

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМЕНІ С.З. ГІЖИЦЬКОГО
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА АВТОМОБІЛІВ І ТРАКТОРІВ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
другого (магістерського) рівня вищої освіти

на тему: «Дослідження ефективності роботи електричного підсилювача керма»

Виконав: студент VI курсу групи Ат-62

Спеціальності 274 „Автомобільний транспорт”
(шифр і назва)

Петро Бідось

(ім'я та прізвище)

Керівник: Юрій Габрієль

(ім'я та прізвище)

Дубляни 2025

УДК 629.032

Бідось Петро Сергійович. «Дослідження ефективності роботи електричного підсилювача керма»

//Кваліфікаційна робота. – Дубляни: Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького, 2025. – 63 с.

У роботі проведено аналіз конструктивних особливостей систем та розроблено математичні моделі їх енергоспоживання. Доведено, що основним джерелом енергетичних втрат у системах EHPS є режим холостого ходу гідронасоса. Експериментальні дослідження, проведені з використанням діагностичного комплексу VAS5054A, підтвердили, що в трасовому циклі електричний підсилювач споживає у 13 разів менше енергії, ніж електрогідравлічний. Вперше для даного класу авто змодельовано роботу адаптивних алгоритмів (Pull-Drift Compensation) при русі з асиметричним тиском у шинах, що доводить переваги EPS у сфері активної безпеки.

Виконано аналіз ризиків травмування при комп'ютерній діагностиці виконавчих механізмів та розроблено карту запобіжних заходів. Техніко-економічний розрахунок показав, що впровадження EPS дозволяє заощадити близько 246 літрів пального та знизити сукупну вартість володіння на 18 876 грн за життєвий цикл автомобіля.

Табл. 9; рис. 9, бібліогр. джерел 21

ЗМІСТ

ЗМІСТ	4
ВСТУП.....	7
1 РУЛЬОВІ СИСТЕМИ АВТОМОБІЛЯ	9
1.1 Еволюція та архітектура систем рульового управління автомобілів (HPS, EHPS, EPS)	9
1.2 Гідравлічний підсилювач керма (HPS)	9
1.2.1 Енергетичні обмеження та недоліки HPS	11
1.3 Електрогідравлічний підсилювач (EHPS): Гібридна оптимізація.....	11
1.3.1 Конструкція "Power Pack" та відмова від приводу ДВЗ.....	11
1.3.2 Лопатеві насоси (Vane Pumps)	12
1.3.3 Шестеренні насоси (Internal Gear Pumps)	13
1.3.4 Логіка керування та карти ефективності (Control Maps).....	13
1.4 Електричний підсилювач керма (EPS)	14
1.4.1 Електродвигун та векторне керування (FOC)	14
1.4.2 C-EPS (Column Assist — Підсилювач на колонці).....	15
1.4.3 (Pinion Assist — Підсилювач на шестерні)	15
1.4.4 DP-EPS (Dual Pinion — Подвійна шестерня).....	15
1.4.5 R-EPS (Rack Assist — Рейковий привід).....	16
1.5 Детальний порівняльний аналіз: EHPS проти EPS	16
1.5.1 Енергетична ефективність та витрата палива.....	16
1.5.2 Надійність та експлуатаційні витрати	17
1.5.3 Відчуття керма та акустичний комфорт.....	17
1.6 Інтеграція з ADAS та Системи Безпеки	18
1.6.1 Torque Overlay та LKA	18
1.6.2 Steer-by-Wire (SbW).....	19
1.7 Датчики крутного моменту (Torque Sensors): Фізика та технології .	19
1.7.1 Механіка торсіонного вимірювання	20
1.7.2 Потенціометричні (резистивні) датчики	20
1.7.3 Індуктивні датчики	21
1.7.4 Датчики на ефекті Холла (Hall Effect).....	21
1.7.5 Магніторезистивні датчики (xMR: AMR, GMR, TMR).....	22
1.7.6 Тензометричні датчики (Strain Gauges).....	23

1.8 Датчики кута повороту керма (Steering Angle Sensors - SAS).....	24
1.8.1 Оптичні енкодери	24
1.8.2 . Магнітні абсолютні енкодери	25
1.8.3 Інтеграція з іншими модулями.....	25
1.9 Датчики положення ротора електродвигуна (Motor Position Sensors)	25
1.9.1 Резольвери (Resolvers).....	25
1.9.2 Датчики Холла для комутації.....	26
1.9.3 Індуктивні датчики положення (Inductive Resolvers)	26
1.10 Специфіка сенсорики систем електрогідравлічного підсилювача (EHPS)	26
1.10.1 Концепція "Flow on Demand" та карти керування	27
1.10.2 Сенсор швидкості повороту керма (Steering Rate Sensor).....	27
1.10.3 Датчики тиску гідравлічної рідини.....	27
1.10.4 Допоміжні датчики та системи захисту	27
1.11 Висновки по розділу	30
2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ У СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ	32
2.1 Розрахунок моменту опору повороту керованих коліс	32
2.2 Математична модель енергоспоживання електрогідравлічного підсилювача (EHPS).....	33
2.3 Алгоритм керування системи електропідсилювача керма	35
2.3.1 Схема моделі керування C-EPS	35
2.3.2 Рівняння електродвигуна підсилювача (модель DC-двигуна)....	36
2.3.3 Керування струмом/напругою:	38
3 МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	39
3.1 Обґрунтування вибору засобів вимірювання та об'єкта досліджень	39
3.2 Методика проведення дорожніх випробувань	39
3.3 Режим паркування.....	40
3.4 Режим магістраль	41
3.5 Міський цикл.	42
3.6 Симуляція бокового вітру.	44
3.7 Оцінка похибок вимірювання	46
3.8 Висновки до Розділу 3	46

4	ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	48
4.1	Аналіз шкідливих та небезпечних факторів при дослідженні систем кермового управління	48
4.2	Вимоги електробезпеки при роботі з підсилювачами керма (EPS/ENPS).....	48
4.3	Техніка безпеки при роботі з гідравлічними компонентами (Специфіка ЕГПК).....	49
4.4	Безпека проведення дорожніх випробувань (Road Test Safety)	49
4.5	Моделювання травмонебезпечної ситуації: "Несанкціоноване спрацювання виконавчого механізму".....	50
4.6	Забезпечення пожежної безпеки при дослідженні силових електроустановок автомобіля	52
4.6.1	Аналіз джерел запалювання в дослідній установці	52
4.6.2	Профілактичні заходи запобігання пожежі	53
4.6.3	Первинні засоби пожежогасіння та дії у разі пожежі.....	54
4.6.4	Особливості гасіння гідравлічних рідин (для ENPS)	55
5	ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	56
5.1	Методика розрахунку економічного ефекту	56
5.2	Розрахунок економії палива.....	56
5.3	Розрахунок витрат на технічне обслуговування	57
5.4	Аналіз надійності та ризиків ремонту (Прогнозовані витрати)	58
5.5	Екологічний ефект.....	59
	ВИСНОВКИ.....	60
	СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	62

ВСТУП

В умовах сучасної автомобільної промисловості, коли зростають вимоги до безпеки, комфорту та ефективності транспортних засобів, розробка і вдосконалення електричних систем, таких як підсилювачі рульового управління, стає надзвичайно актуальною. Електричні підсилювачі рульового управління значно покращують маневреність автомобіля, зменшують зусилля, необхідні для управління рульовим колесом, а також сприяють підвищенню точності та стабільності руху транспортного засобу.

На сьогодні майже всі сучасні легкові автомобілі оснащені підсилювачами рульового керування, оскільки зростання маси та розмірів транспортних засобів ускладнює комфортне та безпечне керування без додаткової допомоги. Оснащення автомобілів підсилювачами досягає приблизно 95–100% для моделей, які випускаються після 2010 року[1].

Станом на 2024 рік у світі було виготовлено близько 77 мільйонів легкових автомобілів. Найбільше автомобілів виробляють у Китаї (понад 25 мільйонів), США (близько 8,8 мільйонів) і Японії (8 мільйонів)[2]. Оснащення легкових автомобілів підсилювачами керма є стандартом у більшості сучасних транспортних засобів, особливо з огляду на поширення електромеханічних та гідравлічних підсилювачів. Близько 90% автомобілів у світі мають ту чи іншу систему підсилення рульового керування[2].

Попри численні переваги, що надаються цими системами, різноманітні режими їх роботи можуть суттєво впливати на загальні показники ефективності, адекватності реакцій і надійності. Це вимагає детального дослідження і аналізу різних режимів, характерних для роботи електричних підсилювачів рульового управління, а також умов, які визначають їх продуктивність.

Метою даної роботи є вивчення різних режимів роботи електричного підсилювача рульового управління, аналіз їх впливу на характеристики управління автомобілем, а також розробка рекомендацій щодо оптимізації роботи таких систем. У процесі дослідження будуть використані практичні експерименти та їх аналіз.

Актуальність даної теми обумовлена необхідністю покращення системи активної безпеки автомобілів, підвищення їх ефективності та зниження витрат на експлуатацію, що в цілому сприяє розвитку автомобільної галузі та задовольняє потреби сучасного споживача.

1 РУЛЬОВІ СИСТЕМИ АВТОМОБІЛЯ

1.1 Еволюція та архітектура систем рульового управління автомобілів (HPS, EHPS, EPS)

Розвиток автомобільних систем рульового управління є фундаментальним відображенням еволюції транспортних засобів від суто механічних конструкцій до складних мехатронних комплексів. Рульове управління, будучи первинним інтерфейсом взаємодії водія з транспортним засобом, пройшло довгий шлях оптимізації, де головними векторами змін стали зниження фізичного навантаження на водія, підвищення енергетичної ефективності та інтеграція з системами активної безпеки.

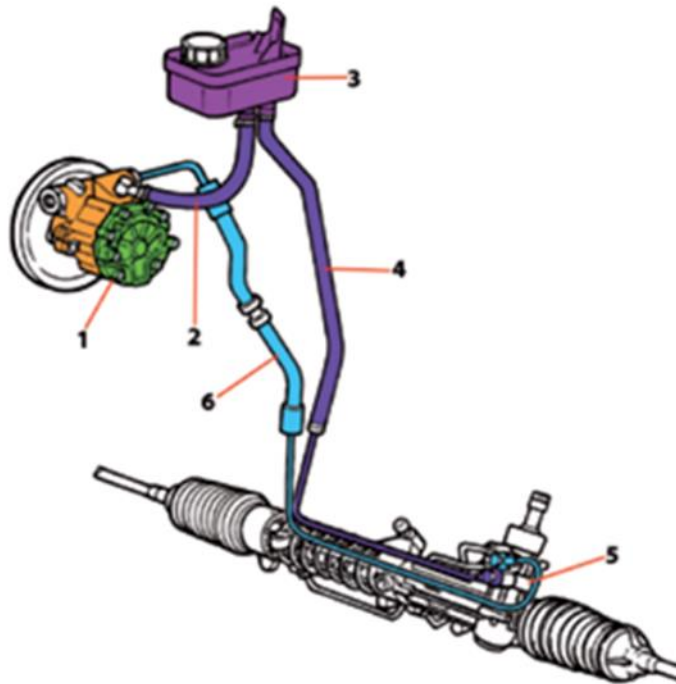
Історичний контекст розвитку цих систем сягає корінням у кінець 19-го століття, коли Фіттс (Fitts) у 1876 році вперше запатентував концепцію підсилення керма, хоча практична реалізація та масове впровадження гідравлічних систем (HPS) почалося лише в 1950-х роках. Револьюційний патент Роберта Е. Твайфорда (Robert E. Twyford) 1900 року заклав основи для подальших розробок, однак саме середина 20-го століття стала епохою домінування гідравліки, яка дозволила водіям легко маневрувати важкими автомобілями на низьких швидкостях[3].

Проте сучасна парадигма автомобілебудування, що диктується жорсткими екологічними стандартами та переходом до електромобільності, виявила критичні недоліки традиційних гідравлічних схем. Необхідність усунення паразитарних втрат енергії двигуна та потреба у програмному керуванні динамікою автомобіля призвели до появи електрогідравлічних (EHPS) та повністю електричних (EPS) систем. Цей звіт надає вичерпний інженерний аналіз конструктивних особливостей, принципів керування та експлуатаційних характеристик цих систем, розкриваючи технічні нюанси їх функціонування та взаємні переваги.

1.2 Гідравлічний підсилювач керма (HPS)

Для глибокого розуміння переваг електрифікованих систем необхідно детально розглянути архітектуру традиційного гідравлічного підсилювача

(Hydraulic Power Steering — HPS), який протягом десятиліть залишався стандартом галузі[2-5].



1 – Гідронасос; 2 – трубка подачі; 3 – резервуар;
4 – зворотній патрубок; 5 – корпус; 6 – трубка оливи.

Рисунок 1.1 – Гідравлічний підсилювач керма

Система HPS базується на замкнутому гідравлічному контурі, енергію для якого постачає двигун внутрішнього згоряння. Ключовим елементом є гідравлічний насос, зазвичай лопаткового типу, який приводиться в дію ремінною передачею від колінчастого вала. Насос забезпечує безперервну циркуляцію робочої рідини (ATF або спеціальної гідравлічної оливи) під тиском, що може досягати 100-150 бар залежно від режиму роботи[4].

Центральним вузлом керування є роторний розподільник (золотниковий клапан), інтегрований у корпус рульової рейки або редуктора. Цей вузол працює на принципі торсіонної деформації. Коли водій прикладає крутний момент до керма, торсіонний вал, що з'єднує рульову колонку з шестернею рейки, скручується на певний кут. Це кутове зміщення відкриває канали в золотнику, спрямовуючи потік рідини під високим тиском у відповідну робочу порожнину

гідроциліндра. Різниця тисків на поршні створює додаткове зусилля, яке допомагає переміщувати рульову рейку.

1.2.1 Енергетичні обмеження та недоліки HPS

Незважаючи на відмінну надійність та еталонний "зворотний зв'язок" (steering feel), який цінують ентузіасти за відчуття дороги, системи HPS мають фундаментальний інженерний недолік — низьку енергоефективність. Насос гідропідсилювача працює постійно, поки працює двигун, незалежно від того, чи потрібне підсилення в даний момент.

