

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

**БАЖИНОВ О.В., БАЖИНОВА Т.О., ЗАВЕРУХА Р. Р.**

**ДІАГНОСТИКА СИЛОВОЇ УСТАНОВКИ  
ГІБРИДНОГО АВТОМОБІЛЯ**

Харків – 2021

УДК 629.3+504

ББК 39.35

Рецензенти: Шуляк М.Л., д-р техн. наук, професор  
Харківський національний університет сільського  
господарства імені П. Василенка  
Самородов В.Б. д-р техн. наук, професор  
Харківський національний технічний університет «ХПТ»  
Волков В.П. д-р техн. наук, професор  
Харківський національний автомобільно-  
дорожній університет

Б 82            Діагностика силової установки гібридного автомобіля / [  
Бажинов О.В., Бажинова Т.О., Заверуха Р.Р.]. – Харків: ХНАДУ, 2021. - 115 с.

**ISBN**

*Рекомендовано до видання вченою радою ХНАДУ, протокол № від 2021*

Розглядаються теоретичні та практичні основи діагностування гібридної силової установки автомобіля. Проведено аналіз діагностичних параметрів складових силової установки гібридного автомобіля. Наведено нейромережеву модель оцінки технічного стану гібридної силової установки автомобіля, а також рекомендації практичного використання результатів дослідження в умовах експлуатації. Монографія призначена для науковців, які досліджують екологічність автотранспортні засоби, а також студентам автомобільного, електричного та механічного профілю.

Іл.

Табл.

Бібліогр.

УДК 629.3 +504

ББК 39.35

**ISBN**

Бажинов О.В.,  
Бажинова Т.О.,  
Заверуха Р.Р.  
Харківський національний  
автомобільно-дорожній  
університет, 2021

## ЗМІСТ

Вступ .....	4
1. Гібридні автомобілі як об'єкт оптимального управління .....	6
2. Зміни технічного стану силових установок гібридних автомобілів від зовнішніх умов .....	15
3. Використання інформаційних систем оцінки технічного стану силових установок гібридних автомобілів .....	19
4. Теоретичні основи оцінки технічного стану силової установки гібридного автомобіля .....	24
5. Математичне моделювання гібридної силової установки .....	37
6. Нейромережева модель оцінки технічного стану гібридної силової установки .....	55
7. Результати дослідження зміни технічного стану силової установки .....	65
8. Рекомендації ефективного діагностування гібридної силової установки .....	84
9. Використання систем нечіткого висновку та штучних нейронних мереж для оцінки технічного стану гібридної силової установки .....	93
Заключення .....	103
Перелік посилань .....	105

## ВСТУП

За останні роки значно збільшилось кількість автомобілів з гібридними силовими установками, які в якості первинного джерела використовують двигун внутрішнього згорання, а другим є електричний накопичувач енергії що має спряження з електромеханічною системою приводу ведучих коліс.

В гібридних автомобілях передача енергії від двигуна внутрішнього згорання на ведучі колеса автомобіля реалізується за одною із схем: послідовна, паралельна або змішана. Окремі автовиробники розділяють гібриди на «м'які» (mild hybrids), де допоміжне джерело енергії набуває чинності як асистент, «повний» (full hybrids), який може рухатися тільки на допоміжному джерелі енергії, і «підзарядкою» (plug-in hybrids).

Діагностування, ремонт автомобілів з гібридними силовими установками (ГСУ) є проблемою. ГСУ в сукупності з електронними блоками управління та іншими вузлами мають складну систему, яка потребує спеціальних підходів при визначенні технічного стану та ремонті при експлуатації гібридних автомобілів. Крім того, від технічного стану автомобіля залежить і безпека дорожнього руху.

Технічний регламент не має інформації по визначенню технічного стану гібридного автомобіля. При проектуванні станцій технічного обслуговування та організації проведення ремонтних робіт використовується нормативно-довідкова література, але відсутня можливість використовувати цю літературу до автомобілів з гібридною силовою установкою бо потрібні інші методи проведення робіт.

Автовиробники гібридних автомобілів на даний момент не дуже зацікавлені в організації якісного обслуговування та надання інформації за умовами визначення технічного стану і нормативних параметрів силової гібридної установки. Обслуговуючий персонал станцій технічного обслуговування не має достатньої кваліфікації по проведенню діагностичних та ремонтних робіт гібридних автомобілів.

Збільшення виробництва гібридних автомобілів обумовлено підвищеними вимогами міжнародних стандартів до екологічної безпеки та економічної витрати енергії транспортних засобів. В той же час в залежності від умов експлуатації витрати палива та викиди шкідливих речовин у відпрацьованих газах не завжди відповідають даним автовиробників. В зв'язку з цим оцінка технічного стану гібридної силової установки транспортних засобів є актуальною задачею.

В монографії розглянуто підвищення ефективності експлуатації функціональних систем гібридного автомобіля шляхом оперативного синтезу управляючих впливів за енергетичними і якісними критеріями з урахуванням зовнішніх умов експлуатації.

У монографії вирішене актуальне науково-прикладне завдання, що створює умови для ефективного використання гібридних автомобілів за рахунок удосконалення методу визначення ефективної роботоздатності гібридної силової установки на етапі експлуатації.

Метод діагностики технічного стану ГСУ забезпечує єдиний підхід дослідження технічного стану агрегатів незалежно від схеми будови та конструктивних особливостей гібридного автомобіля. Наведена стратегія діагностування технічного стану ГСУ на підставі концепції нейромережевого та нейро-нечіткого управління з адаптивним критиком на підставі метода навчання нейронної мережі з підкріпленням.

Практичне значення монографії полягає в тому, що отримані наукові результати становлять єдиний комплекс досліджень (концепція, принципи, критерії, методи та математичні моделі), запропоновано методіку діагностування технічного стану ГСУ на підставі концепції нейромережевого управління. Дисертаційні дослідження складають теоретичну базу для діагностики технічного стану агрегатів ГСУ, наукового обґрунтування базових діагностичних параметрів екологічно-чистих транспортних засобів.

За результатами досліджень запропоновано алгоритм та процедуру раціонального діагностування технічного стану ГСУ автомобіля на етапі експлуатації.

## 1. ГІБРИДНІ АВТОМОБІЛІ, ЯК ОБ'ЄКТ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ

Особливості силових установок гібридних та електромобілів дозволяють зробити висновок, що силові установки як об'єкт управління характеризуються зміною структурою, значною не лінійністю основних своїх елементів та параметричною невизначеністю. Ефективність використання силової установки визначається характеристиками її системи автоматичного управління, яка вирішує наступні задачі: ідентифікація поточного стану систем та вузлів силової установки, прогнозування тягово-швидкісного режиму руху; вибір оптимального режиму роботи силової установки в залежності від її технічного стану та режиму руху автомобіля; оптимальний розподіл потоків потужності між агрегатами силової установки на заданому тягово-швидкісному режимі; управління рекуперацією енергії гальмування, підзарядкою та витратою енергії накопичувача; стабілізація заданих режимів роботи окремих агрегатів силової установки; забезпечення інтерфейсу водія, імітуючи керування базовим автомобілем.

Задачі, які вирішуються системою автоматичного регулювання (САР) силовою установкою, мають ієрархічну організацію.

Першому рівню ієрархії відповідають задачі стабілізації заданих режимів роботи окремих агрегатів силової установки, а також забезпечення якості перехідних процесів. Закони регулювання характеризуються достатньо наближено до зміни параметрів об'єктів регулювання або мати можливість адаптації. Рішення даних задач полягає на локальні регулятори агрегатів силової установки (ДВЗ, регулятор тягового електроприводу, блок управління зарядом-розрядом тягової акумуляторної батареї (ТАБ)).

До другого рівня ієрархії відносяться задачі вибору оптимальних режимів роботи та особливості взаємодії підсистем і агрегатів силової установки, перерозподіл потоків потужності між агрегатами в залежності від стану ТАБ,

режиму руху автомобіля, керуючих та збурюючих (зовнішніх) впливів. При цьому забезпечується економічний та екологічно безпечний режим роботи ДВЗ, а також достатній запас енергії в накопичувачі для зниження пікового навантаження за рахунок допоміжного двигуна. Підзарядка ТАБ виконується при лишку потужності ДВЗ в гібридній силовій установці або шляхом рекуперації енергії гальмування автомобіля.

До третього рівня ієрархії відносять задачу забезпечення інтерфейсу водієві, імітуючи управління базовим автомобілем, а також забезпечує відображення поточного стану і режиму роботи силової установки. Дана задача має відношення до силовою установки гібридного та електромобіля, оскільки керування автомобілем виконується по концепції drive-by-wire, відповідно якої водій керує бортовим комп'ютером, не силовою установкою. Таке рішення не впливає на ефективність функціонування силової установки.

Задачі другого рівня ієрархії визначають стратегію управління гібридною силовою установкою, яка характерна тільки для гібридних та електромобілів з бортовою підзарядкою, коли об'єктами управління є декілька джерел потужності. Ефективність гібридного або електромобіля з бортовою підзарядкою залежить від обраного режиму роботи силової установки до тягово-швидкісного режиму, а також від якості управління перерозподілом потоків потужності між агрегатами силової установки. Цільова функція такого управління є мінімізація витрати палива та викидів шкідливих компонентів у відпрацьованих газів ДВЗ у межах потребам керуваності, надійності, запасу енергії ТАБ та інше [10]. Оптимальний розподіл потужності між ДВЗ і електродвигуна виконується на підставі аналізу статистичних карт питомої витрати палива гібридної силової установки. Оптимізація перерозподілу потоків потужності актуальна для гібридних автомобілів з паралельною та послідовно-паралельною схемами будови силової установки.

Задачі другого рівня ієрархії дозволяють постановку в загальному вигляді та не потребують конкретизації принципового функціонування допоміжного двигуна і контуру рекуперації енергії.

З аналізу досліджень управління силовими установками автомобілів використовують методи розрахункового інтелекту [11, 12]. Управління на підставі нечітких правил і систем нечіткого висновку використовується в роботах [13–15], а в роботах [25, 26] досліджується можливість використання генетичних алгоритмів для налагоджування систем нечіткого висновку. Використання штучних нейронних мереж (ШНМ) при управлінні силової установки наведено в роботах [31, 32]. Сумісному використанню (ШНМ) та систем нечіткого висновку присвячені роботи [31–35]. Наведені дослідження вказують на значний потенціал покращення експлуатаційних характеристик гібридних та електромобілів на підставі ефективного управління потужністю при використанні технологій розрахункового інтелекту.

Є три підходу до будови силових установок гібридних та електромобілів, які відрізняються принципами реалізації стратегії управління при вирішенні другого рівня ієрархії. Це використання логічних правил вибору стратегії або використання методів теорії оптимального управління та використання алгоритмів адаптації до зовнішніх умов експлуатації гібридних та електромобілів. На практиці поширеним є вибір стратегії управління силовою установкою на підставі логічних правил та табличне задання законів регулювання (logic based control strategies). Такий підхід має назву Rule Based (RB) – заснований на правилах [36–40].

Правила та закони управління встановлюють розробники силових установок шляхом використання евристичних методів і аналізу результатів розрахункового експерименту. В даному випадку не враховуються особливості конкретних умов експлуатації, які впливають на ефективність роботи силової установки. Отже, такий підхід не дозволяє використовувати в повній мірі енергоефективність силової установки. Якщо стратегія управління не відповідає зовнішнім умовам роботи автомобіля то силова установка може мати гірші показники енергетичної економічності та токсичності відпрацьованих газів в порівнянні з базовим автомобілем. Логіка функціонування силової установки може задаватися за допомогою бази нечітких правил та використовувати систему



нечіткого висновку. Також для апроксимації законів регулювання або характеристик агрегатів використовується ІНМ [15, 28]. Принцип управління на підставі логічних правил використовується в силових установках більшості гібридних та електромобілів. В роботі [39] використано штучні нейронні мережі в системі управління силовою установкою транспортного засобу з метою зменшення витрати енергії та діагностики off-line технічного стану тягової акумуляторної батареї. За допомогою симулятора навчається непромерена модель автомобіля, яка використовує для off-line навчання нейроконтролера. Якість навчання нейроконтролера визначається симулятором. Для подальшого функціонування системи управління параметри нейронних мереж не змінюються. Відсутність адаптації вагових коефіцієнтів при функціонуванні системи управління обґрунтовано тим, що це веде до втрати довго часової пам'яті системи при виникненні коротко часової несправності, а також можливості виникнення біфуркацій при адаптації в нелінійних системах (рис.1.1).

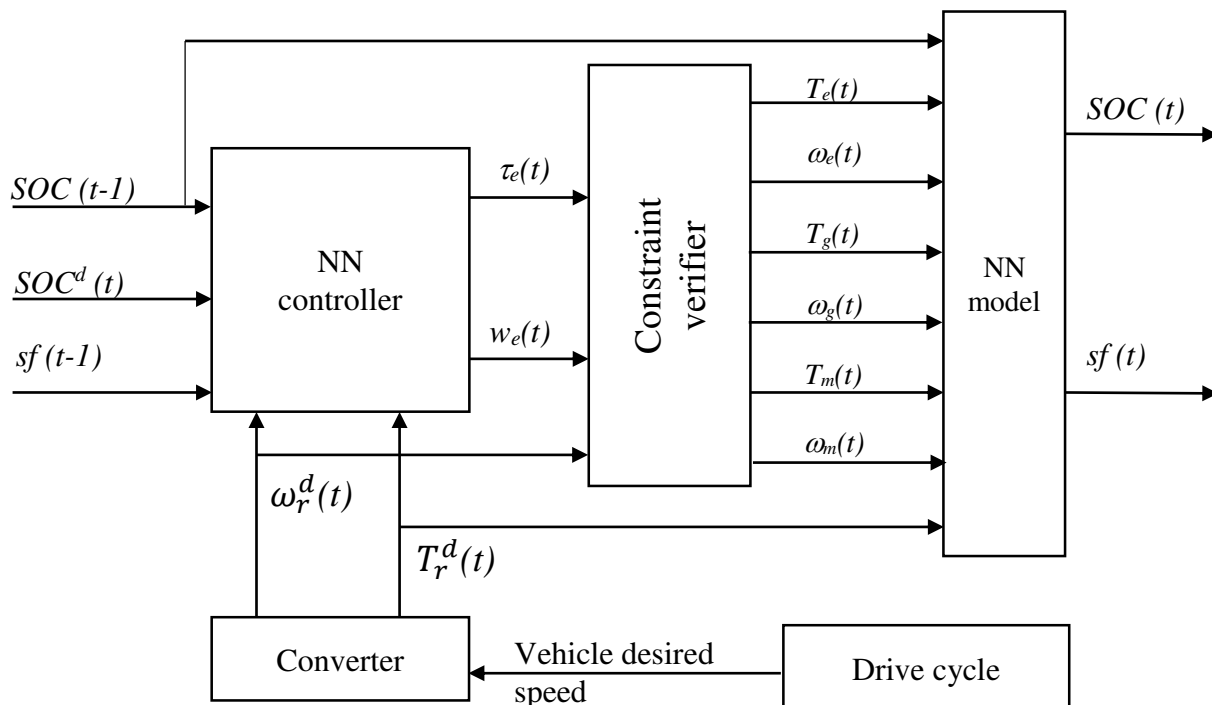


Рисунок 1.1 – Навчання нейроконтролера

Цільова функція оптимізації управління має на увазі мінімізацію витрати енергії при збереженні ступеню заряду тягової акумуляторної батареї при обмеженому діапазоні руху транспортного засобу в заданих умовах експлуатації

$$\text{cost}(t) = \lambda_1 \cdot sf^2(r) + \lambda_2 (SOC^d(t) - SOC(t))^2, \quad (1.1)$$

де  $\lambda_1 = 1$  і  $\lambda_2$  - вагові коефіцієнти,  $\lambda_2 = 10$ , при  $SOC \geq SOC^d$  і  $\lambda_2 = 50$  при  $SOC < SOC^d$ ;

$sf$  – рівень витрати енергії (fuel rate);

$SOC^d$  – бажана ступінь зарядженості тягової акумуляторної батареї.

Нейроконтролер (NN controller) має тришаровий рекурсивний персептрон з п'ятьма входами, 10 нейронів в закритому слої та два вихідних нейрона. В кожний момент часу  $t$  на вхід нейронної межі подається п'яти компонентний вектор  $[w_r^r(t), T_t^r(t), sf(t-1), SOC_t^d, SOC^d(t-1)]$ . На підставі даного вхідного вектору нейронна мережа визначає нормовані значення крутного моменту і швидкості обертання валу двигуна, які потім перетворюють в реальні сигнали управління силовою установкою в блоці Constraint verifier.

Процес навчання непромерженої моделі і нейроконтролера розглядається як задача оптимальної фільтрації з використанням фільтра Калмана. Вагові коефіцієнти нейронної мережі представлені як вектор стану динамічної системи. Нейромержева модель навчається протягом 3000 епох на масиві даних, які мають пари сигналів вхід-вихід від 20 різних умов роботи гібридної силової установки, генеруючих симулятором. Навчання нейроконтролера ведеться протягом 1200 епох.

За результатами випробувань метода нейроуправління в роботі [11] наведено, що нейроконтролер забезпечує зменшення витрати палива на 17 % і скорочує діапазон зміни ступеня зарядженості тягової акумуляторної батареї на 35 %, а також забезпечує мінімізацію викидів токсичних речовин. Для поліпшення експлуатаційних характеристик силової установки використовують цільову функцію оптимізації нейроконтролера параметрів в наявному вигляді. Недоліком

методу слід визнати відсутність адаптації стратегії управління до зміни режиму руху.

Роботи [15, 18, 19] присвячені використанню нечіткої системи управління економічністю та екологічною безпекою гібридних автомобілів з паралельною схемою силової установки (рис. 1.2). Перевірка ефективності наведеної системи управління силовою установкою виконувалася шляхом модулювання руху автомобіля в різних умовах експлуатації. При налагоджуванні нечіткого контролера на режим зменшення викидів оксиду азоту, то викиди зменшуються на 10 %, а витрати палива – на 25 %.



Рисунок 1.2 – Структурна схема гібридної силової установки з паралельною схемою

Недоліком такого підходу до управління силовою установкою є неможливість враховувати більш одного критерія оптимальності при налагодці нечіткого контролера та відсутність адаптації до зовнішніх умов експлуатації.

Метод синтезу нечіткої системи управління силовою установкою гібридного автомобіля з паралельною схемою будови передбачає ефективний перерозподіл крутного моменту між ДВЗ та тяговим електроприводом на основі аналізу керуючого впливу з боку водія, ступеня зарядки тягової акумуляторної батареї і швидкості обертання ротора електродвигуна (рис. 1.3).



Рисунок 1.3 – Структурна схема гібридної силової установки

Робота нечіткого контролера заснована на трьох принципах: ступінь зарядженості тягової акумуляторної батареї не повинна мати низьку зарядку; керуючі впливи з боку водія від педаль акселератора та гальма задовольняють постійно, виключно випадків, коли вони протирічать першому принципу; оптимізація загального ККД основних компонентів гібридної силової установки і якщо не протирічать першому і другому принципам.

Оптимальна ступінь зарядженості акумуляторної батареї визначається за мінімуму її внутрішнього опору. Якщо батарея розряджена нижче цього значення включається режим активної підзарядки шляхом відбору частини потужності від ДВЗ. Якщо батарея заряджена вище оптимального значення використовується в електроприводі для створення тягового зусилля.

Розглянуті принципи управління гібридною силовою установкою реалізовані у вигляді бази правил нечіткого висновку в нечіткому контролері, який є головним в системі управління (рис. 1.4).

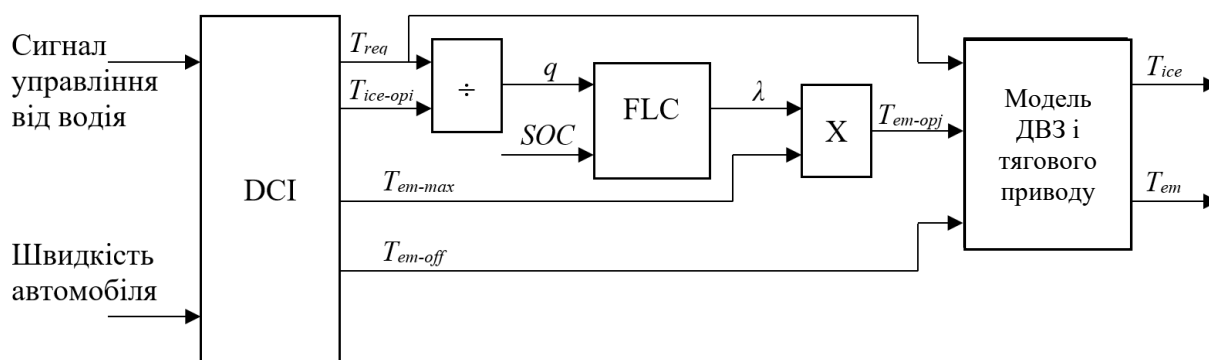


Рисунок 1.4 – Структурна схема системи управління гібридною силовою установкою

На даній схемі інтерпретатор команд водія (DCI) перетворює сигнали з педалей акселератора і гальма відповідно крутному моменту силової установки  $T$ . Сигнал пропорційний куту повороту педалі акселератора множать на максимальний крутний момент ДВЗ  $T_{ред\max}$ , відповідно поточному швидкісному режиму. Момент  $T_{род\max}$  визначається відповідно передачі, яка відповідає його максимальному значенню при даній швидкості.

На вхід FLC надається частка відділення  $g = T_{reg} / T_{ice}$ , а також ступінь зарядженості тягової акумуляторної батареї (SOC). На підставі цієї інформації методом нечіткого висновка визначається оптимальне значення крутного моменту тягового електроприводу в нормалізованому вигляді ( $\lambda$ ). Реальне значення крутного моменту електроприводу визначається за виразом

$$T_{em-odj} = \lambda \cdot T_{em-max}, \quad (1.2)$$

де  $T_{em-max}$  максимальний крутний момент для даної швидкості обертання ротора.

Останній блок структурної схеми визначає кінцеве значення крутних моментів ДВЗ та тягового електродвигуна. Більшість випадків  $T_{em} = T_{em-odj}$  і  $T_{ice} = T_{ред} - T_{em}$ .

Але є виключення:

Якщо  $T_{em-odj}$  і  $T_{ред} - T_{em-odj} < T_{ice-off}$ , то  $T_{ice} = 0$ ;  $T_{em} = T_{ред}$ .

Якщо  $T_{em} - T_{em-odj} > T_{ice-max}$ , то  $T_{ice-max} = T_{ice}$ ;  $T_{em-odj}$ .

