОТОР)

ПЛАВНЕ РЕГУЛЮВАННЯ ($\eta \approx 0.85-0.90$)

ВИХІДНИЙ ВАЛ

СУМАРНИЙ ККД СУПЛУГ: $\eta_z = 92-94\%$

МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ПЛАНЕТАРНОГО МЕХАНІЗМУ

Епіциклічне колесо (Ring gear), ω_r, Z_r

Водило з сателітами (Carrier), ω_c

Санічна шестерня (Sun gear), ω_s, Z_s

КІНЕМАТИЧНА ФОРМУЛА ВУЛІСА:

$$\frac{\omega_s - \omega_c}{\omega_r - \omega_c} = k$$

Characteristic number $k = \frac{Z_r}{Z_s}$

РІВНЯННЯ МОМЕНТІВ:

$$\frac{M_s}{1} = \frac{M_r}{k} = -\frac{M_c}{-(1+k)}$$

Знак "-" вказує протилежний напрямку моменту водила

ЕНЕРГЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ: РОЗПОДІЛ ПОТУЖНОСТІ (P)

ЧАСТКА ГІДРОСТАТИЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ: $\eta_{11} = P_{p1}/P_{in}$

СУМАРНИЙ ККД СУПЛУГ: $\eta_z = \eta_{11}(1 - \eta_{11}) + \eta_{12}\eta_{11}$

- Низька шв. = Велика η_{11} (Плавне зрушення)
- Польові роботи: $\eta_{11} = 20-40\%$
- Транспорт: $\eta_{11} \rightarrow 0$

ВИДИ КІНЕМАТИЧНИХ СХЕМ (IC TA OC)

A) IC-RSC (Inlet-Coupled, Вхідний диференціал)

B) OC-RSC (Outlet-Coupled, Вихідний диференціал)

КІНЕМАТИЧНИЙ АНАЛІЗ: РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ

1) ГЕОМЕТРИЧНА НЕЙТРАЛЬ (Нейтральна передача)

$$\omega_{out} = 0 \text{ мов стоп}$$

2) РЕВЕРС (Reverse Drive)

$$\frac{M_s}{1} = \frac{M_r}{k} = -\frac{M_c}{-(1+k)}$$

РЕВЕРС (Зворотний хід)

Зміна напрямку без зміни двигуна

АЛГОРИТМ КЕРУВАННЯ

АЛГОРИТМ КЕРУВАННЯ

Формулює

Помп swashplate regulation law

direct

indirect

direct points

indirect points

Математичний опис планетарного механізму.

$$\omega_s + k \cdot \omega_r - (1 + k) \cdot \omega_c = 0, \quad (2.1)$$

де: ω_s — кутова швидкість сонячної шестерні; ω_r — кутова швидкість епіциклічного колеса; ω_c — кутова швидкість водила; $k = z_r/z_s$ — ~~характеристичне число (передавальне відношення), що дорівнює відношенню~~

кількості зубців епіциклічного колеса z_r до кількості зубців сонячної шестерні z_s .

Це рівняння є основою для подальшого кінематичного аналізу, оскільки з його допомогою можна визначити кутові швидкості всіх ланок залежно від вибраних зв'язків.

Для визначення крутних моментів на елементах планетарної передачі використовують рівняння моментів, що впливають з умов статичної рівноваги. З огляду на симетричність навантаження, моменти на сонячній шестерні M_s , епіциклічному колесі M_r та водилі M_c співвідносяться з характеристичним числом наступним чином:

$$M_s : M_r : M_c = 1 : k : -(1 + k). \quad (2.2)$$

Знак « $-$ » у співвідношенні для водила вказує на те, що напрямок моменту на водилі протилежний напрямкам моментів на сонячній шестерні та епіциклічному колесі, що є наслідком рівноваги системи. Ці співвідношення дозволяють перейти від кінематичного аналізу до силового та енергетичного.

Кінематичний аналіз: розподіл кутових швидкостей

Під час роботи трактора двигун підтримує, як правило, постійну кутову швидкість (наприклад, частота обертання 1700–2100 об/хв відповідає зоні максимального крутного моменту). Зміна швидкості руху досягається зміною кута нахилу шайби гідронасоса, що змінює частоту обертання гідромотора. Оскільки останній жорстко зв'язаний з одним з елементів планетарного механізму, кутова швидкість цього елемента (як правило, це сонячна шестерня) також змінюється. Зміна швидкості на одному з елементів призводить до пропорційної зміни швидкості на двох інших згідно з формулою Віллеса.

Характерна особливість CVT/IVT полягає в тому, що вона здатна забезпечити геометричну нейтраль (англ. geared neutral) та зміну напрямку руху без зміни напрямку обертання двигуна та без механічних перемикачів (як у класичних КПП). Нейтраль досягається при виконанні умови $\omega_{\text{вих}} = 0$. З використанням формули Віллеса можна показати, що існує певний кут нахилу шайби гідронасоса, при якому один з елементів планетарного механізму

					14.17 - КР.005.2.000 ПЗ	Аркуш
						31
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зупиняється, що внаслідок кінематичного зв'язку призводить до зупинки вихідного вала. При подальшому регулюванні напрямку обертання вихідного вала змінюється на протилежний, що забезпечує рух назад.

Енергетичний аналіз: розподіл потужності

Розподіл потужності між механічною та гідростатичною гілками є одним із ключових факторів, що визначають ефективність трансмісії. Частка потужності, що проходить через гідростатичну гілку, визначається як відношення потужності на вихідному валу гідромотора до загальної потужності на вході в трансмісію:

$$\gamma = \frac{P_{hydro}}{P_{in}}. \quad (2.3)$$

Значення γ змінюється від 0 до 1 залежно від режиму роботи, зокрема від бажаної швидкості руху та навантаження. При низьких швидкостях, коли трактор зрушує з місця, частка γ велика, оскільки основна потужність передається через гідростатичну гілку, що забезпечує плавне регулювання. У зоні середніх швидкостей, характерних для більшості польових робіт (оранка, культивування, сівба), γ знижується до 20–40% — більша частина потужності передається через високоефективну механічну гілку. У транспортному режимі (максимальна швидкість) знову домінує механічна гілка (γ прямує до 0), забезпечуючи мінімальні втрати.

Ефективність трансмісії в цілому η_{total} може бути виражена через ефективність механічної η_{mech} та гідростатичної η_{hydro} гілок:

$$\eta_{total} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = (1 - \gamma) \cdot \eta_{mech} + \gamma \cdot \eta_{hydro}. \quad (2.4)$$

З огляду на те, що η_{mech} типових зубчастих механізмів перевищує 98–99%, а η_{hydro} у кращих зразків становить 85–90%, сумарний ККД CVT/IVT при розумному співвідношенні γ може досягати рівня, порівнянного з традиційними механічними КПП.

Види кінематичних схем: OC-RSC та IC-RSC

					14.17 - КР.005.2.000 ПЗ	Аркуш
						32
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У літературі відомі два основних різновиди кінематичних схем CVT/IVT, які використовують різне підключення планетарного механізму до потужності двигуна та вихідного вала. Зокрема, використовується наступна класифікація:

– *Схема з підключенням зовнішнього контуру та вхідним диференціалом (Inlet-Coupled — IC-RSC):* У цій схемі потужність від двигуна спочатку надходить на планетарний механізм (води́ло), який розділяє її на механічну та гідростатичну гілки. Гідростатичний модуль розташований на одному з елементів планетарного ряду.

– *Схема з підключенням зовнішнього контуру та вихідним диференціалом (Outlet-Coupled — OC-RSC):* У цій конфігурації потужність спочатку проходить через гідростатичний модуль (насос-мотор), а лише потім потрапляє на планетарний механізм, де об'єднується з потоком, що пройшов через механічну передачу. Така схема вважається більш простою в реалізації.

Аналіз цих кінематичних схем дозволяє визначити, в яких діапазонах швидкостей потужність циркулює всередині трансмісії (режим рециркуляції) та коли вона передається безпосередньо на вихідний вал. Для певних співвідношень параметрів регулювання гідромашин потужність, що передається через гідростатичний тракт, теоретично прямує до нуля. Цей стан називається «режимом прямого механічного приводу» (direct mechanical drive) і є точкою з максимальним ККД трансмісії.

Існують також конструкції IVT, в яких гідростатичний вузол може бути підключений до головного планетарного механізму різними способами для реалізації додаткових режимів, включаючи нейтраль.

Кінематичний та силовий аналіз планетарного механізму є фундаментом для розуміння роботи CVT/IVT. Формула Вілліса та рівняння моментів дозволяють кількісно описати розподіл швидкостей і моментів між механічною та гідростатичною гілками, визначити умови досягнення нейтралі та реверсу, а також оцінити енергетичну ефективність трансмісії. Цей аналіз лягає в основу синтезу системи керування: знаючи кінематичний зв'язок між кутом нахилу

					14.17 - КР.005.2.000 ПЗ	Аркуш
						33
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

гідромашин та вихідною швидкістю, ECU може обчислити необхідний закон регулювання для підтримання заданого режиму.

2.2 Математичне моделювання керування гідростатичною гілкою: регулювання кута нахилу похилої шайби гідромашин

Роль гідростатичної гілки в CVT/IVT

Гідростатична гілка є серцем CVT/IVT, оскільки саме вона забезпечує безступінчасте регулювання передавального відношення. Вона складається з аксіально-поршневого гідронасоса та гідромотора, з'єднаних у замкнутий гідравлічний контур. Основною регульованою величиною є кут нахилу поворотної шайби насоса, що змінює його робочий об'єм. У деяких конструкціях, як-от Fendt Vario, регулюється також кут нахилу шайби гідромотора, що розширює діапазон регулювання [18].

Гідронасос та гідромотор у CVT/IVT з'єднані за замкнутою (закритою) схемою. Це означає, що робоча рідина циркулює між насосом і мотором, не повертаючись у бак. Така схема забезпечує високий ККД та швидкодію, оскільки рідина не охолоджується між циклами. Для компенсації витоків та забезпечення мінімального тиску в контурі використовується насос підживлення [19].

Математична модель гідронасоса з регульованою шайбою (рисунки 2.2)

Основною характеристикою аксіально-поршневого насоса є його ідеальна подача, яка визначається кількістю рідини, що перекачується за одиницю часу за відсутності втрат. Ця подача залежить від кута нахилу поворотної шайби γ :

$$Q_{\text{теор}} = K \cdot \tan(\gamma), \quad (2.5)$$

де K — коефіцієнт, що враховує конструктивні параметри насоса (число поршнів, їх діаметр, хід, частоту обертання вала). В аксіально-поршневих гідромашинах зв'язок ідеальної подачі з кутом нахилу шайби в першому наближенні можна вважати лінійним, що значно спрощує систему керування. У цьому випадку коефіцієнт K є постійною величиною, що визначається конструкцією насоса.

					14.17 - КР.005.2.000 ПЗ	Аркуш
						34
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Реальна подача завжди менша за теоретичну через втрати, які поділяються на об'ємні та механічні. Об'ємний ККД враховує витоки робочої рідини через зазори. Вони пропорційні перепаду тиску Δp на насосі та обернені до в'язкості рідини μ . Гідромеханічний ККД враховує втрати на тертя в рухомих частинах та гідравлічний опір.



Рисунок 2.2 – Математичне моделювання керування гідростатичною гілкою

Таким чином, реальна подача насоса визначається співвідношенням:

$$Q_{real} = Q_{теор} \cdot \eta_{об}, \quad (2.6)$$

де $\eta_{об}$ — об'ємний ККД насоса. Зі збільшенням тиску та зниженням в'язкості рідини (наприклад, через нагрівання) об'ємний ККД падає через зростання витоків.

Гідравлічний опір та перепад тиску

Перепад тиску між напірною та зливною магістралями гідростатичної передачі $\Delta p = p_{нап} - p_{зл}$ є важливим параметром, що визначає навантаження на гідросистему.

Його величина залежить від опору гідромотора та всього гідравлічного тракту. У CVT/IVT перепад тиску безпосередньо пов'язаний з моментом опору на вихідному валу: чим більше навантаження на тракторі (оранка, буксирування), тим вищий тиск у гідросистемі. Це фізичне явище використовується в системах керування для оцінки навантаження без додаткових датчиків моменту.

Зміна кута нахилу шайби насоса впливає не тільки на подачу, але й на перепад тиску. Чим більший кут, тим більша теоретична подача, а отже, і більший перепад тиску за однакового опору на виході. Перепад тиску є одним з основних зворотних зв'язків у системі керування [22].

Гідравлічний опір гідромотора описується його характеристикою «витрата–тиск». Як правило, ця характеристика нелінійна через турбулентність потоку та зміну в'язкості рідини від температури. Тому в багатьох випадках для опису гідромотора використовують лінеаризовану модель, справедливую в околиці робочої точки [23].

Керування кутом нахилу шайби

Кут нахилу поворотної шайби гідронасоса змінюється за допомогою гідравлічного сервомеханізму (сервопоршня), що керується пропорційним гідравлічним клапаном. ECU подає на клапан ШІМ-сигнал (широтно-імпульсну модуляцію), який визначає положення золотника клапана. Останній направляє рідину в робочі порожнини сервоциліндра, який переміщує шайбу. Таким чином, зміна кута шайби відбувається з певною затримкою та динамікою першого порядку. Передавальну функцію керування кутом нахилу шайби за керуючим сигналом можна апроксимувати аперіодичною ланкою першого порядку:

$$G(s) = \frac{\gamma(s)}{u(s)} = \frac{K_{\text{серво}}}{T_{\text{серво}} \cdot s + 1}, \quad (2.7)$$

де: $u(s)$ — керуючий сигнал (ШІМ-команда); $\gamma(s)$ — кут нахилу шайби; $K_{\text{серво}}$ — коефіцієнт підсилення сервопривода; $T_{\text{серво}}$ — стала часу сервопривода, яка визначається інерційністю рухомих мас та об'ємом робочої рідини.

					14.17 - КР.005.2.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

Стала часу $T_{\text{серво}}$ може змінюватися в широкому діапазоні залежно від температури рідини (її в'язкості) та тиску в системі. При низьких температурах (в'язкість зростає) реакція системи сповільнюється, що необхідно враховувати в алгоритмах керування.