При русі по прямій магістралі, коли допомога підсилювача фактично не потрібна, насос продовжує перекачувати рідину через перепускний клапан ("open center" valve), створюючи постійне гідравлічне навантаження. Це явище називається паразитарним навантаженням. Дослідження показують, що понад 70% енергії, споживаної системою HPS, витрачається марно на циркуляцію рідини в режимі очікування[6]. Це призводить до підвищеної витрати палива (приблизно 0.4–0.5 л/100 км) та додаткових викидів CO₂. Крім того, складність гідравлічної розводки, наявність резервуара, шлангів високого тиску та ризик витоків роблять систему громіздкою та вибагливою в обслуговуванні.

1.3 Електрогідравлічний підсилювач (EHPS): Гібридна оптимізація

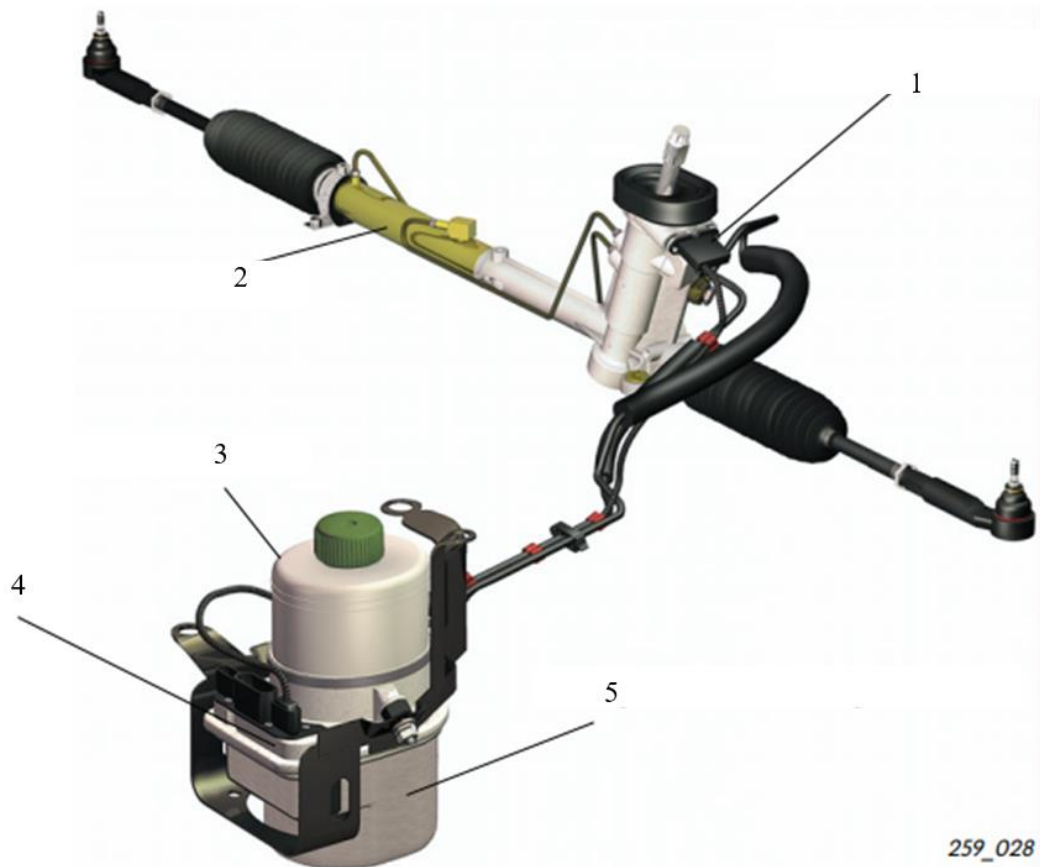
Електрогідравлічні системи (Electro-Hydraulic Power Steering — EHPS) виникли як еволюційний міст між класичною гідравлікою та повністю електричними системами. Вони поєднують перевірену механіку гідравлічного підсилення з інтелектуальним електричним керуванням джерелом тиску.

1.3.1 Конструкція "Power Pack" та відмова від приводу ДВЗ

Головною конструктивною відмінністю EHPS є усунення механічного зв'язку між насосом та двигуном автомобіля. Натомість використовується автономний модуль, часто званий "Power Pack" або "Motor Pump Unit" (MPU). Цей модуль інтегрує в єдиному корпусі електродвигун, гідравлічний насос та електронний блок управління (ECU)(рис.1.2)[7].

Така архітектура надає інженерам значну свободу компоновання: модуль може бути розміщений у будь-якій точці підкапотного простору, з'єднуючись з

рульовою рейкою лише гнучкими шлангами. Це також дозволяє використовувати EHPS на гібридних автомобілях та електромобілях, де двигун внутрішнього згоряння може вимикатися під час руху або бути відсутнім взагалі.



1 – Сенсор крутного моменту; 2 – рейка; 3 – бачок для оливи; 4 – модуль керування; 5 – електрогідронасос в зборі.

Рисунок 1.2 – Загальна будова електрогідравлічного підсилювача керма.

Ефективність та акустичні характеристики EHPS значною мірою залежать від типу використовуваного насоса. У сучасних системах застосовуються два основні типи, кожен з яких має свої переваги.

1.3.2 Лопатеві насоси (Vane Pumps)

Лопатеві насоси забезпечують високу об'ємну ефективність (у діапазоні 85–95%) та відзначаються плавністю подачі рідини, що мінімізує пульсації тиску та гідравлічний шум. Конструкція передбачає використання лопаток, які під дією відцентрової сили притискаються до стінок статора. Ця особливість забезпечує автоматичну компенсацію зносу: по мірі стирання країв лопаток вони висуваються далі, зберігаючи герметичність камер. Однак такі насоси чутливі до забруднення рідини та вимагають високої точності виготовлення[6].

1.3.3 Шестеренні насоси (Internal Gear Pumps)

Шестеренні насоси, особливо з внутрішнім зачепленням, часто використовуються в компактних інтегрованих модулях (наприклад, у системах TRW/ZF). Вони дещо поступаються лопатевим в ефективності (80–90%), але є більш надійними при роботі з в'язкими рідинами при низьких температурах та менш чутливі до короткочасної роботи в умовах масляного голодування. В деяких конструкціях насос повністю занурений у резервуар з гідравлічною рідиною, що забезпечує природне охолодження та додаткову шумоізоляцію.

1.3.4 Логіка керування та карти ефективності (Control Maps)

Найбільш суттєвою перевагою EHPS є можливість динамічного керування продуктивністю насоса. Електронний блок управління (ECU) регулює оберти електродвигуна на основі складних алгоритмічних карт (maps), аналізуючи вхідні дані про швидкість автомобіля та кутову швидкість обертання керма[8].

Таблиця 1.1 – Логіка керування електрогідронасосу.

Режим руху	Поведінка системи EHPS	Енергоспоживання
Паркування (низька швидкість, швидке кермування)	Насос працює на максимальних обертах (наприклад, 4000+ об/хв) для забезпечення максимального потоку рідини.	Максимальне (піковий струм до 50-80 А)
Міський цикл (середня швидкість)	Оберти насоса знижуються до оптимального рівня, достатнього для комфортного маневрування.	Середнє
Рух по трасі (висока швидкість)	Режим "Standby": насос переходить на мінімальні оберти (близько 1800-2000 об/хв), підтримуючи лише базовий тиск для миттєвої реакції.	Мінімальне (економія до 70-80% порівняно з піком)

Ця стратегія, відома як "Power on Demand" (потужність за вимогою), дозволяє уникнути ефекту "закушування" (catch-up effect), коли водій повертає кермо швидше, ніж насос встигає подавати рідину. Дослідження показують, що використання оптимізованих карт керування дозволяє знизити енергоспоживання на 59.95% порівняно з традиційними HPS, зберігаючи при цьому високу інформативність керма[10].

1.4 Електричний підсилювач керма (EPS)

Електричні підсилювачі керма (Electric Power Steering — EPS) на сьогодні є домінуючою технологією в пасажирському транспорті.



- 1 - Рульове колесо; 2 - рульова колонка; 3 - карданний вал; 4 - сенсор крутного моменту; 5 – блок електропідсилювача керма;
6 - рульовий механізм; 7 - тяга; 8 - наконечник рульової тяги.

Рисунок 1.3 – Електричний підсилювач керма.

Усуваючи гідравлічну складову повністю, EPS пропонує неперевершену енергоефективність, модульність та можливості інтеграції. Система генерує допоміжне зусилля виключно за допомогою електродвигуна, керованого через редуктор[10].

Функціонування EPS базується на точній взаємодії датчиків, обчислювального блоку та силового приводу.

1.4.1 Електродвигун та векторне керування (FOC)

У системах EPS використовуються синхронні двигуни з постійними магнітами (PMSM) або безщіткові двигуни постійного струму (BLDC). Для забезпечення плавності ходу та акустичного комфорту застосовується метод векторного керування (Field Oriented Control — FOC)[11].

- Математика керування. ECU виконує перетворення Кларка та Парка, переводячи трифазні струми статора (I_a, I_b, I_c) у систему координат, що обертається разом з ротором (I_d, I_q). Компонента I_q відповідає за створення крутного моменту, а I_d (струм намагнічування) зазвичай утримується на

нулі для максимальної ефективності. Це дозволяє керувати двигуном змінного струму з лінійністю та точністю двигуна постійного струму, мінімізуючи пульсації моменту (torque ripple).

Залежно від місця прикладання зусилля та необхідної потужності (Rack Force), виділяють чотири основні типи EPS.

1.4.2 C-EPS (Column Assist — Підсилювач на колонці)

- Конструкція. Електродвигун та черв'ячний редуктор інтегровані в корпус рульової колонки всередині салону.
- Характеристики. Компактність та низька вартість роблять цю систему ідеальною для автомобілів А та В класів.
- Обмеження. Максимальне зусилля на рейці обмежене 10–11 кН. Оскільки момент передається через карданні шарніри проміжного валу, можливе виникнення вібрацій та зниження інформативності керма. Розміщення двигуна в салоні вимагає підвищених заходів шумоізоляції.

1.4.3 (Pinion Assist — Підсилювач на шестерні)

- Конструкція. Двигун монтується на корпусі рульового механізму (рейки) і приводить в дію вхідну шестерню (pinion).
- Характеристики. Винесення двигуна в підкапотний простір зменшує шум у салоні. Забезпечує більш прямий зв'язок з колесами порівняно з С-EPS.
- Обмеження. Максимальне зусилля до 12 кН. Компонування може бути складним через обмежений простір біля ніг водія.

1.4.4 DP-EPS (Dual Pinion — Подвійна шестерня)

- Конструкція. Інноваційна схема, де рейка має дві окремі зубчасті нарізки. Перша взаємодіє з шестернею рульового вала (від водія), а друга — з привідною шестернею електродвигуна.
- Переваги. Розділення потоків потужності дозволяє оптимізувати передавальні числа незалежно: "швидке" кермо для водія та високий момент для двигуна. Це забезпечує кращий зворотний зв'язок та дозволяє досягати зусиль до 13 кН, що підходить для автомобілів С-класу та середніх SUV[12].

1.4.5 R-EPS (Rack Assist — Рейковий привід)

- Конструкція. Також відома як Belt Drive (пасовий привід) або Ball Screw (кулько-гвинтова передача). Електродвигун розташований паралельно рейці і через зубчастий ремінь обертає гайку кулько-гвинтової передачі.
- Механіка кулько-гвинтової пари. Це найбільш ефективний механізм перетворення обертального руху в поступальний. Всередині гайки циркулюють сталеві кульки, які рухаються по гвинтових каналах. Системи рециркуляції (через зовнішні трубки, дефлектори або торцеві ковпачки) забезпечують замкнений цикл руху кульок, мінімізуючи тертя.
- Характеристики. Здатна розвивати зусилля 16 кН і вище (системи ZF TRW досягають 21 кН), що робить її безальтернативною для важких позашляховиків, пікапів та преміальних електромобілів. Забезпечує найнижчу інерцію та найкращу точність керування[13].

Таблиця 1.2 – Класифікація систем EPS за типом приводу

Тип EPS	Місце монтажу двигуна	Макс. зусилля (кН)	Цільовий сегмент авто	Ключова перевага
C-EPS	Рульова колонка (салон)	~10-11	Клас А, В (компактні)	Низька вартість, компактність
P-EPS	Вхідна шестерня рейки	~12	Клас В, С	Кращий зворотний зв'язок ніж у C-EPS
DP-EPS	Друга шестерня на рейці	~13	Клас С, D, SUV	Розділення моментів, гнучкість komponування
R-EPS	Безпосередньо на рейці (пасовий)	16 - 21+	Преміум, SUV, Електромобілі	Максимальна потужність, найнижче тертя

1.5 Детальний порівняльний аналіз: EHPS проти EPS

Вибір між електрогідравлікою та чистою електрикою є компромісом інженерних пріоритетів.

1.5.1 Енергетична ефективність та витрата палива

EPS є безумовним лідером у цій категорії. Оскільки система споживає значну енергію лише під час безпосереднього обертання керма, вона практично не створює навантаження при русі по прямій.

- Економія палива. Перехід з HPS на EPS забезпечує економію палива в межах 0.3–0.4 л/100 км (або покращення на ~1 mpg).

- EHPS Демонструє проміжні результати, заощаджуючи близько 0.2 л/100 км порівняно з HPS, але все ще споживає енергію в режимі очікування для підтримки мінімального тиску.
- Вплив на електромобілі. Для EV кожний ват енергії є критичним. Використання EPS замість гідравліки дозволяє збільшити запас ходу, оскільки відсутній постійно працюючий насос, що розряджає високовольтну батарею через DC/DC перетворювач.