Недоліком даного методу є відсутність адаптації управління до змінного режиму руху та оптимізації без урахування екологічної безпеки. Враховуючи можливість використання негладких та розривних управляючих впливів більш спроможні використовувати для пошуку оптимального управління силовою установкою принципу максимум, які висунуті Л.С. Понтрягіним, В.Г. Болтянським, Е.Ф. Міщенко [44, 45]. Поставлену задачу є можливість рішення за допомогою динамічного програмування, який засновано на принципі оптимальності, розроблений Р. Белманом для рішення багато шагових задач

оптимізації дискретних процесів. Оптимальне управління в любий момент часу не залежить від наступного стану системи та визначається тільки її поточним станом і метою управління. Використання методу динамічного програмування можливо і для нестационарних задач, які для опису об'єкта та функціоналу якості мають функції часу [43–46]. Аналітичне рішення задач оптимального управління можливо тільки в простих випадках. Такі задачі можуть бути сформульовані тільки для ідеалізації, коли замість поставленої задачі вирішується інша. Головним підходом до рішення реальних задач є приближення чисельної оптимізації. В окремих випадках методи оптимального управління мають алгоритми адаптації стратегії до зовнішніх умов експлуатації [28–30]. Ефективність використання методів теорії оптимального управління для визначення управляючих впливів силової установки гібридних та електромобілів наведено в роботах [48–50].

Цільовою функцією оптимізації гібридної силової установки є мінімізація витрати палива та токсичних викидів для заданих умов роботи. Чисельне рішення оптимізаційної задачі виконується за допомогою методу послідовного квадратичного програмування (SQP). Методи математичного моделювання і (off-line) оптимізації стратегії управління силовими установками розглянуто в роботі [51]. Можливість оптимізації управління силовою установкою гібридного автомобіля з паралельною схемою можливо з використанням принципу максимуму Понтрягіна досліджено в роботі [52]. Критерієм оптимальності є мінімум витрати палива, але забруднення навколишнього середовища викидами токсичних компонентів відпрацьованих газів не враховуються. Є достатня кількість досліджень, присвячених методу динамічного програмування для прийняття оптимальних управляючих впливів силових установок гібридних та електромобілів [53–56]. Це дозволяє визначити оптимальну стратегію управління тільки для фіксованих умов експлуатації і не працюють при змінних умовах роботи транспортного засобу.

## 2. ЗМІНИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГІБРИДНИХ АВТОМОБІЛІВ ВІД ЗОВНІШНІХ УМОВ

Діагностування, ремонт автомобілів з електромеханічними гібридними установками є проблемою. ГСУ в сукупності з бортовим комп'ютером автомобіля і іншими його вузлами є складовою системою, що вимагає спеціальних підходів при визначенні технічного стану та ремонті. Саме така проблема виникає при експлуатації подібних автомобілів. Зокрема гібридних автомобілів TOYOTA, Lexus, Honda, Ford – найбільш поширених в Україні, їх кількість займає більше ніж 50 % від всього автопарку гібридних автомобілів. У свою чергу від технічного стану автомобіля безпосередньо залежить безпека учасників дорожнього руху.

В процесі експлуатації погіршення ефективних показників елементів ГСУ може бути викликано нормальним зносом деталей, відсутністю необхідного технічного обслуговування, іншими взаємопов'язаними причинами. У той же час несправності можуть бути не явними, тобто виникаючими тільки в певних умовах, не завжди визначаються або не визначеними статистичними вимірами.

Оцінка несправностей ГСУ вимагає проведення об'єктивного дослідження і слід визначати за реальними умовами експлуатації. Найбільш підходящим місцем для повноти та достовірності одержуваної інформації є підприємства, що спеціалізуються на ремонті гібридних автомобілів і для отримання об'єктивних даних проведено аналіз бази даних по ремонтованих і обслугованих гібридних автомобілів. Згідно роботи [57] щодо розподілу відмов і несправностей ГСУ найбільше їх кількість безпосередньо пов'язане з двигуном внутрішнього згорання (рис. 2.1). Складність виявлення несправності цього вузла пояснюється тим, що перевірити роботу двигуна внутрішнього згорання в даному випадку важко, його запуск і управління здійснює ЕБУ і тільки в режимі споживання потужності. Аналіз результатів експлуатаційної надійності містить відомості відмов і несправностей, оцінки кількісних показників надійності, перелік деталей, систем, що лімітують працездатність ГСУ автомобіля, таблиця 2.1 [58].

Таблиця 2.1 - Розподіл відмов гібридної силової установки

	Найменування агрегату і системи	Відмови по інтервалам напрацювання, тис. км						Всього, %	
		0-25	25-50	50-75	75-100	100-125	125-150		150-175
1	Двигун:	0	0	6	14,5	16,5	16	18	71
	- система запалювання	0	0	6	13	12	10	10	-
	- система керування двигуном, датчики	0	0	0	0	1	2	2	-
	- система живлення	0	0	0	1,5	3	4,5	6	-
2	Пристрій розподілу потужності (PSD):	0	0,5	0,5	2	4,5	5,5	8	21
	- система охолодження	0	0	0	1	2,5	3	4	-
	- зубчасті механізми	0	0	0	0	0,5	0,5	1,5	-
	- система змащення трансмісії	0	0,5	0,5	1	1,5	1	2,5	-
3	Електроніка:	0	0	0	0	0,5	2	3	5,5
	- несправність силових ключів інвертора	0	0	0	0	1	1	1,5	-
	- несправність обмотки статора MG2	0	0	0	0	0	1	1,5	-
4	Високовольтна батарея:	0	0	0	0	0	0,5	2	2,5
	-недопустимий розряд АКБ	0	0	0	0	0	0	0,5	-
	- закипання, вихід зі строю елементів АКБ	0	0	0	0	0	0	0,5	-
	- втрати ємності АКБ	0	0	0	0	0	0	0,5	-
	- несправність інших частин АКБ	0	0	0	0	0	0	0,5	-
	Всього	0	0,5	3,5	8,5	20	29	38	100

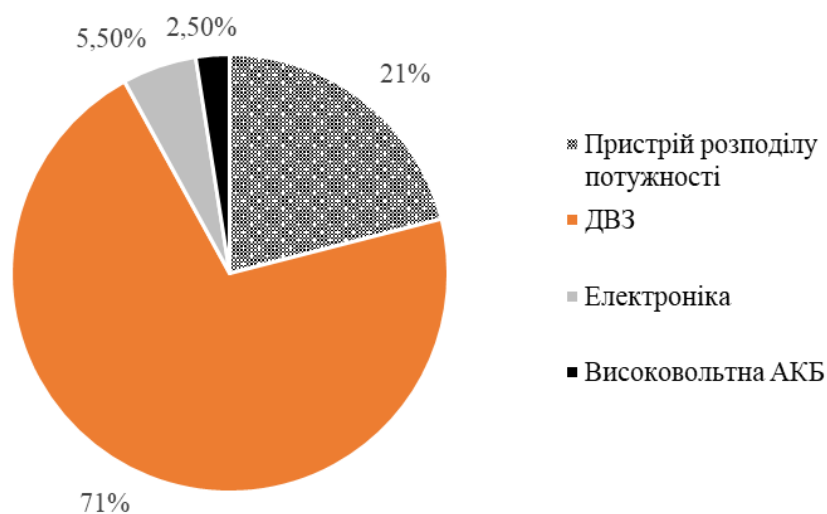
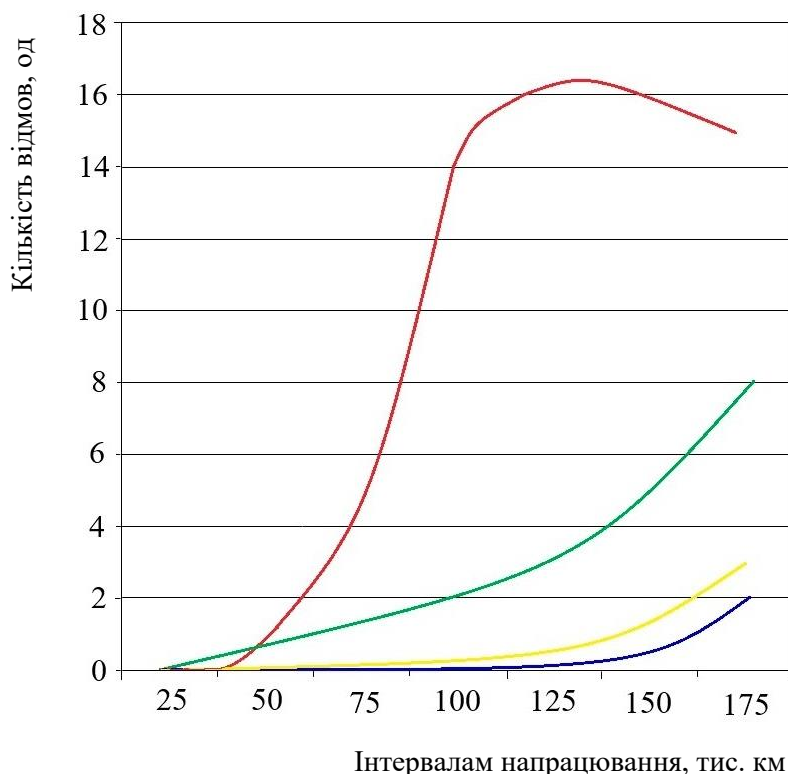


Рисунок 2.1 – Діаграма розподілу відмов по елементах ГСУ



На надійність елементів ГСУ впливають кліматичні умови експлуатації. При зниженні температури збільшується потреба в роботі непрогрітого ДВЗ і збільшується загальний час роботи ДВЗ і при повному заряді ТАБ. Дані фактори знижують економічність гібридного автомобіля, витрата палива збільшується на 15...30 % [59, 61]. Крім того при низькій температурі збільшується кількість відмов системи управління ДВЗ до 23 % від загальної кількості несправностей.

Аналіз роботоздатності ТАБ в умовах низьких температур ємність може знижуватися на 15...25 % при струму розряду 0,5...1,0 С<sup>0</sup> і температурі зовнішніх умов менше -10 С<sup>0</sup>, а саморозряд знижується з 3 % до 1 % за день [60, 63]. При експлуатації ТАБ при низькій температурі має зменшення ресурсу до 15 % [65]. Цей факт пояснюється уповільненням рушійних хімічних реакцій ТАБ за рахунок якісного охолодження ТАБ. Крім того ДВЗ працює більше часу при прогріві, що дозволяє ТАБ частіше залишатися в зарядженому стані.



— ДВЗ і системи; — електроніка; — пристрій РМ; — ВВ АКБ

Рисунок 2.2 – Апроксимуючі криві відмов систем

Під час експлуатації ТАБ виникає розбалансування елементів по ємності, внутрішньому опору та іншим параметрам, що знижує ефективність батареї в цілому. Виникає окислення мідних контактних пластин в ТАБ. Автомобіль реагує на зниження якості ТАБ підвищенням витрати палива, некоректною індикацією рівня заряду і розряду батареї, попереджує сигналізацією і падінням потужності в цілому. Характер зміни технічного стану ГСУ в залежності від пробігу може бути різний. На рисунку 2.2 представлені апроксимуючі криві зміни закономірностей систем ГСУ за даними таблиці 2.2 [59, 64].

Аналізом залежностей (рис. 2.2) видно, що розподіл потоку відмов систем ГСУ по інтервалах носить наростаючий характер. Виходячи зі статистичних даних найбільше число відмов ГСУ пов'язані з ДВЗ і його системами, інші відмови найчастіше є наслідком його несправності.

### **3. ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СИЛОВИХ УСТАНОВОК ГІБРИДНИХ АВТОМОБІЛІВ**

Під інформаційною системою (ІС) будемо розуміти впорядковану організаційно і взаємопов'язану сукупність програмно-технічних засобів і методів, які використовують сучасні інформаційні технології, і застосовуваних для збору, обробки, зберігання, відображення і передачі інформації з метою вирішення поставлених завдань [66, 70].

Інформаційна система в автотранспортних засобах застосовується в якості основних технічних засобів переробки інформації та засоби зв'язку, що дозволяють реалізувати різні інформаційні процеси і висновки інформації, необхідної при прийнятті рішень в задачах будь-якої складності і для різних предметних областей [67].

Інформаційна система являє собою особливе середовище, що включає сукупність використовуваних комп'ютерів, локальних і глобальних комп'ютерних мереж зв'язку, програмних продуктів і інструментальних засобів їх розробки, баз даних, користувачів, інших різних технічних засобів підтримки інформаційних технологій і т.п. [68–71]. В рамках класифікації ІС можна виділити два основні класи систем інформаційно-вимірювальні та інформаційно-керуючі системи.

Інформаційно-вимірювальна система (ІВС) являє собою комплекс вимірювального обладнання, пристроїв обробки та передачі даних, що забезпечують автоматичний збір інформації, яка вимірюється кількісно, безпосередньо від досліджуваних автомобілів – за допомогою процедур вимірювання та контролю, аналізу і обробки інформації, а також відображення її у вигляді числових даних, висловлювань, графіків, таблиць, діаграм та ін., що відображають стану автомобілів [73].

Інформаційно-вимірювальна система – це «сукупність функціонально об'єднаних вимірювальних, обчислювальних та інших допоміжних технічних засобів, для отримання вимірювальної інформації, її перетворення, обробки з

метою представлення споживачеві (в тому числі для введення в інформаційно-керуючу систему) в необхідному вигляді, або автоматичного здійснення логічних функцій контролю, діагностики, ідентифікації».

Під інформаційно-керуючою системою (ІКС) будемо розуміти певну сукупність програмно-апаратного комплексу засобів, методів, алгоритмів автоматизації інформаційних процесів моніторингу та реалізації керуючих впливів гібридними автомобілями [74, 80].

Виділимо наступні основні компоненти інформаційно-керуючої системи [76, 82]:

- людський фактор (аналітики, розробники, програмісти, користувачі, консультанти, інженери, лаборанти, техніки);
- інструментальні засоби розробки програмного забезпечення;
- системне і прикладне програмне забезпечення;
- математичне та методологічне забезпечення;
- апаратне забезпечення;
- інформаційні технології.

Основна концепція інтелектуального транспортного засобу полягає в його здатності постійно контролювати дії водія, автомобіль і навколишнє середовище, а також допомагати водієві ефективно і безпечно керувати. Зараз велика увага приділяється проблемі ефективного використання енергетичних витрат силовою установкою гібридних та автомобілем в залежності від зовнішніх умов. Останнім часом основна увага зосереджена на вдосконаленні технічних можливостей транспортного засобу.

Електронні системи транспортних засобів виконують функцію закритих систем, оскільки отримують інформацію від різних датчиків транспортного засобу і аналізують її за допомогою програм та виробляють в електронному блоці управління (ЕБУ) відповідні команди виконавчим пристроям з метою підвищення ефективності функціонування силової установки гібридного або електромобіля. Взаємодія між електронними блоками управління виконується завдяки шинним

архітектурам, які представляють сукупність контролерів (CAN), а також спеціальну мережу, призначену для передачі інформації спеціального цифрового обладнання – MOST, mediaoriented systems trans, Flex Ray, а також Local interconnect, (LIN).

Програмне забезпечення в гібридному автомобілі складається з безліч компонентів, яке залежить від апаратної частини. Взаємодія між усіма функціями визначається в архітектурі і має різні відображення. Статичне відображення ієрархічно описує функціональні групи, сигнали і розподіл ресурсів. Динамічне відображення аналізує відгук при виконанні різних завдань. Найбільш важливі стандарти наведено нижче.

Асоціація стандартизації автоматизованих і вимірювальних систем (ASAM) займається стандартизацією в автомобільній промисловості стосовно моделям даних, інтерфейсів і синтаксису. ASAM розробила різні стандарти для підключення ЕБУ до комп'ютера введення даних. Стандарт ASAM-MCD1 ( MCD – вимір, калібрування та діагностика) підтримує протоколи передачі даних. Стандарт відображає відповідні дані у вигляді фізичних значень і одночасно обробляє їх, а також дозволяє автоматично калібрувати дані і регламентувати обмін функціональними описами та даними.

Консорціум Flex Ray розробив специфікацію для польової шини для регулювання по розімкненому і замкнутому циклу транспортних засобів.

Завдяки високій швидкості передачі даних із запрограмованим арбітражем шини і відмовостійкості конструкції активно використовується в системах активної безпеки і в силових системах гібридних автомобілів.

Міжнародна електротехнічна комісія (IEC) встановлює стандарти в галузі електротехніки та електроніки і пропонує три системи аналізу щодо відповідності міжнародним стандартам. IEC взаємодіє з міжнародною організацією зі стандартизації (ISO), міжнародним телекомунікаційним союзом (ITU) і численними органами стандартизації [78, 83].

Асоціація розробників програмного забезпечення для автомобілів (MISRA) встановлює правила для розробки і впровадження програмного забезпечення в

автомобільних системах. Стандарт програмування MISRA-C дозволяє уникнути помилок при виконанні або виникненні слабких місць в структурі та захистити правильність виразів. Багато правил можуть автоматично перевірятися та враховуватися при генеруванні кодів.

Системне програмне забезпечення, яке керує гібридним і електромобілем, наведено на рис. 3.1 і складається з таких основних підсистем: сприйняття, планування місії, здійсненої поведінки і планування руху. Ці підсистеми складаються з декількох процесів і передачі повідомлень відповідно до обраної топології [84,85].

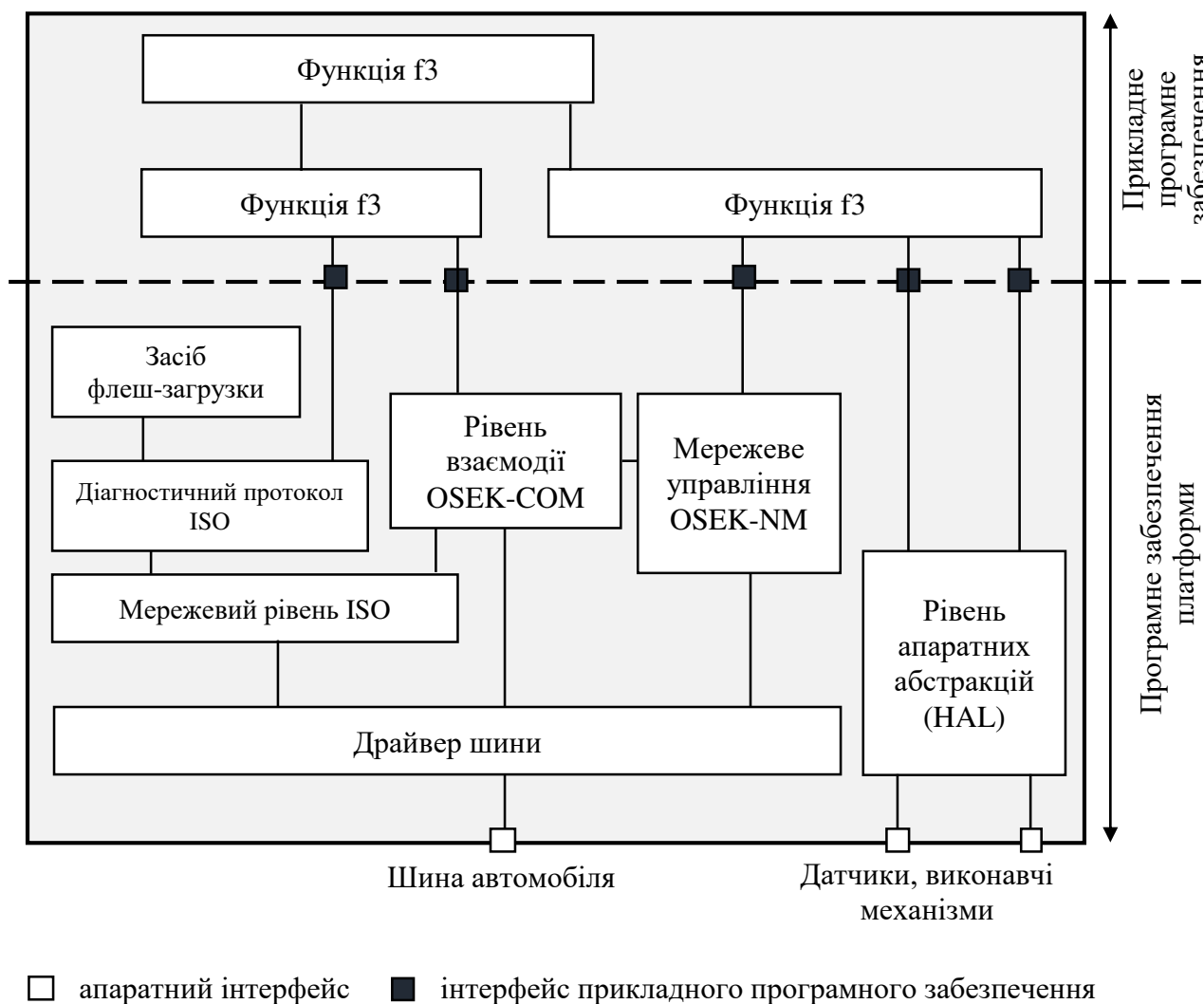


Рисунок 3.1 - Загальна архітектура системи, яка включає основні підсистеми та канали передачі даних

Зауважимо, що система керування силовою установкою гібридного і електромобіля має низку характерних особливостей, що вимагають організації і проведення досліджень з метою забезпечення можливості застосування готових програмних продуктів. Відомі системи AUTO SAR здатні вирішувати питання автоматизації процесу створення програмного забезпечення для розроблюваних систем управління [86]. Однак, в технічній документації до цих систем немає відомостей про методи та алгоритми, що дозволяють в реальному масштабі часу синтезувати енерго- і ресурсозберігаюче управління силовими установками.

Створювані інформаційні системи управління силовими установками якраз повинні мати здатність до управління за різними критеріями, що забезпечує енерго- і ресурсозбереження, а також високу безпеку транспортного процесу без зниження якості гібридних автомобілів [87, 88]. Перераховані вимоги надають суперечливі впливу на завдання управління. Одночасне їх використання істотно ускладнює математичне і методологічне забезпечення проектованої системи управління, а також її технічну реалізацію. Рішення задач управління по комплексному критерію недостатньо розглянуто в літературі, тому створення ПУС діагностування силових установок гібридних автомобілів по комплексними критеріями є своєчасною і актуальною задачею.

#### 4. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СИЛОВОЇ УСТАНОВКИ ГІБРИДНОГО АВТОМОБІЛЯ

ГСУ як керована система може ідеалізуватися настільки, що в кожен фіксований момент часу спостереження  $t = t'$  на інтервалі  $T = \{t | t_s \leq t \leq t_f\}$ ,  $t' \in T$  його властивості можуть бути описані двома дійсними числами:  $\omega(t')$  – поточна кутова швидкість обертання провідних коліс;  $\theta_{TAB}(t')$  – стан накопичувача енергії (ступінь зарядженості тягової акумуляторної батареї). Розглядатимемо дані величини як компоненти вектору стану системи  $\mathbf{x} = \mathbf{x}(t) = [\omega(t), \theta_{TAB}(t)]^T$  у момент часу  $t'$ .

Множина всіх можливих станів в різні моменти часу  $t \in T$  утворюють двовимірний простір станів  $\mathbf{X}$

$$\mathbf{x} \in \mathbf{X} \subset \mathbb{R}_+^2, \forall t \in T, \mathbf{X} = \begin{bmatrix} 0 \leq \omega \leq \omega_{\max} \\ 0 \leq \theta_{TAB} \leq 1 \end{bmatrix}, \quad (4.1)$$

де  $\omega_{\max}$  – максимальна кутова швидкість обертання ведучих коліс.