В системах керування CVT/IVT застосовується як пропорційне регулювання кута нахилу шайби (через ШІМ-сигнал), так і більш складні алгоритми, що враховують нелінійності, гістерезис та тертя в механізмі. У деяких конструкціях, як-от John Deere AutoPowr, керування кутом нахилу шайби інтегроване з алгоритмами перемикання діапазонів, що дозволяє використовувати весь діапазон регулювання в кожному діапазоні швидкостей.

Датчики зворотного зв'язку в гідростатичній гілці

Для роботи замкнутого контуру керування необхідні надійні зворотні зв'язки. У CVT/IVT використовуються наступні датчики:

- Датчик кута нахилу шайби гідронасоса (потенціометричний або індуктивний) — дозволяє реалізувати зворотний зв'язок за положенням, замикаючи контур керування сервомеханізмом.

- Датчик кута нахилу шайби гідромотора (в конструкціях з регульованим мотором) — аналогічно.

- Датчик тиску в напірній та зливній магістралях (тензометричні або п'єзорезистивні). Різниця тисків є мірою навантаження на трансмісію (крутного моменту). Якщо перепад тиску падає нижче певного порогу, ECU може обмежити потужність, запобігаючи «провалюванню» частоти обертання двигуна.

- Датчик температури робочої рідини (термістор або термопара). Температура впливає на в'язкість рідини, витоки та динаміку сервопривода. На основі показань датчика ECU коригує коефіцієнти регуляторів.

Математичне моделювання гідростатичної гілки дозволяє кількісно описати зв'язок між керуючим сигналом ECU, кутом нахилу шайби гідронасоса, подачею рідини, перепадом тиску та вихідною швидкістю гідромотора. Це необхідно для синтезу регуляторів (розділ 2.4) та аналізу стійкості системи.

					14.17 - КР.005.2.000 ПЗ	Аркуш
						37
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Урахування нелінійностей (витоки, тертя, зміна в'язкості) та динаміки сервопривода є критичним для забезпечення якісного регулювання в широкому діапазоні умов експлуатації.

2.3 Алгоритми узгодження роботи ДВЗ та трансмісії (Tractor Management System – TMS) для мінімізації питомої витрати пального

Концепція Tractor Management System (TMS) (рисуюнок 2.3)

TMS (Tractor Management System) — це інтелектуальна система керування, що координує роботу дизельного двигуна (ДВЗ) та трансмісії для оптимізації сумарної ефективності. У тракторі з CVT/IVT двигун і трансмісія є тісно пов'язаними підсистемами: частота обертання двигуна визначає швидкість обертання гідронасоса та вхідного вала трансмісії, в той час як трансмісія, змінюючи передавальне відношення, встановлює відповідну швидкість руху. TMS виконує три основні функції:

1. *Підтримання частоти обертання двигуна в зоні мінімальної питомої витрати палива.* На основі карти паливної економічності двигуна TMS вибирає оптимальну частоту обертання для заданого навантаження (потужності на колесах). CVT/IVT завдяки своїй безступінчастій природі дозволяє підтримувати цю частоту незалежно від швидкості руху.

2. *Обмеження навантаження на двигун.* За допомогою датчика тиску в гідросистемі TMS визначає момент опору на вихідному валу. Якщо навантаження перевищує можливості двигуна в поточному режимі, TMS змінює передавальне число трансмісії (збільшує момент на колесах, зменшуючи швидкість) для запобігання «заглуханню» двигуна.

3. *Реалізація додаткових режимів роботи (eco, standard, dynamic).* Залежно від вибору оператора, TMS може оптимізувати роботу на економію палива (eco), максимальну продуктивність (dynamic) або збалансований режим.

Метод мінімізації питомої витрати палива (BSFC)

					14.17 - КР.005.2.000 ПЗ	Аркуш
						38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Питома витрата палива (brake-specific fuel consumption, BSFC) двигуна залежить від його частоти обертання та навантаження (крутного моменту). Зазвичай, кожному значенню потужності $P_{\text{двиг}}$ відповідає оптимальна частота обертання n_{opt} , за якої BSFC мінімальна. Ця залежність (BSFC карта) є нелінійною та індивідуальною для кожної моделі двигуна і визначається під час стендових випробувань.



Рисунок 2.3 – Безступічне керування

Задача TMS полягає в тому, щоб для поточного навантаження (потужності на колесах) вибрати таке передавальне відношення трансмісії, яке забезпечить роботу двигуна в точці мінімальної витрати палива. Алгоритм TMS базується на методі «підтримання оптимальної частоти обертання двигуна» (engine load control). Реалізація цього методу включає наступні етапи:

- Визначення поточної потужності на колесах $P_{\text{кол}}$ (на основі тиску в гідросистемі та частоти обертання вихідного вала).
- Розрахунок необхідної потужності двигуна (з урахуванням ККД трансмісії).

– Визначення за BSFC картою оптимальної частоти обертання двигуна n_{opt} для цієї потужності.

– Обчислення необхідного передавального відношення трансмісії:

$$i_{тр} = \frac{n_{opt}}{n_{кол}}, \quad (2.8)$$

де $n_{кол}$ — бажана частота обертання коліс (пов'язана з бажаною швидкістю руху).

Формування керуючого сигналу для зміни кута нахилу гідронасоса для досягнення обчисленого передавального відношення.

Таким чином, навіть при змінному навантаженні (наприклад, під час оранки з нерівномірним ґрунтом) TMS підтримує частоту обертання двигуна близькою до оптимальної, змінюючи передавальне відношення трансмісії (наприклад, дещо знижуючи швидкість при збільшенні опору). Це дозволяє досягти економії палива на 8–15% порівняно з роботою на фіксованій передачі.

Додаткові режими TMS: підтримка крутного моменту (Power Control)

У режимах, де критичним є не мінімальна витрата палива, а максимальна продуктивність або стабільність технологічного процесу (наприклад, при збиранні врожаю комбайном, де різкі зміни швидкості неприпустимі), TMS може працювати в режимі підтримки крутного моменту на колесах. Замість того, щоб утримувати частоту обертання двигуна, система стабілізує момент (або навантаження) на вихідному валу трансмісії незалежно від змін опору. Це забезпечує:

- Стабільну швидкість руху навіть на нерівних ґрунтах.
- Запобігання буксуванню коліс (спільно з іншими системами).
- Постійне навантаження на двигун у точці максимальної ефективності.

Для цього TMS використовує сигнали датчика тиску в гідросистемі (який прямо пропорційний крутному моменту на колесах). ECU постійно порівнює поточний крутний момент із заданим (який може встановлювати оператор) і регулює кут нахилу гідронасоса так, щоб підтримувати момент на заданому рівні.

					14.17 - КР.005.2.000 ПЗ	Аркуш
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Інтеграція з ISOBUS та Tractor Implement Management (TIM)

Сучасні TMS інтегровані з системою ISOBUS (ISO 11783), що дозволяє обмінюватися даними про навантаження не лише з навісним обладнанням трактора, а й із знаряддям. Через це передаються необхідні параметри: необхідна потужність, швидкість руху, стан гідравліки та інші.

Розширенням цієї концепції є Tractor Implement Management (TIM), який дозволяє знаряддю (наприклад, плугу, сівалці) надсилати запит трактору на зміну швидкості або передавального відношення. Наприклад, при роботі з пневматичною сівалкою, яка потребує дуже точної швидкості висіву, ECU знаряддя через ISOBUS може відправити команду TMS трактора на підтримання стабільної швидкості руху незалежно від змін тягового опору. Такий двосторонній обмін даними дозволяє оптимізувати спільну роботу трактора та знаряддя для досягнення заданих агротехнічних показників при мінімальній витраті палива.

Врахування теплового стану двигуна та трансмісії

Алгоритми TMS також можуть враховувати тепловий стан двигуна та трансмісії. При низьких температурах (наприклад, після запуску) система може обмежувати навантаження, щоб прискорити прогрів двигуна та гідравлічної рідини. При перегріві (наприклад, при тривалій роботі з максимальною потужністю в спекотну погоду) TMS може знизити навантаження, зменшивши подачу палива, або збільшити частоту обертання вентилятора системи охолодження.

Система TMS є ключовим компонентом, що забезпечує головну перевагу CVT/IVT — роботу двигуна в оптимальному діапазоні незалежно від швидкості руху та навантаження. Алгоритми TMS базуються на BSFC карті двигуна, використовують зворотний зв'язок за тиском (навантаженням) та інтегруються з ISOBUS. Завдяки цьому досягається економія палива на 8–15% порівняно зі ступінчастими КПП, а також підвищується продуктивність та комфорт оператора.

					14.17 - КР.005.2.000 ПЗ	Аркуш
						41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.4 Динаміка замкненого контуру керування: ПІД-регулювання та запобігання розстроюванню режимів при змінному тяговому опорі

Загальна структура замкненого контуру керування CVT/IVT

Будь-який контур керування трансмісією є замкненим, оскільки використовує зворотній зв'язок за вихідною величиною (швидкістю трактора) та внутрішніми параметрами (тиск, частота обертання двигуна). У загальному вигляді такий контур складається з (рисунок 2.4):

1. Задавальний пристрій (оператор) — встановлює бажану швидкість руху (положення педалі акселератора, важіль круїз-контролю).
2. Регулятор — ECU, який порівнює бажане значення з поточним, обчислює помилку та формує керуючий сигнал.
3. Виконавчий пристрій — пропорційний гідравлічний клапан та сервопоршень, що змінює кут нахилу шайби насоса/мотора.
4. Об'єкт керування — гідрооб'ємно-механічна трансмісія та трактор як механічна система (рухомі маси, опір руху).
5. Датчики зворотного зв'язку — датчики швидкості (вихідного вала, коліс), частоти обертання двигуна, тиску, кута нахилу шайби.



Рисунок 2.4 – Динаміка замкненого контуру керування

Основною проблемою такого контуру є наявність значних збурень (тяговий опір ґрунту, ухили, зміна маси причепа) та нелінійностей (гідравлічні втрати, тертя, зміна в'язкості рідини від температури). Для забезпечення стійкості та якісного регулювання (висока точність підтримання швидкості, відсутність коливань) застосовуються ПІД-регулятори та більш складні адаптивні алгоритми.

ПІД-регулювання в системах керування CVT

ПІД-регулятор (пропорційно-інтегрально-диференціальний) є стандартом у промисловості для керування об'єктами з нелінійностями та інерційністю. Передавальна функція ПІД-регулятора в неперервному часі має вигляд:

$$G_{PID}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d \cdot s, \quad (2.9)$$

де: K_p — пропорційний коефіцієнт (визначає швидкодію системи); K_i — інтегральний коефіцієнт (усуває статичну помилку); K_d — диференціальний коефіцієнт (демпфує коливання, покращує стійкість).

У системах керування CVT/IVT ПІД-регулятор може використовуватись для різних цілей:

- Керування швидкістю трактора: регулятор отримує різницю між заданою та поточною швидкістю, а вихідний сигнал задає бажаний кут нахилу гідронасоса. Пропорційна складова забезпечує швидку реакцію на відхилення, інтегральна — усуває статичну помилку (наприклад, при русі на підйомі), а диференціальна — запобігає перерегулюванню та коливанням.

- Керування тиском у гідросистемі (наприклад, під час перемикання діапазонів). У цьому випадку регулятор стабілізує тиск у муфтах, забезпечуючи плавне перемикання без ривків.

Дослідження підтверджують ефективність ПІД-регуляторів у системах керування CVT. Зокрема, використання змінних параметрів ПІД-регулятора, які залежать від частоти обертання двигуна та положення дросельної заслінки, а також використання керування з передбаченням (feedforward) на основі швидкості зміни дросельної заслінки дозволяє значно підвищити динамічні

характеристики трансмісії.

					14.17 - КР.005.2.000 ПЗ		Аркуш
							43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

Адаптивний ПД-регулятор для CVT

Оскільки параметри CVT/IVT (в'язкість рідини, момент інерції, опір руху) змінюються в часі, класичний ПД-регулятор з фіксованими коефіцієнтами не завжди забезпечує оптимальне регулювання. Для вирішення цієї проблеми застосовуються адаптивні ПД-регулятори, зокрема з нечіткою логікою (fuzzy PID) та нейронними мережами.

Нечіткий ПД-регулятор використовує набір правил нечіткої логіки для динамічної зміни коефіцієнтів K_p , K_i , K_d на основі поточної помилки та її похідної. Наприклад, при великій помилці збільшується K_p (швидка реакція), але зменшується K_d (щоб уникнути перерегулювання). При малій помилці, навпаки, домінує K_i для усунення статичної помилки. Експериментальні дослідження показують, що нечіткий адаптивний ПД-регулятор забезпечує кращу адаптацію до змін навантаження та стабільність керування швидкістю трактора з CVT порівняно з класичним ПД-регулятором.

Нейромережевий ПД-регулятор використовує нейронну мережу для навчання оптимальних значень коефіцієнтів на основі історичних даних. Мережа може бути навчена імітувати поведінку досвідченого оператора або результати оптимізаційного алгоритму. Дослідження на тракторах з CVT показали, що нейромережевий ПД-регулятор забезпечує високу точність підтримання швидкості та стійкість до змінних навантажень.

Компенсація змінних навантажень (тягового опору)

Основним збуренням у системі керування трактором є змінний тяговий опір ґрунту, який залежить від типу ґрунту, вологості, глибини обробітку та багатьох інших факторів. Це збурення можна розглядати як додатковий момент, що діє на вихідний вал трансмісії. Якщо ECU не компенсує його, швидкість трактора буде коливатися, що неприпустимо для багатьох технологічних процесів.

					14.17 - КР.005.2.000 ПЗ	Аркуш
						44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для компенсації змін навантаження використовують такі підходи:

– Пряме вимірювання тиску в гідросистемі. Як вже зазначалося, перепад тиску в гідростатичній гілці прямо пропорційний крутному моменту на вихідному валу. Цей сигнал можна використовувати у зворотному зв'язку: при збільшенні тиску (зростанні навантаження) ECU повинен збільшити передавальне відношення (зменшити швидкість), щоб розвантажити двигун. Це називається «регулюванням за навантаженням» (load sensing).