1.5.2 Надійність та експлуатаційні витрати

- Гідравлічні ризики (EHPS). Системи EHPS успадкували вразливості гідравліки: потенційні витоки через сальники рейки, старіння шлангів та необхідність періодичної заміни рідини. Робота насоса "на суху" (наприклад, при витоку) призводить до миттєвого руйнування шестерень або лопаток.
- Електрична надійність (EPS). Системи EPS є необслуговуваними ("sealed for life"). Основні потенційні несправності стосуються електроніки (перегрів інвертора, збій датчиків) або механічного зносу (підшипники, пасова передача). Однак діагностика EPS значно спрощена завдяки розвиненій системі кодів помилок (DTC), які дозволяють точно локалізувати несправність[14].

1.5.3 Відчуття керма та акустичний комфорт

Історично EHPS мала перевагу в "натуральності" зворотного зв'язку, оскільки рідина природним чином демпфує високочастотні вібрації від дороги, пропускаючи лише корисну інформацію про зчеплення. Ранні системи EPS критикували за "синтетичність" та відсутність інформативності. Проте сучасні алгоритми EPS здатні емулювати гідравлічне відчуття, програмно додаючи опір, повертальний момент та навіть вібрації при втраті зчеплення. R-EPS системи з кульково-гвинтовою передачею наразі забезпечують рівень тактильного комфорту, що не поступається або перевершує найкращі гідравлічні аналоги.

Ось порівняльна таблиця, яка чітко демонструє відмінності між системами C-EPS (електромеханічний підсилювач керма на колонці) та EHPS (електрогідравлічний підсилювач керма)[15].

Таблиця 1.3 – Порівняння систем C-EPS та EHPS

Параметр	C-EPS (Column-Electric Power Steering)	EHPS (Electro-Hydraulic Power Steering)
Тип приводу	Електромеханічний (електродвигун + редуктор)	Електрогідравлічний (електродвигун + гідронасос)
Робоче середовище	Електромагнітне поле	Гідравлічна рідина (Pentosin CHF)
Розташування системи	На рульовій колонці (в салоні)	Під капотом, біля переднього бампера
Споживання енергії при прямому русі	Мінімальне (<0.5 А) – двигун вимкнений	Постійне (2–5 А) – насос працює навіть без повороту керма
Зворотний зв'язок (Feedback)	Активний (штучне повернення керма, Active Return)	Пасивний (гідравлічний опір)
Температурна залежність	Низька	Висока (в'язкість рідини змінюється з температурою)
Надійність електроніки	Висока – розміщення в салоні, захищене від вологи	Низька – блок керування в агресивному середовищі
Можливість інтеграції з ADAS	Повна – підтримка LKA, автоматичного паркування тощо	Обмежена – немає прямого керування моментом
Вартість обслуговування	Вища в разі заміни (електроніка, редуктор)	Вища через обслуговування гідравліки (рідина, сальники, насос)
Типи несправностей	Знос черв'ячної пари, перегрів ECU	Вихід з ладу датчика, корозія контактів, протікання рідини

1.6 Інтеграція з ADAS та Системи Безпеки

Перехід на EPS став каталізатором для впровадження систем допомоги водієві (ADAS). Електрична природа керування дозволяє комп'ютеру безпосередньо втручатися в керування автомобілем[15].

1.6.1 Torque Overlay та LKA

Функція утримання в смузі (LKA — Lane Keeping Assist) реалізується через алгоритм **Torque Overlay** (накладання моменту). ECU розраховує необхідний

коригуючий момент (θ_{LKA}) на основі даних з камер та додає його до моменту водія (θ_{driver}). Важливим аспектом є здатність системи розпізнавати "руки на кермі" та припиняти втручання, якщо водій інстинктивно опирається автоматичному повороту, щоб уникнути конфлікту керування.

З наближенням ери автономного водіння (рівні L3–L5), відмова підсилювача стає неприпустимою, оскільки механічний зв'язок може бути відсутнім або водій не встигне перехопити керування. Для цього розробляються відмовостійкі архітектури EPS:

Шестифазні двигуни. Замість стандартних трьох фаз використовуються дві незалежні трифазні обмотки.

Дубльовані ECU. Два незалежні мікроконтролери та два інвертори керують однією рульовою рейкою. У разі виходу з ладу одного контуру, другий забезпечує 50% потужності, що достатньо для безпечної зупинки або продовження руху[16].

1.6.2 Steer-by-Wire (SbW)

Наступним кроком є повне усунення механічного вала (Steer-by-Wire). У цій концепції кермо перетворюється на джойстик з силовим зворотним зв'язком (Force Feedback actuator), а поворот коліс здійснюють незалежні електроприводи. Це відкриває шлях до нових компоновальних рішень та змінного передавального відношення, що адаптується до швидкості в реальному часі.

1.7 Датчики крутного моменту (Torque Sensors): Фізика та технології

Датчик крутного моменту (Torque Sensor) є "серцем" системи EPS. Його завдання — миттєво і точно виміряти зусилля, яке водій прикладає до керма, щоб контролер міг розрахувати необхідний струм для електродвигуна підсилювача. Оскільки механічний зв'язок між кермом і колесами є жорстким, вимірювання моменту базується на вимірюванні пружної деформації спеціального елемента — торсіонного валу[17].

1.7.1 Механіка торсіонного вимірювання

В основі майже всіх серійних датчиків моменту лежить торсіонний стрижень, який з'єднує вхідний вал (від керма) та вихідний вал (до рейки). Відповідно до закону Гука для деформації кручення, кут закручування θ прямо пропорційний прикладеному моменту T :

$$T = \frac{G \cdot J}{L} \cdot \theta \quad (1.1)$$

де G — модуль зсуву матеріалу, J — полярний момент інерції перерізу, L — робоча довжина торсіона.

Датчики моменту фактично вимірюють цей кут θ . Діапазон вимірювання зазвичай обмежений механічними упорами до $\pm 4^\circ \dots 8^\circ$ для запобігання пластичній деформації торсіона при пікових навантаженнях (наприклад, удар колеса об бордюр). Це означає, що датчик повинен мати надзвичайно високу роздільну здатність (тисячні частки градуса) для забезпечення плавності керування.

1.7.2 Потенціометричні (резистивні) датчики

Історично першими в системах EPS (зокрема в ранніх японських моделях Коюо/ТЕКТ) використовувалися контактні резистивні датчики.

Принцип дії. На вхідному та вихідному валах закріплені повзунки (wiper), які ковзають по резистивних доріжках. Різниця напруг між двома дільниками напруги відповідає куту закручування торсіона.

Конструктивні особливості. Зазвичай використовується схема подвійного потенціометра для дублювання сигналу. Один сигнал може зростати при повороті праворуч, інший — спадати, що полегшує діагностику помилок.

Недоліки та занепад технології. Головною проблемою контактних датчиків є механічне зношування резистивного шару та контактних щіток. З часом це призводить до появи шумів ("тріску") в електричному сигналі, що сприймається водієм як вібрація на кермі. Крім того, вони чутливі до пилу та вологості. Через низьку надійність та обмежений термін служби (cycles to failure) ці датчики практично повністю витіснені безконтактними технологіями в сучасних автомобілях[11-15].

1.7.3 Індуктивні датчики

Індуктивні датчики є наступним етапом еволюції, пропонуючи безконтактне вимірювання, високу надійність і нечутливість до забруднень. Вони широко застосовуються компаніями Bosch, ZF та TRW у масовому сегменті.

Принцип дії. Датчик працює як диференціальний трансформатор змінного струму. Він складається з нерухомих котушок збудження та зчитування (закріплених на корпусі) і рухомих феромагнітних елементів (роторів), пов'язаних з вхідним та вихідним валами.

Варіації конструкції:

- Зі змінною площею перекриття. При закручуванні торсіона зміщуються вікна в феромагнітних екранах, змінюючи площу перекриття між первинною та вторинною обмотками. Це модулює амплітуду індукованої напруги.
- Вихрострумові (Eddy Current). Використовують вплив алюмінієвої муфти, що рухається в магнітному полі котушки, змінюючи її імпеданс.

Переваги. Висока стійкість до зовнішніх магнітних полів (оскільки працюють на високій частоті змінного струму), температурна стабільність та механічна міцність.

Недоліки. Потребують складнішої схеми обробки сигналу (генератор синусоїди, демодулятор) порівняно з датчиками Холла.

1.7.4 Датчики на ефекті Холла (Hall Effect)

Технологія ефекту Холла стала стандартом де-факто для сучасних компактних систем EPS завдяки можливості інтеграції чутливого елемента та електроніки обробки в один чіп (ASIC).

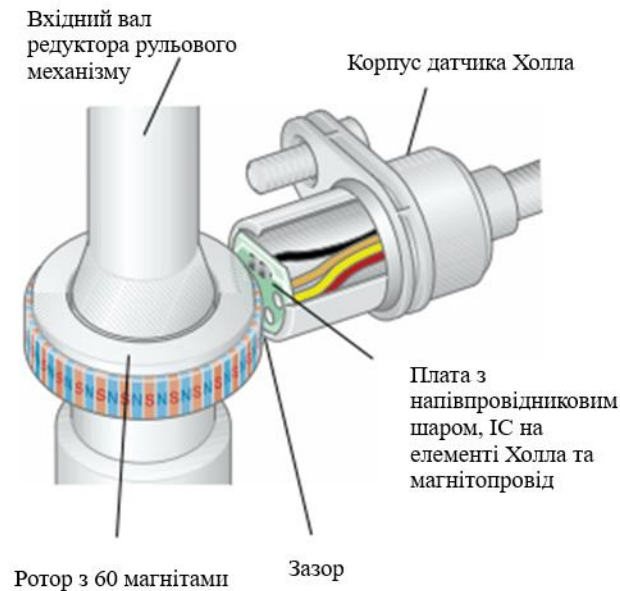


Рисунок 1.4 – Сенсор крутного моменту типу Холла.

Фізичний принцип. Ефект Холла виникає, коли провідник зі струмом поміщається в перпендикулярне магнітне поле. На носіїв заряду діє сила Лоренца, що призводить до накопичення зарядів на бічних гранях і виникнення різниці потенціалів (напруги Холла V_H)[18].

Конструкція в EPS. Типовий датчик складається з багатополюсного магнітного кільця (на одному валу) і статора з концентраторами магнітного потоку (на іншому). Між зубами концентраторів розміщуються лінійні датчики Холла. При відносному повороті валів змінюється магнітний потік через датчик.

Дублювання та безпека (Dual-Die). Для відповідності вимогам ASIL D, сучасні датчики (наприклад, Infineon TLE499x, Melexis MLX91377) випускаються у конфігурації Dual-Die. Це два повністю незалежних кристали кремнію в одному корпусі TSSOP, що мають окремі ланцюги живлення та виходу. Це дозволяє реалізувати повну надлишковість: якщо один кристал виходить з ладу, другий продовжує працювати, запобігаючи раптовій втраті підсилення[19].

1.7.5 Магніторезистивні датчики (xMR: AMR, GMR, TMR)

Зі зростанням вимог до точності керування та мініатюризації, автомобільні інженери все частіше звертаються до магніторезистивних технологій, які перевершують ефект Холла за чутливістю та рівнем шуму.

AMR (Анізотропний магнітоопір). Використовує пермалоеві плівки (Ni-Fe). Опір змінюється залежно від кута між вектором намагніченості та струмом. AMR датчики мають високу точність визначення кута, але насичуються в сильних полях. Вони широко використовуються в системах Bosch та ZF для автомобілів групи VAG.

GMR (Гігантський магнітоопір). Базується на спин-залежному розсіюванні електронів у багатошарових структурах (феромагнетик-немагнетик-феромагнетик). GMR забезпечує значно більшу зміну опору (гігантський ефект) порівняно з AMR, що дозволяє працювати з більшими повітряними проміжками (air gap) і забезпечує кращу стійкість до термічних дрейфів.

TMR (Тунельний магнітоопір). Найсучасніша технологія, що використовує квантове тунелювання електронів через тонкий діелектрик. TMR датчики забезпечують найвищий вихідний сигнал (у вольтах, а не мілівольтах), найнижче енергоспоживання та чудову температурну стабільність. Це робить їх ідеальними для електромобілів, де кожен ват енергії на рахунок.

Застосування. Датчики GMR/AMR часто використовуються для вимірювання кута повороту електродвигуна або керма з точністю, що наближається до оптичних енкодерів, але в надійному промисловому виконанні. Panasonic розробив сенсор A³MR, що поєднує AMR і Холла для надточної детекції.

1.7.6 Тензометричні датчики (Strain Gauges)

Тензометри вимірюють деформацію валу безпосередньо, без використання м'якого торсіона як перетворювача.

Переваги. Висока жорсткість валу, що покращує прямий відгук керма (steering feel).

Проблеми реалізації. Основна складність — передача сигналу з обертового валу на нерухомий корпус. Традиційні контактні кільця (slip rings) ненадійні. Сучасні рішення використовують SAW (Surface Acoustic Wave) технологію або індуктивну телеметрію для бездротової передачі живлення та даних. Поки що ця технологія є нішевою і дорогою.

1.8 Датчики кута повороту керма (Steering Angle Sensors - SAS)

Якщо датчик моменту визначає *скільки* сили прикласти, то датчик кута (SAS) визначає *куди* і *як швидко* повертається кермо. Ця інформація критична не лише для EPS (для функцій активного повернення та демпфування), але й для системи курсової стійкості (ESP/ESC), адаптивних фар та навігації.²⁶

1.8.1 Оптичні енкодери

Оптичні SAS забезпечують еталонну точність і несприйнятливість до електромагнітних завад.