На множині  $\mathbf{X}$  можна виділити підмножину експлуатаційних станів

$$\mathbf{X}_{ex} = \begin{bmatrix} 0 \leq \omega \leq \omega_{ex.\max} \\ \theta_{ex.\min} \leq \theta_{TAB} \leq \theta_{ex.\max} \end{bmatrix} \subset \mathbf{X}. \quad (4.2)$$

Вихід стану системи за межі  $\mathbf{X}_{ex}$  небажаний, хоча і не веде до аварійної ситуації.

Розглядатимемо автомобіль з ГСУ як багатовимірний нелінійний стаціонарний об'єкт виду

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \xi) \\ \mathbf{y} = h(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \end{cases}, \quad (4.3)$$

де  $\mathbf{u}$  – вектор управління  $\mathbf{u} = [\beta_D, \beta_M, \beta_T, \gamma]^T$ ;

$\beta_D$  – сигнал управління потужністю ДВЗ;

$\beta_D = -1$  відповідає відключеному стану ДВЗ;



$\beta_M$  – сигнал управління допоміжною силовою установкою (електромагнітним моментом ВЕД);

$\beta_T$  – сигнал управління системою гідравлічного гальмування;

$\gamma$  – передавальне відношення трансмісії автомобіля.

$\xi$  – вектор збурюючих впливів  $\xi = \xi(t) = [\alpha(t), \vartheta_0(t)] \in \mathbb{R}^2 \quad \forall t \in T$ ;

$\alpha$  – ухил дороги;

$\vartheta_0$  – швидкість зустрічного вітру;

$\mathbf{y}$  – вектор виходу:  $\mathbf{y} = \mathbf{y}(t) = [V(t), G_T(t), E_T(t)]^T \in \mathbf{Y} \subset \mathbb{R}_+^3 \quad \forall t \in T$ ;

$V$  – швидкість автомобіля;

$G_T$  – годинна витрата пального ДВЗ;

$E_T = f_T(C_{NOx}, C_{CO}, C_{HC})$  – ступінь токсичності відпрацьованих газів ДВЗ, яка є функцією годинної емісії токсичних компонентів;

$C_{NOx}, C_{CO}, C_{HC}$  – годинна емісія оксидів азоту, оксиду вуглецю і вуглеводнів відповідно;

$f(\bullet)$  і  $h(\bullet)$  – відомі безперервні або кусочно-безперервні вектор-функції векторних аргументів, визначені на відповідних множинах.

Вважаємо, що дії, що управляють, мають бути обмежені, тобто  $\mathbf{u} \in \mathbf{U} \subset \mathbb{R}^4$   
 $\forall t \in T$

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \beta_D = -1, & 0 \leq \beta_D \leq 1 \\ -1 \leq \beta_M \leq 1 \\ 0 \leq \beta_T \leq 1 \\ \gamma \in \{\gamma_i\}, i = \overline{1,5} \end{bmatrix}. \quad (4.4)$$

Вектор управління може бути заданий як програмне управління:  
 $\mathbf{u} = \mathbf{u}(t) = [\beta_D(t), \beta_M(t), \beta_T(t), \gamma(t)]^T$  або у вигляді координатного управління:  
 $\mathbf{u} = \mathbf{u}(\mathbf{x}) = [\beta_D(\mathbf{x}), \beta_M(\mathbf{x}), \beta_T(\mathbf{x}), \gamma(\mathbf{x})]^T$ .

Компоненти вектору управління в значній мірі визначаються типом ГСУ. У ряді випадків до складу вектору управління може бути включено керуючий

вплив муфту зчеплення  $\beta_S$ . При послідовно-паралельній схемі побудови ГСУ, що використовує планетарний механізм для розділення потоку потужності, відсутнє управління передавальним відношенням трансмісії ДВС  $\gamma$ . При цьому додається сигнал управління стартер-генератором  $\beta_G$ . В деяких випадках присутні керуючі впливи на багатоступінчатий планетарний знижуючий редуктор тягового електроприводу, стрічкове гальмо ланок планетарного механізму і так далі.

Основною функцією САУ ГСУ є виконання завдання стеження, тобто підтримка з мінімальною помилкою заданої швидкості автомобіля  $V_{zd}(t)$  за наявності збурень  $\xi(t)$ ,  $t \in T$  і обмеженнях на можливі стани системи  $\mathbf{x} \in \mathbf{X}$  і допустимі управління  $\mathbf{u} \in \mathbf{U}$ ,  $\forall t \in T$ . Крім цього, процес управління повинен задовольняти ряду додаткових умов: мінімізації витрати пального, рівня токсичності відпрацьованих газів, відхилення ступеня зарядженості ТАБ від оптимальної. Кожна з цих умов може виражатися у вигляді відповідного критерію оптимальності – вимоги забезпечення екстремуму деякого функціонала  $J_x \in \mathbb{R}_+^1$ , залежного від виду функцій  $V_{zd}(t)$ ,  $\mathbf{x}(t)$ ,  $\mathbf{u}(t)$ ,  $\mathbf{y}(t)$  и  $\xi(t)$ , які є аргументами даного функціонала. Критерії оптимальності мають бути узгоджені між собою і з прийнятими обмеженнями для виключення тривіальних або вироджених рішень оптимізаційної задачі і, в той же час, достатньо точно описувати мету оптимізації [75]. Крім цього, критерії мають бути незалежні і монотонні по преференції, тобто покращанню якості управління повинне відповідати зменшення значення відповідного критерію [76].

Для формальної постановки задачі оптимізації управління ГСУ на їздовому циклі, який задається функцією зміни швидкості  $V_{zd}(t)$ ,  $t \in T$ , визначимо багатокритеріальний (векторний) функціонал якості  $\mathbf{J} = \mathbf{J}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, T) = [J_V, J_\theta, J_G, J_E]^T$ ,  $\mathbf{J} \in \mathbb{R}_+^4$ . Окремими компонентами даного векторного функціонала є критерії оптимальності по кожній з умов, яким повинен задовольняти процес управління.

Внаслідок того, що окремі компоненти векторного функціонала мають різний фізичний зміст і діапазон зміни, їх нормування і приведення до безрозмірних величин може бути виконане згідно виразу [76]

$$\mathbf{J}_i = \frac{\tilde{\mathbf{J}}_i - \mathbf{J}_{\min.i}}{\mathbf{J}_{O.i} - \mathbf{J}_{\min.i}}, \quad i = \overline{1, 4}, \quad (4.5)$$

де  $\tilde{\mathbf{J}}_i$  – значення  $i$ -го критерію до нормування;

$\mathbf{J}_{\min.i}$  – мінімально-можливе значення відповідного критерію, отримане в результаті вирішення однокритеріальної задачі оптимізації без урахування решти критеріїв;

$\mathbf{J}_{O.i}$  – середнє значення  $i$ -го критерію при управлінні близькому до оптимального на заданому їздовому циклі.

Для випадку, коли  $\mathbf{J}_{\min.i} = 0$  можна ввести нормуючі коефіцієнти

$$\mathbf{K}_{N.i} = \mathbf{J}_{O.i}^{-1}, \quad i = \overline{1, 4} \quad \text{для кожного з критеріїв: } \mathbf{K}_N = [K_{NV}, K_{N\theta}, K_{NG}, K_{NE}]^T.$$

Визначимо критерії оптимальності управління ГСУ на заданому їздовому циклі таким чином.

### 1. Критерій точності управління за швидкістю

$$\mathbf{J}_1 = \mathbf{J}_V(V, T) = K_{NV} \cdot \int_{t_s}^{t_f} \left( (V_{zd}(t) - V(t))^2 + S_V^2(V(t)) \right) dt, \quad (4.6)$$

де  $S_V$  – функція штрафу за вихід з області експлуатаційних режимів  $\mathbf{X}_{ex}$

$$S_V(V(t)) = \begin{cases} 0, & \text{ї дè } V(t) \leq V_{ex.max}, \\ V(t) - V_{ex.max}, & \text{ї дè } V(t) > V_{ex.max}; \end{cases} \quad (4.7)$$

$V_{ex.max}$  – максимальна експлуатаційна швидкість.  $V_{ex.max} = \omega_{ex.max} \cdot r_{kol}$ ;

$r_{kol}$  – радіус кочення ведучих коліс;

### 2. Критерій використання ТАБ

$$\mathbf{J}_2 = \mathbf{J}_\theta(\theta_{TAB}, T) = K_{N\theta} \cdot \int_{t_s}^{t_f} \left( (\theta_{ex.opt} - \theta_{TAB}(t))^2 + S_\theta^2(\theta_{TAB}(t)) \right) dt, \quad (4.8)$$

де  $\theta_{ex.opt}$  – оптимальний ступінь зарядженості ТАБ.

$S_\theta$  – функція штрафу за вихід з області експлуатаційних режимів  $\mathbf{X}_{ex}$

$$S_\theta(\theta_{TAB}(t)) = \begin{cases} 0, & \text{ї дè } \theta_{ex.min} \leq \theta_{TAB}(t) \leq \theta_{ex.max}, \\ |\theta_{ex.min} - \theta_{TAB}(t)|, & \text{ї дè } \theta_{ex.min} > \theta_{TAB}(t) > \theta_{ex.max}; \end{cases} \quad (4.9)$$

### 3. Критерій економічності ДВЗ

$$\mathbf{J}_3 = \mathbf{J}_G(G_T, T) = K_{NG} \cdot \int_{t_s}^{t_f} G_T^2(t) dt; \quad (4.10)$$

### 4. Критерій ступеня токсичності відпрацьованих газів ДВЗ

$$\mathbf{J}_4 = \mathbf{J}_E(E_T, T) = K_{NE} \cdot \int_{t_s}^{t_f} E_T(t) dt, \quad (4.11)$$

Тоді маємо ступень токсичності відпрацьованих газів

$$E_T(t) = K_{ENox} \cdot C_{NOx}^2(t) + K_{ECO} \cdot C_{CO}^2(t) + K_{EHC} \cdot C_{HC}^2(t); \quad (4.12)$$

де  $K_{ENox}$ ,  $K_{ECO}$ ,  $K_{EHC}$  – коефіцієнти токсичності відповідних компонентів відпрацьованих газів. Дані коефіцієнти повинні визначатися з урахуванням впливу компонентів на здоров'ї людини і навколишнє середовище, а також їх питомого вмісту у відпрацьованих газах. При цьому повинне виконуватися співвідношення

$$K_{ENox} + K_{ECO} + K_{EHC} = 1. \quad (4.13)$$

При обчисленні критеріїв оптимальності в деяких випадках інтеграція може здійснюватися не на всьому інтервалі спостереження  $T$ , а в ковзаючому вікні шириною  $\Delta T$  на інтервалах  $[t, t + \Delta T]$  або  $[t - \Delta T, t]$ .

Враховуючи, що  $\mathbf{y} = h(\mathbf{x}, \mathbf{u})$  надалі можна вважати  $\mathbf{J}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, T) = \mathbf{J}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T)$ . рішення багато критеріальної задачі оптимізації управління приводить до формування множини  $\mathbf{U}^p$  не покращувальних по Парето (Парето-оптимальних) управлінь  $\mathbf{u}^{*p} \in \mathbf{U}^p \subset \mathbf{U}$  [71, 74]

$$\mathbf{U}^p = \left\{ \mathbf{u}^{*p} \in \mathbf{U} \mid \exists \mathbf{u} \in \mathbf{U} : \mathbf{J}_i(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T) \leq \mathbf{J}_i(\mathbf{x}, \mathbf{u}^{*p}, T), i = \overline{1, 4}; \mathbf{u} \neq \mathbf{u}^{*p} \right\}, \quad (4.14)$$

де  $\mathbf{J}_i$  –  $i$ -й компонент векторного функціонала.

Управління, що належать множині  $U^P$  не можуть бути покращені одночасно по всіх критеріях, тобто вони є незрівняними по векторному функціоналу, оскільки вимоги різних критеріїв суперечливі. Внаслідок цього, виникає проблема вибору єдиного управління з множини Парето на основі деякої схеми компромісу, при досягненні компонентами функціонала умовних мінімумів. Існує достатньо багато підходів до вирішення даної проблеми, які строго визначають властивості оптимального рішення і те, в якому сенсі оптимальне рішення перевершує решту всіх допустимих рішень [76].

Одним з підходів до забезпечення єдиності рішення задачі векторної оптимізації є використання принципу гарантованого результату (мінімакса), згідно якому за оптимальне вважається управління  $u^* \in U$ , яке доставляє якнайкраще значення як найгіршому критерію якості

$$u^*(t) = \arg \min_{u \in U} \max_{i=1,4} J_i(x, u, T), \quad \forall t \in T. \quad (4.15)$$

На різних ділянках їздового циклу пріоритети окремих критеріїв, складових векторного функціоналу, можуть змінюватися. Для урахування різного ступеня важливості критеріїв може бути введений вектор

$$K_P = [K_{PV}, K_{P\theta}, K_{PG}, K_{PE}]^T, \quad \sum_i K_{P,i} = 1, \quad K_{P,i} > 0, \quad i = \overline{1,4}. \quad (4.16)$$

Вибір компонентів векторів  $K_P$  є нетривіальною задачею. Для її вирішення можуть бути використані метод аналізу ієрархій або метод класифікації альтернатив, викладені в [77].

Векторна функція оптимального управління при нерівнозначних критеріях

$$u^*(t) = \arg \min_{u \in U} J_{SV}(x, u, T), \quad \forall t \in T, \quad (4.17)$$

де  $J_{SV}$  – згортка векторного функціонала якості

$$J_{SV}(x, u, T) = \max_{i=1,4} \{K_{P,i} \cdot J_i(x, u, T)\}, \quad J_{SV}(x, u, T) \in \mathbb{R}_+^1. \quad (4.18)$$

Управління, що є рішенням мінімаксної задачі, в порівнянні з іншими управліннями гарантує найбільше віддалення найгіршого з компонентів векторного функціонала від межі області допустимих значень [77].

Основним недоліком даного підходу є можлива втрата гладкості отримуваної цільової функції  $J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T)$ , проте у багатьох випадках застосування мінімаксної згортки є достатньо зручним.

Інший підхід до отримання єдиного рішення оптимізаційної задачі передбачає зведення багато критеріальну оптимізацію до однокритеріальної шляхом лінійного згортання векторного критерію в суперкритерій

$$J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T) = \sum_{i=1}^4 \mathbf{K}_{P,i} \cdot \mathbf{J}_i(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T), \quad J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T) \in \mathbb{R}_+^1. \quad (4.19)$$

Простота і наочність даного підходу визначає його найбільше поширення. Разом з тим, ефективне використання лінійної згортки критеріїв можливо тільки у разі, коли парето-оптимальне рішення в просторі критеріїв оптимальності утворюють випуклу множину. Інакше деякі управління  $\mathbf{u}^* \in \mathbf{U}^p$  не можуть бути отримані відповідним вибором  $\mathbf{K}_p$ . Крім того, у ряді випадків малим приростам вагових коефіцієнтів  $\mathbf{K}_{P,i}$ ,  $i = \overline{1, 4}$  відповідають великі прирости функціонала  $J_{SV}$ , і рішення оптимізаційної задачі може виявитися нестійким [78, 79].

Задачу оптимізації управління автомобільної ГСУ сформулюємо таким чином.

Для їздового циклу, визначуваного заданою функцією зміни швидкості автомобіля  $V_{zd}(t)$ ,  $t \in T$ , знайти управління  $\mathbf{u}^*(t)$ , яке доставляє мінімум функціоналу  $J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T)$  і задовольняє прийнятним обмеженням на можливі стани, допустимі управління і обмеженням у вигляді неголономних зв'язків

$$\begin{aligned} J_{SV}^* &= J_{SV}(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*, T) = \min_{\mathbf{u}} J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T), \\ \mathbf{x}^* &\in \mathbf{X}, \quad \mathbf{u}^* \in \mathbf{U}, \quad f_c(\dot{\mathbf{x}}^*, \mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*) = 0, \quad \forall t \in T. \end{aligned} \quad (4.20)$$

При цьому значення  $J_{SV}^*$  називатимемо оптимальним значенням функціонала, а векторну функцію

$$\mathbf{u}^*(t) = \arg \min_{\mathbf{u}} J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T), \quad (4.21)$$

що доставляє функціоналу оптимальне значення – оптимальним управлінням.

Обмеження у вигляді неголономних зв'язків  $f_c(\dot{\mathbf{x}}, \mathbf{x}, \mathbf{u}) = 0$  обумовлені динамічними властивостями власне автомобіля, ГСУ і апаратури управління. Вони визначаються кінематичною схемою ГСУ і трансмісії автомобіля.

Одним з можливих варіантів паралельної схеми побудови ГСУ є схема, при якій оборотна електрична машина (G/M) як допоміжний двигун встановлюється в приводі провідного моста ТЗ, відмінного від ведучого моста трансмісії первинного ДВЗ (рис.2.1). При гальмуванні автомобіля електрична машина, працюючи в генераторному режимі, може створювати необхідний гальмівний момент на колесах і забезпечувати рекуперацію кінетичної енергії ТЗ. Часто як оборотна електрична машина – допоміжний двигун застосовується вентильний електродвигун.

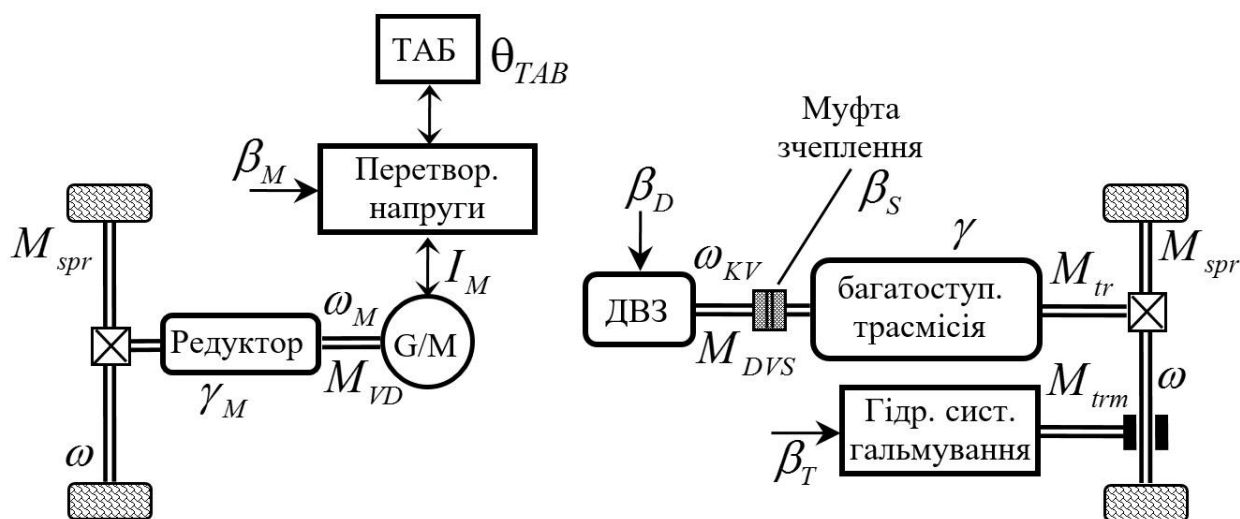


Рисунок 4.1 – Паралельна схема гібридної силової установки

Управління ГСУ в даному випадку здійснюється за допомогою наступних управляючих впливів:

– положення органу управління потужністю ДВЗ ( $\beta_D$ ). Вважатимемо, що величина  $\beta_D$  чисельно дорівнює відношенню дійсної ефективної потужності, що розвивається двигуном, до максимальної ефективної потужності при даній швидкості обертання КВ;

– сигнал управління електромагнітним моментом тягового електродвигуна ( $\beta_M$ ), який визначається відношенням необхідного електромагнітного моменту до максимального. Величина  $\beta_M$  задає струм статора електричної машини  $I_M$ , чим досягається необхідне значення моменту обертання або моменту опору на валу ротора;

– сигнал управління системою гідравлічного гальмування ( $\beta_T$ ), який визначає відношення моменту гальмування ведучих коліс, що задається, до максимального;

– передаточне відношення ( $\gamma$ ) трансмісії від ДВЗ до ведучих коліс;

– коефіцієнт включення муфти зчеплення ( $\beta_S$ ), який визначається ступенем натиснення на педаль зчеплення:  $0 \leq \beta_S \leq 1$ .

З точки зору математичного опису динамічних властивостей гібридного автомобіля даний варіант паралельної схеми ГСУ практично не відрізняється від інших відомих варіантів.

З аналізу (рис. 4.1) видно, що існує жорсткий кінематичний зв'язок між ротором електричної машини і ведучими колесами

$$\omega = \gamma_M^{-1} \cdot \omega_M, \quad (4.22)$$

де  $\gamma_M$  – передаточне відношення трансмісії гібридного автомобіля від ротора електричної машини до ведучих коліс;

$\omega_M$  – кутова швидкість обертання ротора електричної машини.

У свою чергу, за відсутності пробуксовування коліс, швидкість автомобіля пов'язана з кутовою швидкістю обертання ведучих коліс виразом:

$$V = \omega \cdot r_{kol}, \quad (4.23)$$

де  $r_{kol}$  – радіус кочення ведучого колеса:  $r_{kol} = \tilde{r}_{kol} \cdot h_{def}$ ;

$\tilde{r}_{kol}$  – радіус ведучого колеса;

$h_{def}$  – коефіцієнт деформації колеса.

Розглянемо особливості руху автомобіля з паралельною ГСУ за наявності керуючих і збурюючих впливів.



Відомо, що математична модель руху автомобіля багатоструктурна, тобто такі режими як рух з заблокованою, розблокованою і з буксуючою муфтою зчеплення можуть бути описані окремими системами диференціальних рівнянь. Зміна одного структурного стану іншим з формальної точки зору відбувається при зміні кількості узагальнених координат в рівнянні Лагранжа 2-го роду.

При включеному зчепленні і вибраному передавальному відношенні трансмісії у разі прямолінійного руху без пробуксовування коліс силова установка автомобіля і безпосередньо зв'язаний з нею споживач потужності (власне автомобіль) утворюють жорстку механічну систему з одним ступенем свободи. Як узагальнену координату системи виберемо кут повороту провідних коліс  $\varphi$ . Якщо дана система неконсервативна і на неї накладені ідеальні голономні зв'язки, то динаміка такої системи може бути описана за допомогою рівняння Лагранжа другого роду [80 – 85]

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial E_k}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial \varphi} = Q_\varphi, \quad (4.24)$$

де  $\dot{\varphi} = d\varphi/dt = \omega$  – кутова швидкість обертання ведучих коліс;

$E_k$  – кінетична енергія автомобіля;

$Q_\varphi$  – узагальнена сила, відповідна прикладеним до ведучих коліс автомобіля моментам сил, віднесена до координати  $\varphi$ .