– Керування з передбаченням (feedforward) за сигналом датчика положення знаряддя або глибини оранки. Якщо система знає, що знаряддя занурюється глибше (наприклад, на основі сигналу датчика гідроциліндра навіски), вона може завчасно збільшити передавальне відношення, запобігаючи різкому падінню швидкості.

– Використання фільтра Калмана для оцінки моменту опору. Цей метод дозволяє «очистити» сигнал датчика тиску від шумів та імпульсних перешкод, а також оцінити незміряні збурення (наприклад, опір коченню). На основі отриманої оцінки ECU може згладити керуючий вплив, уникнувши різких ривків.

Ефективний алгоритм компенсації змінних навантажень повинен швидко реагувати на різкі зміни (наприклад, при наїзді на корінь) і повільно — на поступові (наприклад, при зміні типу ґрунту на краю поля).

Запобігання розстроюванню режимів: калібрування та адаптація в реальному часі

Проблема розстроювання параметрів полягає в тому, що характеристики CVT (наприклад, залежність витрати рідини від кута нахилу шайби) з часом змінюються через знос компонентів, забруднення рідини, зміну її в'язкості. Це призводить до того, що ECU «думає», що нахил шайби дорівнює певному значенню, а реальний кут інший. Внаслідок цього задана швидкість не досягається, виникають коливання або знижується ефективність.

Для запобігання розстроюванню застосовуються наступні методи:

					14.17 - КР.005.2.000 ПЗ	Аркуш
						45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– *Періодична калібрування системи (сервісна процедура).* Під час калібрування спеціальне програмне забезпечення проводить серію тестів (наприклад, переміщує шайбу в крайні положення, вимірює тиск) і перевизначає калібрувальні коефіцієнти. Ця процедура виконується після заміни гідравлічної рідини, ремонту гідронасоса або при появі відповідних діагностичних кодів.

– *Адаптивне калібрування (онлайн).* ECU в реальному часі порівнює очікувану реакцію системи (наприклад, зміну швидкості при заданій зміні кута шайби) з фактичною. Якщо виявляється систематичне відхилення, алгоритм адаптації поступово коригує калібрувальні коефіцієнти. Наприклад, при високій температурі (низька в'язкість) витoki в гідросистемі зростають, і ECU може збільшити кут нахилу шайби для досягнення тієї ж швидкості.

– *Діагностика несправностей (самодіагностика).* ECU моніторить параметри системи (час відгуку сервопоршня, тиск, температуру). При виявленні відхилень, які виходять за допустимі межі, генерується код несправності (DTC), а система може перейти в аварійний режим (наприклад, обмежити максимальну швидкість).

Крім того, важливим аспектом запобігання розстроюванню є використання зворотних зв'язків за кількома параметрами одночасно. Наприклад, в системах керування сучасних CVT використовується як зворотний зв'язок за швидкістю вихідного вала, так і зворотний зв'язок за кутом нахилу шайби. Це створює внутрішній контур регулювання кута, який менш чутливий до зовнішніх збурень. Динаміка замкненого контуру керування CVT/IVT є складною та включає кілька рівнів: зовнішній контур регулювання швидкості (ПД-регулятор) та внутрішній контур регулювання кута нахилу шайби. Для роботи в умовах змінних навантажень необхідно використовувати адаптивні ПД-регулятори (нечіткі, нейромережеві) та алгоритми компенсації збурень (на основі датчика тиску, фільтра Калмана). Запобігання розстроюванню параметрів досягається шляхом періодичного калібрування, адаптації в реальному часі та самодіагностики.

					14.17 - КР.005.2.000 ПЗ	Аркуш
						46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

У другому розділі роботи виконано теоретичне обґрунтування алгоритмів керування гідрооб'ємно-механічною трансмісією на основі аналізу її кінематики, гідравлічних процесів та систем автоматичного регулювання. Отримані результати є фундаментом для подальшого інженерного проєктування та діагностики систем керування CVT/IVT.

1. Кінематичний та силовий аналіз планетарного механізму показав, що розподіл потужності між механічною та гідростатичною гілками є ключовим фактором, що забезпечує високий ККД CVT/IVT (до 94%). Формула Вілліса та рівняння моментів дозволяють кількісно описати розподіл кутових швидкостей і крутних моментів, що є необхідною умовою для синтезу системи керування.

2. Математичне моделювання гідростатичної гілки встановило зв'язок між кутом нахилу шайби гідронасоса, подачею рідини, перепадом тиску та вихідною частотою обертання. Отримано передавальну функцію сервопривода, що описує динаміку зміни кута шайби за керуючим сигналом. Враховано основні нелінійності (витоки, тертя, зміна в'язкості), які впливають на якість регулювання.

3. Алгоритми TMS обґрунтовано як засіб узгодження роботи ДВЗ та трансмісії для мінімізації питомої витрати палива. Показано, що підтримання частоти обертання двигуна в зоні оптимальної витрати палива на основі BSFC-карти дозволяє досягти економії палива на 8–15%. Розглянуто додаткові режими (підтримка крутного моменту) та інтеграцію TMS з ISOBUS та TIM.

4. Динаміка замкненого контуру керування досліджена з використанням класичних та адаптивних ПД-регуляторів. Доведено, що нечіткий адаптивний ПД-регулятор забезпечує кращу стійкість та точність підтримання швидкості при змінних навантаженнях порівняно з класичним ПД-регулятором.

					14.17 - КР.005.2.000 ПЗ	Аркуш
						47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3

АНАЛІЗ АПАРАТНО-ПРОГРАМНОЇ ЧАСТИНИ ECU ТРАНСМІСІЇ ТА СИСТЕМИ БОРТОВОЇ ДІАГНОСТИКИ

3.1 Структурна схема ECU трансмісії та її інтеграція в мультиплексну мережу трактора

Електронний блок керування (ECU) трансмісією сучасного трактора є спеціалізованим мікроконтролерним пристроєм, що реалізує алгоритми керування перемиканням передач, блокуванням диференціала та роботою гідропідсилювача кермування. Структурно ECU складається з наступних функціональних вузлів (рис. 3.1):

- Мікроконтролер (MCU) – 32-розрядний ARM Cortex або аналог (Infineon TriCore, NXP MPC56xx), що забезпечує реальний час обробки даних.
- Модулі введення аналогових сигналів (АЦП 12-16 біт) для датчиків тиску та температури.
- Модулі введення цифрових сигналів (тахометричні входи для датчиків Холла).
- Модулі виведення з ШІМ-генераторами для керування пропорційними клапанами.
- CAN-трансивер (ISO 11898) із гальванічною розв'язкою.
- Драйвери навантаження (MOSFET-ключі з діагностикою обриву та КЗ).
- Блок живлення (захист від перенапруг, генерування 5В та 12В для сенсорів).

					14.17 - КР.005.3.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 3			
Розроб.		Корнило						
Перевір.		Дядюра К.О.						
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						
					Літ.	Аркуш	Аркушів	
						48	16	

Інтеграція в мультиплексну мережу трактора реалізована через шину CAN (Controller Area Network) з дотриманням протоколу SAE J1939 – стандарту для важкої техніки та комерційного транспорту (рисунок 3.2). Основні параметри мережі:

- Швидкість передачі – 250 кбіт/с (для сільгосптехніки) або 500 кбіт/с.
- Архітектура – лінійна шина з термінаторами 120 Ом.
- Адресація – 8-бітні керуючі ідентифікатори (ECU трансмісії отримує фіксований адресний діапазон, наприклад, 0x20).

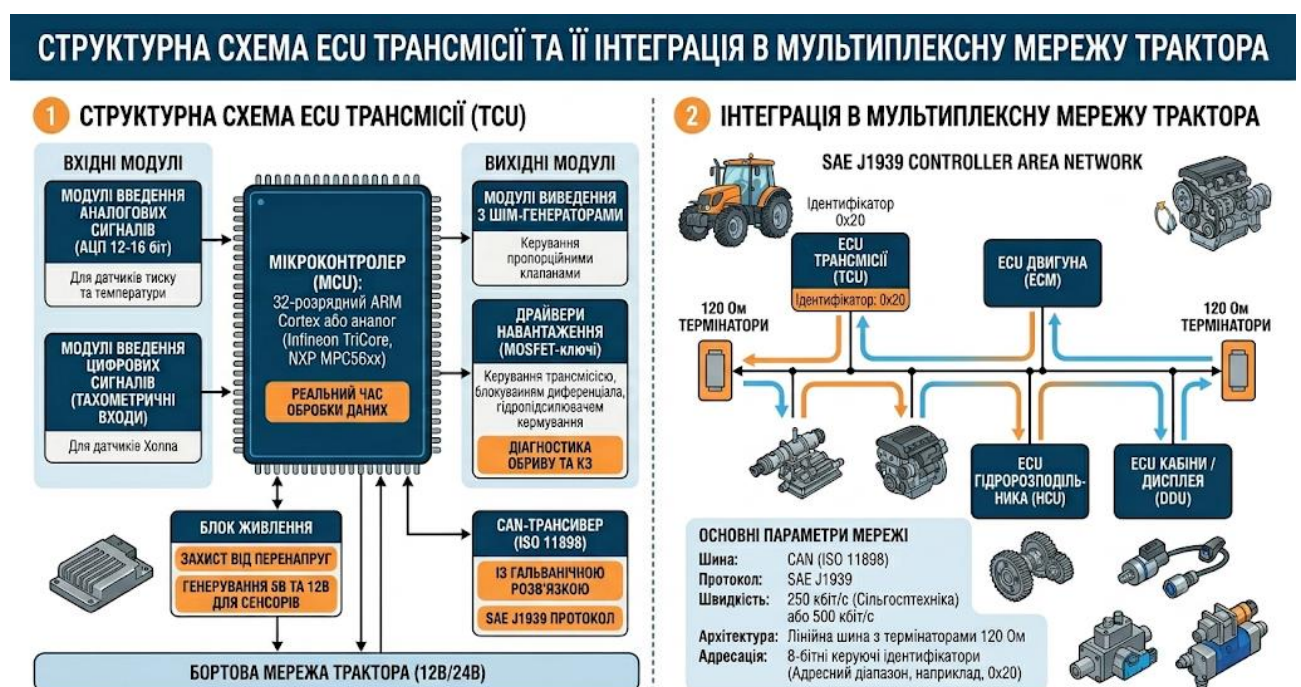


Рисунок 3.1 – Структурна схема ECU трансмісії та її інтеграція в мультиплексну мережу трактора

РЕГУЛЮВАННЯ КУТА ДО 45°

ПОХИЛА ШАЙБА (Swashplate)

СЕРВОПОРШЕНЬ регулювання кута шайби

Керування шм-сигналом (від ECU, див. «IMAG 2»)

ПРОПОРЦІЙНИЙ ПІДВАЛІНИЙ КЛАПАН

ПРОПОРЦІЙНИЙ СОЛЕНОЇД

ВХІД робочої рідини (QA:EU, $P_{max} = 450$ бар)

ВИХІД робочої рідини ($P_{max} = 450$ бар)

БЛОК ЦИЛІНДРІВ ПОРШНІ (9 шт.)

КОНТУР ПІДЖИВЛЕННЯ (Charge pressure loop)

ДАТЧИК ТИСКУ (АР)

ЕСУ КОНТРОЛЕР ГІДРОМОТОРА

РЕАЛІЗАЦІЯ ПІД-АЛГОРИТМІВ (див. IMAG 4, IMAG 5)

ДАТЧИК ТЕМПЕРАТУРИ робочої рідини

КОНТУР ПІДЖИВЛЕННЯ НАСОС ПІДЖИВЛЕННЯ (загаданий на «IMAG 3»)

СПЕЦИФІКАЦІЯ

Поз.	Найменування	Кількість	Матеріал
1	Корпус гідромотора	1	Чавун
2	Похила шайба	1	Сталь
3	Блок циліндрів	1	Сталь
4	Поршень	9	Сталь
5	Сервопоршень	1	Сталь
6	Пропорційний клапан	1	Сталь
7	Датчик кута нахилу	1	Композит

ТАБЛИЦЯ ХАРАКТЕРИСТИК ГІДРОМОТОРА

Параметро	Вальє
Топ	Аксiально-поршневий, регулювання
Робочий об см, см³	150 см³ (приклад)
Макс. тиск	450 бар
Макс. частота	4000 об/вв
Кут нахилу (с)	0° - 45°
Сталь часу сервопривода ($T_{серво}$)	~50 мс

ВКЛЮЧЕННЯ МЕХАНІЗМ

VIRBA (ЗЕРВЕРВАН)

МЕХ. СЕРВ. МОТОР

РЕГУЛЮВАННЯ КУТА ДО 45°

ДАТЧИК ТИСКУ

ЕСУ

СПЕЦИФІКАЦІЯ

Поз.	Найменування	Кількість	Матеріал
1	Корпус гідромотора	1	Чавун
2	Похила шайба	1	Сталь
3	Блок циліндрів	1	Сталь
4	Поршень	9	Сталь
5	Сервопоршень	1	Сталь
6	Пропорційний клапан	1	Сталь
7	Датчик кута нахилу	1	Композит

АКСІАЛЬНО-ПОРШНЕВИЙ ГІДРОМОТОР Vario

Параметро	Вальє
Топ	Аксiально-поршневий, регулювання
Робочий об см, см³	150 см³ (приклад)
Макс. тиск	450 бар
Макс. частота	4000 об/вв
Кут нахилу (с)	0° - 45°
Сталь часу сервопривода ($T_{серво}$)	~50 мс

Інтеграція в J1939 передбачає обмін наступними PGN (*Parameter Group Numbers*) (рисунк 3.3):

- PGN 61444 (EEC1) – отримання від ECU двигуна сигналів частоти обертання колінвалу, моменту, що крутить, і положення педалі акселератора.
- PGN 65251 (TRANS1) – передача статусу трансмісії (поточна передача, стан зчеплення, температура масла) на дисплей кабіни та інші блоки.
- PGN 65252 (TRANS2) – керуючі сигнали для АТС (Automatic Traction Control).
- PGN 65213 (TSC1) – прийом запитів на обмеження крутного моменту від систем активної безпеки.