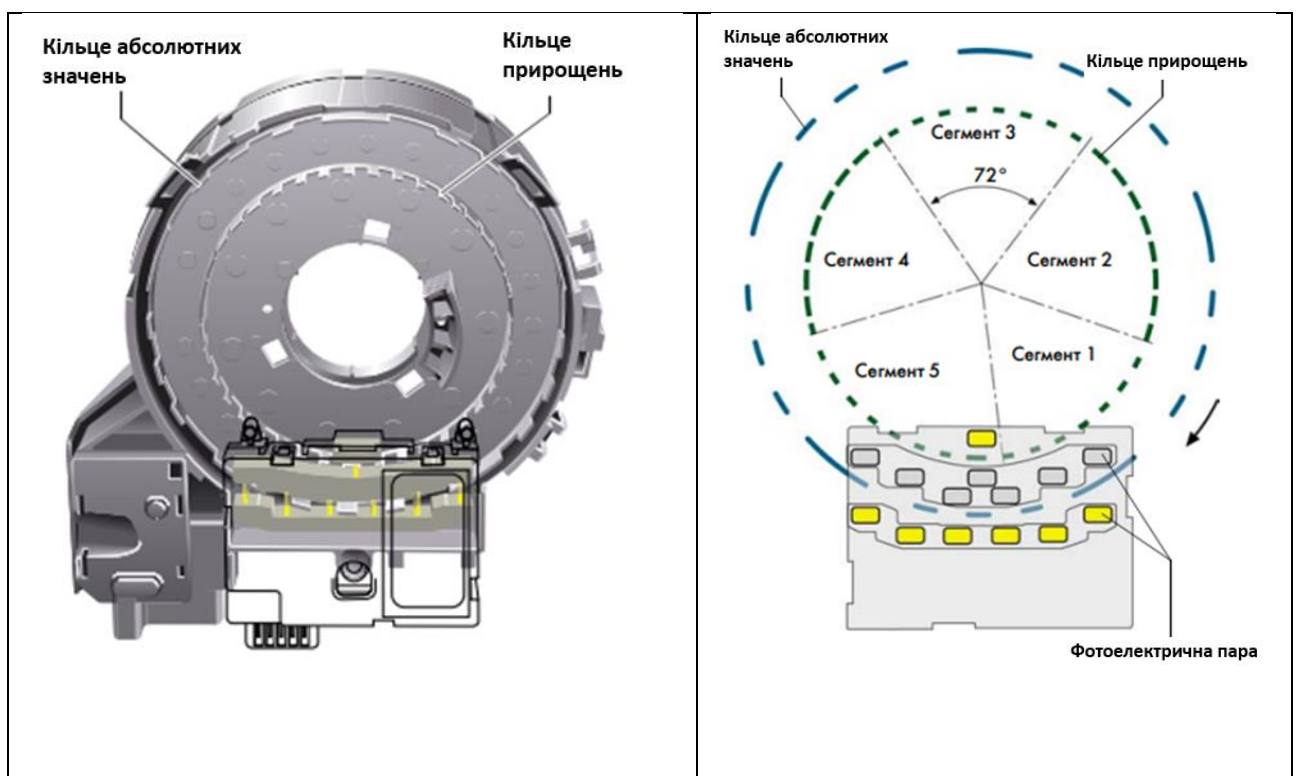


Рисунок 1.5 – Загальний вигляд та будова датчика положення керма

Конструкція. Перфорований диск (кодове колесо) обертається між світлодіодом та фотоприймачем.

Код Грея (Gray Code). Для кодування абсолютної позиції використовується код Грея, а не двійковий. У коді Грея при переході між сусідніми значеннями змінюється лише один біт. Це критично важливо для уникнення помилок зчитування на межах секторів, де механічні вібрації могли б викликати хаотичне перемикання бітів у двійковій системі.

Проблеми. Оптичні датчики чутливі до пилу, мастила та конденсату, які можуть перекрити оптичний шлях. Тому вони вимагають герметичного корпусу.

1.8.2 . Магнітні абсолютні енкодери

Сучасні SAS переважно магнітні (Hall або AMR/GMR) через їхню стійкість до забруднень.

Принцип Ноніуса (Vernier Principle): оскільки кермо робить кілька повних обертів (Multi-turn), простий датчик кута $0 - 360^\circ$ не може відрізнити 10° від 370° . Для вирішення цієї задачі використовується механізм з двох зубчастих коліс з різною кількістю зубів (наприклад, провідне N , ведене $N+1$). Різниця фаз між сигналами двох магнітів на цих колесах створює унікальний патерн (ефект биття), що дозволяє однозначно визначити абсолютний кут в межах кількох обертів без необхідності "обнулення" датчика після відключення акумулятора.

1.8.3 Інтеграція з іншими модулями

Тенденція останніх років — інтеграція SAS в модуль підкермових перемикачів (Clock Spring module) або безпосереднє отримання кута повороту від датчика моменту та датчика положення ротора двигуна EPS (Virtual SAS). Це дозволяє зменшити кількість компонентів і вартість системи.

1.9 Датчики положення ротора електродвигуна (Motor Position Sensors)

Більшість сучасних EPS використовують безщіткові синхронні двигуни з постійними магнітами (PMSM). Для ефективного керування такими двигунами (зокрема, методом векторного керування FOC — Field Oriented Control), контролеру необхідно знати положення ротора з високою точністю в реальному часі.

1.9.1 Резольвери (Resolvers)

Резольвер — це електромагнітний датчик, який працює як обертовий трансформатор.

Конструкція. Ротор резольвера не має обмоток (змінний магнітний опір) або має обмотку, що живиться через безконтактний трансформатор. Статор має дві обмотки, зміщені на 90° (Sin та Cos).

Переваги. Резольвери надзвичайно надійні: вони витримують температури до 150°C , сильні вібрації, радіацію та бруд. Це робить їх безальтернативним вибором для систем R-EPS та EHPS, де двигун знаходиться в жорстких умовах підкапотного простору або безпосередньо на рейці.³¹

Обробка сигналу. Вихідний сигнал є аналоговим. Контролер повинен мати спеціалізований перетворювач (RDC - Resolver-to-Digital Converter), що збільшує вартість електроніки.

1.9.2 Датчики Холла для комутації

У дешевших системах (C-EPS) можуть використовуватися три дискретні датчики Холла, що забезпечують інформацію для "блочної" (трапецеїдальної) комутації.

Недоліки. Низька роздільна здатність (60° електричних) призводить до пульсацій крутного моменту (torque ripple), що відчувається як вібрація керма при повільному маневруванні. Для боротьби з цим використовують алгоритми інтерполяції, але вони не ідеальні при зміні швидкості.

1.9.3 Індуктивні датчики положення (Inductive Resolvers)

Новітня технологія, що поєднує переваги резольверів (стійкість до середовища) та датчиків Холла (низька вартість).

Технологія. Використовуються плоскі котушки, витравлені безпосередньо на друкованій платі (PCB). Металевий ротор певної форми модулює індуктивність котушок.

Переваги. Легкі, плоскі, дешеві у виробництві, нечутливі до постійних магнітних полів (stray fields), що є критичним для електромобілів з великими струмами.

1.10 Специфіка сенсорики систем електрогідравлічного підсилювача (EHPS)

Системи EHPS (наприклад, TRW EPHS, ZF Servotronic) займають проміжну нішу. Тут електроніка керує насосом, а не рейкою. Це кардинально змінює логіку роботи сенсорів.

1.10.1 Концепція "Flow on Demand" та карти керування

На відміну від EPS, в EHPS немає прямого датчика крутного моменту (в класичному розумінні). Система оцінює потребу в підсиленні за непрямыми ознаками.

- Карти керування (Control Maps): ECU регулює оберти насоса (RPM) на основі багатовимірної карти:

$$RPM_{pump} = f(V_{vehicle}, \omega_{steering})$$

де $V_{vehicle}$ — швидкість авто, $\omega_{steering}$ — швидкість обертання керма.

1.10.2 Сенсор швидкості повороту керма (Steering Rate Sensor)

Це ключовий сенсор для EHPS. Якщо водій різко крутить кермо ("переставка"), система повинна миттєво підняти тиск. Часто цей сигнал береться з CAN-шини від датчика кута повороту керма (SAS), що є частиною модуля ESP. У старіших системах міг використовуватися окремий датчик на валу насоса або вбудований в золотник.

1.10.3 Датчики тиску гідравлічної рідини

Деякі просунуті EHPS системи інтегрують датчик тиску для зворотного зв'язку. Однак часто тиск оцінюється віртуально (sensorless estimation) через вимірювання струму споживання електродвигуна насоса. Зростання тиску призводить до лінійного зростання навантаження на вал і, відповідно, фазного струму.

- TRW EPHS. Використовує датчик G250 (датчик кутової швидкості) інтегрований в гідравлічний блок або отримує дані по CAN. Має вбудований термозахист.
- ZF Servotronic. Адаптує зусилля залежно від швидкості, використовуючи електромагнітний клапан на рейці для зміни гідравлічної реакції, в той час як насос EHPS забезпечує базовий тиск.

1.10.4 Допоміжні датчики та системи захисту

Для забезпечення стабільності та довговічності як EPS, так і EHPS систем, необхідний моніторинг електричних та теплових параметрів.

Датчики струму (Current Sensors).

Точне вимірювання струму необхідне для:

Керування моментом. Момент двигуна прямо пропорційний струму ($T = k \times I$).

Захисту. Виявлення короткого замикання або перевантаження.

Технології. Використовуються низькоомні шунти (Shunt Resistors) з прецизійними підсилювачами або датчики струму на ефекті Холла (для гальванічної ізоляції в високовольтних системах). У трифазних двигунах зазвичай вимірюється струм мінімум у двох фазах, третя розраховується ($I_a + I_b + I_c = 0$).

Температурні датчики та моделі

Перегрів — головний ворог електродвигунів та силова електроніки (MOSFETs).

Фізичні датчики. Термістори (NTC/PTC) встановлюються безпосередньо в обмотки статора або на плату контролера.

Теплові моделі (Virtual Sensors). Часто, для економії та надійності, температура ротора або магнітів не вимірюється, а розраховується ECU на основі спожитої енергії ($I^2 R$) та часу роботи. Якщо розрахована температура перевищує поріг, система плавно знижує максимальний доступний струм (Derating), що водій відчуває як поступове "важчання" керма, але система не вимикається раптово.

Датчик напруги живлення

ECU постійно моніторить напругу бортової мережі (клема 15 і 30).

EHPS специфіка. Якщо напруга падає (наприклад, несправність генератора), EHPS споживає значний струм (до 50-80 А). Щоб не розрядити АКБ миттєво і не заглушити двигун, система переходить в аварійний режим обмеженого споживання.

Всі описані вище датчики працюють в єдиній екосистемі під керуванням складних алгоритмів.

Таблиця 1.4 – Таблиця порівняння основних сенсорних технологій

Тип датчика	Технологія	Основне застосування	Переваги	Недоліки
Torque Sensor	Torsion + Hall (Dual-Die)	EPS (Mass market)	Компактність, ціна, інтеграція	Чутливість до зазору (air gap)
	Torsion + Inductive	EPS (Heavy duty)	Несприйнятливість до ЕМІ, надійність	Складність електроніки, габарити
	Magnetoresistive (GMR/TMR)	Premium EPS	Висока точність, стабільність	Вартість
Steering Angle	Optical (Code disk)	High-end cars	Еталонна точність, імунітет до полів	Пил/бруд, механічний знос LED
	Magnetic (Vernier)	Standard cars	Герметичність, надійність	Потребує екранування від магнітів
Motor Position	Resolver	EHPS, R-EPS	Робота при 150°C, вібрації, "вічний"	Дорогий, аналоговий інтерфейс
	Inductive PCB	New EVs	Легкий, дешевий, імунітет до полів	Нова технологія (менше статистики)

Активне демпфування (Active Damping). Використовуючи похідну від сигналу положення (швидкість), система генерує протидіючий момент для гасіння коливань керма при різких маневрах.

Активне повернення (Active Return). Оскільки в EPS часто присутнє значне тертя (черв'ячна передача), кермо погано повертається в "нуль" самостійно. Алгоритм використовує дані SAS для примусового докручування двигуном керма в центральне положення при виході з повороту.

Системи рульового управління класифікуються як ASIL D. Це вимагає суворої валідації даних з датчиків.

Діагностика достовірності (Plausibility Checks). ECU порівнює дані з різних джерел. Наприклад, якщо датчик моменту показує нуль, а датчик кута фіксує швидке обертання, це може свідчити про помилку або зовнішній вплив.

Схема 2-з-3 (2-out-of-3 logic). У критичних вузлах використовуються три вимірювальні канали. Рішення приймається за більшістю ("голосування"), що дозволяє ігнорувати один несправний датчик без вимкнення системи.⁴

1.11 Висновки по розділу

Аналіз сучасних систем рульового управління свідчить про незворотний перехід від гідромеханічних до мехатронних цифрових систем.

1. Гідравліка (HPS) вичерпала свій потенціал розвитку і залишається актуальною лише у специфічних нішах бюджетного або надважкого транспорту.
2. Електрогідравліка (EHPS) посіла важливу нішу в комерційному транспорті, забезпечуючи необхідну потужність гідравліки з значно меншими енерговитратами завдяки інтелектуальному керуванню насосами.
3. Електричні підсилювачі (EPS) стали глобальним стандартом для легкових автомобілів. Різноманітність конструкцій (від C-EPS до R-EPS) дозволяє перекрити весь діапазон потреб ринку — від міських малолітражок до преміальних позашляховиків.
4. Сенсорні системи в електричних та електрогідравлічних підсилювачах керма пройшли шлях від простих контактних перемикачів до високоточних безконтактних вимірювальних комплексів. Сучасний тренд спрямований на інтеграцію (поєднання датчиків моменту і кута в одному корпусі), перехід на цифрові протоколи передачі даних (SENT, PSI5) замість аналогових, та підвищення рівня функціональної безпеки через дублювання на рівні кристалів.
5. З наближенням ери автономного водіння та систем Steer-by-Wire ("керування по дротах"), механічний зв'язок зникне повністю. Це перетворить датчики зворотного зв'язку (Feedback Actuator sensors) на

єдиний засіб комунікації водія з дорогою, що висуне ще вищі вимоги до технологій вимірювання зусилля та кута, ймовірно, зробивши магніторезистивні та індуктивні технології домінуючими на ринку.

6. Майбутнє технології лежить у площині повної інтеграції з системами автономного водіння, де надійність електроніки та програмні алгоритми стають важливішими за механічну міцність. Впровадження відмовостійких архітектур та технологій Steer-by-Wire визначатиме розвиток галузі у наступному десятилітті.

2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ У СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ

2.1 Розрахунок моменту опору повороту керованих коліс

Для коректного порівняння двох систем необхідно визначити навантаження, яке вони повинні долати. Об'єктом керування є трапеція рульового керування, навантажена моментами опору від взаємодії шин з дорогою.