Кінетична енергія автомобіля може бути визначена на підставі теореми Кеніга [86]

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot J_{DVS} \cdot \omega_{KV}^2 + \frac{1}{2} \cdot J_{VD} \cdot \omega_M^2 + \frac{1}{2} \cdot m_A \cdot V^2 + E_{k.vm}, \quad (4.25)$$

де  $J_{DVS}$  – момент інерції мас, що обертаються, ДВЗ, приведений до осі обертання колінчастого валу;

$\omega_{KV}$  – кутова швидкість обертання колінчастого валу ДВЗ. При заблокованій муфті зчеплення  $\omega_{KV} = \gamma \cdot \omega$ ;

$J_{VD}$  – момент інерції ротора електричної машини;

$m_A$  – маса автомобіля;

$E_{k.vm}$  – кінетична енергія різних мас, що обертаються, в автомобілі (колеса і так далі). Цю кінетичну енергію надалі враховуватимемо у вигляді коефіцієнта  $k_{vm}$ , який визначає її відношення до кінетичної енергії основної маси автомобіля.

Враховуючи співвідношення між швидкістю обертання ведучих коліс і швидкостями, що входять в рівняння для кінетичної енергії, останній вираз можна переписати у вигляді

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot J_{\Sigma.kol} \cdot \omega^2, \quad (4.26)$$

де  $J_{\Sigma.kol}$  – сумарний момент інерції мас, що обертаються, приведений до осі обертання ведучих коліс

$$J_{\Sigma.kol} = J_{DVS} \cdot \gamma^2 + J_{VD} \cdot \gamma_M^2 + k_{vm} \cdot m_A \cdot r_{kol}^2. \quad (4.27)$$

Вважатимемо, що приведений момент інерції  $J_{\Sigma.kol}$  не залежить від швидкості обертання ведучих коліс, а швидкість обертання коліс не залежить від їх кутового положення. В цьому випадку маємо

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \omega} \left( \frac{J_{\Sigma.kol} \cdot \omega^2}{2} \right) &= J_{\Sigma.kol} \cdot \omega; \\ \frac{d}{dt} (J_{\Sigma.kol} \cdot \omega) &= \frac{dJ_{\Sigma.kol}}{dt} \cdot \omega + \frac{d\omega}{dt} \cdot J_{\Sigma.kol} = \frac{dJ_{\Sigma.kol}}{d\varphi} \cdot \omega^2 + \frac{d\omega}{dt} \cdot J_{\Sigma.kol}; \\ \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \frac{J_{\Sigma.kol} \cdot \omega^2}{2} \right) &= \frac{\partial J_{\Sigma.kol}}{\partial \varphi} \cdot \frac{\omega^2}{2} + J_{\Sigma.kol} \cdot \omega \cdot \frac{\partial \omega}{\partial \varphi} = \frac{dJ_{\Sigma.kol}}{d\varphi} \cdot \frac{\omega^2}{2}. \end{aligned} \quad (4.28)$$

Підставивши набутих значень похідних в рівняння Лагранжа, отримаємо

$$J_{\Sigma.kol} \cdot \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \cdot \frac{dJ_{\Sigma.kol}}{d\varphi} = Q_\varphi. \quad (4.29)$$

Для знаходження узагальненої сили  $Q_\varphi$ , дамо куту  $\varphi$ , віртуальний приріст  $\delta\varphi$  і розглянемо суму елементарних робіт на цьому переміщенні моментів сил, прикладених до ведучих коліс

$$\delta A_\varphi = \gamma \cdot M_{DVS} \cdot \delta\varphi + \gamma_M \cdot M_{VD} \cdot \delta\varphi - M_{trm} \cdot \delta\varphi - M_{spr} \cdot \delta\varphi - M_{tr} \cdot \delta\varphi, \quad (4.30)$$

де  $M_{DVS} = M_{DVS}(\omega_{KV}, \beta_D)$  – ефективний момент ДВЗ;

$M_{VD} = M_{VD}(\omega_M, \beta_M)$  – момент на валу електричної машини;

$M_{trm} = M_{trm}(\beta_T)$  – гальмівний момент системи гідравлічного гальмування;

$M_{spr} = M_{spr}(V, \alpha, \mathcal{G}_0)$  – момент опору, прикладений до ведучих коліс автомобіля;

$M_{tr}$  – момент опору, обумовлений силами тертя в елементах трансмісії, приведений до осі обертання ведучих коліс;

Узагальнена сила визначається із виразу

$$Q_\varphi = \frac{\delta A_\varphi}{\delta \varphi} = \gamma \cdot M_{DVS} + \gamma_M \cdot M_{VD} - M_{trm} - M_{spr} - M_{tr}. \quad (4.31)$$

Підставивши вираження для  $Q_\varphi$  у рівняння Лагранжа і вважаючи, що значенням  $dJ_{\Sigma.kol}/d\varphi$  можна знехтувати, отримаємо рівняння динаміки прямолінійного руху системи ГСУ – автомобіль за відсутності пробуксовування коліс і заблокованої муфти зчеплення

$$J_{\Sigma.kol} \cdot \frac{d\omega}{dt} = \gamma \cdot M_{DVS} + \gamma_M \cdot M_{VD} - M_{trm} - M_{spr} - M_{tr}. \quad (4.32)$$

При русі з розблокованою муфтою зчеплення автомобіль з паралельною ГСУ набуває другого ступню свободи. У якості другої узагальненої координати динамічної системи виберемо кут повороту КВ  $\varphi_{KV}$ . Динамічні властивості прямолінійного руху автомобіля в цьому випадку описуються наступними рівняннями Лагранжа

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial E_k}{\partial \omega} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial \varphi} = Q_\varphi \\ \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial E_k}{\partial \omega_{KV}} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial \varphi_{KV}} = Q_{\varphi.kv} \end{array} \right., \quad (4.33)$$

де  $Q_{\varphi.kv}$  – узагальнена сила, відповідна узагальненій координаті  $\varphi_{KV}$ .

В даному випадку кінетична енергія автомобіля визначається вираженням

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot (J_{DVS} \cdot \omega_{KV}^2 + J_{\Sigma.kol.s} \cdot \omega^2), \quad (4.34)$$

де  $J_{\Sigma.kol.s}$  – сумарний момент інерції мас, що обертаються, приведений до осі обертання ведучих коліс, при вимкненому зчепленні

$$J_{\Sigma.kol.s} = J_{VD} \cdot \gamma_M^2 + k_{vm} \cdot m_A \cdot r_{kol}^2 \quad (4.35)$$

Відповідні узагальнені сили визначаються виразами

$$Q_\varphi = \gamma_M \cdot M_{VD} - M_{trm} - M_{spr} - M_{tr.vd}, \quad (4.36)$$

$$Q_{\varphi.kv} = M_{DVS} - M_{tr.dvs}, \quad (4.37)$$

де  $M_{tr.vd}$  и  $M_{tr.dvs}$  – моменти опору сил тертя в елементах трансмісії електричної машини і ДВЗ відповідно.

Після диференціювання виразу для кінетичної енергії по узагальнених координатах і узагальнених швидкостях записуємо остаточні рівняння динаміки системи ГСУ – автомобіль при розблокованій муфті зчеплення

$$\begin{cases} J_{\Sigma.kol.s} \cdot \frac{d\omega}{dt} = \gamma_M \cdot M_{VD} - M_{trm} - M_{spr} - M_{tr.vd} \\ J_{DVS} \cdot \frac{d\omega_{KV}}{dt} = M_{DVS} - M_{tr.dvs} \end{cases} \quad (4.38)$$

Для опису руху гібридного автомобіля з блокованою муфтою зчеплення вважатимемо, що коефіцієнт  $\beta_S \in [0, 1]$  характеризує міру буксування фрикційної муфти. При цьому значення  $\beta_S = 0$  відповідає руху з розблокованою муфтою зчеплення або на нейтральній передачі, а  $\beta_S = 1$  – руху з блокованою муфтою. В цьому випадку динамічні властивості системи ГСУ – автомобіль – дорога можуть бути описані таким чином

$$\begin{cases} (J_{DVS} \cdot \gamma^2 \cdot \beta_S + J_{\Sigma.kol.s}) \cdot \frac{d\omega}{dt} = \gamma \cdot \beta_S \cdot (M_{DVS} - M_{tr.dvs}) + \gamma_M \cdot M_{VD} - M_{trm} - M_{spr} - M_{tr.vd} \\ J_{DVS} \cdot \frac{d\omega_{KV}}{dt} \cdot (1 - \beta_S) + \omega_{KV} \cdot \beta_S = (M_{DVS} - M_{tr.dvs}) \cdot (1 - \beta_S) + \gamma \cdot \beta_S \cdot \omega \end{cases} \quad (4.39)$$

Очевидно, що значення змінної  $\beta_S$  визначається ступенем натиснення на педаль зчеплення.

## 5. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГІБРИДНОЇ СИЛОВОЇ УСТАНОВКИ

Двигун внутрішнього згорання, будучи основним двигуном ГСУ, багато в чому визначає технічний стан її і показники економічності і екологічної безпеки. Для вирішення завдань аналізу, синтезу і оптимізації системи управління ГСУ ключовою є проблема ідентифікації статичних і динамічних характеристик (математичній моделі) ДВЗ.

Під математичною моделлю ДВЗ розумітимемо деякого оператора

$$\mathbf{F}_{DVS} : \mathbf{U}_{DVS} \mapsto \mathbf{Y}_{DVS}, \quad (5.1)$$

відповідно до якого кожному вхідному вектору має

$$\mathbf{u}_{DVS} = \begin{bmatrix} \omega_{KV} \\ \dot{\omega}_{KV} \\ \beta_D \\ \dot{\beta}_D \end{bmatrix}, \mathbf{u}_{DVS} \in \mathbf{U}_{DVS} \subset \mathbb{R}^4, \forall t; \mathbf{U}_{DVS} = \begin{bmatrix} \omega_{KV.min} \leq \omega_{KV} \leq \omega_{KV.max} \\ \dot{\omega}_{KV.min} \leq \dot{\omega}_{KV} \leq \dot{\omega}_{KV.max} \\ 0 \leq \beta_D \leq 1 \\ \dot{\beta}_{D.min} \leq \dot{\beta}_D \leq \dot{\beta}_{D.max} \end{bmatrix}, \quad (5.2)$$

ставиться у відповідність вихідний вектор

$$\mathbf{y}_{DVS} = \begin{bmatrix} M_{DVS} \\ G_T \\ C_{NOx} \\ C_{CO} \\ C_{HC} \end{bmatrix}, \mathbf{y}_{DVS} \in \mathbf{Y}_{DVS} \subset \mathbb{R}^5, \forall t; \mathbf{Y}_{DVS} = \begin{bmatrix} M_{DVS.min} \leq M_{DVS} \leq M_{DVS.max} \\ 0 \leq G_T \leq G_{T.max} \\ 0 \leq C_{NOx} \leq C_{NOx.max} \\ 0 \leq C_{CO} \leq C_{CO.max} \\ 0 \leq C_{HC} \leq C_{HC.max} \end{bmatrix}, \quad (5.3)$$

тобто

$$\mathbf{y}_{DVS} = \mathbf{F}_{DVS}(\mathbf{u}_{DVS}), \quad (5.4)$$

де  $\dot{\omega}_{KV} = d\omega_{KV}/dt$ ;  $\dot{\beta}_D = d\beta_D/dt$ ;  $\omega_{KV.min}$ ,  $\omega_{KV.max}$ ,  $\dot{\omega}_{KV.min}$ ,  $\dot{\omega}_{KV.max}$  – мінімально і максимально допустимі швидкості обертання і прискорення КВ відповідно;  $\dot{\beta}_{D.min}$ ,  $\dot{\beta}_{D.max}$  – мінімально і максимально можливі швидкості сигналу, що управляє, ДВЗ;  $M_{DVS.min}$ ,  $M_{DVS.max}$  – мінімальне і максимальне значення ефективного моменту ДВЗ, які є функціями швидкості обертання КВ;  $G_{T.max}$  – максимально можлива годинна витрата пального;  $C_{NOx.max}$ ,  $C_{CO.max}$ ,

$C_{HC,max}$  – максимальна годинна емісія оксидів азоту, оксиду вуглецю і вуглеводнів відповідно.

Оператор моделі  $\mathbf{F}_{DVS}$  має бути в певному значенні щонайкраще наближений до невідомого оператора об'єкту  $\mathbf{F}_{DVS}^*$ . Близькість операторів оцінюватимемо виключно по близькості їх реакцій на одну і ту ж вхідну дію. Процес ідентифікації математичної моделі полягає у визначенні структури  $\mathbf{\Omega}_{DVS}$  оператора  $\mathbf{F}_{DVS}$  і вектору невідомих параметрів моделі  $\mathbf{P}_{DVS}$  [88]

$$\mathbf{F}_{DVS} = \langle \mathbf{\Omega}_{DVS}, \mathbf{P}_{DVS} \rangle. \quad (5.5)$$

Отримана в результаті ідентифікації математична модель повинна задовольняти ряду вимог:

- вихід моделі винен максимально точно, згідно вибраній метриці, відповідати характеристикам ДВЗ, що належать області допустимих експлуатаційних режимів, при одних і тих же вхідних сигналах;

- рівень складності моделі має бути прийнятним з погляду її використання при вирішенні оптимізаційної задачі;

- математичні перетворення, використовувані при побудові моделі, повинні допускати ефективну реалізацію засобами системи комп'ютерної математики MATLAB.

Процес ідентифікації повинен спиратися на експериментально отримані швидкісні і навантажувальні характеристики ДВЗ, забезпечувати простоту налаштування моделі на конкретний тип двигуна, мати достатню перешкодозахищеність, бути автоматичним або автоматизованим.

Математичні моделі ДВЗ у вигляді систем диференціальних рівнянь, отриманих на основі аналізу термодинамічних процесів в камері згоряння, впускному і випускному колекторах, особливостей взаємодії систем сумішоутворення і запалювання, кінематичних зв'язків між різними вузлами і агрегатами і так далі виявляються надзвичайно складними і громіздкими [77, 89, 90]. Лінеаризація даних рівнянь [91– 94] призводить до суттєвого зростання

нев'язки виходів моделі і об'єкту при необхідності використовувати модель в широкому діапазоні експлуатаційних режимів ДВЗ

$$\begin{cases} \mathbf{N}_{21} = 2 \cdot \left( 1 + \exp \left( -2 \cdot \left( \mathbf{W}_{21} \cdot \left[ \bar{\omega}_{KV}, \bar{M}_{DVS} \right]^T + \mathbf{B}_{21} \right) \right) \right) - 1 \\ \mathbf{N}_{22} = 2 \cdot \left( 1 + \exp \left( -2 \cdot \left( \mathbf{W}_{22} \cdot \mathbf{N}_{21} + \mathbf{B}_{22} \right) \right) \right) - 1 \\ \left[ \bar{C}_{NOx}, \bar{C}_{CO}, \bar{C}_{HC} \right]^T = \mathbf{W}_{23} \cdot \mathbf{N}_{22} + \mathbf{B}_{23} \end{cases}, \quad (5.6)$$

де  $\mathbf{N}_{2i}$  – вектори виходів нейронів  $i$ -го шару,  $i = 1, 2$ ;

$\mathbf{W}_{2i}$  – матриці вагових коефіцієнтів нейронів  $i$ -го шару,  $i = \overline{1, 3}$ ;

$\mathbf{B}_{2i}$  – вектори зсувів нейронів  $i$ -го шару,  $i = \overline{1, 3}$ .

Денормування вихідного сигналу нейронної мережі здійснюється згідно виразу

$$\begin{bmatrix} C_{NOx} \\ C_{CO} \\ C_{HC} \end{bmatrix} = 0,5 \cdot \left( \begin{bmatrix} \max \{ C_{NOx} \} \\ \max \{ C_{CO} \} \\ \max \{ C_{HC} \} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \min \{ C_{NOx} \} \\ \min \{ C_{CO} \} \\ \min \{ C_{HC} \} \end{bmatrix} \right) * \left( \begin{bmatrix} \bar{C}_{NOx} \\ \bar{C}_{CO} \\ \bar{C}_{HC} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} \min \{ C_{NOx} \} \\ \min \{ C_{CO} \} \\ \min \{ C_{HC} \} \end{bmatrix}, \quad (5.7)$$

де  $\min \{ C_{NOx} \}$ ,  $\min \{ C_{CO} \}$ ,  $\min \{ C_{HC} \}$ ,  $\max \{ C_{NOx} \}$ ,  $\max \{ C_{CO} \}$ ,  $\max \{ C_{HC} \}$  – відповідно мінімальні і максимальні значення множин  $\{ C_{NOx.i} \}$ ,  $\{ C_{CO.i} \}$  і  $\{ C_{HC.i} \}$ ,  $i = \overline{1, N_{ex.2}}$ .

Регульовальна характеристика вибраного двигуна, відповідно до якої відбувається обмеження максимальних оборотів КВ при низькому навантаженні, моделюється за допомогою відображення  $\mathbf{F}_{DVS.3}$

$$\begin{aligned} M_{DVS}(\tilde{M}_{DVS}, \omega_{KV}) &= \min(\tilde{M}_{DVS}, M_{DVS.p}(\omega_{KV})), \\ M_{DVS.p}(\omega_{KV}) &= k_{DVS.p1} \cdot \omega_{KV} + k_{DVS.p0} \end{aligned} \quad (5.8)$$

де  $k_{DVS.p0}$ ,  $k_{DVS.p1}$  – параметри регульовальної характеристики ДВЗ.

Тепер задача структурної ідентифікації моделі ДВС може мати параметри, тобто різні структури можуть кодуватися вектором структурних параметрів  $\mathbf{D}_{DVS}$

$$\mathbf{F}_{DVS} = \langle \mathbf{D}_{DVS}, \mathbf{P}_{DVS} \rangle \quad (5.9)$$

В даному випадку елементами вектору  $\mathbf{D}_{DVS}$  є кількості нейронів в прихованих шарах ШНМ  $\mathbf{F}_{DVS.1}$  і  $\mathbf{F}_{DVS.2}$ , які визначають розмірності відповідних матриць вагових коефіцієнтів і зміщень нейронів  $\mathbf{D}_{DVS} = \langle \mathbf{D}_{DVS.1}, \mathbf{D}_{DVS.2} \rangle$ . У свою чергу, елементами вектору  $\mathbf{P}_{DVS}$  невідомих параметрів моделі є елементи матриць вагових коефіцієнтів і зміщень нейронів ШНМ  $\mathbf{F}_{DVS.1}$  і  $\mathbf{F}_{DVS.2}$ , а також параметри регулювальної характеристики  $k_{DVS.p0}$  і  $k_{DVS.p1}$ :  $\mathbf{P}_{DVS} = \langle \mathbf{P}_{DVS.1}, \mathbf{P}_{DVS.2}, \mathbf{P}_{DVS.3} \rangle$ .

Вважатимемо, що в результаті діагностування ДВЗ була отримана множина точок  $\{M_{DVS.i}, \omega_{KV.i}, \beta_{D.i}\}$ ,  $\{G_{T.i}, \omega_{KV.i}, \beta_{D.i}\}$ ,  $i = \overline{1, N_{ex.1}}$  і  $\{C_{NOx.j}, M_{DVS.j}, \omega_{KV.j}\}$ ,  $\{C_{CO.j}, M_{DVS.j}, \omega_{KV.j}\}$ ,  $\{C_{HC.j}, M_{DVS.j}, \omega_{KV.j}\}$ ,  $j = \overline{1, N_{ex.2}}$ , які є репрезентативною вибіркою нормативних даних і достатньо точно відображають поведінку швидкісних характеристик ДВЗ, показників його економічності і токсичності ВГ при  $\omega_{KV} \in [\omega_{KV.min}, \omega_{KV.max}]$ ,  $\beta_D \in [0, 1]$ .

Для нейронної мережі  $\mathbf{F}_{DVS.1} = \langle \mathbf{D}_{DVS.1}, \mathbf{P}_{DVS.1} \rangle$  функція нев'язку виходів моделі і об'єкту  $\psi_{DVS.1}$  в  $i$ -й точці експериментальних характеристик може бути визначена таким чином

$$\begin{cases} \psi_{DVS.1}(i, \mathbf{D}_{DVS.1}, \mathbf{P}_{DVS.1}) = (M_{DVS.i} - y_{11})^2 + (G_{T.i} - y_{12})^2 \\ [y_{11}, y_{12}]^T = \mathbf{F}_{DVS.1}(\omega_{KV.i}, \beta_{D.i}, \mathbf{D}_{DVS.1}, \mathbf{P}_{DVS.1}) \end{cases} \quad (5.10)$$

Задача параметричної ідентифікації нейронної мережі  $\mathbf{F}_{DVS.1}$  може бути зведена до задачі пошуку мінімуму цільового функціонала вигляду

$$J_{DVS.1}(\mathbf{D}_{DVS.1}, \mathbf{P}_{DVS.1}) = \frac{1}{N_{ex.1}} \cdot \sum_{i=1}^{N_{ex.1}} \psi_{DVS.1}(i, \mathbf{D}_{DVS.1}, \mathbf{P}_{DVS.1}) \rightarrow \min. \quad (5.11)$$

Для нейронної мережі  $\mathbf{F}_{DVS.2}$  відповідно можна записати

$$\begin{cases} \psi_{DVS.2}(j, \mathbf{D}_{DVS.2}, \mathbf{P}_{DVS.2}) = (C_{NOx.j} - y_{21})^2 + (C_{CO.j} - y_{22})^2 + (C_{HC.j} - y_{23})^2 \\ [y_{21}, y_{22}, y_{23}]^T = \mathbf{F}_{DVS.2}(\omega_{KV.j}, M_{DVS.j}, \mathbf{D}_{DVS.2}, \mathbf{P}_{DVS.2}) \end{cases}; \quad (5.12)$$



$$J_{DVS.2}(\mathbf{D}_{DVS.2}, \mathbf{P}_{DVS.2}) = \frac{1}{N_{ex.2}} \cdot \sum_{j=1}^{N_{ex.2}} \psi_{DVS.2}(j, \mathbf{D}_{DVS.2}, \mathbf{P}_{DVS.2}) \rightarrow \min. \quad (5.13)$$

Якщо параметри  $\mathbf{P}_{DVS.3} = [k_{p0}, k_{p1}]^T$  регулювальної характеристики  $\mathbf{F}_{DVS.3}$  задані, ідентифікація математичної моделі ДВЗ зводиться до визначення структури і параметрів нейронних мереж  $\mathbf{F}_{DVS.1}$  и  $\mathbf{F}_{DVS.2}$

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{D}_{DVS}, \mathbf{P}_{DVS} \rangle &= \langle [\mathbf{D}_{DVS.1}, \mathbf{D}_{DVS.2}], [\mathbf{P}_{DVS.1}, \mathbf{P}_{DVS.2}, \mathbf{P}_{DVS.3}] \rangle = \\ &= \begin{cases} \arg \min_{\mathbf{D}_{DVS.1}, \mathbf{P}_{DVS.1}} J_{DVS.1}(\mathbf{D}_{DVS.1}, \mathbf{P}_{DVS.1}) \\ \arg \min_{\mathbf{D}_{DVS.2}, \mathbf{P}_{DVS.2}} J_{DVS.2}(\mathbf{D}_{DVS.2}, \mathbf{P}_{DVS.2}) \end{cases} . \end{aligned} \quad (5.14)$$

Для вирішення ідентифікаційної задачі можуть бути використані відомі методи навчання нейронних мереж [77 – 80, 84 – 86]. Одним з таких методів, який показав свою високу ефективність при рішенні даної задачі, є алгоритм SCG (англомовне скорочення scaled conjugate gradient algorithm, що асоціюється з назвою даного алгоритму в ППП Neural Network Toolbox), запропонований Моллером (Moller) [80, 82]. Цей алгоритм об'єднує ідеї методу зв'язаних градієнтів з квазіньютонівими методами, і, зокрема, використовує підхід, реалізований в алгоритмі LM (Levenberg-Marquardt optimization) Льовенберга, – Марквардта [81, 85]. Алгоритм SCG може зажадати більшого числа ітерацій, чим інші алгоритми методу зв'язаних градієнтів, але при цьому кількість обчислень на кожній ітерації істотно скорочена.