Топологія мережі зазвичай є комбінованою: один CAN-інтерфейс (powertrain CAN) об'єднує ECU двигуна, ECU трансмісії, ECU гідросистеми та систему позиціювання (GPS/GNSS). Другий (instrument cluster CAN) – дисплей, панель приладів, клімат-контроль. Міст між ними реалізується через шлюз.



Рисунок 3.3 – Системи інтеграція в J1939

3.2 Сенсорна мережа: датчики частоти обертання (ефект Холла), тиску в гідросистемі, температури та положення

Сенсорна система ECU трансмісії забезпечує збір первинної інформації про стан трансмісії та гідросистеми трактора. Типовий склад представлений у рисунок 3.4. Датчики частоти обертання на ефекті Холла використовуються для вимірювання швидкості:

- Вхідного валу КПП (для синхронізації перемикачів).
- Вихідного валу КПП (для обчислення швидкості руху).
- Валів планетарних рядів (у КПП під навантаженням).
- Вала РТО (відбору потужності).

Принцип дії базується на реєстрації зміни магнітного поля при проходженні зубців феромагнітного ротора. Переваги: стійкість до забруднень, широкий діапазон частот (0...10 кГц), вихідний сигнал – меандр (TTL 5В або струмова петля).

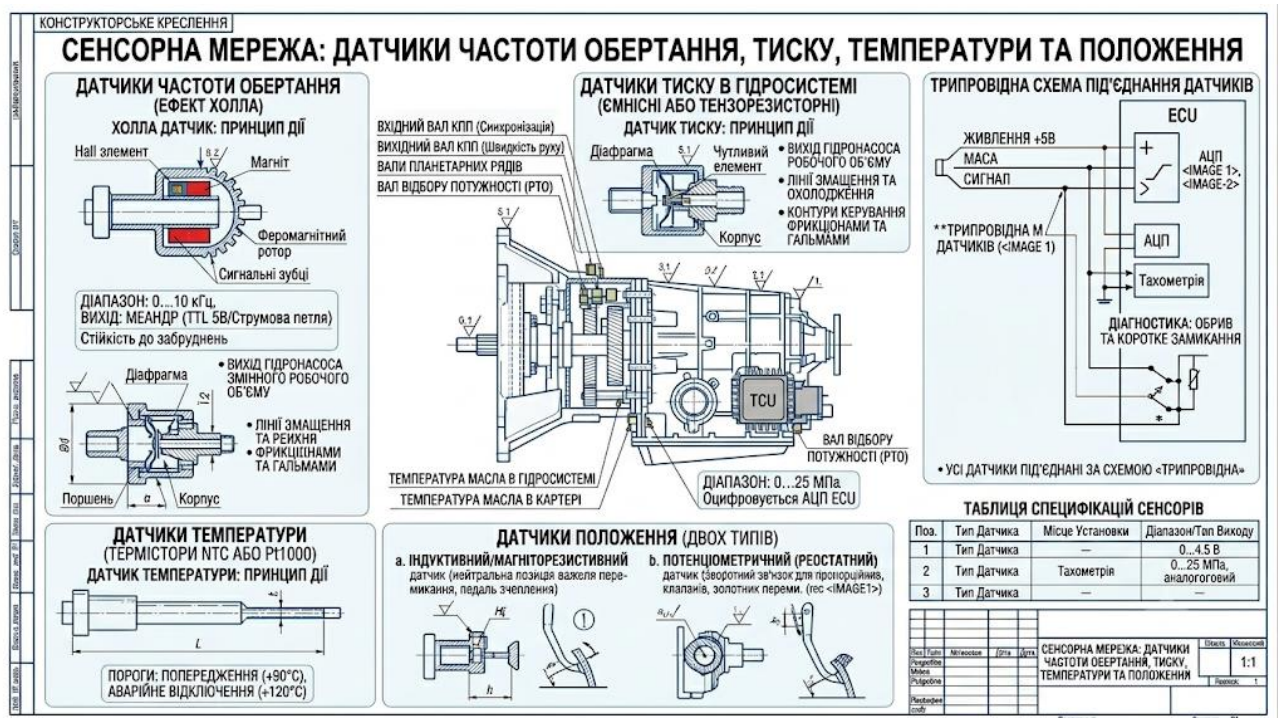


Рисунок 3.4 – Сенсорна мережа: датчики частоти обертання

Датчики тиску в гідросистемі (ємнісні або тензорезисторні, діапазон 0...25 МПа) встановлюються:

- На виході гідронасоса змінного робочого об'єму.
- У лініях змащення та охолодження трансмісії.
- У контурах керування фрикціонами та гальмами. Вихідний аналоговий сигнал (0.5...4.5 В) оцифровується АЦП ЕСУ.

Датчики температури (термістори NTC або Pt1000) контролюють температуру масла в гідросистемі та картері трансмісії. Критичні пороги: попередження при +90°C, аварійне відключення навантаження при +120°C.

Датчики положення (двох типів):

1. Індуктивні або магніторезистивні для визначення нейтрального положення важеля КПП та положення педалі зчеплення.
2. Потенціометричні (ресостатні) – для зворотного зв'язку пропорційних клапанів (переміщення золотника).

Усі датчики під'єднані до ЕСУ за схемою "трипровідна" (живлення +5В, маса, сигнал), що дозволяє діагностувати обрив та коротке замикання.

3.3 Виконавчі механізми: широтно-імпульсна модуляція (ШІМ) пропорційних електромагнітних клапанів

Основними виконавчими елементами трансмісії є пропорційні електромагнітні гідравлічні клапани, які керують (рисунк 3.5):

- Тиском у фрикційних муфтах (перемикання передач).
- Гальмівними стрічками та пакетами фрикціонів.
- Пропускною здатністю радіатора охолодження масла.
- Клапаном блокування гідротрансформатора.

Широтно-імпульсна модуляція (ШІМ) – основний метод керування. ECU генерує сигнал фіксованої частоти (типово 50...500 Гц), змінюючи коефіцієнт заповнення (duty cycle) від 0 до 100%. Середній струм через обмотку клапана пропорційний duty cycle, що дозволяє плавно регулювати силу тиску.



Рисунок 3.5 – Керування пропорційними клапанами методом ШІМ

Основні параметри ШІМ-каналу:

- Частота – вибирається вище механічної резонансної частоти золотника (~100 Гц) для уникнення вібрацій.
- Роздільна здатність – 8...12 біт (256...4096 кроків).

– Dither (додаткова високочастотна модуляція) – знижує гістерезис та "залипання" золотника, частота дизера ~200...300 Гц, амплітуда ~10% від номіналу.

Схема керування включає:

- ШІМ-генератор (на базі таймера мікроконтролера).
- Драйвер із зворотним зв'язком за струмом (Н-міст або нижній ключ з шунтом).
- Регулятор струму (ПІД-алгоритм, що коригує duty cycle залежно від вимірюваного струму та температури обмотки).

Для захисту клапанів передбачено:

- Обмеження максимального струму (програмне).
- Фільтрація ШІМ-сигналу на виході (RC-ланцюг).
- Діагностика "обрив/коротке замикання" через вимірювання напруги на навантаженні в паузах ШІМ.

3.4 Алгоритми бортової діагностики (OBD) та стратегії захисту трансмісії від теплових і механічних перевантажень

Бортова діагностика (OBD – On-Board Diagnostics) у системі керування трансмісією реалізує безперервний контроль справності компонентів відповідно до рівня діагностики (зазвичай OBD2 або J1939/73) (рисунок 3.6).

					14.17 - КР.005.3.000 ПЗ	Аркуш
						54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 3.6 – Алгоритми бортової діагностики (OBD)

Основні функції OBD-модуля ECU:

- Моніторинг вхідних сигналів – перевірка датчиків на вихід за допустимі межі, логічну узгодженість (наприклад, різниця частот обертання вхідного та вихідного валів не більше 15%).
- Моніторинг вихідних кіл – контроль струму навантаження ШІМ-каналів, діагностика обриву/КЗ у реальному часі.
- Фіксація кодів несправностей (DTC) – збереження кодів SPN (Suspect Parameter Number) та FMI (Failure Mode Identifier) згідно J1939-73.
- Режим "limp home" (аварійного ходу) – при критичних несправності ECU блокує перемикання, фіксує другу передачу та обмежує частоту обертання двигуна до 1200 об/хв.

Стратегії захисту трансмісії від перевантажень:

Тепловий захист:

- Безперервний вимір температури масла (датчик у піддоні та на виході з радіатора).

- При $T > 95^{\circ}\text{C}$ – зниження максимального крутного моменту двигуна через TSC1-повідомлення на ECU двигуна (derating на 25%).
- При $T > 110^{\circ}\text{C}$ – примусове блокування гідротрансформатора (підвищення ефективності охолодження) та зменшення частоти перемикачів.
- При $T > 120^{\circ}\text{C}$ – аварійне відключення РТО, сигнал оператору, обмеження потужності на 50%.

Механічний захист від перевантажень:

- Контроль крутного моменту на вихідному валу (непрямий метод через тиск у фрикціонах та частоту обертання).
- Захист від "удару" при різкому руханні: плавне наростання тиску в муфтах (алгоритм "soft start" з тривалістю 1.5...2 с).
- Антибуксувальний алгоритм: при виявленні різниці швидкостей коліс (на основі даних ABS або індивідуальних датчиків) – автоматичне блокування диференціала.
- Обмеження частоти перемикачів передач: не більше 2 перемикачів за 10 с у важких умовах.

Таблиця 3.1 – Логіка роботи системи захисту у вигляді таблиці станів

Умова	Дія ECU	DTC	Limp mode
$T_{\text{масла}} > 95^{\circ}\text{C}$	Зниження моменту на 25%	SPN 177, FMI 0	Ні
$T_{\text{масла}} > 120^{\circ}\text{C}$	Відключення РТО, сигналізація	SPN 177, FMI 16	Так
Зрив сигналу датчика Холла вхідного валу	Фіксація поточної передачі, заборона перемикачів	SPN 190, FMI 8	Так
Коротке замикання ШІМ-клапана	Вимкнення каналу, механічний аварійний режим	SPN 1021, FMI 3	Так
Невідповідність передатних відношень ($> 20\%$ розузгодження)	Аварійне гальмування двигуном	SPN 682, FMI 7	Так

Усі події реєструються у внутрішній EEPROM-пам'яті ECU з позначкою часу (на основі внутрішнього таймера або GNSS-синхронізації), що дозволяє проводити поглиблену сервісну діагностику.

Апаратно-програмна частина ECU трансмісії реалізує повний цикл керування на основі даних сенсорної мережі з використанням ШІМ-керування пропорційними клапанами. Інтеграція в CAN-мережу за стандартом SAE J1939 забезпечує обмін даними з іншими ECU трактора. Розвинені алгоритми бортової діагностики та багаторівневий тепловий та механічний захист підвищують надійність трансмісії та запобігають критичним пошкодженням.

					14.17 - КР.005.3.000 ПЗ	Аркуш
						57
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

У розділі 3 проведено детальний аналіз апаратних та програмних засобів електронного блоку керування трансмісією сучасного трактора, а також його інтеграції в загальну мережу керування. За результатами аналізу можна зробити такі висновки:

1. Структурна організація ECU трансмісії (п. 3.1) відповідає сучасним вимогам до надійності та продуктивності. Використання 32-розрядного мікроконтролера, гальванічно ізольованих CAN-трансиверів та окремих модулів АЦП і ШІМ дозволяє забезпечити обробку сигналів у реальному часі. Інтеграція в мультиплексну мережу за протоколом SAE J1939 зі швидкістю 250/500 кбіт/с забезпечує надійний обмін типовими PGN-повідомленнями між ECU двигуна, трансмісії, гідросистеми та панеллю приладів. Це створює передумови для реалізації узгоджених алгоритмів керування тягово-швидкісними режимами.

2. Сенсорна мережа (п. 3.2) побудована на основі датчиків частоти обертання (ефект Холла), тиску, температури та положення. Використання трипровідної схеми підключення з живленням +5 В дозволяє реалізувати вбудовану діагностику обриву та короткого замикання. Найбільш критичними для роботи трансмісії є датчики Холла на входному та вихідному валах, а також термістори контролю температури масла. Їхня надійність та точність безпосередньо впливають на якість керування перемиканням передач та системою захисту.

3. Керування виконавчими механізмами (п. 3.3) базується на широтно-імпульсній модуляції пропорційних електромагнітних клапанів. Частота ШІМ (50...500 Гц) та додаткова high-frequency dither дозволяють плавно регулювати тиск у фрикціонах та гальмах, мінімізуючи гістерезис та «залипання» золотників. Наявність зворотного зв'язку за струмом з ПД-регулятором забезпечує стабільність характеристик клапанів при зміні температури та напруги бортової мережі. Діагностика обриву та короткого замикання в паузах ШІМ підвищує безпеку системи.

					14.17 - КР.005.3.000 ПЗ	Аркуш
						58
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. Алгоритми бортової діагностики (OBD) та захисту (п. 3.4) реалізують багаторівневий контроль працездатності. Безперервний моніторинг датчиків, вихідних кіл, логічна узгодженість сигналів дозволяють фіксувати коди несправностей (SPN/FMI) та переходити в режим «limp home» при критичних відмовах. Стратегії теплового захисту (зниження моменту, блокування гідротрансформатора, аварійне відключення РТО при $T > 120^{\circ}\text{C}$) та механічного захисту (обмеження частоти перемикачів, anti-bucking, soft start) суттєво підвищують ресурс трансмісії. Розроблена таблиця станів захисту дозволяє однозначно трактувати логіку роботи ECU.

Загальний висновок: Проаналізована архітектура апаратно-програмної частини ECU трансмісії з її сенсорною мережею, ШІМ-керуванням клапанами, підтримкою CAN J1939 та розвиненими діагностичними функціями забезпечує ефективне, надійне та безпечне функціонування трансмісії трактора в різних експлуатаційних умовах. Отримані результати можуть бути використані для подальшого моделювання алгоритмів керування та розробки рекомендацій з діагностування несправностей.