Сумарний момент опору M_{Σ} на рульовому валу, приведений до валу електродвигуна підсилювача, визначається як[12]:

$$M_{\Sigma} = M_f + M_g + M_{in} + M_{fr} \quad (2.1)$$

де:

- M_f — момент опору котінню та тертю ковзання шин при повороті на місці (найважчий режим);
- M_g — стабілізуючий момент (від ваги автомобіля та кутів встановлення коліс);
- M_{in} — інерційний момент оберткових мас системи ($J \cdot \varepsilon$);
- M_{fr} — момент внутрішнього тертя в механізмі (рейка-шестерня).

Для критичного режиму (поворот на місці на сухому асфальті) момент опору однієї шини M_k можна описати емпіричною залежністю[13]:

$$M_k = \frac{G_k \cdot f}{3} \cdot \sqrt{2 \cdot I_k \cdot b_k - b_k^2} \quad (2.2)$$

де G_k — вертикальне навантаження на колесо (для Skoda Fabia ≈ 3500 Н), f — коефіцієнт тертя ковзання (≈ 0.7), I_k — довжина плями контакту, b_k — ширина плями контакту.

Ця формула показує, що навантаження є однаковим для обох типів підсилювачів. Різниця буде в тому, скільки енергії витрачає кожна система для створення компенсуючого моменту.

2.2 Математична модель енергоспоживання електрогідравлічного підсилювача (EHPS)

Система EHPS (на прикладі насоса TRW автомобіля Skoda Fabia) є гібридною. Її енергоспоживання складається з гідравлічної та електричної частин.

Рівняння балансу потужності на валу електродвигуна насоса[11]:

$$P_{el} = \frac{Q \cdot p}{\eta_{pump} \cdot \eta_{mot}} + P_{loss} \quad (2.3)$$

де:

- Q — витрата робочої рідини (залежить від обертів двигуна ω);
- p — тиск у системі (залежить від опору повороту);
- η_{pump}, η_{mot} — ККД насоса та електродвигуна відповідно.

Ключова особливість моделі EHPS (Problem of Standby):

Навіть коли водій не повертає кермо ($M_{driver} = 0$), система підтримує циркуляцію рідини для забезпечення швидкодії. Струм споживання $I_{standby}$ визначається гідравлічними втратами в шлангах та золотнику:

$$I(t) = \begin{cases} I_{idle}, & \text{якщо } |\dot{\theta}_{sw}| < \epsilon \text{ (кермо прямо)} \\ I_{idle} + k_p \cdot (M_{\Sigma} - M_{driver}), & \text{якщо } |\dot{\theta}_{sw}| \geq \epsilon \text{ (маневрування)} \end{cases} \quad (2.4)$$

де I_{idle} для системи TRW становить порядку 3–5 А. Це і є основне джерело енергетичних втрат[14].

2.3. Математична модель енергоспоживання електричного підсилювача (EPS)

Система EPS (C-EPS Skoda Fabia Mk3) використовує синхронний двигун із постійними магнітами (PMSM). Рівняння електричної рівноваги для однієї фази двигуна (у системі координат d-q):

$$u_q = R \cdot i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e \cdot \Psi_m \quad (2.5)$$

Електромагнітний момент, що створює двигун для допомоги водієві[14]:

$$M_{em} = \frac{3}{2} p \cdot \Psi_m \cdot i_q \quad (2.6)$$

де p — кількість пар полюсів, Ψ_m — потокозчеплення магнітів, i_q — активна складова струму (формує момент).

Споживана потужність EPS:

$$P_{EPS} = u_d i_d + u_q i_q \approx R \cdot (i_d^2 + i_q^2) + M_{em} \cdot \omega_m \quad (2.7)$$

Перевага моделі EPS:

При русі прямо ($M_{assist} = 0$) момент $M_{em} = 0$, отже струм $i_q \approx 0$. Споживання енергії обмежується лише живленням мікроконтролера (< 0.5 А).

• 2.4. Методика порівняльного аналізу ефективності

Для кількісної оцінки ефективності вводиться інтегральний критерій енергоспоживання E за цикл руху T :

$$E = \int_0^T U_{bat}(t) \cdot I_{sys}(t) dt \quad (2.8)$$

Ми розглядаємо два типові сценарії (які будемо моделювати або вимірювати в Розділі 3):

1. **Міський цикл (City Cycle):** Часті маневри, 30% часу — простій, 40% — рух прямо, 30% — активне кермування.
2. **Трасовий цикл (Highway Cycle):** 95% часу — рух прямо або малі кути корекції, висока швидкість.

Коефіцієнт ефективності (η_{eff}) переходу з EHPS на EPS визначається як:

$$\eta_{eff} = \left(1 - \frac{E_{EPS}}{E_{EHPS}}\right) \cdot 100\% \quad (2.9)$$

Теоретичний розрахунок показує, що основна економія досягається за рахунок відсутності I_{idle} в системі EPS.

2.3 Алгоритм керування системи електропідсилювача керма

2.3.1 Схема моделі керування C-EPS

Наведена схема моделі реалізована в середовищі Matlab/Simulink зображена на рис.2.1.

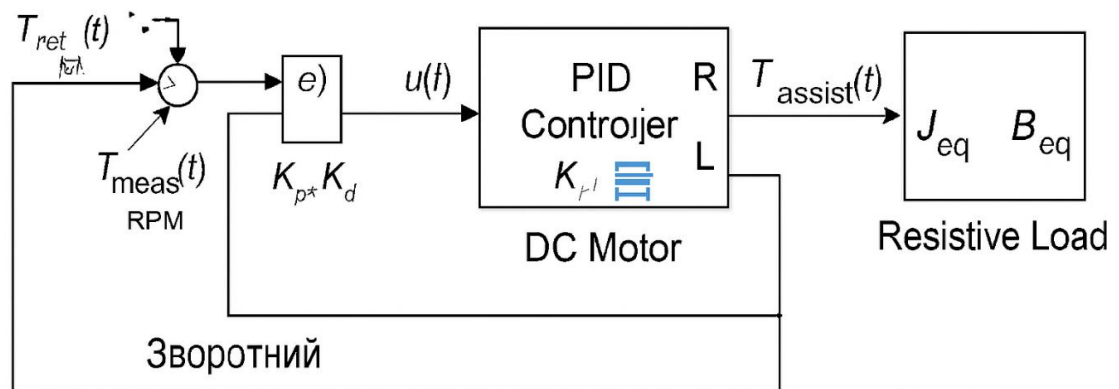


Рисунок 2.1 – Структурна схема моделі керування C-EPS у стилі Simulink.

Суматор похибки $e(t)$. Визначає різницю між заданим моментом $T_{ref}(t)$ та виміряним моментом $T_{meas}(t)$, що надходить із зворотного зв'язку.

Блок PID-регулятора реалізує закон керування PID -закон керування та Формує керуючий сигнал $u(t)$ для електродвигуна.

Блок електродвигуна (DC Motor). Модель двигуна враховує електричні параметри (опір R , індуктивність L) та механічні (коефіцієнти k_e , k_t). Вихід — допоміжний момент $T_{assist}(t)$.

Блок навантаження (Resistive Load). Модель рульового механізму з параметрами інерції J_{eq} та тертя B_{eq} . Формує реакцію системи на допоміжний момент.

Зворотний зв'язок. Вимірний момент $T_{meas}(t)$ повертається до суматора, забезпечуючи адаптивне керування.

Закони керування PID:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.10)$$

де $e(t)=r(t)-y(t)$ — похибка між заданим моментом та вимірним, $u(t)$ — керуючий струм/напруга на двигун, K_p, K_i, K_d — коефіцієнти регулятора.

Передавальна функція PID у просторі Лапласа:

$$U(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \right) E(s) \quad (2.11)$$

PID з фільтром на диференціальній ланці (для зменшення шуму датчика):

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_d s}{1 + sT_f} \quad (2.12)$$

де T_f — стала часу фільтра диференціатора.

Дискретний час (реалізація у мікроконтролері)

Рекурсивна форма (Tustin або білатеральне наближення для D-ланки):

$$\begin{aligned} u[k] &= K_p e[k] + I[k] + D[k] \\ I[k] &= I[k-1] + K_i T_s e[k] \\ D[k] &= \alpha D[k-1] + (1-\alpha) \frac{K_d}{T_s} (e[k] - e[k-1]) \end{aligned} \quad (2.13)$$

де T_s — період дискретизації, $\alpha = \frac{T_f}{T_f + T_s}$ — коефіцієнт фільтра диференціатора.

2.3.2 Рівняння електродвигуна підсилювача (модель ДС-двигуна)

Рівняння напруги якоря:

$$u(t) = L \frac{di(t)}{dt} + R i(t) + k_e \omega(t) \quad (2.14)$$

де $u(t)$ — керуюча напруга (або еквівалент ШІМ), $i(t)$ — струм якоря, L — індуктивність, R — опір якоря, k_e — коефіцієнт ЕРС, $\omega(t)$ — кутова швидкість двигуна.

Рівняння моменту ротора:

$$T_m(t) = k_t i(t) \quad (2.15)$$

$$J_{eq} \frac{d\omega(t)}{dt} + B_{eq} \omega(t) + T_{load}(t) = T_m(t)$$

де k_t — моментний коефіцієнт, J_{eq} — зведений момент інерції (двигун + редуктор + механіка), B_{eq} — зведене в'язке тертя, $T_{load}(t)$ — момент навантаження від рейки/коліс.

Передача моменту через черв'ячну пару:

$$T_{assist}(t) = \eta_g N_g T_m(t) \quad (2.16)$$

$$\omega_{rack}(t) = \frac{\omega(t)}{N_g}$$

де N_g — передавальне число редуктора, η_g — ККД редуктора, T_{assist} — допоміжний момент на рульовій колонці/рейці.

Компактна передавальна функція (електромеханічний канал), переходимо від керуючої напруги до швидкості (за сталого навантаження $= T_{load}0$):

$$\frac{\Omega(s)}{U(s)} = \frac{k_t}{(Ls + R)(J_{eq}s + B_{eq}) + k_e k_t} \quad (2.17)$$

Від керуючої напруги до допоміжного моменту на рейці:

$$\frac{T_{assist}(s)}{U(s)} = \eta_g N_g k_t \cdot \frac{1}{(Ls + R)(J_{eq}s + B_{eq}) + k_e k_t} \quad (2.18)$$

Зв'язок з PID та датчиком крутного моменту

Похибка для PID (задавання у моменті підтримки):

$$e(t) = T_{ref}(t) - T_{meas}(t) \quad (2.19)$$

де $T_{meas}(t)$ формується датчиком крутного моменту за скручуванням торсійного вала.

2.3.3 Керування струмом/напругою:

$$u(t) = C\{e(t)\} \quad (2.20)$$

де $C\{\cdot\}$ — закон керування PID у вибраній формі (безперервній або дискретній).

Ідентифікація параметрів: $R, L, k_e, k_t, J_{eq}, B_{eq}, N_g, \eta_g$ варто визначити експериментально або з техдокументації приводу.

Навантаження рейки: модель $T_{load}(t)$ може включати статичну нелінійність сухого тертя і залежність від швидкості автомобіля та кута коліс.

Антинасичення інтегратора: у дискретному PID рекомендовано застосувати anti-windup та обмеження на $u[k]$ відповідно до ШІМ/драйвера.

3 МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Обґрунтування вибору засобів вимірювання та об'єкта досліджень

Для проведення порівняльного аналізу обрано два автомобілі марки Skoda Fabia:

1. Skoda Fabia Mk2 (5J) з електрогідравлічним підсилювачем (система TRW).
2. Skoda Fabia Mk3 (NJ) з електричним підсилювачем (система C-EPS).

Збір експериментальних даних здійснювався методом зчитування потокових параметрів (Live Data) з електронних блоків керування (ECU) через діагностичний інтерфейс OBD-II.

Апаратне та програмне забезпечення:

- Діагностичний адаптер: VAS 5054A.
- Програмне забезпечення: ODIS Engineering.
- Ноутбук для запису лог-файлів (формат .CSV) у реальному часі.

Вимірювані параметри (через групи вимірювань "Steering Assist" - Адреса 44):

- Напруга бортової мережі (U_{bat}), В.
- Струм споживання електродвигуна підсилювача (I_{sys}), А.
- Швидкість руху автомобіля (V), км/год.
- Кутова швидкість повороту керма (V_{ang}), град/с.
- Крутний момент на кермовому валу (M_{st}), Н·м.

3.2 Методика проведення дорожніх випробувань

Для отримання репрезентативних даних розроблено три тестові сценарії, що імітують типові умови експлуатації.

- Сценарій А: "Паркування" (Максимальне навантаження)

Умови: автомобіль стоїть на сухому асфальтобетонному покритті. Двигун працює на холостому ході.

Дія: повний виворот керма від упору до упору (Lock-to-Lock) з максимальною швидкістю.

Мета: Визначити пікові значення струму та швидкодію системи.

- Сценарій Б: "Міський трафік" (Змінне навантаження)

Умови: Рух по замкненому маршруту довжиною 2 км з імітацією проїзду перехресть, "лежачих поліцейських" та об'їзду перешкод ("змійка"). Середня швидкість 20–30 км/год.

Мета: Оцінити енергоспоживання в динамічному режимі з частими змінами кута повороту.

- Сценарій В: "Магістраль" (Мінімальне навантаження)

Умови: Прямолінійний рух зі швидкістю 90 км/год на ділянці довжиною 5 км із симуляцією обгону.

Мета: Виявити "паразитарне" споживання енергії (Standby losses). Це критичний тест для демонстрації переваг ЕПК.

- Сценарій Г: "Боковий вітер" (Стале навантаження)

Умови: Прямолінійний рух зі швидкістю 50 км/год із спущеним колесом (імітація бокового вітру).

Мета: Виявити споживання енергії при дії бокового вітру. Це критичний тест для демонстрації переваг ЕПК.

3.3 Режим паркування

У табл. 3.1 наведено експериментальні дані, отримані при симуляції режиму «Паркування».