Одна з найбільш серйозних труднощів, що виникають при навчанні ШНМ, пов'язана з явищем перенавчання (overfitting). Воно полягає в тому, що при мінімізації вибраного функціонала мережа мінімізує помилку на деякій обмеженій навчальній множині, що може привести до нестійкості результатів поза даною множиною. При цьому здібність мережі до узагальнення накопичених знань на вхідні сигнали, що не належать навчальній множині, на певному етапі навчання перестає зростати і навіть може погіршуватися.

В роботі [80] затверджується, що перенавчання може наступити у тому випадку, коли кількість точок множини, на якій проводиться навчання нейронної

мережі  $N_{ex.i} < 30 \cdot k_{INS.p}$ , де  $k_{INS.p}$  – кількість вільних параметрів мережі. Разом з тим необхідно враховувати, що окрім структури ШНМ і об'єму навчальної множини, на ефект перенавчання впливає також характер залежності, що апроксимується, і розподіл точок навчальної множини.

Методика оцінки помилки узагальнення, що базується на використанні міри Вапника-Червоненкіса, яка відображає рівень складності ШНМ і тісно пов'язана з кількістю синаптичних зв'язків, що містяться в ній, викладена в [79, 80]. Однак сьогодні метод точного визначення міри Вапника-Червоненкіса не відомий, що утрудняє оцінку помилки узагальнення з метою управління навчанням мережі.

Для подолання ефекту перенавчання множина вихідних даних може бути розділена на дві підмножини: навчальну (training set) і контрольну (validation set). Навчання мережі здійснюється з використанням навчальної підмножини. Контрольна підмножина використовується тільки для контролю помилки навчання. На початковій фазі навчання помилка для контрольної підмножини зменшується так само, як і для навчальної підмножини. На певному етапі зменшення помилки для контрольної підмножини припиняється або вона починає зростати. У цей момент необхідно переривати процедуру навчання для запобігання явищу перенавчання.

Якщо помилка для контрольної підмножини значно перевищує помилку для навчальної підмножини можна зробити висновок, що вихідні дані непоказні, тобто недостатньо точно відображають поведінку характеристик ДВЗ.

Для розподілу множини вихідних даних на навчальну і контрольну підмножини в [80] запропоновано використовувати коефіцієнт розбиття  $k_{rzb} \in [0,1]$

$$k_{rzb} = \frac{\sqrt{2 \cdot k_{INS.p} - 1} - 1}{2 \cdot (k_{INS.p} - 1)}. \quad (5.15)$$

Кількість точок, що виділяються в навчальну підмножину, визначається із співвідношення  $N_{ex.train} = (1 - k_{rzb}) \cdot N_{ex}$ , де  $N_{ex}$  – загальна кількість експериментально отриманих точок, що належать характеристиці, яка

апроксимується. Кількість точок, що виділяються в контрольну підмножину:  $N_{ex.vld} = k_{rzb} \cdot N_{ex}$ . Вибір  $k_{rzb}$  істотно впливає на ефективність навчання нейронної мережі тільки у разі високої складності характеристики, що апроксимується, при невеликому розмірі навчальної множини. Із збільшенням складності характеристики оптимальне значення  $k_{rzb}$  має тенденцію до зменшення.

Основною вимогою до допоміжного електродвигуна ГСУ, як і до інших тягових електроприводів, є його стійка і ефективна робота у всьому діапазоні тягово-швидкісних режимів, що задаються, за умови обмеження споживаної потужності можливостями акумуляторної батареї і тягової мережі. Окрім цього двигун має бути оборотною електричною машиною і забезпечувати рекуперацію енергії гальмування ТЗ при роботі в генераторному режимі.

До недавнього часу в тяговому електроприводі найширше застосовувалися двигуни постійного струму (ДПС). Основними перевагами ДПС є простота реалізації процесу регулювання швидкості і можливість безпосереднього підключення до автономного джерела електроживлення – акумуляторної батареї.

Успіхи в області силової електроніки і мікропроцесорної техніки створили сприятливі умови для розробки і виробництва тягових електроприводів нового покоління на базі вентильних двигунів. Саме такі електроприводи в даний час найчастіше застосовуються як допоміжний двигун ГСУ.

Вентильний електродвигун (ВЕД) є системою регульованого електроприводу, що складається з електродвигуна змінного струму, конструктивно подібного до синхронної машини, вентильного перетворювача (ВП) і пристрою управління (ПУ), що забезпечують комутацію кіл обмоток статора залежно від кутового положення ротора.

Як тяговий електропривод застосовуються ВЕД на основі синхронного двигуна із збудженням від розташованих на роторі постійних магнітів (СДПМ) [89–91].

Використання ВП і ПУ, що виконують функцію щітково-колекторного вузла, наділяє ВЕД властивості безколекторного ДПС і дозволяє використовувати

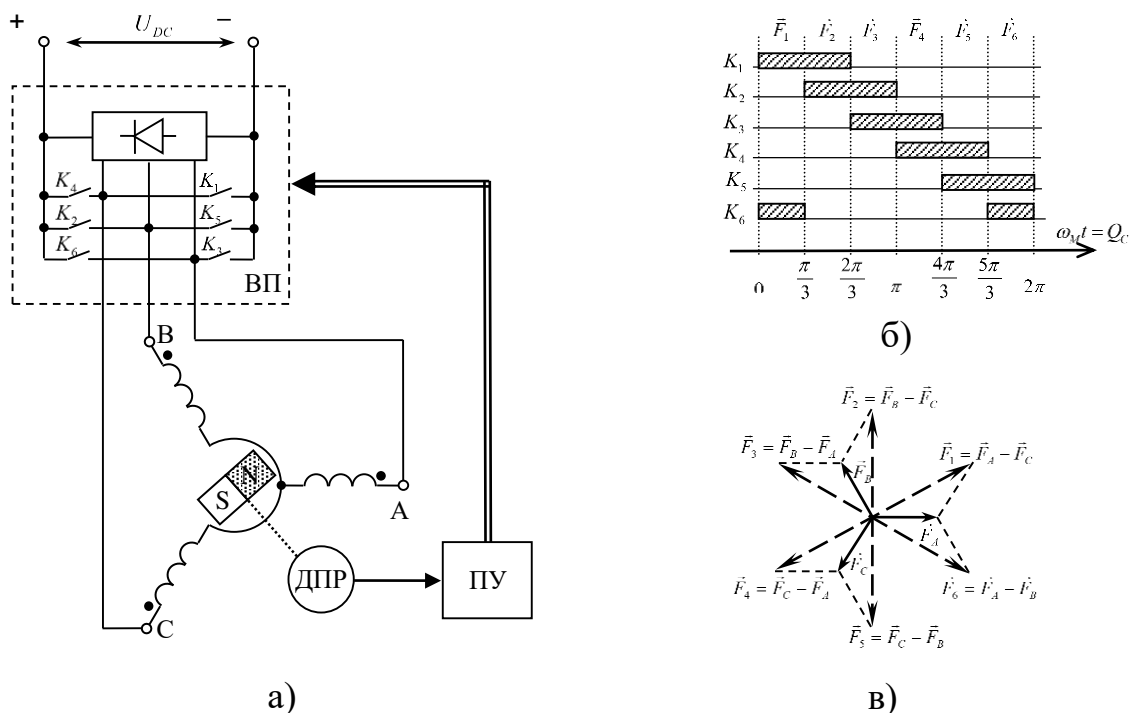
прості структури управління електроприводу постійного струму. Основними конструктивними і техніко-експлуатаційними перевагами ВЕД є:

- безконтактність і відсутність вузлів, що вимагають обслуговування;
- велика перевантажувальна здатність по моменту;
- малий момент інерції ротора, висока швидкодія;
- висока статична точність і великий можливий діапазон регулювання швидкості;
- найвищі енергетичні показники через відсутність втрат на збудження (ККД більше 90 %);
- можливість використання у вибухонебезпечному і агресивному середовищі;
- простота системи охолодження через відсутність на роторі обмоток, що нагріваються струмом навантаження;
- великий термін служби, надійність;
- в порівнянні з ДПС кращі масо габаритні і вартісні показники.

Функціональна схема ВЕД на основі СДПМ приведена на (рис.5.1-а). Обмотки статора отримують живлення від джерела постійного струму  $U_{DC}$  через мостовий комутатор вентильного перетворювача ВП з шістьма керованими напівпровідниковими ключами  $K_1 - K_6$ . Діодний міст із зворотною, відносно напруги живлення, полярністю включення діодів, що входить до складу ВП, створює контури для спаду струму в обмотках при відключенні відповідних ключів. Нумерація ключів відповідає черговості їх комутації (рис.5.1-б) з кутовим інтервалом 60 електричних градусів (ел. град). Для спрощення розгляду прийнято, що число пар полюсів дорівнює одиниці, що дозволяє не розрізняти фізичний і електричний простори ( $1 \text{ ел. град} = 1^\circ$ ).

Комутація струмів в обмотках статора приводить до зміни просторового положення вектору результуючої магніторушійної сили  $\vec{F}$ . Вектор  $\vec{F}$  визначається як геометрична сума векторів магніторушійних сил (МРС) двох фаз,

що обтикаються струмом в кожен момент часу, з урахуванням напрямку струму відносно початку і кінця обмотки (див. рис.5.1-в).



а – схема включення; б – часова діаграма комутації ключів вентильного перетворювача; в – просторова діаграма вектору результуючої сили, що намагнічує, обмоток статора

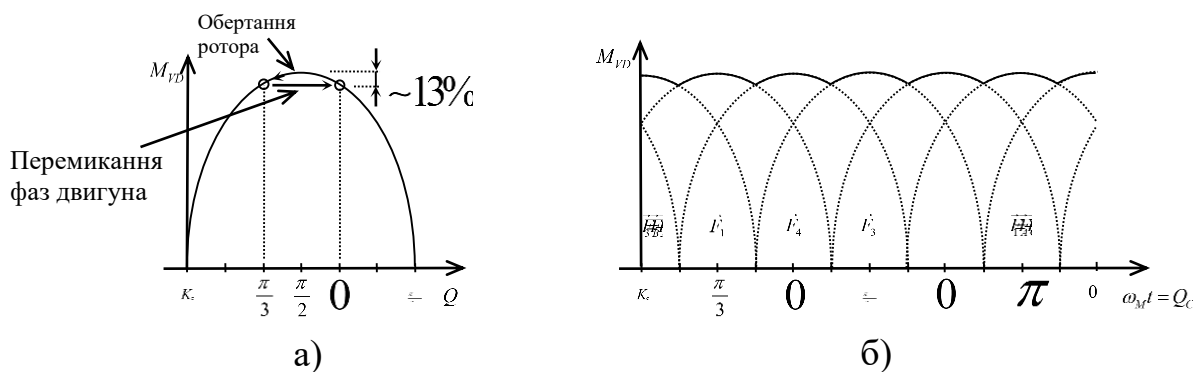
Рисунок 5.1 – Вентильний електродвигун на основі СДПМ

З датчика положення ротора ДПР в пристрій управління ПУ поступає інформація про поточне кутове положення ротора щодо обмоток статора. На підставі цієї інформації ПУ здійснює управління ключами  $K_1 - K_6$  таким чином, що б кут  $Q$  між векторами результуючої МРС  $\vec{F}$  і магнітного потоку ротора  $\vec{\Phi}$  перебував в діапазоні  $Q = \left[ \frac{\pi}{3}, \frac{2\pi}{3} \right]$ . При цьому середній кут розходження  $Q_{md} = \pi/2$ .

Електромагнітний момент, що розвивається двигуном  $M_{VD}$  визначається взаємодією двох потоків: статора, що створюється струмом в обмотках статора, і ротора, що створюється постійними магнітами

$$M_{VD} = \frac{3}{2} |\vec{F}| |\vec{\Phi}| \sin Q. \quad (5.16)$$

На рис.5.2-а приведена залежність електромагнітного моменту СДПМ від кута  $Q$  [92]. Під дією електромагнітного моменту ротор двигуна повертається, і кут  $Q$  зменшується. Характер залежності електромагнітного моменту від кута повороту ротора  $Q_C$  (рис.5.2-б).



(а) – вентильного двигуна від кута між векторами потоків статора і ротора

(б) – від кутового положення ротора

Рисунок 5.2 – Залежність електромагнітного моменту

При визначенні кута  $Q_C$  за початок відліку узятий напрям вектору МРС фази А при підключенні початку обмотки до позитивного полюса джерела живлення (рис.5.3).

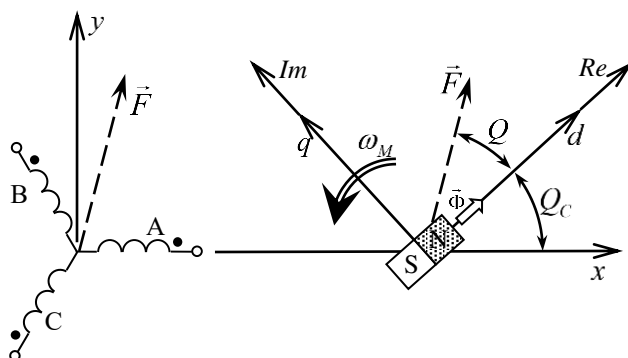


Рисунок 5.3 – Взаємозв'язок нерухомих систем координат СДПМ і систем координат, що обертаються

Наявність пульсацій моменту і пов'язана з цим нерівномірність обертання ротора є одним з недоліків ВЕД. Нерівномірність обертання ротора залежить від числа пар полюсів двигуна і приведенного моменту інерції приводу. Цей недолік може бути усунений переходом до синусоїдальної форми струму в обмотках статора. Частота цього струму, так само як і в розглянутій схемі, повинна визначатися сигналами ДПР.

Управління електромагнітним моментом і частотою обертання ротора ВЕД проводиться методом широтно-імпульсного регулювання. Змінюючи шпаруватість імпульсів управління ключами  $K_1 - K_6$  у періоди їх включеного стану, можна регулювати середню величину напруги, що підводиться до обмоток статора двигуна, а, отже, і величину результуючої МДС  $|\vec{F}|$ .

Для здійснення режиму гальмування алгоритм управління ВП має бути змінений так, щоб результуючий вектор МДС статора відставав від вектору магнітного потоку ротора. Для забезпечення можливості рекуперації енергії гальмування до складу ВП замість діодного моста повинен входити керований випрямляч [51, 56].

Розглянемо систему координат  $(d, q)$  пов'язану з ротором ВЕД і нерухому відносно його. Вважатимемо, що вісь  $d$  суміщена з віссю магнітного потоку ротора [52, 55].

Взаємозв'язок системи координат, що обертається  $(d, q)$  і нерухомої  $(x, y)$  системи координат розглянемо на прикладі просторового вектора МДС  $\vec{F}$  який випереджає вектор магнітного потоку ротора  $\vec{\Phi}$  на кут  $Q$  (див. рис.5.3).

У нерухомій системі координат вектор МДС може бути представлений у алгебраїчній і показовій формі

$$\vec{F}_{xy} = F_x + j \cdot F_y = F_{\max} \cdot (\cos(Q + Q_C) + j \cdot \sin(Q + Q_C)) = F_{\max} \cdot e^{j(Q + Q_C)}. \quad (5.17)$$

Аналогічно, в системі координат, що обертається  $(d, q)$  вважаючи вісь  $d$  речовою віссю площинності комплексного змінного, той же вектор можна представити у вигляді

$$\vec{F}_{dq} = F_d + j \cdot F_q = F_{\max} \cdot (\cos(Q) + j \cdot \sin(Q)) = F_{\max} \cdot e^{jQ}, \quad (5.18)$$

де  $F_x, F_y, F_d, F_q$  – проекції вектору  $\vec{F}$  на відповідні осі;  $F_{\max}$  – амплітуда МДС.

Порівнюючи приведені вирази, можна одержувати формулу для перерахунку величин із нерухомої системи координат в ту, що обертається

$$\vec{F}_{xy} = \vec{F}_{dq} \cdot e^{-jQ} \cdot e^{j(Q+Q_c)} = \vec{F}_{dq} \cdot e^{jQ_c}. \quad (5.19)$$

Застосувавши дану формулу до векторів  $\vec{u}_{xy}, \vec{i}_{xy}$  і  $\vec{\psi}_{xy}$ , отримаємо рівняння для електромагнітних процесів ВЕД в системі координат, що обертається

$$\begin{cases} \vec{u}_{dq} \cdot e^{jQ_c} = R_1 \cdot \vec{i}_{dq} \cdot e^{jQ_c} + \frac{d}{dt} (\vec{\psi}_{dq} \cdot e^{jQ_c}), \\ \vec{\psi}_{dq} \cdot e^{jQ_c} = L_1 \cdot \vec{i}_{dq} \cdot e^{jQ_c} + \psi_{mag} \cdot e^{jQ_c} \end{cases}, \quad (5.20)$$

$$\frac{d}{dt} (\vec{\psi}_{dq} \cdot e^{jQ_c}) = \frac{d\vec{\psi}_{dq}}{dt} \cdot e^{jQ_c} + j \cdot \vec{\psi}_{dq} \cdot p_p \cdot \omega_M \cdot e^{jQ_c}, \quad (5.21)$$

враховуючи, що  $Q_c = p_p \cdot \omega_M \cdot t$ .

Після скорочення лівої і правої частини даних рівнянь на  $e^{jQ_c}$  отримаємо вираз

$$\begin{cases} \vec{u}_{dq} = R_1 \cdot \vec{i}_{dq} + \frac{d\vec{\psi}_{dq}}{dt} + j \cdot p_p \cdot \omega_M \cdot \vec{\psi}_{dq}, \\ \vec{\psi}_{dq} = L_1 \cdot \vec{i}_{dq} + \psi_{mag} \end{cases}. \quad (5.22)$$

Представимо просторові вектори, що входять в дані рівняння, через їх проекції на осі координат [18, 24]

$$\vec{u}_{dq} = u_d + j u_q; \vec{i}_{dq} = i_d + j i_q; \vec{\psi}_{dq} = \psi_d + j \psi_q. \quad (5.23)$$

В цьому випадку можна записати

$$\begin{cases} u_d + j u_q = R_1 \cdot i_d + j R_1 \cdot i_q + \frac{d\psi_d}{dt} + j \frac{d\psi_q}{dt} + j p_p \cdot \omega_M \cdot \psi_d - p_p \cdot \omega_M \cdot \psi_q, \\ \psi_d + j \psi_q = L_{1d} \cdot i_d + j L_{1q} \cdot i_q + \psi_{mag.d} + j \psi_{mag.q} \end{cases}, \quad (5.24)$$



де  $L_{1d}$  і  $L_{1q}$  – повні індуктивності обмоток статора по подовжній і поперечній осях.

Якщо СДПМ виконаний із неявно полюсним ротором,  $L_{1d} = L_{1q} = L_1$ ;  $\psi_{mag,d}$  та  $\psi_{mag,q}$  – проекції вектору потокозчеплення статора від магнітного потоку ротора на осі координат. Оскільки вісь  $d$  суміщена з віссю магнітного потоку ротора –  $\psi_{mag,d} = \psi_{mag}$ ;  $\psi_{mag,q} = 0$ .

Розділивши дійсні і уявні частини рівнянь, отримаємо скалярний опис ВЕД

$$\begin{cases} u_d = R_1 \cdot i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - p_p \cdot \omega_M \cdot \psi_q \\ \psi_d = L_{1d} \cdot i_d + \psi_{mag} \\ u_q = R_1 \cdot i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + p_p \cdot \omega_M \cdot \psi_d \\ \psi_q = L_{1q} \cdot i_q \end{cases}, \quad (5.25)$$

або

$$\begin{cases} u_d = R_1 \cdot i_d + L_{1d} \cdot \frac{di_d}{dt} - p_p \cdot \omega_M \cdot L_{1q} \cdot i_q \\ u_q = R_1 \cdot i_q + L_{1q} \cdot \frac{di_q}{dt} + p_p \cdot \omega_M \cdot L_{1d} \cdot i_d + p_p \cdot \omega_M \cdot \psi_{mag} \end{cases}. \quad (5.26)$$

Потужність, споживану ВЕД, можна визначити як суму миттєвих потужностей фаз статора [35]:

$$P_{pir} = u_A \cdot i_A + u_B \cdot i_B + u_C \cdot i_C. \quad (5.27)$$

Оскільки миттєві значення фазних струмів і напруги можуть бути записані в нерухомій системі координат

$$\vec{u}_{xy} = \mathbf{a} \cdot [u_A \quad u_B \quad u_C]^T = \frac{2}{3} \left( u_A - \frac{1}{2}(u_B + u_C) + j \frac{\sqrt{3}}{2}(u_B - u_C) \right) = u_x + j u_y; \quad (5.28)$$

$$\vec{i}_{xy} = \mathbf{a} \cdot [i_A \quad i_B \quad i_C]^T = \frac{2}{3} \left( i_A - \frac{1}{2}(i_B + i_C) + j \frac{\sqrt{3}}{2}(i_B - i_C) \right) = i_x + j i_y, \quad (5.29)$$

звідки

$$u_A = u_x; \quad i_A = i_x;$$

$$\begin{aligned} u_B &= -\frac{1}{2}(u_x - \sqrt{3} \cdot u_y); & i_B &= -\frac{1}{2}(i_x - \sqrt{3} \cdot i_y); \\ u_C &= -\frac{1}{2}(u_x + \sqrt{3} \cdot u_y); & i_C &= -\frac{1}{2}(i_x + \sqrt{3} \cdot i_y), \end{aligned} \quad (5.30)$$

підставивши їх у вираз для споживаної потужності, запишемо

$$P_{ptr} = u_x \cdot i_x + \frac{1}{4}(u_x - \sqrt{3} \cdot u_y)(i_x - \sqrt{3} \cdot i_y) + \frac{1}{4}(u_x + \sqrt{3} \cdot u_y)(i_x + \sqrt{3} \cdot i_y) = \frac{3}{2}(u_x \cdot i_x + u_y \cdot i_y). \quad (5.31)$$

Величина  $P_{ptr}$  при заданих значеннях модулів векторів струму і напруги визначається тільки взаємним розташуванням цих векторів і не залежить від вибору системи координат. Отже, можна записати

$$P_{ptr} = \frac{3}{2}(u_d \cdot i_d + u_q \cdot i_q). \quad (5.32)$$

Підставивши в дану формулу вирази для  $u_d$  і  $u_q$  отримаємо

$$P_{ptr} = \frac{3}{2} \left( R_1 \cdot (i_d^2 + i_q^2) + \frac{d\psi_d}{dt} \cdot i_d + \frac{d\psi_q}{dt} \cdot i_q + p_p \cdot \omega_M \cdot (\psi_d \cdot i_q - \psi_q \cdot i_d) \right). \quad (5.33)$$

У цьому виразі можна виділити три складові:

$$P_{CU} = \frac{3}{2} \cdot R_1 \cdot (i_d^2 + i_q^2) \quad (5.34)$$

– потужність активних втрат в міді статора ВЕД;

$$P_{MG} = \frac{3}{2} \left( \frac{d\psi_d}{dt} \cdot i_d + \frac{d\psi_q}{dt} \cdot i_q \right) \quad (5.35)$$

– складова потужності, що характеризує приріст електромагнітної енергії, що запасається в обмотках статора;

$$P_{EM} = \frac{3}{2} \cdot p_p \cdot \omega_M \cdot (\psi_d \cdot i_q - \psi_q \cdot i_d) \quad (5.36)$$

– електромагнітна потужність.