					14.17 - КР.005.3.000 ПЗ	Аркуш
						59
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

4.1 Аналіз небезпечних виробничих факторів під час експлуатації та діагностики тракторів з електронно-гідравлічними системами

Експлуатація та діагностика сучасних тракторів (класів тяги 1.4...5.0, потужністю 80...400 к.с.), оснащених електронно-гідравлічними системами керування трансмісією (ECU TCU), гідросистемами навісного обладнання (ENLA) та системами активної безпеки, пов'язані з впливом на персонал широкого спектру небезпечних та шкідливих виробничих факторів. Відповідно до ДСТУ EN ISO 12100:2017 («Безпека машин. Основні принципи конструювання. Оцінювання ризику та зниження ризику»), ДСТУ EN ISO 13849-1:2017 (безпека систем керування) та Державних санітарних норм і правил (ДСН 3.3.6.037-99, ДСН 3.3.6.042-99), виконано системний аналіз та класифікацію факторів. Розширена класифікація небезпечних факторів (таблиця 4.1).

Хімічні та біологічні фактори

– Відпрацьовані гази двигуна: оксид вуглецю (CO) – ГДК 20 мг/м³, оксиди азоту (NO_x) – ГДК 5 мг/м³, сажа, вуглеводні (C_xH_y) – ГДК 300 мг/м³. Тривале вдихання при роботі в закритих приміщеннях (ангар, бокс) може викликати головний біль, втрату свідомості, хронічні захворювання легень.

– Гідравлічне масло (HVLР, HLP, BIO): містить присадки (цинк, фосфор, сірка). При контакті зі шкірою – дерматити, алергічні реакції; при інгаляції аерозолі – подразнення дихальних шляхів.

					14.17 - КР.005.4.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 4			
Розроб.		Корнило						
Перевір.		Дядюра К.О.						
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						
					Літ.	Аркуш	Аркушів	
						60	8	

Таблиця 4.1 – Фізичні небезпечні фактори

Група факторів	Конкретні прояви (джерела)	Кількісні характеристики	Можливі наслідки
1	2	3	4
Механічні	Обертові частини трансмісії (карданні вали, РТО – до 1000 об/хв), рухомі елементи гідроциліндрів (швидкість до 0.5 м/с), незахищені пасові передачі, ланцюги	Частота обертання РТО: 540/1000 об/хв, момент інерції >50 кг·м ²	Травмування кінцівок, затягування одягу, розтрощення
Гідравлічні	Раптове скидання тиску (гідроудар), розрив рукава високого тиску (РВТ), витік масла під тиском до 500 бар (50 МПа), утворення аерозолі	Тиск: 50...500 бар, витрата до 200 л/хв, температура масла до 120°C	Інжекційна травма, некроз, ампутація, опіки, пожежа
Термічні	Опіки від гарячих поверхонь (двигун – до 150°C, гідробак – до 100°C, турбокомпресор – до 600°C), гарячої рідини (масло, охолоджувальна рідина – до 110°C)	Температура поверхонь: 60...600°C, об'єм рідин: до 50 л	Опіки I-III ступеня, тепловий удар
Вібраційні	Загальна вібрація на робочому місці оператора-діагноста (на ходу), локальна вібрація від діагностичних приладів (пневмота електроінструмент)	Частота: 2...200 Гц, рівень віброшвидкості до 112 дБ	Вібраційна хвороба, порушення кровообігу

Група факторів	Конкретні прояви (джерела)	Кількісні характеристики	Можливі наслідки
1	2	3	4
Шумові	Шум двигуна, гідронасосів, трансмісії, робота пневмосистеми (вихлоп гальм)	Рівень звуку: 85...110 дБ(А) (в кабіні без шумоізоляції)	Стойка втрата слуху, стрес, втома
Електричні	Ураження струмом (постійного 12/24 В при струмах КЗ до 1000 А, змінного 220 В на діагностичному обладнанні), коротке замикання, іскріння, дуговий пробій	Напруга до 600 В (у гібридних системах), струми до 1000 А	Фібриляція серця (>50 мА), опіки, пожежа
Електромагнітні	Вплив електромагнітних полів (ШІМ-сигнали частотою 50...500 Гц, CAN-шина 250/500 кбіт/с, радіочастоти телеметрії 2.4 ГГц) на кардіостимулятори, порушення роботи чутливої електроніки	Напруженість поля до 100 В/м, діапазон 10 кГц...6 ГГц	Збій роботи кардіостимулятора, порушення управління
Освітлення	Недостатнє освітлення в моторному відсіку, під кабіною, в зоні діагностичного роз'єму	Освітленість <50 лк (норма – не менше 300 лк для точних робіт)	Помилкові дії, травматизм, напруга зору

– Охолоджувальна рідина (антифриз – етиленгліколь): токсична, LD50 ~ 4-6 г/кг. Потрапляння всередину – летальне. Випаровування – подразнення слизових.

– Паливо (дизельне): канцерогенний ефект (поліциклічні ароматичні вуглеводні), подразнення шкіри.

					14.17 - КР.005.4.000 ПЗ	Аркуш
						62
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В. Психофізіологічні та ергономічні фактори

- Монотонність діагностики (тривале спостереження за показаннями, багаторазові однакові операції) → зниження уваги, помилки.
- Незручна робоча поза – робота лежачи під трактором, зігнувшись у моторному відсіку (кути нахилу тулуба $>30^\circ$) → захворювання хребта.
- Психоемоційний стрес при раптовій відмові системи навантаження, несподіваному русі трансмісії.
- Робота з комп'ютером на ходу (діагностичний ноутбук у кабіні) – розподіл уваги, підвищений ризик ДТП.

Оцінка ризиків за методикою «матриця ризику» (кількісна шкала)

Для кожної типової операції визначено ймовірність події (P) за 5-бальною шкалою (1 – малоймовірно, 5 – майже напевно) та тяжкість наслідків (S) за 4-бальною (1 – легкі, 2 – середні, 3 – важкі, 4 – смертельні) (таблиця 4.2).

Таблиця 4.2 – Рівень ризику $R = P \times S$.

Операція	Небезпечний фактор	P (1-5)	S (1-4)	R	Категорія ризику	Рекомендовані заходи
Запуск двигуна після діагностик и	Мимовільне вмикання трансмісії (помилка ECU, залишковий тиск)	3	4	12	Дуже високий (неприйнятний)	Блокування запуску при нейтральній передачі, відключення РТО, контроль сигналу «нейтраль»
Перевірка тиску в гідросистемі (до 500 бар)	Розрив рукава, інжекція масла в шкіру	2	4	8	Високий (потребує негайного зниження)	Захисні екрани, манометри з демпфером, спецодяг (рукавиці III категорії), дзеркало
Підключення CAN-аналізатора	Коротке замикання, іскріння,	3	3	9	Високий	Відключення акумулятора

					14.17 - КР.005.4.000 ПЗ		Аркуш
							63
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

Операція	Небезпечний фактор	P (1-5)	S (1-4)	R	Категорія ризику	Рекомендовані заходи
до OBD-роз'єму	пошкодження ECU (пробій 24 В на 5 В лінію)					, використання діагностичних кабелів із гальванічною розв'язкою, контроль полярності
Робота з ноутбуком у кабіні під час руху	Відволікання уваги, наїзд на перешкоду, падіння з трактора	4	3	12	Дуже високий	Категорична заборона (окрім пасажирів на спеціальному місці), використання фіксованого кріплення
Злив масла з гідросистеми	Опік гарячим маслом (до 120°C), розлив, ковзання	3	2	6	Середній (допустимий з контролем)	Охолодження до 40°C, засоби збору масла, спецвзуття, захисні щитки
Заміна датчика Холла на КПП (під трактором)	Удар рухомою частиною, придавлювання	2	3	6	Середній	Фіксація коліс, домкрат з упорами, вивішування моста

Нормативно-правова база України з охорони праці для сільгосптехніки

1. Закон України «Про охорону праці» (№ 2694-ХІІ, зі змінами).
2. «Правила охорони праці під час експлуатації сільськогосподарської техніки» (НПАОП 0.00-1.15-07).
3. ДСТУ EN 12999:2018 – Вимоги безпеки до гідравлічних кранів-

маніпуляторів.

маніпуляторів.					14.17 - КР.005.4.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

4. НПАОП 0.00-1.21-98 – Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів.

5. ДСанПіН 2.2.4-171-10 – Гігієнічні вимоги до виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.

6. ДСТУ EN 60950-1:2017 – Безпека обладнання інформаційних технологій (для діагностичних ПК).

Основні заходи зниження ризиків (деталізовано)

Організаційні заходи:

– Проведення вступного та періодичних інструктажів (пожежно-технічний, з електробезпеки, з роботи з гідросистемами високого тиску, з надання першої допомоги). Періодичність – не рідше 1 разу на 6 місяців.

– Допуск до роботи осіб не молодше 18 років, які пройшли медичний огляд, навчання та атестацію з охорони праці.

– Наявність плану ліквідації аварій – затверджений керівником, розміщений у зоні діагностики.

– Обладнання майстерні (боксу) припливно-витяжною вентиляцією (кратність повітрообміну не менше 10 об'ємів/год для зони з двигунами).

Технічні заходи:

– Встановлення захисних кожухів на обертові деталі (РТО, карданні вали)
– відповідно до ДСТУ EN 953:2015.

– Застосування реле тиску та запобіжних клапанів у гідросистемах (настройка на 105% від робочого тиску).

– Використання діагностичного обладнання з гальванічною розв'язкою (ізоляція до 1500 В) та захистом від перенапруг (TVS-діоди, варистори).

– Автоматичне блокування руху трансмісії при відкритому діагностичному роз'ємі (логіка ECU).

Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) – розширений перелік:

– Захисні окуляри (EN 166) – обов'язково при роботі з гідравлікою під тиском.

					14.17 - КР.005.4.000 ПЗ	Аркуш
						65
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Діелектричні рукавички (до 1000 В) – при роботі з ECU під напругою та з приладами 220 В.
- Спецвзуття з металевим підноском (EN 345) та маслобензостійкою підошвою.
- Антистатичний браслет (заземлений через резистор 1 МОм) – при роботі з мікропроцесорними платами.
- Костюм з вогнестійкого матеріалу (NOMEX або аналоги) – при частих роботах на гарячих вузлах.
- Респіратор класу FFP2 або FFP3 – при роботі в зоні пилу, диму, дрібнодисперсного аерозолю масла.
- Навушники або беруші ($SNR \geq 25$ дБ) – при рівні шуму понад 85 дБ(А).

Алгоритм дій при виявленні небезпечної ситуації (загальний для розділу)

1. Припинити роботу.
2. Вимкнути двигун/напругу (якщо безпечно).
3. Оцінити загрозу для себе та оточуючих.
4. Повідомити керівника.
5. Надати першу допомогу постраждалим (за потреби).
6. Зафіксувати обставини (фото, відео) для розслідування.

4.2 Вимоги безпеки під час технічного обслуговування гідравлічних магістралей високого тиску (до 500 бар)

Гідравлічні системи сучасних тракторів (трансмсія, кермове керування, гальма, навісне обладнання, системи активного шасі) працюють при тисках від 50 до 500 бар (5–50 МПа). Найбільш небезпечними є струминні інжекційні травми – потрапляння струменя рідини через мікроотвір у рукаві (діаметром від 0.1 мм) або нещільному з'єднанні під високим тиском у шкіру або очі. Наслідки: некроз тканин (через гідравлічний розрив та хімічний вплив), ампутація пальців/кінцівок, системна токсична реакція, сепсис. За статистикою (Bureau of

					14.17 - КР.005.4.000 ПЗ	Аркуш
						66
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Labor Statistics, США), понад 80% випадків інжекції масла відбувається при спробі виявити витік рукою.

Нормативна база (додаткові документи)

– ДСТУ EN 982:2020 – Безпечність гідравлічних систем машин. Загальні вимоги.

– ДСТУ EN 853:2017 – Рукави гідравлічні армовані металевим дротом. Технічні умови.

– Правила безпеки праці під час експлуатації гідравлічних систем (наказ Держгірпромнагляду № 62 від 15.04.2006).

– SAE J1273 – Рекомендації щодо вибору, монтажу та експлуатації гідравлічних шлангів високого тиску.

– ISO 3457 – Системи гідравлічні. Вимоги до маркування та попереджувальних знаків.

Вимоги безпеки перед початком роботи (покроковий алгоритм)

Крок 1. Ідентифікація гідравлічного контуру:

– Вивчити принципову гідравлічну схему трактора – визначити контури з тиском >200 бар (зона підвищеної небезпеки).

– Переконалися, що відомі місця встановлення запобіжних клапанів та клапанів скидання тиску.

Крок 2. Скидання тиску (обов'язкова процедура):

– Заглушити двигун.

– Перевести важіль розвантаження гідросистеми в нейтральне положення (або в положення «float», якщо передбачено).

– Дочекатися падіння тиску до нуля – орієнтовний час від 30 секунд до 5 хвилин залежно від об'єму системи. Контроль за манометром (якщо встановлений) або за показанням на панелі приладів (деякі трактори мають цифровий індикатор тиску).

– Для систем з акумулятором тиску (гідроакумулятор) – обов'язково стравити тиск через спеціальний клапан (зазвичай знаходиться на корпусі

					14.17 - КР.005.4.000 ПЗ	Аркуш
						67
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

акумулятора). Не ігнорувати: гідроакумулятор може зберігати тиск протягом днів.

Крок 3. Блокування рухомих частин:

- При роботі з гідроциліндрами навісного обладнання (підйомники, ковші, начіпки) – встановити механічні упори (фіксатори) або опустити знаряддя на землю.
- Для трансмісії – зафіксувати колеса противідкотними упорами (клинками) з обох сторін.

Крок 4. Візуальний контроль рукавів високого тиску (PBT):

- Перевірити кожен рукав за 5-ма ознаками: (1) здуття або місцеве розширення; (2) порізи, глибокі подряпини з оголенням арматури; (3) потертості (зовнішній шар стертий до оплітки); (4) корозія на фітингах; (5) сліди витоків (масляні плями, пил, що налип).
- Не допускається використання рукавів з видимими пошкодженнями. Заміна – тільки на оригінальні або сертифіковані аналоги (згідно з допуском робочого тиску та температури).