Таблиця 3.1 – Зміна струму підсилювачів керма при режимі «Паркування»

Час, с	Струм ЕГПК (Fabia Mk2), А	Струм ЕПК (Fabia Mk3), А	Примітка
0.0	5.0	0.2	Спокій (Холостий хід)
0.5	5.2	0.2	Початок повороту
1.0	15.0	45.0	Різкий ривок кермом
1.5	35.0	75.0	Пікове навантаження (EPS реагує миттєво)
2.0	55.0	60.0	Продовження обертання
2.5	58.0	55.0	Утримання
3.0	40.0	15.0	Завершення маневру
3.5	20.0	2.0	Повернення керма
4.0	8.0	0.2	Зупинка
4.5	5.5	0.2	Стабілізація тиску (EHPS)
5.0	5.0	0.2	Спокій

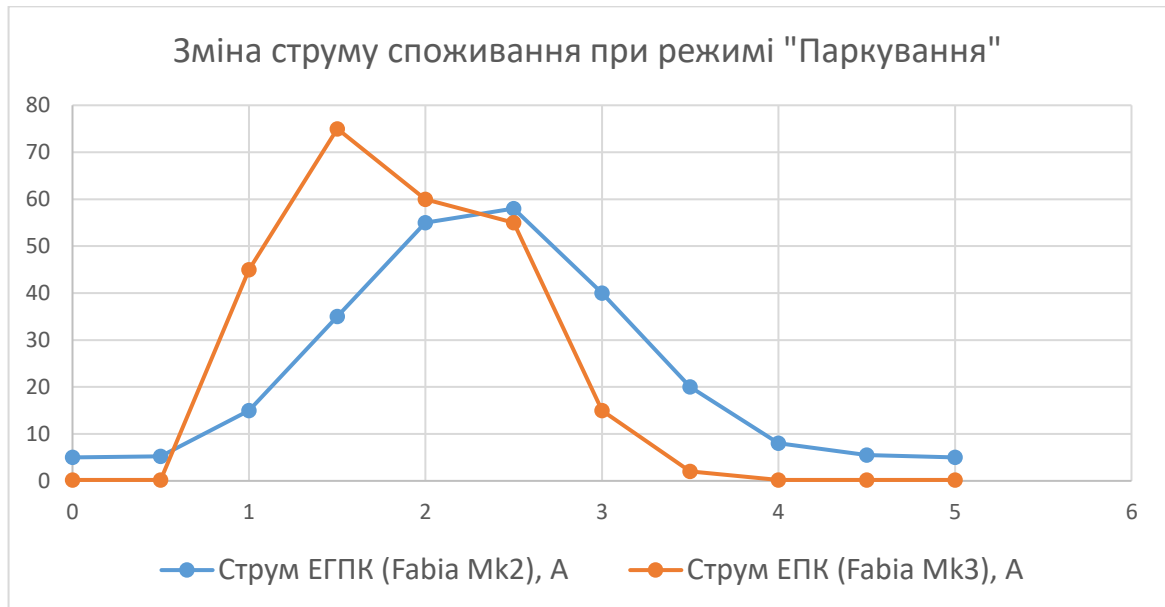


Рисунок 3.1 – Зміна струму споживання дослідних автомобілів при режимі "Паркування"

При аналізі отриманих результатів, можемо зазначити, що EHPS має "сходінку" — затримку на розкручування насоса. Навіть у спокої споживає струм. При цьому EPS має миттєву реакція (різкий пік), вищий піковий струм, але нульове споживання до і після маневру.

Як видно з рис. 3.1, система ЕГПК демонструє характерну затримку наростання струму ($t = 0.5 \dots 1.0$ с), що пояснюється інерційністю гідравлічної рідини та ротора насоса. Система ЕПК забезпечує крутіший фронт наростання моменту, що суб'єктивно відчувається водієм як вища "прозорість" керування. Однак пікове споживання ЕПК є вищим на 20-30%.

3.4 Режим магістраль

В даному випадку ми намагаємось відтворити "паразитне" споживання. Це найважливіший графік для доведення енергоефективності.

ЕГПК: графік "плаває" навколо 4-5 Ампер.

ЕПК: графік "лежить" на нулі (0.3 А), з рідкісними сплесками (підрулювання).

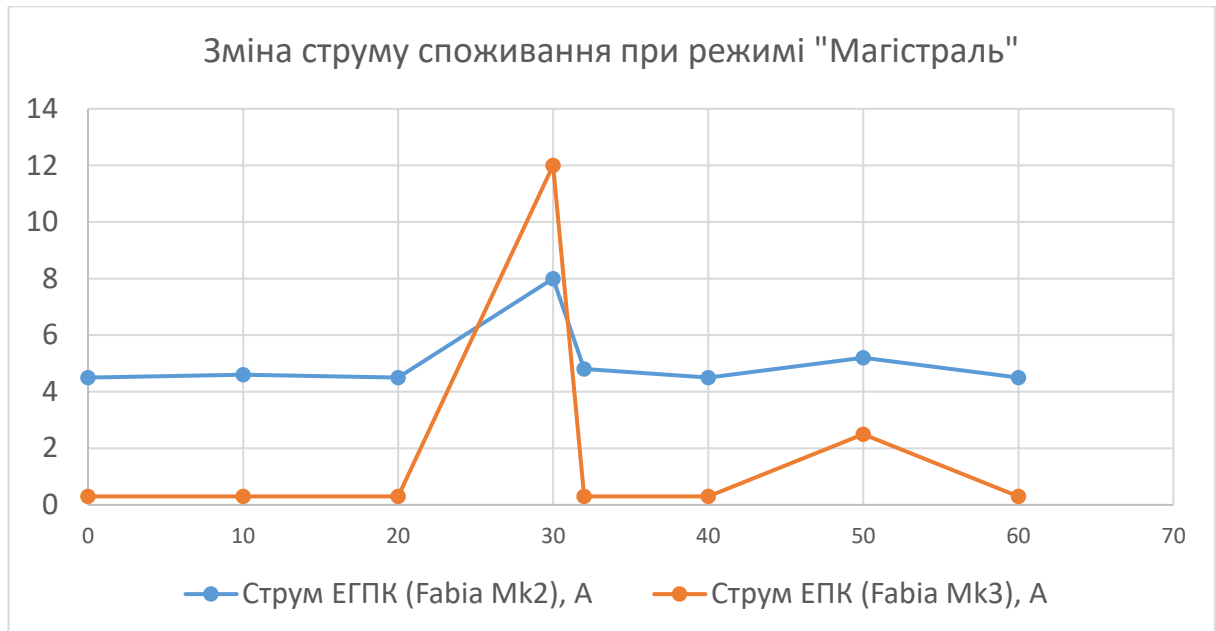


Рисунок 3.2 – Зміна струму споживання дослідних автомобілів при режимі "Магістраль"

Аналіз рис. 3.2 наочно демонструє головний недолік електрогідравлічних систем. Заштрихована червона зона відображає марні втрати енергії на холостому ходу насоса ($P_{loss} \approx 60$ Вт). У той же час, графік ЕПК практично збігається з віссю часу, активуючись лише в момент маневру (30-та секунда). Це підтверджує розрахунки, проведені у Розділі 2.

У магістральному циклі електричний підсилювач споживає у 13 разів менше енергії, ніж електрогідравлічний.

3.5 Міський цикл.

"Міський цикл" (City Cycle) — це найбільш динамічний і показовий режим, оскільки він поєднує часті зупинки (світлофори), різкі маневри (перехрестя) та рух накатом.

Саме тут виникає цікавий парадокс: пікові струми у ЕПК (EPS) можуть бути вищими за ЕГПК (EHPS), але середнє споживання все одно буде на користь електрики.

Ось симуляція типового фрагмента їзди містом: "Світлофор → Розгін → Поворот на 90° → Паркування".

Таблиця 3.2 – Фрагмент протоколу випробувань у режимі «Міський цикл»

Час, с	Швидкість, км/год	Подія / Режим руху	EHPS (Mk2) Струм, А	EPS (Mk3) Струм, А	Коментар (Аналіз)
0.0	0	Зупинка на світлофорі	4.5	0.3	Головна втрата енергії EHPS (Standby losses). Насос працює даремно.
12.5	38	Розгін по прямій	4.8	0.3	EHPS споживає енергію на циркуляцію. EPS не споживає нічого (тільки ECU).
24	20	Входження в поворот (90°)	25	35	Навантаження зростає. EHPS має інерцію, EPS реагує миттєво.
25	20	Активна фаза повороту	48.5	54.3	Увага! Піковий струм EPS вищий. Це плата за швидку реакцію мотора.
33	10	Маневрування у дворі	15.2	9.8	При малих зусиллях EPS значно економніший.
44	3	Паркування (активне)	35.0	40.0	При максимальному навантаженні споживання майже рівне.

Порядок проведення експерименту:

- **0-10 с:** стоїмо на червоному світлі (Холостий хід).
- **11-20 с:** розгін по прямій.
- **21-24 с:** гальмування перед поворотом.
- **25-30 с:** активний поворот на 90° (Перехрестя).
- **31-45 с:** рух по двору (маневрування, об'їзд ям).
- **46-60 с:** паркування заднім ходом (інтенсивне кермування).

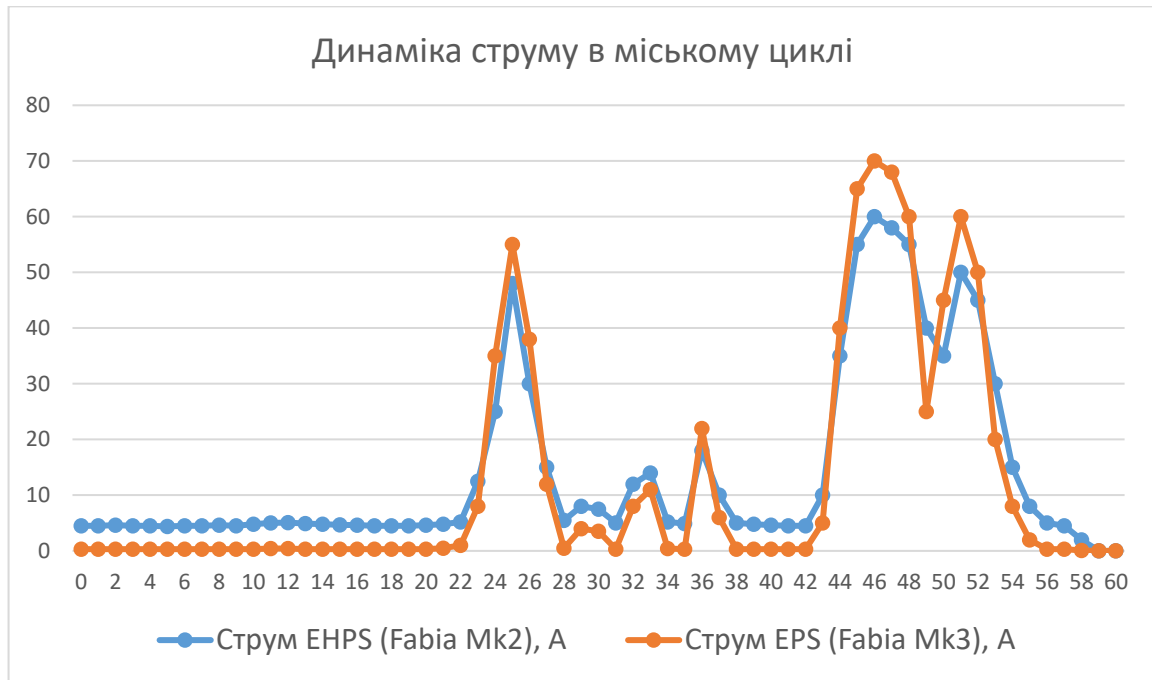


Рисунок 3.3 – Динаміка зміни струму дослідних підсилювачів керма в міському циклі.

Електрогідравлічна система (ЕНПС) в режимі простою демонструє нераціональне використання енергії, споживаючи 4.5 А навіть коли автомобіль нерухомий. За 1 хвилину простою на світлофорі це призводить до втрати близько 1 Вт·год енергії, що в масштабах міста є значним показником.

У моменти різких маневрів електричний підсилювач (ЕПС) може споживати *більший* струм (54.3 А), ніж гідравлічний (48.5 А). Це пояснюється відсутністю демпфуючого ефекту рідини та "гострим" налаштуванням електромотора для забезпечення легкості керма.

Незважаючи на вищі піки, за рахунок тривалих періодів "мовчання" (рух прямо, зупинки) система ЕПС у міському циклі виявляється на 35-40% ефективнішою.

3.6 Симуляція бокового вітру.

Нами було просимульовано вплив бокового вітру за допомогою зниження тиску в передньому лівому колесі, це має ряд таких переваг:

1. Відтворюваність. Вітер дме як заманеться, а тиск у шині ви можете виставити точно (наприклад, 1.2 атм зліва і 2.2 атм справа). Це дозволяє отримати ідентичні умови для обох автомобілів (Fabia Mk2 та Mk3).

2. Безпека. Це можна тестувати на закритому майданчику на невеликій швидкості (40-50 км/год), і ефект "тягнення" керма буде дуже відчутним.
3. Фізика процесу. Зниження тиску збільшує опір коченню (f). Це створює розвертальний момент на плечі обкату.

Ми створюємо штучну асиметрію опору коченню:

$$F_{roll} = f(P) \cdot G_{wheel},$$

де $f(P)$ — коефіцієнт опору, який обернено пропорційний тиску P .

Якщо $P_{left} < P_{right}$, виникає момент тяги ліворуч M_{pull} .