Момент обертання ВЕД можна виразити через електромагнітну потужність і кутову швидкість обертання ротора [30 – 33]

$$M_{VD} = \frac{P_{EM}}{\omega_M} = \frac{3}{2} \cdot p_p \cdot (\psi_d \cdot i_q - \psi_q \cdot i_d) = \frac{3}{2} \cdot p_p \cdot (\psi_{mag} + i_d \cdot (L_{1d} - L_{1q})) \cdot i_q. \quad (5.37)$$

Якщо СДПМ виконаний з неявно полюсним ротором, коли  $L_{1d} = L_{1q}$  отримаємо

$$M_{VD} = \frac{3}{2} \cdot p_p \cdot \psi_{mag} \cdot i_q. \quad (5.38)$$

Розглянемо режим роботи ВЕД, при якому струми  $i_d$  і  $i_q$  залишаються постійними або міняються достатньо повільно ( $di_d/dt = 0$ ;  $di_q/dt = 0$ ). В цьому випадку можна записати

$$\begin{cases} u_d = R_1 \cdot i_d - p_p \cdot \omega_M \cdot L_{1q} \cdot i_q \\ u_q = R_1 \cdot i_q + p_p \cdot \omega_M \cdot L_{1d} \cdot i_d + p_p \cdot \omega_M \cdot \psi_{mag} \\ M_{VD} = \frac{3}{2} \cdot p_p \cdot (\psi_{mag} + i_d \cdot (L_{1d} - L_{1q})) \cdot i_q \end{cases} \quad (5.39)$$

При  $L_{1d} = L_{1q}$  електромагнітний момент двигуна однозначно визначається складовою струму  $i_q$ . Отже, найбільш економічним режимом роботи ВЕД є такий, при якому забезпечується рівність нулю струму  $i_d$  що відповідає найменшому значенню струму, споживаного при даному навантаженні [55, 56].

Якщо ВЕД має явно виражені полюси, індуктивності обмотки статора по подовжній і поперечній вісях різні. В цьому випадку момент обертання ВЕД залежить від обох складових струму, а модуль вектору струму статора (повний струм споживання ВЕД) визначається виразом

$$I_M = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} = \sqrt{i_d^2 + \left(\frac{2 \cdot M_{VD}}{3 \cdot p_p}\right)^2} \cdot \frac{1}{(\psi_{mag} + i_d \cdot (L_{1d} - L_{1q}))^2}. \quad (5.40)$$

Значення складових  $i_d^*$  і  $i_q^*$  що забезпечують мінімальний струм споживання ВЕД при заданому навантаженні, можуть бути отримані з умови

$$\begin{cases} i_d^* = \arg \min_{i_d \in [-I_{max}, 0]} (I_M(i_d, M_{VD})) \\ I_M^* = I_M(i_d^*, M_{VD}) \\ i_q^* = \sqrt{(I_M^*)^2 - (i_d^*)^2} \end{cases}, \quad M_{VD} = const. \quad (5.41)$$

Окрім мінімізації повного струму статора ВЕД можливі і інші критерії оптимальності при визначенні подовжньою і поперечною складових струму. Деякі з них розглянуті в [51].

Область допустимих режимів роботи ВЕД обмежена співвідношеннями

$$\sqrt{i_d^2 + i_q^2} \leq I_{\max}; \quad \sqrt{u_d^2 + u_q^2} \leq U_{\max}, \quad (5.42)$$

де  $I_{\max}$  – максимально-допустимий струм фази, обумовлений особливостями ВП або тепловими обмеженнями;

$U_{\max}$  – максимально-допустима напруга фази  $U_{\max} = \frac{U_{DC}}{\sqrt{3}}$ ;

$U_{DC}$  – постійна напруга тягової бортової мережі.

На високих швидкостях обертання ротора ВЕД для задоволення обмеженням області допустимих режимів часто виявляється необхідним використовувати, так званий, режим «ослаблення поля». Даний режим припускає збільшення негативної складової вектору струму  $i_d$  з метою компенсації ЕРС обертання  $E = \omega_e \psi_{mag}$  за допомогою складової напруги статора  $\omega_e L_{1d} i_d$  [52]. Таким чином, в загальному випадку  $[i_d^*, i_q^*] = f(M_{VD}, \omega_M)$ .

Перспективними для використання в тяговому електроприводі вважаються акумулятори на основі літію (літій-іонні, літій-полімерні і т.д.). Номінальна ємність ЕРС акумулятора літій-іонних батареї становить  $E_{AK} = 3,5$  В при дуже низькому внутрішньому опорі. Саморозряд таких ТАБ становить близько 10 % на місяць. Час повного заряду становить 2...3 год. Широке впровадження літій-іонних ТАБ в даний час стримує висока вартість і ряд невирішених технологічних проблем [58].

В процесі функціонування тягового електроприводу електронний блок управління забезпечує підтримання ступеня зарядженості ТАБ ( $\theta_{ТАБ} = C_{ТАБ}/C_{ТАБ,ном}$ , де  $C_{ТАБ}$  – кількість А·год, яке може віддати ТАБ при номінальному режимі розряду) в діапазоні  $\theta_{ТАБ} = 0,4...0,8$  [55].

При цьому поточне значення величини  $\theta_{ТАБ}$  може бути визначено за величиною напруги  $U_{ТАБ}$  на вихідних контактах ТАБ, значенням сили струму розряду/заряду  $\pm I_{ТАБ}$  і температури електроліту батареї  $t_{ТАБ}^0$ .

При діагностуванні технічного стану тягового електроприводу ГСУ ступінь зарядженості ТАБ можна оцінити відповідно до виразу

$$\theta_{ТАБ} = \theta_{ТАБ.0} - \frac{1}{3600 \cdot C_{ТАБ.nom}} \cdot \int_{t_s}^{t_f} I_{ТАБ} dt, \quad (5.43)$$

де  $\theta_{ТАБ.0}$  - ступінь зарядженості ТАБ в момент діагностування.

Якщо уявити еквівалентну схему заміщення ТАБ у вигляді послідовного з'єднання еквівалентної ЕРС ( $E_{ТАБ}$ ) і еквівалентного внутрішнього опору ( $R_{ТАБ}$ ), напругу ТАБ можна визначити з виразу

$$U_{ТАБ} = E_{ТАБ} - I_{ТАБ} \cdot R_{ТАБ}. \quad (5.44)$$

Цей вираз не враховує динамічні властивості ТАБ, якими при діагностуванні тягового електроприводу можна знехтувати. У загальному випадку  $E_{ТАБ}$  і  $R_{ТАБ}$  є функціями ступеня зарядженості ТАБ, температури електроліту ( $t_{ТАБ}^0$ ), величини і напрямку струму ( $I_{ТАБ}$ ).

$$E_{ТАБ} = E_{ТАБ}(\theta_{ТАБ}, I_{ТАБ}, t_{ТАБ}^0), \quad R_{ТАБ} = R_{ТАБ}(\theta_{ТАБ}, I_{ТАБ}, t_{ТАБ}^0) \quad (5.45)$$

Потужність, що віддається або споживана акумуляторною батареєю, визначається виразом

$$P_{ТАБ} = U_{ТАБ} \cdot I_{ТАБ} = (E_{ТАБ} - I_{ТАБ} \cdot R_{ТАБ}) \cdot I_{ТАБ} \quad (5.46)$$

Отже,

$$I_{TAB} = \frac{1}{2 \cdot R_{TAB}} (E_{TAB} - \sqrt{E_{TAB}^2 - 4 \cdot R_{TAB} \cdot P_{TAB}}) \quad (5.47)$$

Негативне значення підкорінного виразу в останній формулі відповідає випадку  $P_{TAB} > P_{TAB.max}$ , де  $P_{TAB.max}$  – максимальна потужність, ТАБ. Отже,

$$P_{max} = \frac{E_{TAB}^2}{4 \cdot R_{TAB}} \quad (5.48)$$

Якщо живлення тягового електроприводу

$$\begin{cases} P_{TAB} = \frac{P_{VD}}{\eta_{inv}} + P_{dop}, \text{ при} \\ P_{TAB} = P_{VD} \cdot \eta_{inv} + P_{dop} \end{cases} \quad (5.49)$$

де  $P_{VD}$  – потужність, споживана тяговим електроприводом. Якщо в якості тягового електроприводу виступає вентильний двигун.

$$P_{VD} = \frac{3}{2} \cdot (u_d \cdot i_d + u_q \cdot i_q) \quad (5.50)$$

У режимі двигуна  $P_{VD} = P_{ptr} \geq 0$ , в генераторному режимі  $P_{VD} = P_{ptr} < 0$ ;

$P_{dop}$  – потужність, споживана від бортової мережі додатковим електроустановкам;

$\eta_{inv}$  – ККД трифазного інвертора з ШІМ.

## 6. НЕЙРОМЕРЕЖЕВА МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГІБРИДНОЇ СИЛОВОЇ УСТАНОВКИ

Однією із головних задач, виникаючих під час експлуатації гібридного автомобіля є підтримка ефективності та надійності всіх його систем та попередження відмов. Ця задача може бути вирішена на підставі оцінки силової установки гібридного автомобіля.

Нейромережева модель оцінки технічного стану силової установки дозволяє реалізовувати ресурсні можливості гібридних автомобілів виключно випадках їх передчасного відправлення в ремонт, зменшити кількість простоїв при технічному обслугованні, більш раціонально планувати режими роботи та визначення оптимального терміну експлуатації конкретного автомобіля, що знижує витрати на його обслуговування. Знання технічного стану силової установки необхідні для створення ремонтної бази та обґрунтування потреби в запасних частинах.

В теперішній час трудоемність діагностування складає 40 % загальної трудовитрати технічного обслуговування. Використання стаціонарних та переносних діагностичних засобів пов'язано з операціями підключення, налаштування і зняття датчиків та комунікаційної апаратури, що веде до значних витрат на допоміжні роботи, які складають майже 80...85 % часу повного циклу діагностування.

Дослідження [9] вказують на те, що використання бортових діагностичних систем дозволяє знизити трудовитрати діагностування на 35 % за рахунок зменшення кількості підготовчо-заклучних операцій. Такі системи враховують дані датчиків на різних режимах роботи при експлуатації автомобіля, відстежують зміни параметрів за таблицями, які зберігаються в пам'яті пристрою та інформують водія про появлення несправності за допомогою багатофункціональних індикаторів на приладній панелі. Після ідентифікації збережених в пам'яті кодів помилок та аналіз додаткових даних оператором приймається рішення про наступні дії.

Головними труднощами при використанні бортових систем є правильна інтерпретація коду та визначення правильної причини появи несправності, що потребує високої кваліфікації оператора, а також складності розробки, виробництва та збільшення кількості використаних датчиків та збільшення мережі проводів [9].

Витрати енергії (палива, електроенергії) визначається вантажно-швидкісним режимом. На цій підставі енергетичні витрати визначають при заданих умовах експлуатації ресурс силової установки гібридного автомобіля. Ефективність витрати ресурсу силової установки гібридного автомобіля оцінюється за критерієм показника ресурсу. Крім того нейромережева модель оцінки технічного стану силової установки гібридного автомобіля інваріантна різним силовим установкам.

Технічний стан силової установки гібридного автомобіля залежить від вантажно-швидкісного режиму, а з іншого боку, витрата енергії (палива, електроенергії) також визначається вантажно-швидкісним режимом. При постійній швидкості руху взаємозв'язок між технічним станом силової установки та енергетичними витратами залежить від крутного моменту на колеса. Між технічним станом силової установки, енергетичними витратами та крутним моментом на колесах є пряма залежність.

Така залежність має підставу на наступне: при експлуатації гібридних автомобілів в конкретних умовах технічний стан силової установки за даний період часу можна оцінювати за енергетичними витратами. Сумарна витрата енергії відповідає пробігу гібридного автомобіля, при якому буде повна витрата ресурсу силової установки. Отже, множина пробігу гібридного автомобіля, при якому силова установка потребує ремонту, на витрату енергії в кВт-год на 100км пробігу є сумарна витрата енергії. Така величина для конкретної силової установки є постійна. При експлуатації гібридного автомобіля технічний стан силової установки зменшується на стільки, на скільки збільшується витрата енергії. Таку закономірність покладено в основу оцінки технічного стану силової установки гібридного автомобіля за сумарними витратами енергії.



Технічний стан ГСУ залежить від вантажно-швидкісного режиму, з іншого боку, витрата енергії (палива і електроенергії) також визначається вантажно-швидкісним режимом. При постійному швидкісному режимі взаємозв'язок між технічним станом силової установки і енергетичними затратами в основному залежить від крутного моменту на колінчастому валу. Між технічним станом силової установки, енергетичними затратами і крутним моментом на колінчастому валу існує прямий зв'язок.

Такий взаємозв'язок дає підставу висловити наступне: при експлуатації гібридних автомобілів в певних умовах технічний стан силової установки за даний період часу можна оцінювати по енергетичним витратам. Сумарний витрата палива відповідає пробігу автомобіля, при якому настане повне вичерпання ресурсу силового. Отже, твір пробігу автомобіля, при якому силовому агрегату буде потрібно капітальний ремонт, на витрату палива в л/100 км пробігу є сумарний витрата палива. Ця величина для конкретного силового агрегату буде постійною. При експлуатації автомобіля ресурс двигуна і трансмісії зменшується на стільки, наскільки збільшується витрата палива. Ця закономірність і кладеться в основу оцінки ресурсу силового агрегату по загальній витраті палива.

Оцінка ресурсу силових агрегатів транспортних машин по витраті палива і швидкості руху має величезне значення для цілей планування і управління технічної служби АТП. Витрата палива і швидкості руху є енергетичними показниками використання транспортних машин в конкретних умовах експлуатації. З представлених вище рівнянь слід, що зі зменшенням ресурсу силової установки і підвищенням швидкості руху спостерігається збільшення витрати палива силових агрегатів транспортних машин.

Тому всі заходи спрямовані на зниження витрати палива і підвищення середніх швидкостей руху є одночасно дієвими і на підвищенні ресурсу силової установки гібридних транспортних машин. Ефективність витрачання ресурсу силової установки гібридних транспортних машин можна оцінити критерієм показника ресурсу, який визначається за виразом:

$$\left. \begin{aligned} K_p &= \frac{(Q_\phi + 0,091 \cdot E_{AKB}) \cdot V_a}{0,35 \cdot Q_{\max} \cdot V_{\max}} \text{ при } V_a \leq 0,3 \cdot V_{\max} \\ K_p &= \frac{0,35 \cdot Q_\phi \cdot V_{\max}}{(Q_\phi + 0,091 \cdot E_{AKB}) \cdot V_a} \text{ при } V_a > 0,3 \cdot V_{\max} \end{aligned} \right\}, \quad (6.1)$$

де  $Q_\phi$ ,  $Q_{\min}$  – відповідно фактичний і мінімальний витрата палива гібридного автомобіля в л/100 км пробігу;

$V_{\max}$ ,  $V_a$  – відповідно максимальна та середня швидкість руху автомобіля; км/год;

$E_{AKB}$  – ємність акумуляторної батареї, кВт·год.

Фактична витрата пального ( $Q_\phi$ ) визначається за виразом, л/100 км:

$$Q_\phi = \frac{100 \cdot g_e \cdot N_e}{V_a \rho_T}, \quad (6.2)$$

де  $g_e$  – питома витрата пального, кг/кВт·год;

$\rho_T$  – питома вага палива, г/г;

$N_e$  – ефективна потужність ДВЗ, кВт.

Питома витрата палива має мінімум на вузькому діапазоні тягово-швидкісних режимів ДВЗ гібридного автомобіля. В даному випадку питому витрату палива слід приймати величиною постійною, оскільки ДВЗ працює тільки в вузькому вантажно-швидкісному режимі.

Ефективна потужність ДВЗ ( $N_e$ ) визначається так, кВт:

$$N_e = \frac{M_{кр} \cdot n}{900}, \quad (6.3)$$

де  $M_{кр}$  – крутний момент ДВЗ, кН;

$n$  – швидкість обертання колінчастого валу ДВЗ, хв.

Крутний момент ДВЗ ( $M_{кр}$ ) можна визначити через продуктивність паливних форсунок наступним чином, Н м:

$$M_{кр} = C \cdot n \cdot T_B, \quad (6.4)$$

де  $C = 6,9 \cdot 10^{-3} V X_\zeta$ ;

$V$  – продуктивність паливної форсунки, мл;

$X_\zeta$  – кількість циліндрів ДВЗ;

$T_e$  – час впорскування палива форсункою, с.

Ємність тягової акумуляторної батареї визначається величинами напруги  $U$  і струму  $I$ , а також залежить від температури зовнішнього середовища, кВт·год.

$$E_{AKB} = U \cdot I (0,85 + 0,005 \cdot t_B) \cdot 10^{-3} = 0, \quad (6.5)$$

де  $t_e$  – температура зовнішнього середовища, °С.

На підставі вище наведеного коефіцієнт оцінки технічного стану гібридної силової установки має таку залежність:

$$K_p = A \cdot [B \cdot V_a \cdot n^2 \cdot T_e + 9,1 \cdot 10^{-4} \cdot U \cdot I \cdot (0,85 + 0,05 \cdot t_e)] \cdot V_a, \quad (6.6)$$

де  $A = 0,35 \cdot Q_{min} \cdot V_{max}$ ;

$B = 12,8 \cdot 10^{-6} \cdot g_e \cdot V \cdot X_{\psi}$ ;

Заходи, які спрямовані на зменшення витрат палива і підвищення швидкості руху транспортної машини, в результаті збільшують ресурс силової установки гібридного автомобіля. В умовах високої вартості експериментальних даних, їх обмеженої кількості, високої рівнем шуму, неповноти, а часто і суперечливості, у багатьох випадках найкращими виявляються моделі на основі штучних нейронних мереж (ІНС) [70, 85].

Побудова нейромережевої діагностичної моделі являє собою спосіб представлення нелінійного перетворення у вигляді композиції багатовимірних лінійних і одновимірних нелінійних перетворень. При цьому методи знаходження оптимальної структури ІНС сьогодні невідомі. Найбільш широке застосування для вирішення завдання апроксимації нелінійних залежності  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_{\lambda-1})$  отримав багатошаровий персептрон:

$$y = f_q \left( \mathbf{B}_q + \mathbf{W}_q \cdot \left( f_{q-1} \left( \mathbf{B}_{q-1} + \mathbf{W}_{q-1} \cdot \left( \dots f_1 \left( \mathbf{B}_1 + \mathbf{W}_1 \cdot [x_1, x_2, \dots, x_{\lambda-1}]^T \right) \right) \right) \right) \right), \quad (6.7)$$

де  $q$  – кількість шарів мережі;  $\mathbf{B}_i$  – вектор зсувів  $i$ -го шару;  $\mathbf{W}_i$  – матриця вагових коефіцієнтів  $i$ -го шару;  $f_i(\circ)$  – функція активації  $i$ -го шару. В якості активаційних функцій нейронів прихованих шарів в більшості випадків використовуються функції гіперболічного тангенса:

$$f_i(s) = th(s) = \frac{2}{1 + e^{-2s}} - 1, \quad (6.8)$$

а для вихідного шару вибирають лінійну активаційну функцію.

Аналізом досліджень [101,103] було встановлено, що така ІНС з одним прихованим і одним вихідним шаром здатна апроксимувати з будь-який наперед заданою точністю на компактному безлічі довільну безперервну функцію. Проте, з даних досліджень не слід, що один прихований шар є оптимальним в сенсі часу навчання, простоти реалізації і якості узагальнення. Завдання структурної ідентифікації моделі ІНС може бути параметризовано шляхом кодування різних структур вектором структурних параметрів  $\mathbf{D}$ . В даному випадку елементами вектору  $\mathbf{D}$  є кількість шарів мережі, і кількості нейронів в прихованих шарах, які визначають розмірності відповідних матриць вагових коефіцієнтів і зсувів нейронів.

Таким чином, ідентифікація залежності  $f_i(s) = t \cdot h(s) = \frac{2}{1 + e^{-2s}} - 1$  полягає у виборі оптимальної структури мережі  $\tilde{\mathbf{D}}$  і її навчанні, тобто такого налаштування параметрів  $\tilde{\mathbf{B}}_i$  и  $\tilde{\mathbf{W}}_i$ ,  $i = \overline{1, q}$  і її навчанні, тобто такого налаштування параметрів:

$$J_{CPG}(\mathbf{D}, \mathbf{B}_i, \mathbf{W}_i) = \frac{1}{N_{CPG}} \sum_{n=1}^{N_{CPG}} \left( \hat{P}_v^n - P_{v.CPG}(\mathbf{X}_n, \mathbf{D}, \mathbf{B}_i, \mathbf{W}_i) \right)^2, \quad (6.9)$$

де  $P_{v.CPG}$  – вихідний сигнал нейронної мережі, що апроксимує характеристику критерію показника технічного стану ДВЗ, при подачі на її вхід вектору

$$\mathbf{X}_n = \left[ \hat{\omega}_{kv}^n, \hat{I}_{st}^n, \hat{U}_{ab}^n, \hat{T}_m^n \right], \quad n = \overline{1, N_{CPG}} :$$

$$\langle \tilde{\mathbf{D}}, \tilde{\mathbf{B}}_i, \tilde{\mathbf{W}}_i \rangle = \arg \min_{\mathbf{D}, \mathbf{B}_i, \mathbf{W}_i} J_{CPG}(\mathbf{D}, \mathbf{B}_i, \mathbf{W}_i). \quad (6.10)$$

Для вирішення ідентифікаційної завдання можуть бути використані відомі методи навчання нейронних мереж.

При дослідженні закономірностей зміни технічного стану ДВЗ нерідко виникає ситуація, коли при нестачі кількісних даних про досліджуваних характеристиках є деякі якісні відомості, представлені, наприклад, у вигляді слабо формалізованих знань експертного співтовариства. Найбільш повно

використовувати дані відомості при ідентифікації залежності, що характеризують технічний стан паливної та запалювальної систем, можливо при використанні систем нечіткого виводу.