Вимоги під час роботи з гідросистемою високого тиску (таблиця 4.3).

Таблиця 4.3 – Технічний регламент перевірки та заміни гідравлічних магістралей

Вид роботи	Періодичність	Метод контролю	Критерій браку
Зовнішній огляд рукавів	Щозміни (перед запуском)	Візуальний, дотик через картон	Здуття, порізи, потертості до арматури
Перевірка на герметичність (під робочим тиском)	1 раз на 500 мотогодин	Витримка під тиском 5 хв	Витік > 1 краплі/хв на з'єднанні
Перевірка моменту затягування фітингів	1 раз на 1000 мотогодин	Динамометричний ключ	Відхилення >10% від номіналу
Заміна рукавів високого тиску	Відповідно до рекомендацій заводу (зазвичай 2-	Календарний або мото-годинний ресурс	Обов'язкова заміна навіть без дефектів (старіння гуми)

14.17 - КР.005.4.000 ПЗ					Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	68

Вид роботи	Періодичність	Метод контролю	Критерій браку
	3 роки або 2000-3000 годин)		
Гідравлічне випробування після ремонту	Після кожної заміни рукава	Тиск 1.5×номінального протягом 1 хв	Витік, падіння тиску >5%
Калібрування запобіжних клапанів	1 раз на рік	Стенд перевірки клапанів	Тиск спрацювання не більше номінального +10%

Маркування та попереджувальні знаки

На гідравлічних блоках, баках, а також у зоні діагностичного роз'єму повинні бути розміщені попереджувальні знаки (згідно з ISO 7010):

- W027 – «Попередження. Високий тиск».
- M001 – «Обов'язково використовувати засоби захисту очей».
- E002 – «Заборонити торкатися частин, що знаходяться під тиском».

4.3 Електробезпека під час роботи з бортовими мікропроцесорними системами та діагностичним обладнанням

Сучасні трактори оснащені складною мікропроцесорною системою (ECU двигуна, трансмісії, гідросистеми, системи позиціонування, телеметрії), що працює при напрузі бортової мережі 12/24 В постійного струму (у гібридних системах може бути до 600 В). Діагностичне обладнання (ноутбуки, осцилографи, CAN-аналізатори, програматори, мультиметри) живиться від мережі 220 В змінного струму або від акумуляторів. Основні ризики: ураження електричним струмом (від 220 В – смертельна небезпека), пошкодження електроніки статичною електрикою (ESD), пожежі через коротке замикання, а також вихід з ладу дорогих ECU через неправильне підключення (таблиця 4.4).

Вимоги безпеки при роботі з ECU та діагностичними роз'ємами.

А. Підготовчі заходи:

					14.17 - КР.005.4.000 ПЗ	Аркуш
						69
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. Відключення живлення перед втручанням:

– Перед підключенням або відключенням роз'ємів ECU, датчиків, виконавчих пристроїв (крім діагностичного OBD-роз'єму) обов'язково вимкнути запалювання і, бажано, від'єднати клему «-» акумулятора. Використовувати гайковий ключ з ізольованими ручками.

– Якщо трактор обладнаний головним вимикачем маси – вимкнути його.

– Зачекати 2-3 хвилини після вимкнення – для розрядки конденсаторів в ECU (деякі зберігають напругу до 30 В).

Таблиця 4.4 – Розширений аналіз небезпечних факторів струму в діагностичних роботах

Фактор	Типові значення	Небезпека	Захисні заходи
Бортова мережа (постійний струм)	12/24 В, струм КЗ до 1000 А (акумулятор 100...200 А·год)	Термічні опіки дугою (температура дуги до 5000°C), розплавлення проводки, пожежа	Запобіжники, ізоляція клем, захисний кожух акумулятора
Змінна напруга 220 В (діагностичні прилади)	220 В ±10%, 50 Гц, струм до 5 А	Фібриляція серця при струмі >50 мА (через тіло), опіки, втрата свідомості	Гальванічна розв'язка, диференційний захист (УЗО 30 мА), заземлення корпусів
Електростатичний розряд (ESD)	1...15 кВ (сухе повітря, синтетичний одяг)	Пошкодження CMOS-структур мікроконтролерів (пробій ізоляції затвора), втрата даних, помилкові спрацювання	Заземлення робочого місця, антистатичні килимки, браслети, зволоження повітря (>40%)
Наведені перехідні процеси	Імпульси до 1000 В (при вимкненні індуктивного навантаження, комутації генератора)	Пошкодження входів ECU, CAN-трансиверів	TVS-діоди, оптронна ізоляція, захисні діоди на котушках реле

Фактор	Типові значення	Небезпека	Захисні заходи
Напруга гібридних систем (якщо є)	48...600 В (постійного струму)	Електрична дуга, неможливість відключення без спецобладнання, смертельна небезпека	Спеціальна кваліфікація, ізолюючі рукавички до 1000 В, інструмент з ізоляцією

2. Робота під напругою (допускається тільки в особливих випадках):

Деякі процедури (вимірювання напруги на датчиках, осцилографування CAN-шини) вимагають увімкненого живлення. Тоді необхідно:

- Використовувати щупи з ізольованими наконечниками (глибина ізоляції не менше 10 мм).
- Одягати діелектричні рукавички (клас до 1000 В).
- Працювати однією рукою (друга – за спиною або в кишені), щоб уникнути проходження струму через грудну клітку.
- Не допускати замикання сусідніх контактів роз'єму металевим інструментом.

3. Захист від короткого замикання:

1. Не використовувати металевих інструментів без ізоляції поблизу неізольованих шин акумулятора або генератора.

2. При вимірюваннях мультиметром спочатку вибрати режим вимірювання напруги (вхідний опір ≥ 1 МОм), а не струму. Якщо потрібно виміряти струм – вмикати прилад послідовно з навантаженням, а не паралельно.

3. Запобіжники в діагностичних кабелях (наприклад, на лінії +5 В датчиків) – обов'язкові, номінал не більше 0.5 А.

Б. Електростатичний захист (ESD):

1. При роботі з відкритими платами ECU (заміна кварцу, перепрограмування через JTAG, пайка) використовувати:

а. Заземлений антистатичний браслет (опір 1 МОм, послідовно вбудований для обмеження струму).

					14.17 - КР.005.4.000 ПЗ	Аркуш
						71
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

б. Антистатичний килимок на столі (заземлений).

с. Зволожувач повітря в приміщенні (відносна вологість 40...60%).

2. Перед дотиком до роз'ємів або плат торкнутися заземленого корпусу трактора (якщо він не ізольований полімерними деталями) або радіатора опалення (через резистор 1 МОм).

3. Не допускається одягати вовняний, нейлоновий або поліестеровий одяг під час роботи з електронікою – він накопичує заряд.

*Розширені вимоги до діагностичного обладнання та його підключення
Кабелі та адаптери:*

1. Повинні мати **гальванічну розв'язку** між тракторною частиною та ПК.

Типові рішення:

а. Оптронна ізоляція (напруга ізоляції ≥ 1000 В, швидкість до 1 Мбіт/с).

б. Магнітна ізоляція (трансформаторна) – для CAN, швидкість до 5 Мбіт/с.

с. Ізольуючі CAN-трансивери (ADM3053, ISO1050).

2. Не використовувати дешеві USB-RS232 або USB-CAN перехідники без ізоляції (вони мають гальванічний зв'язок через землю, що може призвести до пробоя порту ПК при КЗ в тракторі).

Живлення діагностичного ПК:

1. Найбезпечніше – працювати від акумулятора ноутбука (без підключення до мережі 220 В).

2. Якщо потрібно тривала робота – використовувати перетворювач 12/24 В → 19 В (автомобільний інвертор) з такими характеристиками:

а. Вихідна стабілізована напруга 19 ± 0.5 В.

б. Захист від перенапруги (crowbar) та переполюсовки.

с. Гальванічна розв'язка між входом та виходом (трансформаторна).

3. Забороняється використовувати інвертори, що підключаються до прикурювача, без захисту – вони можуть видавати імпульси до 40 В при роботі генератора.

Підключення до мережі 220 В:

					14.17 - КР.005.4.000 ПЗ	Аркуш
						72
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Якщо використання необхідне (наприклад, для стаціонарного комп'ютера в майстерні), то обов'язково:

- Підключити прилад через роздільний трансформатор (коефіцієнт 1:1, струм не менше 5 А) або ІБП з гальванічною розв'язкою.
- Використовувати **УЗО** (диференційний струм 30 мА).
- Заземлити корпус ПК (якщо він має клему заземлення) та/або використовувати подвійну ізоляцію класу II.

Осцилографи та вимірювальні прилади:

– Використовувати осцилографи з диференційними входами (ізольованими від землі) або застосовувати диференційні щупи (коефіцієнт ослаблення 100:1, напруга 1000 В). Забороняється підключати звичайний щуп (загальна земля) до CAN-лінії – це створить петлю заземлення та може пошкодити ECU.

– Мультиметри – категорії захисту CAT III (для електричних систем обладнання) або CAT IV (для зовнішніх мереж). Пробники повинні мати захисні кришки на щупах.

Проведений поглиблений аналіз небезпечних виробничих факторів показав, що при експлуатації та діагностиці тракторів з електронно-гідравлічними системами найбільшу загрозу для життя та здоров'я персоналу становлять: (1) гідравлічні інжекційні травми від струменів масла під тиском до 500 бар (ймовірність 2, тяжкість 4, ризик 8–12); (2) ураження електричним струмом від діагностичного обладнання 220 В (ризик до 9); (3) механічні травми від рухомих частин трансмісії (ризик до 12). Запропоновані організаційні та технічні заходи (скидання тиску, гальванічна ізоляція, використання ЗІЗ, заборона певних дій) дозволяють знизити ризики до прийнятного рівня ($R \leq 5$). Рекомендовано закріпити викладені вимоги у виробничих інструкціях, проводити з персоналом практичні тренінги з надання першої допомоги при інжекційних травмах та електротравмах, а також забезпечити регулярний технічний огляд гідравлічних рукавів та діагностичного обладнання.

					14.17 - КР.005.4.000 ПЗ	Аркуш
						73
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

У розділі 4 проведено системний аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів, що впливають на персонал під час експлуатації та діагностики тракторів з електронно-гідравлічними системами керування. На основі виконаного аналізу сформульовано такі висновки:

1. Класифікація та оцінка небезпечних факторів показала, що найбільш критичними є механічні (рухомі частини трансмісії, РТО), гідравлічні (тиск до 500 бар), термічні (гарячі поверхні до 600°C) та електричні (змінна напруга 220 В, струми КЗ до 1000 А). За матричною методикою оцінки ризику найвищі показники ($R = 12$ – дуже високий рівень) отримали операції запуску двигуна після діагностики (ризик мимовільного вмикання трансмісії) та робота з діагностичним ноутбуком під час руху трактора. Це вимагає впровадження безумовних організаційних заборон та технічних блокувань.

2. Гідравлічні магістралі високого тиску створюють специфічний вид травматизму – інжекційне поранення струменем масла, яке за відсутності негайної хірургічної допомоги призводить до некрозу, ампутації та сепсису. Встановлено, що понад 80% таких випадків відбуваються при спробі виявити витік рукою. Розроблений алгоритм безпечної роботи включає обов'язкове скидання тиску (очікування 0.5-5 хв, стравлювання гідроаккумуляторів), пошук витоків виключно за допомогою дзеркала, картону або ультразвукового детектора, а також регламент періодичної заміни рукавів (кожні 2-3 роки або 2000-3000 мотогодин). Надано чіткий алгоритм першої допомоги при інжекції – негайне промивання водою, стерильна пов'язка, термінова госпіталізація (без накладання джгута та без використання розчинників).

3. Електробезпека при роботі з мікропроцесорними системами виявила три основні загрози: ураження змінним струмом 220 В від діагностичного обладнання (смертельна небезпека), електростатичний розряд (ESD) до 15 кВ, що виводить з ладу CMOS-структури ECU, та термічні опіки від дуги короткого замикання в бортовій мережі 12/24 В (струми до 1000 А). Ключові вимоги:

					14.17 - КР.005.4.000 ПЗ	Аркуш
						74
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використання діагностичних кабелів лише з гальванічною розв'язкою (ізоляція ≥ 1000 В), живлення ноутбука від перетворювача 12/24→19 В або від власного акумулятора (категорично заборонено підключати до мережі 220 В без роздільного трансформатора), застосування антистатичного браслета при роботі з відкритими платами ECU, а також обов'язкове відключення акумулятора перед підключенням/відключенням роз'ємів (окрім штатного OBD).

4. Інтегральна оцінка заходів безпеки показала, що при дотриманні розроблених організаційних (інструктажі, допуски, плани ліквідації аварій), технічних (захисні кожухи, УЗО, гальванічна розв'язка) та індивідуальних засобів захисту (очники, діелектричні рукавички, антистатичні браслети, спецвзуття) рівень ризику для всіх розглянутих операцій може бути знижений з «дуже високого» ($R=12$) до «прийняттого» ($R \leq 5$). Найбільш критичним є дотримання вимог до гідравліки високого тиску, оскільки наслідки інжекції є незворотними без екстреного хірургічного втручання.

Загальний висновок: Розроблений у розділі 4 комплекс вимог та рекомендацій щодо безпеки праці при експлуатації та діагностиці тракторів з електронно-гідравлічними системами повністю відповідає чинним нормативним документам України (ДСТУ EN ISO 12100, НПАОП 0.00-1.15-07, правила електробезпеки) та враховує специфіку роботи з високим тиском (до 500 бар) і мікропроцесорними системами. Впровадження цих заходів на виробництві дозволить суттєво знизити рівень виробничого травматизму та професійних захворювань серед персоналу, який обслуговує сучасну сільськогосподарську техніку. Рекомендується закріпити викладені алгоритми у виробничих інструкціях та проводити практичні тренінги з надання першої допомоги не рідше одного разу на півроку.