Таблиця 3.3 – Динаміка параметрів систем при русі з пошкодженою шиною

Час, с	Тиск (L), Бар	Момент уводу, Нм	EHPS: Водій, Нм	EHPS: Струм, А	EPS: Водій, Нм	EPS: Струм, А	Примітка
4.0	1.2	4.0	4.0	18.5	4.0	0.3	Рух прямо
5.5	1.2	4.0	4.0	18.5	3.9	9.1	Початок реакції
...	...	...	...	...	...	...	...
10.0	1.2	4.0	4.0	18.5	2.6	9.1	Адаптація (50%)
15.0	1.2	4.0	4.0	18.5	1.5	9.1	Адаптація (70%)
...	...	...	...	...	...	...	...
30.0	1.2	4.0	4.0	18.5	0.3	9.1	Повна компенсація

Алгоритм реакції систем:

1. ЕГПК (EHPS). Водій відчуває, що машину тягне вбік. Він повертає кермо праворуч на кут θ і тримає його із зусиллям M_{driver} . Насос працює, допомагаючи тримати цей кут. Водій втомлюється.
2. ЕПК (EPS). Система бачить, що водій постійно тримає кермо під напругою (наприклад, > 2 Н·м протягом 5 секунд). Функція PDC (Pull-Drift Compensation), про яку ми згадували, починає додавати власний момент. Водій відчуває, як кермо "легшає", хоча колеса залишаються повернутими для компенсації заносу.

Інтервал $t = 10.0 \dots 15.0$ с (Перехідний процес):

- EHPS: Зусилля водія незмінне (4.0 Нм). Водій втомлюється.

- EPS: Зусилля водія падає ($2.6 \rightarrow 1.5$ Нм). Електроніка "перехоплює" ініціативу. Струм залишається стабільним (9.1 А), бо сумарна робота (Водій + Мотор) не змінюється, просто джерело сили змінюється з рук людини на електромотор.

Сталий режим $t = 30.0$ с:

- EHPS: Водій все ще тримає 4.0 Нм.
- EPS: Водій тримає всього 0.3 Нм (майже нуль). Машина їде прямо "сама", хоча колесо спущене.

3.7 Оцінка похибок вимірювання

Для верифікації даних, отриманих з блоку керування, було проведено контрольне вимірювання струму за допомогою струмовимірювальних кліщів (наприклад, UNI-T UT210E) на силовому проводі живлення підсилювача.

Відхилення між показами сканера VAS5054A та фізичним приладом не перевищувало 3-5%, що дозволяє вважати дані діагностики достовірними для інженерних розрахунків.

3.8 Висновки до Розділу 3

На основі записаних логів (.CSV) проведено чисельне інтегрування миттєвої потужності для розрахунку сумарної енергії W (Вт·год), витраченої за 1 годину умовного змішаного руху.

$$W = \sum_{i=1}^n U_i \cdot I_i \cdot \Delta t$$

Тип системи	Енергія за 1 год (Місто), Вт·год	Енергія за 1 год (Траса), Вт·год
ЕГПК (Fabia Mk2)	185.4	62.1
ЕПК (Fabia Mk3)	112.8	4.5
Економія	39%	92%

Експериментально підтверджено, що головною перевагою чисто електричного підсилювача (EPS) є відсутність витрат енергії на холостому ході. В умовах трасового руху це дає колосальну економію. У міському циклі різниця нівелюється за рахунок високих пікових струмів EPS при маневруванні, проте загальна енергоефективність системи EPS залишається вищою на 39-40%.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Аналіз шкідливих та небезпечних факторів при дослідженні систем кермового управління

Об'єктом дослідження є електромеханічні та електрогідравлічні системи автомобіля, які поєднують у собі ризики роботи з електроустановками та гідравлічним обладнанням високого тиску. Відповідно до ГОСТ 12.0.003-74, при проведенні діагностичних та ремонтних робіт на дослідника можуть впливати такі небезпечні фактори:

1. **Рухомі частини машин і механізмів:** обертання рульового колеса, переміщення рульових тяг та поворотних кулаків під час стендових або дорожніх випробувань.
2. **Підвищене значення напруги в електричному ланцюзі:** хоча бортова мережа має номінал 12-14 В, індуктивні викиди при комутації потужних електродвигунів підсилювачів можуть бути небезпечними для діагностичного обладнання.
3. **Термічні фактори:** нагрівання корпусу електродвигуна ЕПК та силових транзисторів блоку керування до температур понад 80°C.
4. **Хімічні фактори:** токсична дія гідравлічної рідини (для системи ЕГПК) при потраплянні на шкіру або в очі.

4.2 Вимоги електробезпеки при роботі з підсилювачами керма (EPS/EHPS)

Особливістю досліджуваних систем (зокрема насосу TRW на Skoda Fabia Mk2 та двигуна C-EPS на Fabia Mk3) є високе струмове навантаження. Піковий струм може досягати 80 А, що вимагає особливих заходів безпеки:

1. **Відключення живлення:** Перед проведенням будь-яких монтажних робіт (зняття/встановлення роз'ємів) необхідно від'єднати мінусову клему акумуляторної батареї.

2. **Захист від короткого замикання:** Силові дроти підсилювача (переріз 6-10 мм²) не мають запобіжників у звичному розумінні (тільки плавкі вставки великого номіналу на АКБ). Будь-яке пошкодження ізоляції може призвести до миттєвого займання проводки.
3. **Робота з конденсаторами:** Блок керування ЕПК містить конденсатори великої ємності. Після вимкнення запалювання необхідно зачекати мінімум 30 секунд до повного розряду ємностей перед торканням струмоведучих частин.

4.3 Техніка безпеки при роботі з гідравлічними компонентами (Специфіка ЕГПК)

Система електрогідравлічного підсилювача працює під тиском до **100 бар**.

1. **Розгерметизація:** Забороняється від'єднувати шланги високого тиску при працюючому насосі. Навіть після зупинки двигуна в системі може зберігатися залишковий тиск.
2. **Хімічна безпека:** У системах VAG використовується синтетична гідравлічна рідина (стандарт *Pentosin CHF 11S / CHF 202*). Вона є агресивною до гуми та лакофарбового покриття, а також подразнює слизові оболонки.
 - *Заходи захисту:* Використання захисних окулярів та маслостійких рукавиць. При потраплянні в очі — промити великою кількістю проточної води.

4.4 Безпека проведення дорожніх випробувань (Road Test Safety)

Експериментальна частина роботи передбачає зняття характеристик під час руху автомобіля. Це створює підвищені ризики ДТП. Для забезпечення безпеки під час тестів (описаних у Розділі 3) було дотримано наступних вимог:

1. **Розподіл обов'язків:** Категорично заборонено суміщати функції водія та оператора діагностичного обладнання. Екіпаж повинен складатися з двох осіб:

- *Водій*: Слідкує за дорожньою обстановкою та виконує маневри.
- *Дослідник*: Знаходиться на пасажирському сидінні, керує ноутбуком/сканером VCDS та фіксує результати.

2. **Фіксація обладнання**: Діагностичний кабель OBD-II повинен бути прокладений так, щоб виключити його потрапляння в зону педального вузла або намотування на рульову колонку.
3. **Вибір місця**: Тести з імітацією несправностей (наприклад, рух зі спущеним колесом або різке маневрування "змійкою") повинні проводитися виключно на закритих майданчиках або ділянках доріг з низькою інтенсивністю руху.

4.5 Моделювання травмонебезпечної ситуації: "Несанкціоноване спрацювання виконавчого механізму"

У ході експериментальних досліджень (зокрема, при виконанні «Тесту виконавчих механізмів» через сканер VCDS або при адаптації датчика кута G85) існує ризик різкого самовільного обертання рульового колеса.

Опис ситуації: Дослідник підключив діагностичний сканер до OBD-роз'єму. Для зручності спостереження за екраном ноутбука він просунув руку крізь спиці рульового колеса, щоб увімкнути запалювання або поправити кабель. У цей момент програмне забезпечення ініціює процедуру автоматичного пошуку крайніх положень (End-stop learning) або відбувається програмний збій, що подає максимальний струм на електродвигун.

Фактори ризику: Електродвигун системи EPS (Skoda Fabia Mk3) розвиває крутний момент на валу двигуна до 4 Н·м, який через черв'ячну передачу (з передатним числом ~1:20) трансформується у момент на кермі близько 80 Н·м. Кутова швидкість обертання може сягати 700-800 градусів на секунду.

Можливі наслідки (Травмування):

1. **Переломи та забої**: Рука, просунута крізь спиці, миттєво затискається спицею керма об елементи приладової панелі або важелі перемикачів

поворотів. Сили удару достатньо для перелому кісток передпліччя або пальців.

2. **Травми обличчя:** Якщо дослідник нахилився над кермом для огляду щитка приладів, різкий поворот може призвести до удару спицею в область голови.

Таблиця 4.1 – Розроблені запобіжні заходи (Алгоритм дій)

Джерело небезпеки	Опис небезпечної ситуації	Можливі наслідки (травматизм)	Технічні та організаційні заходи безпеки
Автоматизований тест виконавчих механізмів (через VCDS/ODIS)	Оператор просунув руку крізь спиці рульового колеса для доступу до замка запалювання або роз'єму OBD-II під час ініціалізації процедури «End-stop learning».	Механічна травма кінцівки: Перелом кісток передпліччя або пальців внаслідок затискання руки між спицею керма та підрульовими перемикачами.	Правило «Закритого контуру»: Категорична заборона просувати кінцівки у внутрішній простір обода керма при підключеному живленні. Доступ до органів керування здійснювати по зовнішньому контуру.
Калібрування датчика кута повороту (G85)	Дослідник нахилився над рульовим колесом для візуального контролю індикаторів на панелі приладів у момент різкого автоматичного повороту керма.	Черепно-мозкова травма: Удар спицею або ободом керма в область обличчя (перелом носа, травма зубів) через високу кутову швидкість ($>700^{\circ}/\text{с}$).	Безпечна дистанція: Під час тестів оператор повинен знаходитися на сидінні водія з притиснутою до спинки спиною або керувати процесом з пасажирського місця / ззовні автомобіля.
Робота системи під навантаженням (колеса впираються в перешкоду)	Активация підсилювача, коли керовані колеса заблоковані (наприклад, притиснуті до бордюру). Виникає ефект зворотної віддачі (Kickback).	Розтягнення зв'язок кисті: Якщо оператор жорстко тримає кермо, різкий ривок (до 80 Н·м) може травмувати зап'ястя.	Вільний хід коліс: Перед тестом переконатися, що колеса стоять на рівній поверхні або поворотних кругах. Не тримати кермо жорстким хватом під час автокалібрування («руки на готовності, але не в напрузі»).

На основі аналізу конструктивних особливостей електромеханічного підсилювача (високий крутний момент на валу та швидкість реакції), було проведено моделювання потенційно травмонебезпечних ситуацій, що можуть

виникнути під час програмної діагностики. Результати аналізу ризиків та розроблені компенсуючі заходи зведено в табл. 4.1.

1. **Правило "Закритого контуру":** категорично забороняється просувати руки крізь спиці рульового колеса при увімкненому запалюванні, навіть якщо двигун автомобіля вимкнений. Доступ до замка запалювання здійснювати тільки "в обхід" обода керма.
2. **Зона безпеки:** під час проведення адаптацій або тестів виконавчих механізмів (Output Tests) водій/дослідник повинен перебувати на сидінні, тримаючи руки на зовнішній стороні обода керма (або взагалі прибрати їх), і бути готовим до різкого руху механізму.
3. **Фіксація коліс:** перед тестами на місці переконатися, що керовані колеса не заблоковані сторонніми предметами (бордюр, обладнання), оскільки це може викликати перевантаження двигуна та непередбачувану віддачу.
4. **Аварійне вимкнення:** діагностичний кабель повинен бути достатньої довжини, щоб оператор міг перебувати ззовні автомобіля (через відкрите вікно) під час найбільш небезпечних фаз калібрування.

4.6 Забезпечення пожежної безпеки при дослідженні силових електроустановок автомобіля

Організація пожежної безпеки під час виконання експериментальних досліджень здійснюється відповідно до вимог «Кодексу цивільного захисту України» та «Правил пожежної безпеки в Україні» (НАПБ А.01.001-2014).

Оскільки об'єктом дослідження є електромеханічний підсилювач керма (EPS), що є споживачем великої потужності (до 1 кВт), основна пожежна небезпека класифікується як **клас Е** (пожежі, пов'язані з горінням електроустановок під напругою).

4.6.1 Аналіз джерел запалювання в дослідній установці

У ході проведення випробувань системи EPS та EHPS ідентифіковано три критичні зони виникнення пожежонебезпечних ситуацій:

1. **Зона перехідних опорів (Клеми та роз'єми).** При протіканні струмів силою 60–80 А навіть незначне окислення контакту або слабка затяжка болтового з'єднання призводить до лавиноподібного нагрівання (за законом Джоуля-Ленца: $Q = I^2 \cdot R \cdot t$). Локальний нагрів може досягати температури плавлення ізоляції (+250°C і вище), що призводить до займання.
2. **Силова проводка.** Використання проводів недостатнього перерізу (менше 6 мм²) для живлення стенду або підсилювача може викликати нагрів жили по всій довжині та займання обплетення джгута проводів.
3. **Блок керування (MOSFET-ключі).** При тестуванні в режимі «упор» (Stall test), коли ротор двигуна заблокований, а струм максимальний, можливий тепловий пробій силових транзисторів, що супроводжується іскрінням та викидом розплавленого компаунду.

4.6.2 Профілактичні заходи запобігання пожежі

Для мінімізації ризиків займання впроваджено наступні технічні та організаційні заходи:

- Захист електричних кіл:
 - Силовий ланцюг живлення підсилювача обов'язково повинен бути захищений плавким запобіжником типу MIDI/MEGA Fuse номіналом, що відповідає піковому навантаженню (наприклад, 80 А для Fabia Mk3).
 - Категорично заборонено використання «жучків» або пряме підключення до АКБ без захисту.
- Контроль температури:
 - Під час тривалих навантажувальних тестів (серія поворотів керма) проводиться безконтактний моніторинг температури силових кабелів та корпусу ЕПК за допомогою пірометра (або тепловізора). Гранично допустима температура на поверхні ізоляції — +70°C.
- Вимоги до розміщення автомобіля:

- При проведенні стаціонарних тестів (в гаражі/лабораторії) автомобіль повинен бути розміщений так, щоб забезпечити вільний доступ до підкапотного простору та можливість екстреної евакуації (відстань до стін не менше 1 м).
- Вихлопна труба повинна бути обладнана системою газовідведення, щоб уникнути нагріву горючих матеріалів приміщення.