Можливість застосування апарату нечіткої логіки для ідентифікації залежності  $P_v = f_{CPG}(\omega_{kv}, I_{st}, U_{ab}, T_m)$  базується на наступних результатах:

1). В 1992 р. Ванг (Wang) довів теорему, згідно з якою для кожної речової безперервної функції  $G(x)$ , заданої на компактному безлічі  $U$ , і для довільного  $\varepsilon > 0$  існує нечітка експертна система, що формує вихідну функцію  $F(x)$  таку, що

$$\sup \|F(x) - G(x)\| \leq \varepsilon, \quad (6.11)$$

де  $\|\circ\|$  – символ прийнятого відстані між функціями;

2). В 1993 р. Б. Коско (B. Kosko) довів теорему про нечіткої апроксимації (Fuzzy Approximation Theorem), згідно з якою будь-яка математична система може бути апроксимована системою, заснованої на нечіткій логіці.

3). В 1995 р. Кастро (Castro) показав, що логічний контролер Мамдані при певних умовах є універсальним апроксиматором.

Одним з найбільш поширених і довели свою ефективність методів нечіткого виводу є алгоритм Мамдані, запропонований в 1975 р англійським математиком Е. Мамдані (Ebrahim Mamdani).

Використання системи нечіткого виведення відповідно до цього алгоритмом передбачає введення лінгвістичних змінних  $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_{\lambda-1}$  і  $\tilde{y}$ , відповідних входним і вихідним параметрам досліджуваних залежності. Дані змінні задаються на базових терм-множинах  $\mathbf{X}_j = \{\mathbf{x}_{ji}\}_{i=1}^{I_{x_j}}$  и  $\mathbf{Y} = \{\mathbf{y}_i\}_{i=1}^{I_y}$ , де  $I_{x_j}, I_y$  – кількість термів у відповідних терм-множин;  $j = \overline{1, \lambda - 1}$ . Кожне із значень (термів) кожної лінгвістичної змінної являє собою окрему нечітку змінну з функцією приналежності у вигляді гаусом функції з центром і варіацією  $\sigma$

$$\mu_{x_{ji}}(x_j, \sigma_{x_{ji}}, c_{x_{ji}}) = \exp\left[\frac{-(x_j - c_{x_{ji}})^2}{2\sigma_{x_{ji}}^2}\right], \quad \mu_{y_i}(y, \sigma_{y_i}, c_{y_i}) = \exp\left[\frac{-(y - c_{y_i})^2}{2\sigma_{y_i}^2}\right], \quad (6.12)$$

де  $x_j \in [x_{j.\min}, x_{j.\max}]$ ,  $y \in [y_{\min}, y_{\max}]$  – носії відповідних нечітких множин.

Для формалізації якісних знань про досліджувані характеристики складається база правил нечітких продукції, в яких умови і укладення сформульовані в термінах нечітких лінгвістичних висловлювань:

$$\begin{aligned} P_1: & \text{Якщо } \tilde{x}_1 = \mathbf{x}_{1a_1} \text{ і } \tilde{x}_2 = \mathbf{x}_{2b_1} \text{ і } \dots \text{ і } \tilde{x}_{\lambda-1} = \mathbf{x}_{2c_1} \text{ тоді } y = \mathbf{y}_{d_1}; \\ P_2: & \text{Якщо } \tilde{x}_1 = \mathbf{x}_{1a_2} \text{ і } \tilde{x}_2 = \mathbf{x}_{2b_2} \text{ і } \dots \text{ і } \tilde{x}_{\lambda-1} = \mathbf{x}_{2c_2} \text{ тоді } y = \mathbf{y}_{d_2}; \\ P_k: & \text{Якщо } \tilde{x}_1 = \mathbf{x}_{1a_k} \text{ і } \tilde{x}_2 = \mathbf{x}_{2b_k} \text{ і } \dots \text{ і } \tilde{x}_{\lambda-1} = \mathbf{x}_{2c_k} \text{ тоді } y = \mathbf{y}_{d_k} \end{aligned} \quad (6.13)$$

де  $k$  – кількість правил, що є основою правил нечітких продукції;  $a_i \in \{1, 2, \dots, Ix_1\}$ ;  $b_i \in \{1, 2, \dots, Ix_2\}$ ;  $c_i \in \{1, 2, \dots, Ix_{\lambda-1}\}$ ;  $d_i \in \{1, 2, \dots, Iy\}$ . Кожному правилу відповідає ваговий коефіцієнт  $w_i$ ,  $i = \overline{1, k}$ .

Реалізація нечіткого виведення згідно з алгоритмом Мамдані вимагає виконання ряду етапів.

1). Фазифікація, метою якої є встановлення відповідності між конкретними значеннями  $x_1^*$ ,  $x_2^*$ , ...,  $x_{\lambda-1}^*$  вхідних параметрів досліджуваних залежності і значеннями функцій належності  $\mu_{x_{ji}}(x_j^*, \sigma_{x_{ji}}, c_{x_{ji}})$ ,  $j = \overline{1, \lambda-1}$ ,  $i = \overline{1, Ix_j}$  термів лінгвістичних змінних  $\tilde{x}_1$ ,  $\tilde{x}_2$ , ...,  $\tilde{x}_{\lambda-1}$ , відповідних цим параметрам;

2). Агрегування передумови в нечітких правилах, яке представляє собою процедуру визначення ступеня істинності  $\gamma_i$ ,  $i = \overline{1, k}$  умов по кожному з правил системи нечіткого виведення. При цьому ступінь істинності кожної передумови  $\beta_{ji}$ ,  $j = \overline{1, \lambda-1}$ ,  $i = \overline{1, k}$  визначається значенням функції приналежності відповідного терму. Для визначення результату нечіткої кон'юнкції (зв'язка «І»)

може бути використана функція  $\min$ , а для визначення результату нечіткої диз'юнкції (зв'язка «АБО») - функція  $\max$

$$\gamma_i = w_i \cdot \min_{j=1, \overline{\lambda-1}} \{\beta_{ji}\}; \quad \gamma_i = w_i \cdot \max_{j=1, \overline{\lambda-1}} \{\beta_{ji}\}, \quad i = \overline{1, k}; \quad (6.14)$$

3). Активація заключень в нечітких правилах, яка представляє собою процедуру визначення ступеня істинності заключення кожного правила у вигляді нечітких множин з функціями належності  $\mu'_{y_i}(y)$ ,  $i = \overline{1, k}$  і виконується згідно виразу

$$\mu'_{y_i}(y) = \min\{\gamma_i, \mu_{y_i}(y)\}, \quad (6.15)$$

де  $\mu_{y_i}(y)$  – функції приналежності термів вихідної лінгвістичної змінної, що входять до підзаключень  $i$ -го правила бази правил нечітких продукції;

4). Акумуляція висновків нечітких правил, що представляє собою процедуру об'єднання нечітких множин, що відповідають термам підзаключень вихідний лінгвістичної змінної окремих правил

$$\mu_y(y) = \max_{i=1, k} \{\mu'_{y_i}(y)\}. \quad (6.16)$$

5). Дефазифікація вихідної змінної, що забезпечує визначення її звичайного (НЕ нечіткого) значення, може бути виконана з використанням методу центру тяжіння

$$y^* = \frac{\int_{y_{\min}}^{y_{\max}} y \cdot \mu_y(y) dy}{\int_{y_{\min}}^{y_{\max}} \mu_y(y) dy}. \quad (6.17)$$

Розглянута система нечіткого виведення може здійснювати грубу апроксимацію залежності, що характеризує знос ЦПГ і КШМ. Точність такої апроксимації визначається параметрами задаються лінгвістичних змінних, а також якістю і повнотою бази правил нечітких продукції, які акумулюють в собі апріорну інформацію про досліджувані явища.

Для збільшення точності апроксимації необхідно здійснити адаптацію системи нечіткого виведення до особливостей досліджуваних процесів з використанням масивів експериментально отриманих даних  $\left\{ \left( \hat{P}_v^n, \hat{\omega}_{kv}^n, \hat{I}_{st}^n, \hat{U}_{ab}^n, \hat{T}_m^n \right) \right\}_{n=1}^{N_{CPG}}$  – характеризують технічний стан силової установки гібридного автомобіля.

Процес адаптації полягає в оптимізації вектору параметрів  $\mathbf{P} = \left[ w_i, \sigma_{x_{ji}}, c_{x_{ji}}, \sigma_{y_m}, c_{y_m} \right]$ ,  $i = \overline{1, k}$ ,  $j = \overline{1, \lambda - 1}$ ,  $l = \overline{1, l_x}$ ,  $m = \overline{1, l_y}$ , системи нечіткого виведення, елементами якого є значення вагових коефіцієнтів правил нечітких продукції і параметри функцій приналежності термів лінгвістичних змінних.

Оптимальний вектор параметрів  $\tilde{\mathbf{P}}$  при дослідженні характеристики технічного стану силової установки гібридного автомобіля визначається виразом

$$\tilde{\mathbf{P}} = \arg \min_{\mathbf{P}} \left\{ \frac{1}{N_{CPG}} \sum_{n=1}^{N_{CPG}} \left( \hat{P}_v^n - P_{v.CPG}(\mathbf{X}_n, \mathbf{P}) \right)^2 \right\}, \quad (6.18)$$

де  $P_{v.CPG}$  – вихідний сигнал системи нечіткого виведення з параметрами, апроксимуючої характеристику технічного стану ДВЗ, при подачі на її вхід вектору  $\mathbf{X}_n = \left[ \hat{\omega}_{kv}^n, \hat{I}_{st}^n, \hat{U}_{ab}^n, \hat{T}_m^n \right]$ ,  $n = \overline{1, N_{CPG}}$ .



## 7. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГІБРИДНОЇ СИЛОВОЇ УСТАНОВКИ

Для визначення технічного стану силової установки гібридного автомобіля та отримання обґрунтованих діагностичних параметрів були проведені експериментальні дослідження на гібридному автомобілі Toyota Prius з метою визначити зміни напруги та струму. Це дозволило визначити в умовах експлуатації межі зміни зарядного струму та напруги АКБ і режими роботи ДВЗ.

Для дослідження технічного стану гібридної силової установки автомобіля Toyota Prius було використано бортовий вимірювальний комплекс, який розроблено в Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті. Основою вимірювального комплексу є АЦП з інтерфейсом ISA типу PCL-711. В якості програмного забезпечення був обраний пакет Advantec Genidaq 7.1. Крім того для вимірювання таких параметрів, як час впорскування палива, масова витрата повітря, оберти електричних машин був використаний мотортестер MODIS.

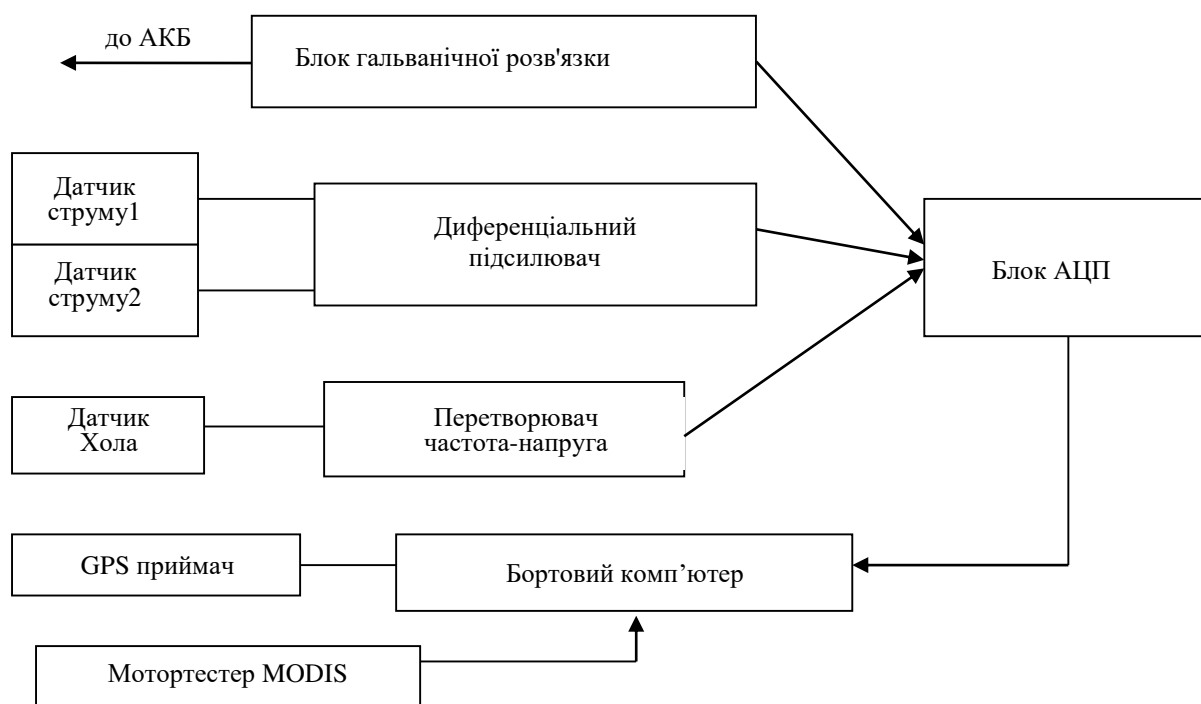


Рисунок 7.1 – Структурна схема вимірювального комплексу

Для вимірювання струмів генератора MG1 та електродвигуна MG2 був застосований датчик, на основі двох датчиків Хола типу SS49E в диференціальному включенні, встановлений у корпусі інвертора (рис. 7.1) на шині генератора MG1 (рис. 7.2). Тоді відповідно до першого закону Кірхгофа

$$I_{MG2} = I_{AKB} - I_{MG1} \quad (7.1)$$

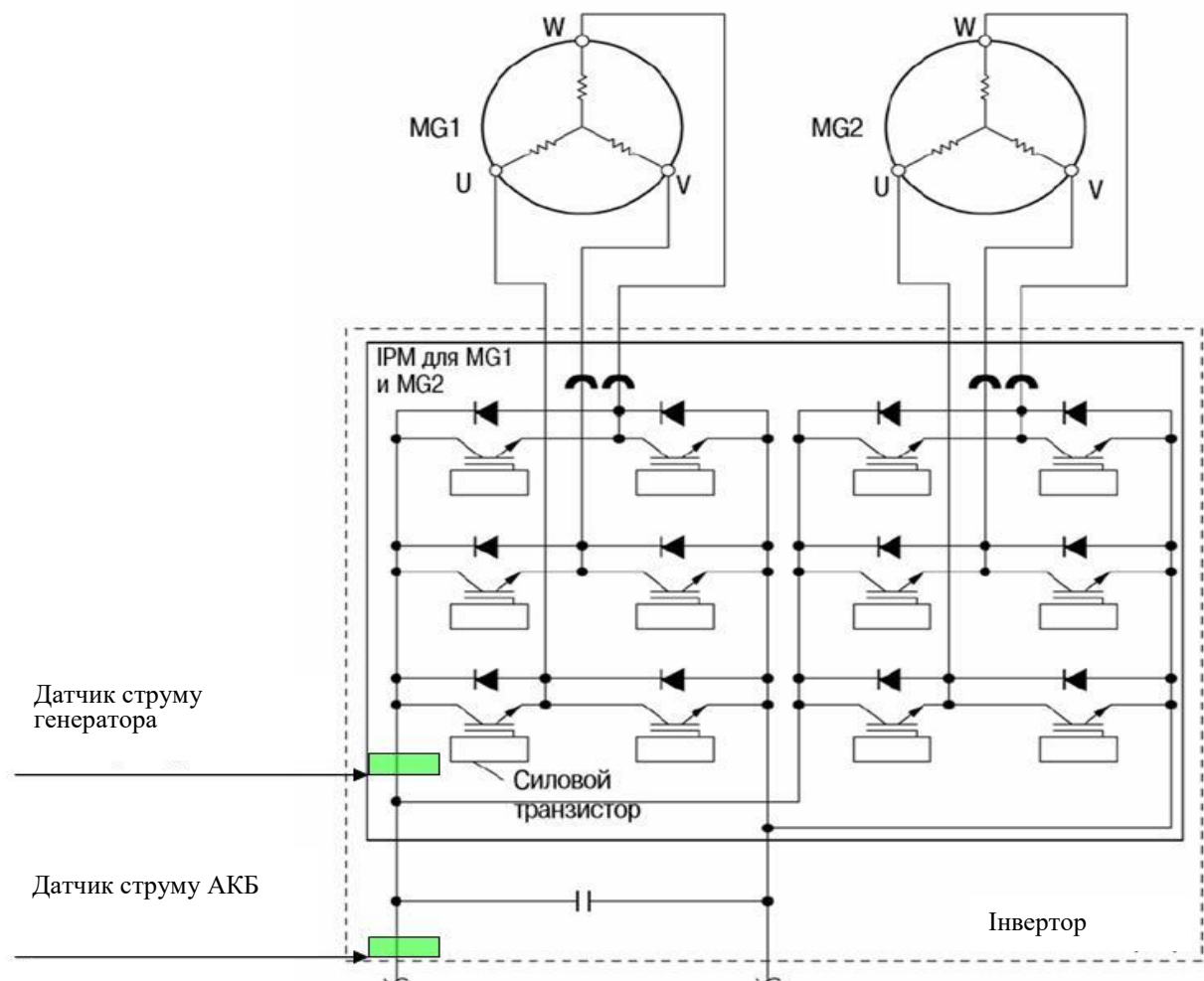


Рисунок 7.2 – Схема підключення датчиків струму

Для посилення сигналу з датчика струму генератора використовується диференційний підсилювач на основі двох операційних підсилювачів типу AD 820 (рис. 7.4).

Для вимірювання струму АКБ використовується датчик CSNA 111 безконтактного типу на основі ефекту Хола (рис.7.5, 7.6)

Для вимірювання оборотів ДВЗ використовується датчик Хола типу SS411, встановлений безпосередньо на котушці запалювання (рис. 7.3). Принципова схема тахометра (рис. 7.8).