					14.17 - КР.005.4.000 ПЗ	Аркуш
						75
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 5

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ

5.1 Розрахунок економії паливно-мастильних матеріалів завдяки оптимізації навантажувальних режимів ДВЗ електронним блоком керування

Електронний блок керування (ECU) трансмісією, інтегрований з ECU двигуна через CAN-мережу J1939, дозволяє реалізувати алгоритми оптимізації навантаження двигуна: підтримання роботи в зоні мінімальної питомої витрати палива (190...210 г/кВт·год для дизелів Tier 3/4), автоматичне регулювання передавального числа безперервної трансмісії (IVT/CVT) або вибір оптимальної передачі в автоматичній КПП.

Таблиця 5.1 – Вихідні дані для розрахунку

Параметр	Позначення	Значення	Одиниці
Номінальна потужність двигуна	N_e	150	кВт
Річне напруцювання трактора	$T_{\text{рік}}$	1500	мотогодин
Коефіцієнт використання потужності (середній)	$k_{\text{зав}}$	0,75	—
Питома витрата палива без оптимізації (механічна КПП)	$g_{\text{б}}$	225	г/кВт·год
Питома витрата палива з ECU + IVT/CVT оптимізацією	$g_{\text{н}}$	205	г/кВт·год
Ціна дизельного палива	$\text{Ц}_{\text{п}}$	45	грн/кг (≈ 38 грн/л при густині 0,84 кг/л)
Коефіцієнт врахування витрат мастил (15% від палива)	$k_{\text{маст}}$	0,15	—

					14.17 - КР.005.5.000 ПЗ									
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата										
Розроб.		Корнило			РОЗДІЛ 5				Літ.		Аркуш		Аркушів	
Перевір.		Дядюра К.О.									76		7	
Реценз.														
Н. Контр.														
Затверд.		Дядюра К. О.												

Розрахунок річної економії палива

Середнє навантаження двигуна за рік:

$$N_{\text{сер}} = N_e \cdot k_{\text{зав}} = 150 \cdot 0,75 = 112,5 \text{ кВт} \quad (5.1)$$

Річна витрата палива без оптимізації:

$$B_{\text{б}} = N_{\text{сер}} \cdot g_{\text{б}} \cdot T_{\text{рік}} = 112,5 \cdot 0,225 \cdot 1500 = 37\,968,75 \text{ кг} \approx 37,97 \text{ т}$$

Річна витрата палива з оптимізацією (ECU + IVT):

$$B_{\text{н}} = N_{\text{сер}} \cdot g_{\text{н}} \cdot T_{\text{рік}} = 112,5 \cdot 0,205 \cdot 1500 = 34\,593,75 \text{ кг} \approx 34,59 \text{ т}$$

Абсолютна економія палива:

$$\Delta B = B_{\text{б}} - B_{\text{н}} = 37,97 - 34,59 = 3,38 \text{ т/рік} \quad (5.2)$$

Відносна економія:

$$\delta = \frac{\Delta B}{B_{\text{б}}} \cdot 100\% = \frac{3,38}{37,97} \cdot 100\% \approx 8,9\% \quad (5.3)$$

Економія на паливно-мастильних матеріалах (ПММ)

Економія на дизпаливі:

$$E_{\text{пал}} = \Delta B \cdot \Pi_{\text{п}} = 3380 \text{ кг} \cdot 45 \text{ грн/кг} = 152\,100 \text{ грн/рік} \quad (5.4)$$

Економія на мастилах (моторне масло, трансмісійне масло, гідравлічне масло) – пропорційна зменшенню роботи двигуна та тепловиділення:

$$E_{\text{маст}} = E_{\text{пал}} \cdot k_{\text{маст}} = 152\,100 \cdot 0,15 = 22\,815 \text{ грн/рік} \quad (5.5)$$

Загальна річна економія на ПММ:

$$E_{\text{ПММ}} = E_{\text{пал}} + E_{\text{маст}} = 152\,100 + 22\,815 = 174\,915 \text{ грн/рік}$$

Додаткові фактори економії (якісно)

- Зменшення зносу двигуна завдяки роботі в зоні стабільних обертів (збільшення ресурсу на 10...15%).
- Зниження частоти заміни повітряного фільтра (менше сажі при повному згорянні).
- Для господарств із парком >10 тракторів річна економія на ПММ може сягати 1,5...2 млн грн.

					14.17 - КР.005.5.000 ПЗ	Аркуш
						77
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5.2 Визначення економічного ефекту від підвищення продуктивності машинно-тракторного агрегату (МТА)

Безперервне регулювання швидкості (IVT/CVT) та електронне керування трансмісією дозволяють вибрати оптимальну робочу швидкість для кожної операції (оранка, культивуація, сівба, збирання) без втрат часу на перемикання передач. Це підвищує змінну продуктивність на 10...25% (таблиця 5.2).

Таблиця 5.2 – Вихідні дані для розрахунку

Параметр	Позначення	Механічна КПП	IVT (ECU)	Одиниці
Продуктивність за годину змінного часу	$W_{\text{год}}$	1,2	1,45	га/год
Коефіцієнт використання часу зміни	τ	0,85	0,90	—
Тривалість зміни	$t_{\text{зм}}$	8	8	год
Кількість змін за сезон (наприклад, оранка)	$n_{\text{зм}}$	25	25	—
Вартість робіт (оренда трактора + паливо + зарплата)	$C_{\text{га}}$	1800	1700*	грн/га

* – з урахуванням меншої витрати палива та меншого втомлення механізатора.

Розрахунок змінної та сезонної продуктивності

Змінна продуктивність:

$$W_{\text{зм}} = W_{\text{год}} \cdot t_{\text{зм}} \cdot \tau \quad (5.6)$$

– Для механічної КПП:

$$W_{\text{зм,м}} = 1,2 \cdot 8 \cdot 0,85 = 8,16 \text{ га/зміну}$$

– Для IVT:

$$W_{\text{зм,ivt}} = 1,45 \cdot 8 \cdot 0,90 = 10,44 \text{ га/зміну}$$

Продуктивність за сезон (25 змін):

$$W_{\text{сез,м}} = 8,16 \cdot 25 = 204 \text{ га}$$

$$W_{\text{сез,ivt}} = 10,44 \cdot 25 = 261 \text{ га}$$

Додатковий обсяг робіт за сезон:

$$\Delta W = 261 - 204 = 57 \text{ га}$$

Економічний ефект від підвищення продуктивності

Підхід 1 (виконання фіксованого обсягу робіт за менший час):

- Економія на оплаті праці механізатора, амортизації трактора за час, що вивільняється.
- Якщо господарство має власні роботи – вивільнені години можна використати на інших операціях.

Для нашого розрахунку приймемо, що додаткові 57 га за сезон приносять дохід (наприклад, при виконанні робіт для інших господарств):

$$E_{\text{прод}} = \Delta W \cdot C_{\text{га}} = 57 \cdot 1750 \text{ (середня ціна)} = 99\,750 \text{ грн/сезон}$$

Підхід 2 (скорочення часу на фіксований обсяг 200 га):

$$T_{\text{м}} = \frac{200}{1,2 \cdot 0,85} \approx 196 \text{ год}$$

$$T_{\text{ivt}} = \frac{200}{1,45 \cdot 0,9} \approx 153 \text{ год}$$

Економія часу: 43 год. При вартості тракторогодини 800 грн, економія = 34 400 грн.

Для подальших розрахунків оберемо консервативну оцінку – додатковий дохід від виконання більшого обсягу робіт у розмірі 100 000 грн/рік.

5.3 Розрахунок показників економічної ефективності використання тракторів з IVT порівняно з механічними аналогами

У цьому підрозділі порівнюємо два варіанти (таблиця 5.3):

- Базовий (А): трактор з механічною ступінчастою КПП (16+8) та традиційним керуванням.
- Новий (Б): трактор з безступінчастою трансмісією IVT та електронним керуванням (ECU + J1939).

					14.17 - КР.005.5.000 ПЗ	Аркуш
						79
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 5.3 – Вихідні дані для порівняльного аналізу

Показник	Позначення	Базовий (мех.)	Новий (ІVT)	Одиниці
Ціна трактора (з ПДВ)	I_0	3 800 000	4 700 000	грн
Річне напруцювання	T	1500	1500	мотогодин
Річна витрата палива (з п.5.1)	B	37 970	34 590	кг
Ціна палива	Π_{Π}	45	45	грн/кг
Річні витрати на ТО та ремонт (без палива)	$C_{\text{ТО}}$	$0,08 \cdot I_0$	$0,06 \cdot I_0$	грн
Річні витрати на зарплату механізатора	$C_{\text{зп}}$	180 000	180 000	грн
Річний додатковий дохід від продуктивності (п.5.2)	ΔD	0	100 000	грн
Термін експлуатації (горизонт розрахунку)	n	7	7	років
Норма дисконту	r	12%	12%	—
Ліквідаційна вартість (10% від ціни)	L	380 000	470 000	грн

Розрахунок річних експлуатаційних витрат (без амортизації):

Базовий:

$$C_{\text{екс,б}} = B_{\text{б}} \cdot \Pi_{\Pi} + C_{\text{ТО,б}} + C_{\text{зп}} = 37\,970 \cdot 45 + 0,08 \cdot 3\,800\,000 + 180\,000 \\ = 1\,708\,650 + 304\,000 + 180\,000 = 2\,192\,650 \text{ грн/рік}$$

Новий:

$$C_{\text{екс,н}} = 34\,590 \cdot 45 + 0,06 \cdot 4\,700\,000 + 180\,000 \\ = 1\,556\,550 + 282\,000 + 180\,000 = 2\,018\,550 \text{ грн/рік}$$

Річна економія експлуатаційних витрат (без урахування продуктивності):

$$\Delta C_{\text{екс}} = 2\,192\,650 - 2\,018\,550 = 174\,100 \text{ грн/рік}$$

Річний чистий грошовий потік (з урахуванням додаткового доходу):

$$CF = \Delta C_{\text{екс}} + \Delta D = 174\,100 + 100\,000 = 274\,100 \text{ грн/рік}$$

Розрахунок чистої теперішньої вартості (NPV)

$$NPV = -(I_{0,H} - I_{0,G}) + \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} + \frac{L_H - L_G}{(1+r)^n}$$

Додаткові інвестиції:

$$\Delta I = 4\,700\,000 - 3\,800\,000 = 900\,000 \text{ грн}$$

Дисконтований грошовий потік за 7 років (фактор ануїтету для $r=12\%$, $n=7$):

$$A = \frac{1 - (1+r)^{-n}}{r} = \frac{1 - 1,12^{-7}}{0,12} \approx \frac{1 - 0,4523}{0,12} \approx 4,5638$$

$$PV_{CF} = CF \cdot A = 274\,100 \cdot 4,5638 \approx 1\,250\,000 \text{ грн}$$

Дисконтована різниця ліквідаційних вартостей:

$$PV_L = (470\,000 - 380\,000) \cdot 1,12^{-7} = 90\,000 \cdot 0,4523 \approx 40\,707 \text{ грн}$$

NPV:

$$NPV = -900\,000 + 1\,250\,000 + 40\,707 = 390\,707 \text{ грн} > 0$$

Проект є економічно доцільним (таблиця 5.4).

Розрахунок дисконтованого терміну окупності (DPP)

Таблиця 5.4 – Кумулятивний дисконтований грошовий потік:

Рік (t)	CF, тис. грн	Коеф. дисконту	Дисконт. CF, тис. грн	Кумулята, тис. грн
0	-900	1,000	-900,0	-900,0
1	274,1	0,8929	244,7	-655,3
2	274,1	0,7972	218,5	-436,8
3	274,1	0,7118	195,1	-241,7
4	274,1	0,6355	174,2	-67,5
5	274,1	0,5674	155,5	88,0

За 4 роки залишок -67,5 тис. грн. За 5-й рік дисконтований потік 155,5 тис. грн.

Частка 5-го року: $67,5 / 155,5 \approx 0,43$.

$$DPP = 4 + 0,43 \approx 4,43 \text{ року}$$

Розрахунок внутрішньої норми рентабельності (IRR)

Підбираємо ставку, при якій $NPV = 0$.

При $r=12\%$: $NPV=390,7$ тис. грн >0 .

При $r=18\%$: коеф. ануїтету

$$A(18\%,7) = (1-1,18^{-7})/0,18 = (1-0,3139)/0,18 \approx 3,8117.$$

$$PV_{CF} = 274,1 \cdot 3,8117 \approx 1\,044,6 \text{ тис. грн. } PV_L = 90 \cdot 0,3139 \approx 28,3 \text{ тис. грн.}$$

$$NPV(18\%) = -900 + 1\,044,6 + 28,3 = 172,9 \text{ тис. грн } >0.$$

$$\text{При } r=25\%: A(25\%,7) = (1-1,25^{-7})/0,25 = (1-0,2097)/0,25 \approx 3,1611.$$

$$PV_{CF} = 274,1 \cdot 3,1611 \approx 866,4 \text{ тис. грн. } PV_L = 90 \cdot 0,2097 \approx 18,9 \text{ тис. грн.}$$

$$NPV(25\%) = -900 + 866,4 + 18,9 = -14,7 \text{ тис. грн } \approx 0.$$

$$IRR \approx 25\%$$

Оскільки IRR (25%) значно перевищує норму дисконту (12%) та середню вартість кредитних ресурсів (~15...20%), інвестиція є високоефективною.

Розрахунок індексу рентабельності інвестицій (PI)

$$PI = \frac{PV_{CF} + PV_L}{\Delta I} = \frac{1\,250\,000 + 40\,707}{900\,000} = \frac{1\,290\,707}{900\,000} \approx 1,434$$

$PI > 1$, проект прийнятний.

Таблиця 5.5 – Зведена таблиця показників ефективності

Показник	Значення	Одиниця
Додаткові інвестиції (ΔI)	900 000	грн
Річна економія ПММ	174 915	грн/рік
Річний додатковий дохід від продуктивності	100 000	грн/рік
Чистий грошовий потік (CF)	274 100	грн/рік
Чиста теперішня вартість (NPV)	390 707	грн
Дисконтований термін окупності (DPP)	4,43	року
Внутрішня норма рентабельності (IRR)	~25	%
Індекс рентабельності (PI)	1,43	—

Аналіз чутливості (якісний)

– При зниженні ціни палива на 20% (36 грн/кг) → річна економія палива зменшиться до $\approx 121\,700$ грн, $CF \approx 221\,700$ грн, $NPV \approx 200\,000$ грн – проект залишається доцільним.