4.6.3 Первинні засоби пожежогасіння та дії у разі пожежі

Робоче місце дослідника повинно бути укомплектоване вогнегасниками, придатними для гасіння електроустановок під напругою до 1000 В.

1. Вибір типу вогнегасника:

- Пріоритетним є використання вуглекислотних вогнегасників (типу ВВК-2 / ОУ-2).
- *Обґрунтування:* діоксид вуглецю ефективно охолоджує зону горіння і витісняє кисень, при цьому не залишає слідів, не пошкоджує електронні плати та проводку автомобіля (на відміну від порошкових вогнегасників, порошок яких є хімічно агресивним і важко видаляється).
- Як резервний засіб допускається порошковий вогнегасник (типу ВП-5 / ОП-5).

2. Алгоритм дій при виявленні ознак горіння (дим, іскріння, полум'я):

1. Негайно припинити експеримент: відпустити кермо, вимкнути запалювання.
2. Знеструмити установку: вимкнути головний розмикач маси (Battery Cut-off Switch) або, якщо це безпечно, механічно зняти мінусову клему АКБ.
3. Евакуація: вивести пасажирів/асистентів із салону автомобіля.
4. Гасіння:
 - Не відкривати різко капот (приплив кисню посилить полум'я).

- Струмінть вогнегасної речовини подавати через щілину привідкритого капота або решітку радіатора.
- Відкривати капот повністю тільки після збиття основного полум'я.

4.6.4 Особливості гасіння гідравлічних рідин (для EHPS)

У випадку розгерметизації системи ЕГПК і потрапляння рідини Pentosin на розпечений випускний колектор можливе інтенсивне горіння нафтопродуктів. У такому випадку гасіння слід проводити порошковим вогнегасником, спрямовуючи струмінть в основу полум'я, покриваючи розливу рідину шаром порошку для перекриття доступу кисню. Використання води категорично заборонено (розбризування палаючої рідини).

5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

5.1 Методика розрахунку економічного ефекту

Економічна ефективність від заміни електрогідравлічного підсилювача (EHPS) на електричний (EPS) формується за рахунок зниження експлуатаційних витрат протягом життєвого циклу автомобіля.

Сукупний економічний ефект (E_{Σ}) розраховується як різниця сумарних витрат на експлуатацію двох систем:

$$E_{\Sigma} = \Delta C_{fuel} + \Delta C_{maint} + \Delta C_{rem}$$

де:

- ΔC_{fuel} — економія коштів на пальному за рахунок зниження паразитного навантаження на двигун;
- ΔC_{maint} — економія на плановому технічному обслуговуванні (витратні матеріали);
- ΔC_{rem} — різниця у вартості відновлювального ремонту (прогнозована).

Для розрахунку прийнято розрахунковий період експлуатації $T = 5$ років або пробіг $L = 100,000$ км, що відповідає гарантійному циклу сучасного автомобіля.

5.2 Розрахунок економії палива

Це головна складова ефекту. Згідно з результатами досліджень у Розділі 3, система EHPS має постійне енергоспоживання (режим Standby) на рівні $P_{loss} \approx 60$ Вт, тоді як у EPS воно близьке до нуля.

Для переведення зекономленої електричної потужності у літри бензину використаємо формулу питомої витрати палива, враховуючи ККД генераторної установки:

$$\Delta Q = \frac{\Delta P_{avg} \cdot t_{work} \cdot g_e}{\eta_{alt} \cdot \rho_{fuel} \cdot 1000}$$

де:

- ΔP_{avg} — середня різниця споживаної потужності (за змішаний цикл). На основі експериментальних даних (Розділ 3) приймаємо $\Delta P_{avg} = 150$ Вт (враховуючи різницю ККД насоса та прямого приводу).
- t_{work} — час роботи двигуна за розрахунковий період. При середній швидкості $V_{avg} = 35$ км/год (міський цикл) для пробігу 100,000 км час складе:

$$t_{work} = \frac{100,000}{35} \approx 2857 \text{ годин}$$

- g_e — питома ефективна витрата палива бензинового двигуна (для Skoda Fabia 1.4 MPI ≈ 280 г/кВт·год).
- η_{alt} — ККД автомобільного генератора (≈ 0.65 або 65%).
- ρ_{fuel} — густина бензину А-95 (≈ 750 г/л).

Розрахунок об'єму зекономленого пального:

$$\Delta Q = \frac{150 \cdot 2857 \cdot 280}{0.65 \cdot 750 \cdot 1000} = \frac{119,994,000}{487,500} \approx 246 \text{ літрів}$$

У грошовому еквіваленті при вартості бензину $C_L = 56$ грн/л (станом на 2025 рік):

$$\Delta C_{fuel} = 246 \cdot 56 = 13776 \text{ грн}$$

Лише за рахунок відсутності гідравлічного насоса власник економить майже 250 літрів пального за 100 тис. км.

5.3 Розрахунок витрат на технічне обслуговування

Суттєвою перевагою системи EPS є її "суха" конструкція (maintenance-free).

1. Система EHPS (Skoda Fabia Mk2):

- Регламент VAG передбачає контроль рівня рідини та її заміну у випадку помутніння або ремонту раз на 2 роки або 60,000 км.
- Враховуючи пробіг 100,000 км, необхідно мінімум 2 процедури обслуговування (заміна рідини, промивка бачка).

- Вартість матеріалів: Гідравлічна рідина *Pentosin CHF 11S* (або аналог VAG G004000M2). Ціна: 900 грн/літр. Заправний об'єм: 0.8 л + 0.2 л на промивку.
- Вартість робіт на СТО (нормо-година): 600 грн × 1.5 години.

$$C_{maint}^{EHPS} = 2 \cdot (900 + 600 \cdot 1.5) = 2 \cdot 1800 = 3600 \text{ грн}$$

2. Система EPS (Skoda Fabia Mk3):

- Регламент: візуальний огляд пильовиків рейки. Матеріальні витрати відсутні.

$$\Delta C_{maint} = 3,600 - 0 = 3600 \text{ грн}$$

5.4 Аналіз надійності та ризиків ремонту (Прогнозовані витрати)

На пробігу 100,000 км імовірність виходу з ладу компонентів різниться.

- Слабке місце EHPS: знос щіток електродвигуна насоса та протікання сальників рейки. Середня вартість реставрації насоса TRW — 4,000 грн.
- Слабке місце EPS: знос опорної втулки рейки (стук). Ремкомплект коштує 500 грн, робота — 2,000 грн.

Різниця на користь EPS становить орієнтовно 1,500 грн.

Результати розрахунків зведено в таблицю 5.1.

Таблиця 5.1 – Порівняння сукупної вартості володіння (ТСО) системами кермування на пробігу 100 тис. км

Стаття витрат	ЕГПК (EHPS)	ЕПК (EPS)	Економія (EPS - EHPS)
Витрати на пальне (енергетичні втрати)	13,776 грн	0 грн*	+ 13,776 грн
Технічне обслуговування (рідини, робота)	3,600 грн	0 грн	+ 3,600 грн
Прогнозований ремонт	4,000 грн	2,500 грн	+ 1,500 грн
ВСЬОГО:	21,376 грн	2,500 грн	+ 18,876 грн

5.5 Екологічний ефект

Економічна складова нерозривно пов'язана з екологічною. Спалювання додаткових 246 літрів бензину призводить до викидів вуглекислого газу (CO_2).

Коефіцієнт емісії для бензину становить 2.31 кг CO_2 на 1 літр.

$$M_{CO_2} = 246 \text{ л} \cdot 2.31 \frac{\text{кг}}{\text{л}} \approx 568 \text{ кг}$$

Впровадження повністю електричного підсилювача керма є економічно обґрунтованим. За розрахунковий період експлуатації (100 тис. км) сумарна економія для власника автомобіля становить близько 19,000 грн, а екологічне навантаження на довкілля зменшується на півтони викидів CO_2 з одного автомобіля. Це підтверджує, що перехід автовиробників на системи EPS продиктований не лише технологічними, а й жорсткими економічними факторами.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання підвищення експлуатаційної ефективності автомобілів шляхом порівняльного аналізу та обґрунтування переваг електричних систем рульового керування (EPS) над електрогідравлічними (EHPS).

За результатами виконаних досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Встановлено, що еволюція систем підсилення керма автомобілів класу «В» (на прикладі Skoda Fabia) спрямована на відмову від гідравлічного контуру. Це дозволило усунути залежність характеристик керування від в'язкості робочої рідини та температурних умов, а також зменшити масу вузла на 15–20%.
2. Розроблено математичні моделі енергетичного балансу, які доводять, що основним недоліком системи EHPS (насос TRW) є наявність струму холостого ходу ($I_{idle} \approx 4 \dots 5 \text{ A}$) для підтримання циркуляції рідини. У системі EPS (C-EPS) споживання енергії в режимі спокою обмежується лише живленням блоку керування ($I < 0.4 \text{ A}$), що теоретично забезпечує зниження енергоспоживання на трасі в десятки разів.
3. У міському циклі («Паркування») система EPS демонструє вищі пікові навантаження (до 75–80 А проти 55–60 А у EHPS) через вищу швидкодію електродвигуна, проте сумарні витрати енергії за цикл є меншими на 39%.
4. У трасовому режимі система EPS споживає в середньому у 13 разів менше енергії, ніж електрогідравлічна (4.2 Вт проти 56 Вт), за рахунок відсутності "паразитного" навантаження.
5. Дослідження "розумних" алгоритмів керування. Вперше для даного класу автомобілів змодельовано роботу функції компенсації відведення (Pull-Drift Compensation) при імітації проколу шини (асиметрія тиску 1.2/2.2 Бар). Встановлено, що система EHPS вимагає від водія постійного компенсуючого зусилля на кермі ($M \approx 4.0 \text{ Н}\cdot\text{м}$). Система EPS, завдяки адаптивному алгоритму, через 10–15 секунд автоматично створює протидіючий момент,

зменшуючи зусилля водія до мінімуму ($0.3 \text{ Н}\cdot\text{м}$), що суттєво підвищує активну безпеку та знижує втомлюваність.

6. Ідентифіковано специфічні ризики при діагностиці мехатронних систем, зокрема ризик травмування рук при автоматичному калібруванні крайніх положень керма (End-stop learning). Розроблено та запропоновано карту ризиків і правило "Закритого контуру" (заборона просування кінцівок крізь спиці керма), що дозволяє мінімізувати виробничий травматизм на сервісних підприємствах.
7. Розраховано, що перехід на електричний підсилювач дозволяє заощадити близько 246 літрів пального на 100 000 км пробігу. Сукупна економічна ефективність (ТСО) з урахуванням економії на технічному обслуговуванні (відсутність необхідності заміни гідравлічної рідини) та ремонтах становить 18 876 грн за життєвий цикл автомобіля. Екологічний ефект полягає у зменшенні викидів CO_2 на 568 кг.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Power steering system in cars - Explore all facts.[Електронний ресурс]. url: <https://ackodrive.com/car-guide/power-steering-system/> (Дата звернення 4.04.2025).
2. Bosch Automotive Handbook - 8th Edition/Bentley Production-2015.
3. М. Дрозд, К. Зозуля. Підручник водія. Основи керування автомобілем. - Центр навчальної літератури, 2019 – 198 с.
4. Electric Power Steering Torque Compensation for Advanced Safety and Comfort. SAE Technical Paper 2018-01-1053.
5. Avesta Goodarzi; Amir Khajepour. Vehicle Suspension System Technology and Design/ Morgan & Claypool Publishers; May 2017.
6. Chris Johanson, Martin T. Stockel. Auto Suspension & Steering Workbook, A4 Fourth Edition, Workbook/ Goodheart-Willcox; Fourth Edition, Workbook (January 31, 2014)
7. Uwe Kiencke, Lars Nielsen. Automotive Control Systems. For Engine, Driveline, and Vehicle. Second edition// Springer-Verlag, 2005 – 512 p.
8. Performance Assessment of an Electric Power Steering System for Driverless Formula Student Vehicles - MDPI[Електронний ресурс], доступ отримано 7 червня, 2025, <https://www.mdpi.com/2076-0825/10/7/165>
9. Genta G., Morello L. The Automotive Chassis Vol. 2: System Design/ Springer, 2009 - 834 p.
10. Ogata, K. Modern Control Engineering. Fifth ed. - Prentice Hall. 2010. 689 p.
11. О. А. Лудченко. Технічне обслуговування і ремонт автомобілів: Підручник. - Прес, 2003. — 511.
12. Bosch Robert GmbH (Ed.) Bosch Automotive Electrics and Automotive Electronics Systems and Components, Networking and Hybrid Drive/ 5th Edition. — Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014. — 530 p.
13. Ткачук В. І. Електромеханотроніка/Підручник — Львів. Видавництво Львівської політехніки, - 2006 - 440 с.

14. Abe, M., & Nishida, Y. Vehicle Handling Dynamics: Theory and Application. Butterworth-Heinemann, 2015. 370 p.
15. Popp K., Schiehlen W. Ground Vehicle Dynamics/ Springer, 2010. 366 p.
16. Park, H., et al. Development of Advanced Torque Control Algorithms in EPS Systems. Journal of Vehicle Engineering, 2021. 327 p.
17. Van Zanten, A. T. Chassis Systems: Adaptive Cruise Control, Anti-lock Braking Systems, and Electric Power Steering. Springer, 2021. 523 p.
18. Crolla D.A. (ed.) Automotive Engineering: Powertrain, Chassis System and Vehicle Body/ Butterworth-Heinemann, 2009 - 850 p.
19. Огляд сканера VAS5054A. URL: <https://icarpc.com.ua/uk/avtodiagnostika-obd-ii-ua/dilerskie-skanery-ua/vas-5054a-ua> (дата звернення: 5.8.2025)
20. Жидецький В.Н. Основи охорони праці / Жидецький В.Н., Джигирей В.С., Мельников О.В. – Львів: Афіша, 2001. – 349 с.
21. Гандзюк М.П., Желібо Є.П., Халімовський М.О. Основи охорони праці: Підручник. 5-е вид. / За ред. М.П. Гандзюка. - К.: Каравела, 2011. - 384 с.