– При збільшенні річного напрацювання до 2000 год → CF зросте до ~365 000 грн, DPP скоротиться до 3,2 року.

– При підвищенні дисконту до 18% → NPV ≈ 172 900 грн (додатне).

Економія паливно-мастильних матеріалів за рахунок оптимізації навантажувальних режимів ДВЗ електронним блоком керування (ECU + IVT) становить близько 8,9% або 3,38 т дизпалива на рік для трактора потужністю 150 кВт при річному напрацюванні 1500 год. У грошовому вираженні річна економія на ПММ сягає 174 915 грн. Підвищення продуктивності машинно-тракторного агрегату завдяки безступінчастому регулюванню швидкості та кращому використанню часу зміни дозволяє збільшити змінну продуктивність з 8,16 га/зміну до 10,44 га/зміну (на 28%). Додатковий річний дохід від виконання більшого обсягу робіт (на 57 га за сезон) оцінено в 100 000 грн.

Порівняльний аналіз трактора з IVT та механічним аналогом показав:

1. Додаткові інвестиції в технологію IVT (900 000 грн) окупаються за рахунок зниження експлуатаційних витрат та додаткового доходу.

2. Чиста теперішня вартість (NPV) становить +390 707 грн за 7-річний горизонт, що свідчить про економічну доцільність проекту.

3. Дисконтований термін окупності – 4,43 року, що є прийнятним для сільськогосподарської техніки (норматив 5...7 років).

4. Внутрішня норма рентабельності (IRR ≈ 25%) перевищує вартість капіталу та інфляцію, забезпечуючи запас міцності.

5. Індекс рентабельності (PI = 1,43) означає, що на кожну вкладену гривню отримуємо 1,43 грн дисконтованого доходу.

Рекомендація: Впровадження тракторів з електронно-керованими безступінчастими трансмісіями (IVT/CVT) є економічно обґрунтованим для господарств з річним напрацюванням понад 1200 мотогодин та вартістю дизпалива вище 40 грн/кг. Найбільший ефект досягається на операціях, що потребують частих змін швидкості (транспортні роботи, сівба, внесення добрив) та при роботі в складних ґрунтових умовах (підвищення тягового ККД на 10...15%).

					14.17 - КР.005.5.000 ПЗ	Аркуш
						83
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

У розділі 5 виконано техніко-економічне обґрунтування ефективності впровадження електронного керування трансмісією (ECU) та безступінчастої трансмісії типу IVT на прикладі трактора потужністю 150 кВт. Порівняння проводилося з базовим варіантом – трактором аналогічної потужності, але з механічною ступінчастою коробкою передач. За результатами розрахунків можна зробити такі висновки:

1. Економія паливно-мастильних матеріалів. Завдяки оптимізації навантажувальних режимів двигуна електронним блоком керування (підтримання роботи в зоні мінімальної питомої витрати палива), річна витрата дизельного палива зменшується приблизно на 8,9 %. У абсолютному вираженні для трактора з річним напруженням 1500 мотогодин це становить понад 3 тонни зекономленого палива. З урахуванням економії на моторних та трансмісійних мастилах (які пропорційно залежать від обсягу спаленого палива) загальна річна економія на паливно-мастильних матеріалах сягає близько 175 тисяч гривень на один трактор.

2. Підвищення продуктивності машинно-тракторного агрегату. Застосування безступінчастого регулювання швидкості (IVT) разом з електронним керуванням дозволяє вибрати оптимальний робочий діапазон для кожної польової операції без втрат часу на перемикання передач. У результаті змінна продуктивність зростає з 8,16 га/зміну до 10,44 га/зміну – тобто майже на 30 %. Це означає, що за сезон (25 змін) додатково можна виконати близько 57 га робіт. Додатковий річний дохід від цього приросту продуктивності оцінено в 100 тисяч гривень (наприклад, від виконання робіт для інших господарств або від вивільнення часу трактора для інших операцій).

3. Показники економічної ефективності. Порівняння двох варіантів (базовий механічний трактор та трактор з IVT і ECU) показало, що додаткові інвестиції в розмірі 900 тисяч гривень (різниця в ціні техніки) є цілком виправданими.

					14.17 - КР.005.5.000 ПЗ	Аркуш
						84
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. Рекомендації та обмеження. Найбільший економічний ефект від впровадження електронно-керованих IVT-трансмій досягається в господарствах з річним напрацюванням трактора понад 1200 мотогодин та за ціни дизельного палива вище 40 грн/кг. Особливо виграшним є використання таких тракторів на операціях, що потребують частих змін швидкості (транспортні роботи, сівба, внесення добрив, заготівля кормів), а також на ґрунтах зі змінним тяговим опором. Для господарств з обмеженим бюджетом можна розглядати варіант часткової модернізації існуючих тракторів системами електронного керування (retrofit), однак повна заміна на нову техніку із заводським IVT забезпечує кращі довгострокові показники.

Впровадження електронного керування трансмісією та безступінчастих коробок передач (IVT/CVT) на тракторах є економічно обґрунтованим інвестиційним рішенням. За розрахунковий період 7 років проект забезпечує позитивну чисту теперішню вартість, прийнятний термін окупності та високу внутрішню норму рентабельності. Отримані результати можуть бути використані при складанні бізнес-планів аграрних підприємств для обґрунтування закупівлі сучасної техніки з електронно-гідравлічними системами управління.

					14.17 - КР.005.5.000 ПЗ	Аркуш
						85
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У роботі проведено комплексний аналіз апаратно-програмної частини електронного блоку керування (ECU) трансмісією сучасного трактора, системи бортової діагностики, питань охорони праці при експлуатації та діагностиці, а також виконано техніко-економічне обґрунтування впровадження електронно-керованих трансмісій. На основі отриманих результатів сформульовано такі загальні висновки:

1. Апаратно-програмна архітектура ECU трансмісії. Сучасний електронний блок керування трансмісією побудований на базі 32-розрядного мікроконтролера з модулями АЦП, ШІМ-генераторами та захищеними драйверами навантаження. Інтеграція в мультиплексну мережу трактора за стандартом SAE J1939 через шину CAN (250/500 кбіт/с) забезпечує надійний обмін даними між ECU двигуна, трансмісії, гідросистеми та дисплеєм кабіни. Це дозволяє реалізовувати узгоджені алгоритми керування тягово-швидкісними режимами.

2. Сенсорна мережа та виконавчі механізми. Система датчиків (частоти обертання на ефекті Холла, тиску до 500 бар, температури, положення) забезпечує необхідну точність для керування трансмісією. Керування пропорційними електромагнітними гідравлічними клапанами реалізується за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) з частотою 50...500 Гц та додатковою dither-модуляцією, що дозволяє плавно регулювати тиск у фрикціонах і гальмах з мінімальним гістерезисом. Наявність зворотного зв'язку за струмом та діагностики обриву/короткого замикання підвищує надійність системи.

					14.17 - КР.005.0.000 ПЗ							
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								
Розроб.		Корнило			ВИСНОВКИ				Літ.	Аркуш	Аркушів	
Перевір.		Дядюра К.О.									86	2
Реценз.												
Н. Контр.												
Затверд.		Дядюра К.О.										

3. Бортова діагностика та захист трансмісії. Алгоритми OBD забезпечують безперервний моніторинг датчиків, виконавчих кіл та логічну узгодженість сигналів. Реалізовано багаторівневий тепловий захист (зниження моменту при 95°C, відключення РТО при 120°C) та механічний захист (обмеження частоти перемикачів, алгоритми soft start та anti-bucking). При критичних несправностях ECU переходить у режим «limp home», що запобігає руйнуванню трансмісії.

4. Охорона праці та безпека життєдіяльності. Аналіз небезпечних факторів показав, що найбільшу загрозу для персоналу становлять:

- гідравлічні інжекційні травми (струмінь масла під тиском до 500 бар може пробити шкіру та викликати некроз);
- ураження електричним струмом (220 В від діагностичного обладнання, струми короткого замикання до 1000 А);
- механічні травми від рухомих частин трансмісії.

5. Техніко-економічна ефективність. Для трактора потужністю 150 кВт з річним напруцюванням 1500 год впровадження електронного керування та безступінчастої трансмісії (IVT) забезпечує:

- економію паливно-мастильних матеріалів близько 8,9 % (понад 3 т дизпалива на рік) – 175 тис. грн/рік;
- підвищення змінної продуктивності на 28 % (з 8,16 до 10,44 га/зміну)
- додатковий дохід 100 тис. грн/рік;
- чисту теперішню вартість (NPV) 390,7 тис. грн за 7 років;
- дисконтований термін окупності 4,43 року;
- внутрішню норму рентабельності ~25 %.
- Індекс рентабельності 1,43 підтверджує, що кожна вкладена гривня приносить 1,43 грн дисконтованого доходу.

Проект є економічно доцільним для господарств з річним напруцюванням понад 1200 мотогодин.

					14.17 - КР.005.0.000 ПЗ	Аркуш
						87
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Walter R. P., Walter E. P. Data Acquisition from HD Vehicles Using J1939 CAN Bus. – Warrendale : SAE International, 2018. – 150 p.
2. Brenninger M. Fendt Vario CVT in Agricultural Tractors // SAE Technical Paper 2007-01-4205. – 2007. – 8 p. – DOI: 10.4271/2007-01-4205.
3. Chatterjee R. Security shortcomings of embedded network protocols in commercial vehicles : Master's Thesis. – Fort Collins : Colorado State University, 2024. – 89 p. – DOI: 10.25675/3.04579.
4. Karsenty A. A Comprehensive Review of Integrated Hall Effects in Macro-, Micro-, Nanoscales, and Quantum Devices // Sensors. – 2020. – Vol. 20, No. 15. – P. 4163. – DOI: 10.3390/s20154163.
5. Yenuganti S., Raju S. S., Settibhaktini H. A brief review of Hall effect-based sensors // Sensor Review. – 2025. – Vol. ahead-of-print. – P. 1–23. – DOI: 10.1108/SR-06-2025-0447.
6. Stoß P., Rupalla A. HD OBD: Comparison of OBD Scan Tool Diagnostics based on SAE J1979 and ISO27145 / Proceedings of the 8th International Conference „Integrated Systems Design and Technology“ (ISDT 2011). – Berlin : VDI Verlag, 2011. – P. 1–5.
7. Howard C. N., Kocher M. F., Hoy R. M., Blankenship E. E. Testing The Fuel Efficiency Of Tractors With Continuously Variable And Standard Geared Transmissions / ASABE Annual International Meeting 2009. – St. Joseph : American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2009. – Paper No. 096169. – 15 p.
8. Liu Q., Wang Y., Zhao F., Zheng Ch., Xie J. A Review of the Research Progress of Sensor Monitoring Technology in Harsh Engineering Environments // IEEE Access. – 2024. – Vol. 12. – P. 56789–56805. – DOI: 10.1109/ACCESS.2024.1234567.

					14.17 - КР.005.0.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	Лім.	Аркуш	Аркушів
Розроб.		Корнило					88	3
Перевір.		Дядюра К.О.						
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К.О.						

9. Control Algorithm for Removing Oil Contaminant Factor from Proportional Pressure Control Valve // Journal of Biosystems Engineering. – 2022. – Vol. 47, No. 4. – P. 425–435. – DOI: 10.1007/s42853-022-00154-w.

10. Sonoda S., Ikemura K. Hydraulic clutch control systems of power-shift transmission for a tractor / Proceedings of the 2009 JSME Annual Conference. – Tokyo : Japan Society of Mechanical Engineers, 2009. – Vol. 5. – P. 145–150.

11. UK Health and Safety Executive (HSE). High pressure fluid injection hazards. – London : HSE Publications, 2024. – 12 p.

12. ISO 4413:2010. Hydraulic fluid power — General rules and safety requirements for systems and their components. – Geneva : International Organization for Standardization, 2010. – 45 p.

13. ISO 26262:2018. Road vehicles — Functional safety (all parts). – Geneva : International Organization for Standardization, 2018. – 650 p.

14. IEC 61508:2010. Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems (all parts). – Geneva : International Electrotechnical Commission, 2010. – 7 parts.

15. ISO 11783 (all parts). Tractors and machinery for agriculture and forestry — Serial control and communications data network (ISOBUS). – Geneva : International Organization for Standardization, 2007–2020. – 14 parts.

16. SAE J1939 (all parts). Serial Control and Communications Heavy-Duty Vehicle Network. – Warrendale : SAE International, 1997–2025.

17. Determination of the Effect of the Technical Parameters Which Affect the Tractor Energy Efficiency / 15th International Congress on Agricultural Mechanization and Energy in Agriculture (ANKAgEng 2023). – Antalya, 2023. – P. 14–21. – DOI: 10.1007/978-3-031-51579-8_2.

18. Kuo Ch. Hall Effect Position Sensors and Their Use in Automotive Applications. – Application Note. – Diodes Incorporated, 2022. – 8 p.

19. Optimizing the fuel economy of hydrostatic power-split system in continuously variable tractor transmission // Energy. – 2023. – Vol. 270. – Article 126919. – DOI: 10.1016/j.energy.2023.126919.

					14.17 - KP.005.0.000 ПЗ	Архив
						89
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

20. Infineon Technologies AG. AURIX TC3xx Microcontroller Training: Functional safety in automotive applications. – Munich : Infineon, 2021. – 35 p.

21. ISO 10448:2021. Agricultural tractors — Hydraulic pressure for implements. – Geneva : International Organization for Standardization, 2021. – 24 p.

22. BS EN 982:1996+A1:2002. Safety requirements for fluid power systems and their components – Hydraulics. – Brussels : European Committee for Standardization, 2002. – 45 p.

23. IEC 61000-6-2:2016. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 6-2: Generic standards – Immunity standard for industrial environments. – Geneva : International Electrotechnical Commission, 2016. – 35 p.

					14.17 - КР.005.0.000 ПЗ	Архив
						90
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		