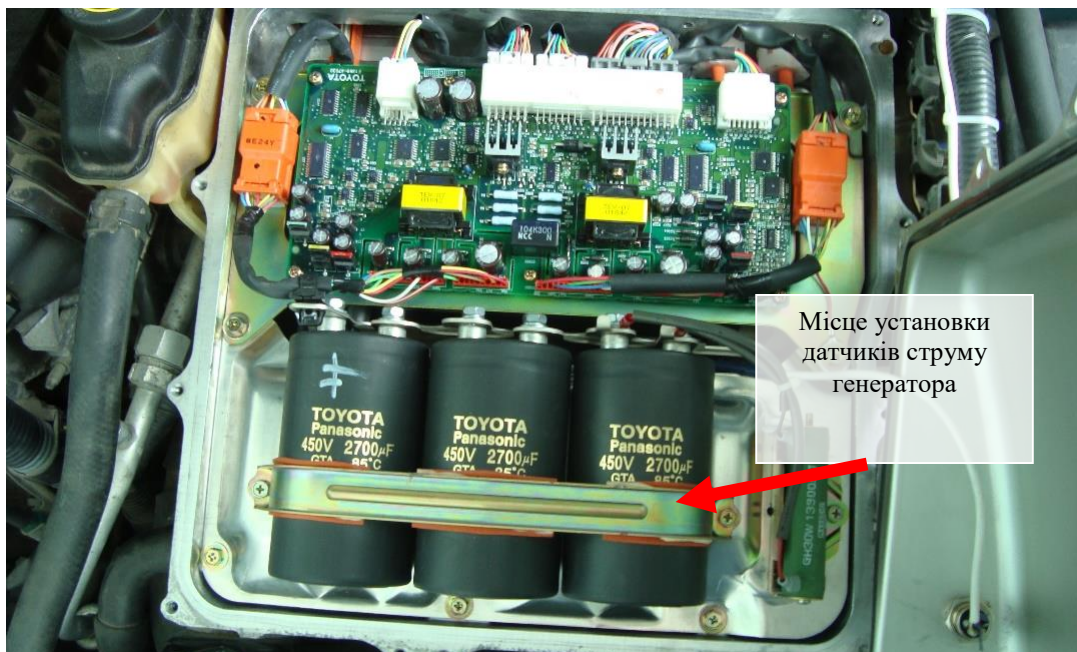


Рисунок 7.3 – Місце встановлення датчиків струму

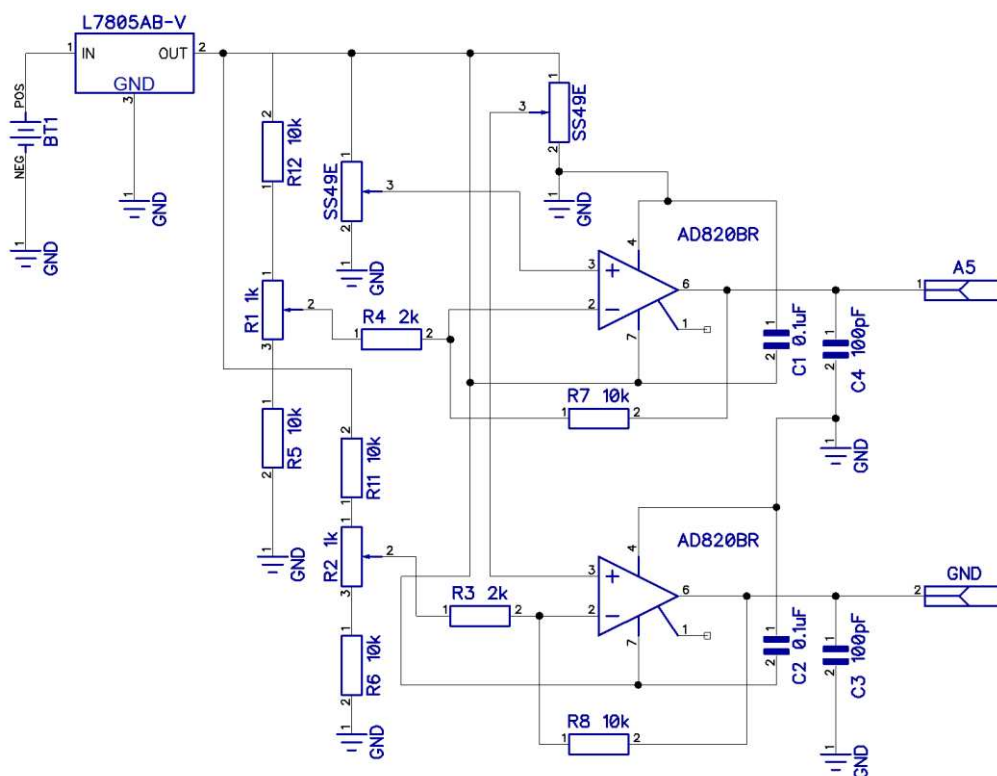


Рисунок 7.4 – Підсилювач сигналу датчиків струму генератора

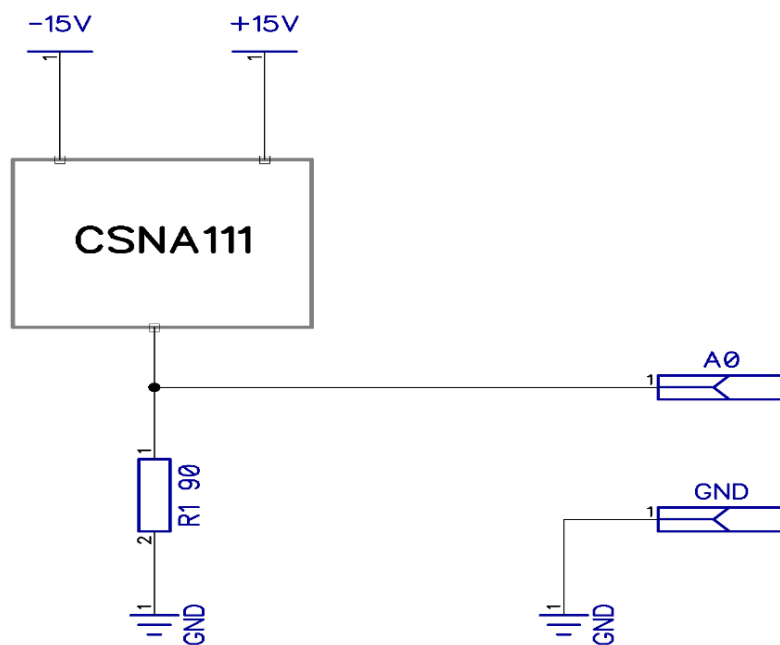


Рисунок 7.5 – Схема підключення датчика струму АКБ

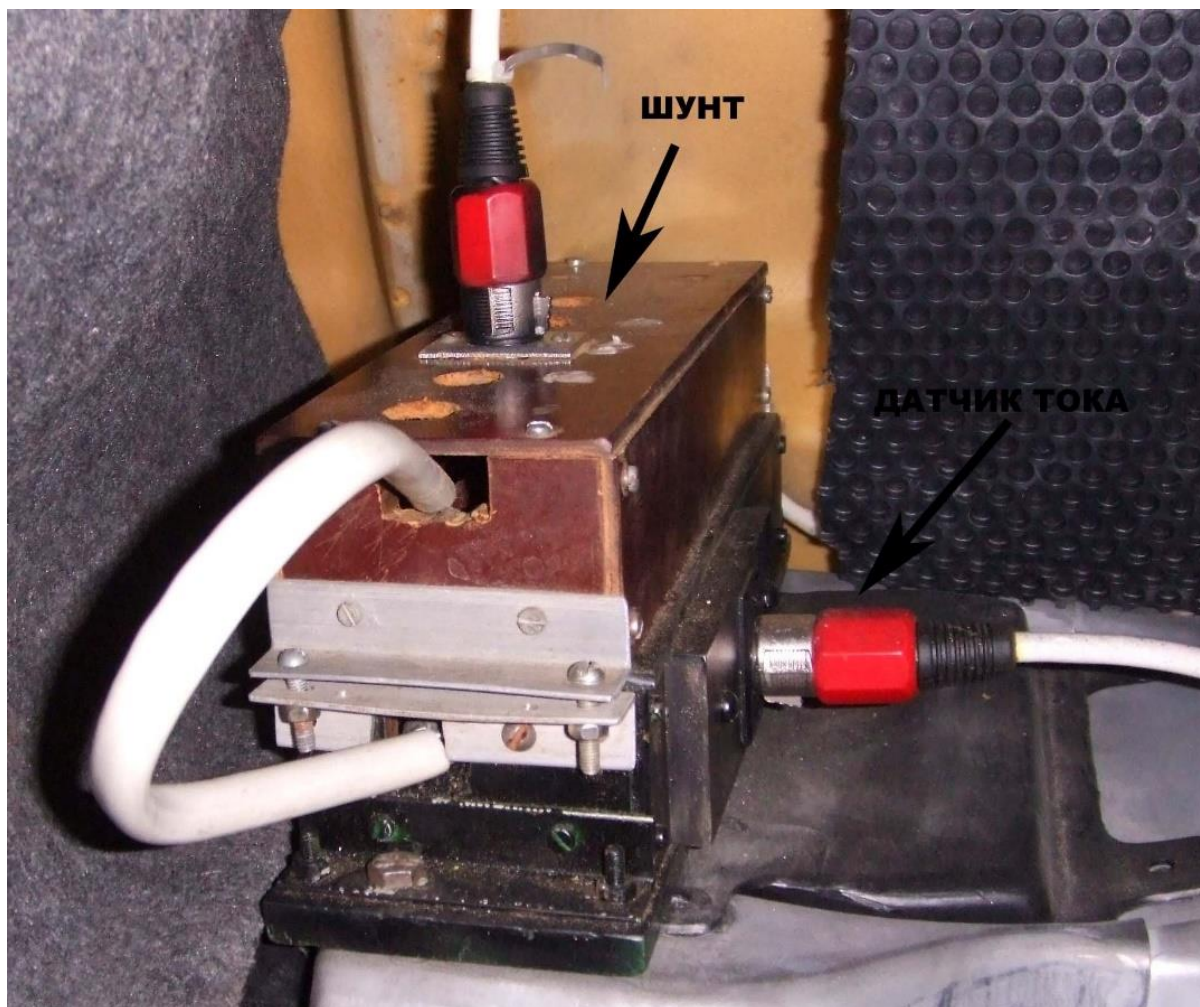


Рисунок 7.6 – Датчик струму АКБ

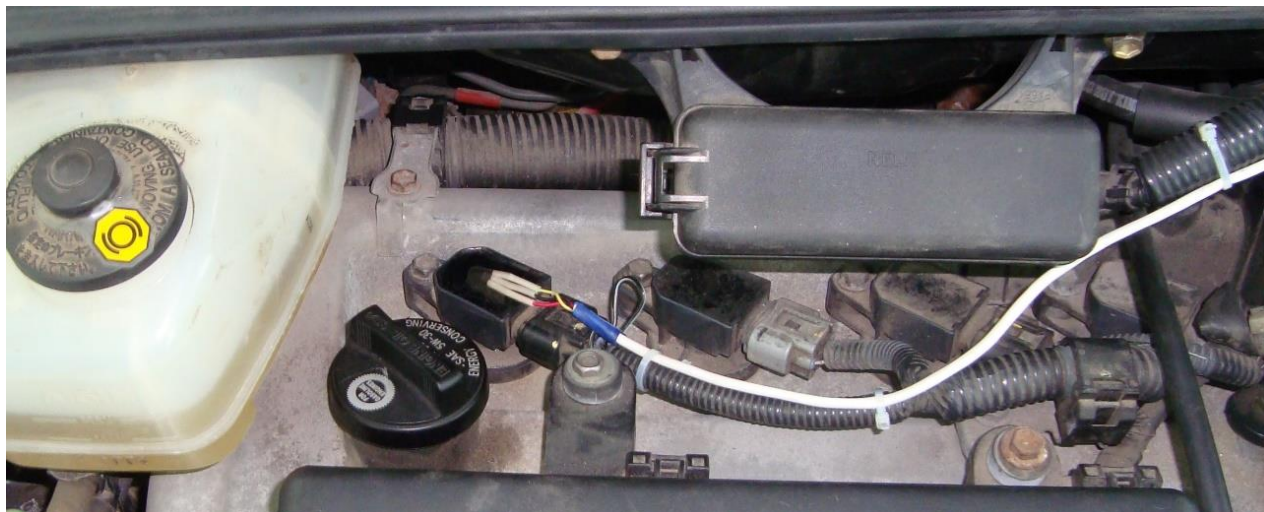


Рисунок 7.7 – Датчик тахометра ДВЗ

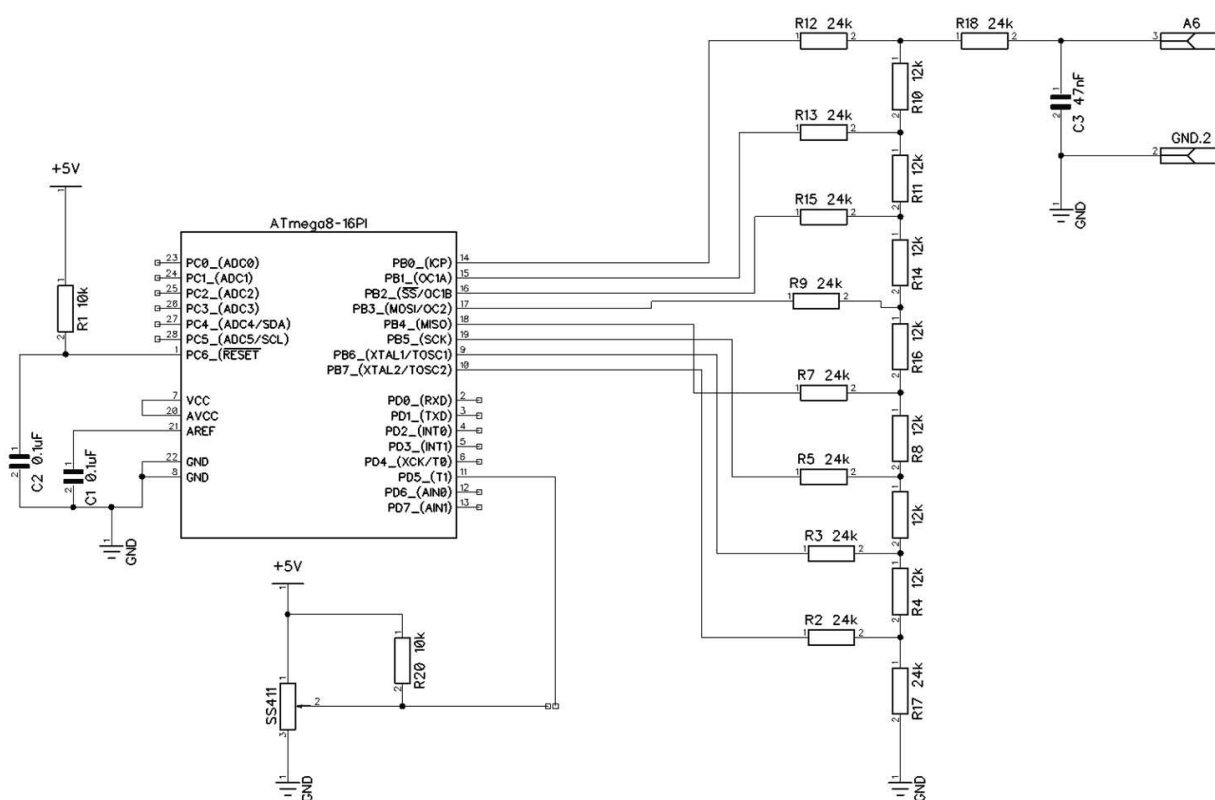


Рисунок 7.8 – Принципова схема тахометра

Вимірювання швидкості руху автомобіля проводиться за допомогою датчика швидкості колеса, що входить до складу АБС. Принципова схема каналу вимірювання швидкості (рис. 7.9).

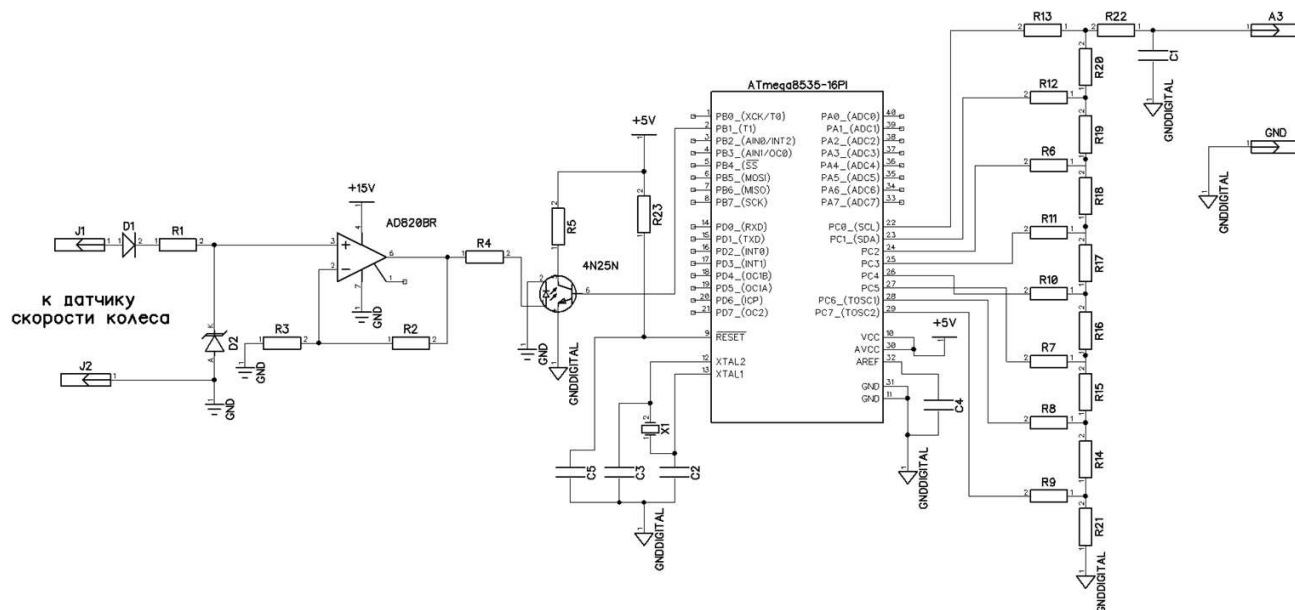


Рисунок 7.9 – Принципова схема каналу вимірювання швидкості

Тарування датчика швидкості відбувається за допомогою GPS приймача BU-353.

Для вимірювання напруги тягової АКБ використовується гальванічне розв'язаний підсилювач на основі високо-лінійного оптрона HCNR 200 (рис. 7.10 – 7.13).

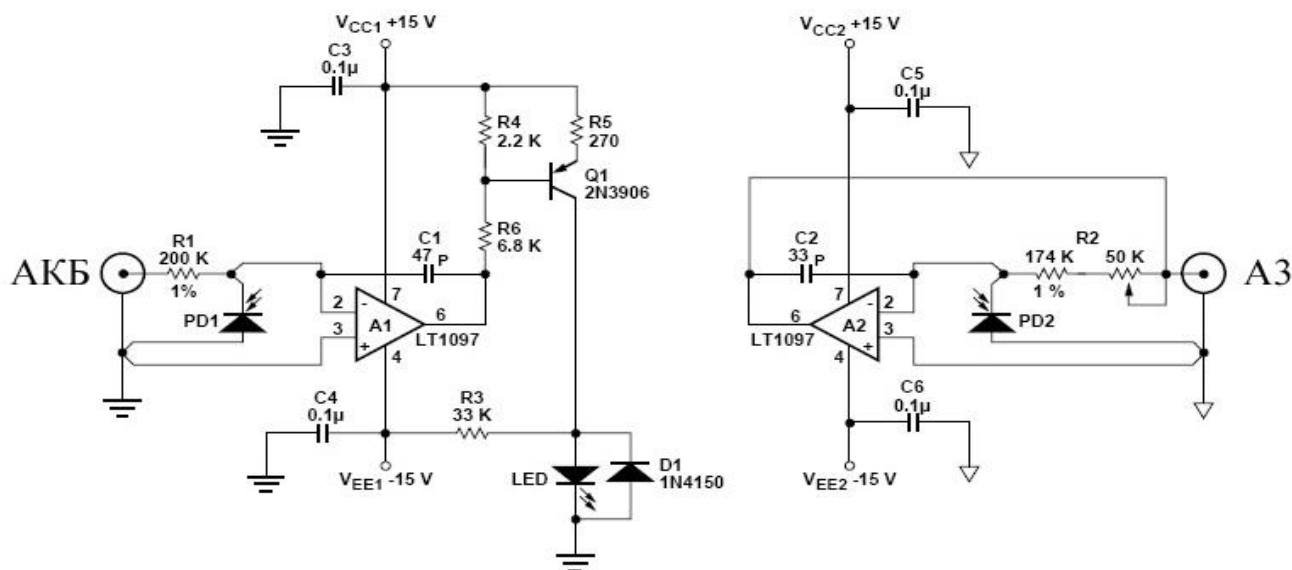


Рисунок 7.10 – Гальванічна розв'язка каналу вимірювання високої напруги

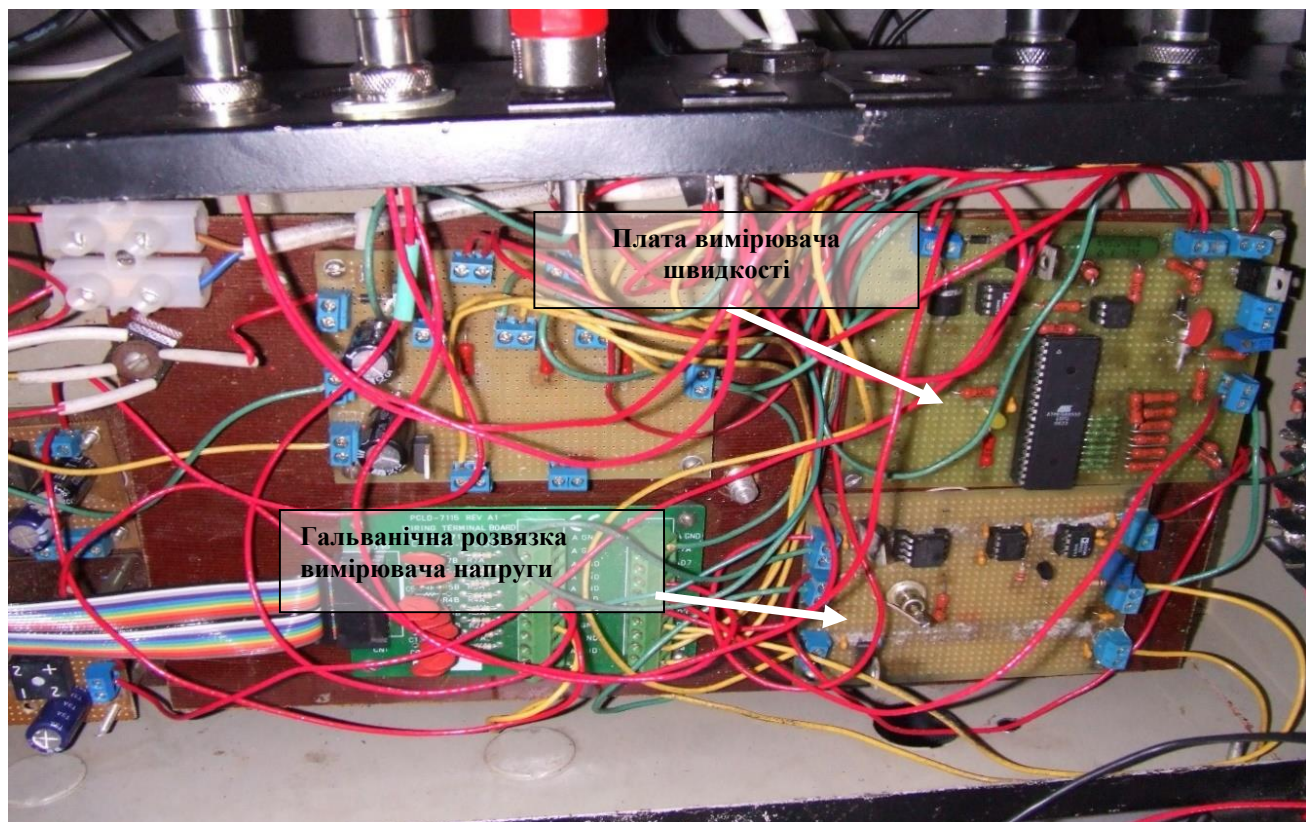


Рисунок 7.11 – Основний модуль

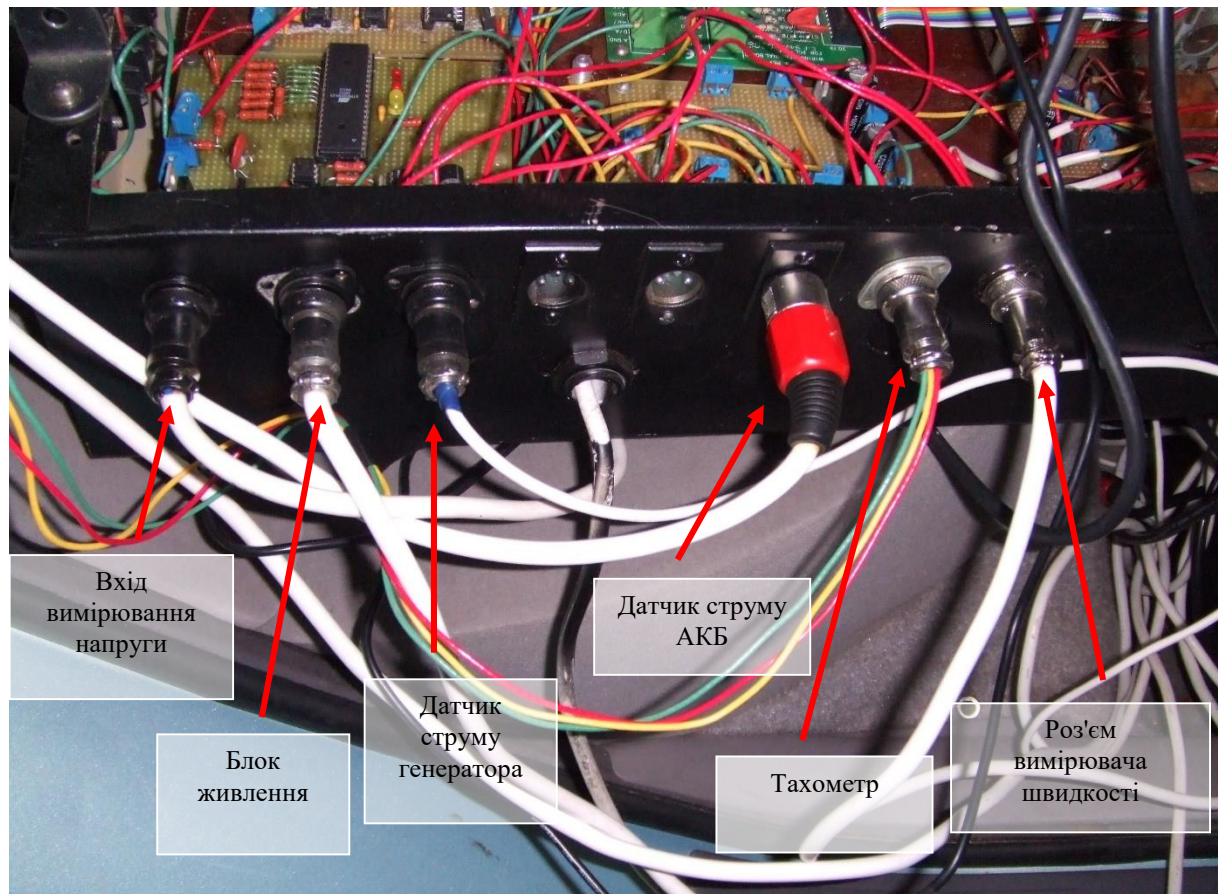


Рисунок 7.12 – Схема підключення датчиків

Сигнали з датчиків надходять в основний модуль (рис. 7.13), де відбувається їх перетворення до виду придатного для вимірювання за допомогою АЦП. Вимірювальний комплекс на автомобілі та його інтерфейс (рис. 7.13).

Для дослідження паливної системи ДВЗ ГСУ було розроблено лабораторний стенд для визначення технічного стану електромагнітних форсунок розподіленої системи впорскування палива (рис. 7.14). Для отримання сигналів з датчиків синхронізації роботи електронних систем відповідно до положення колінчатого та розподільчого валів на стенді передбачено електропривод з частотою обертання ведучого шківa 1500 об/хв.

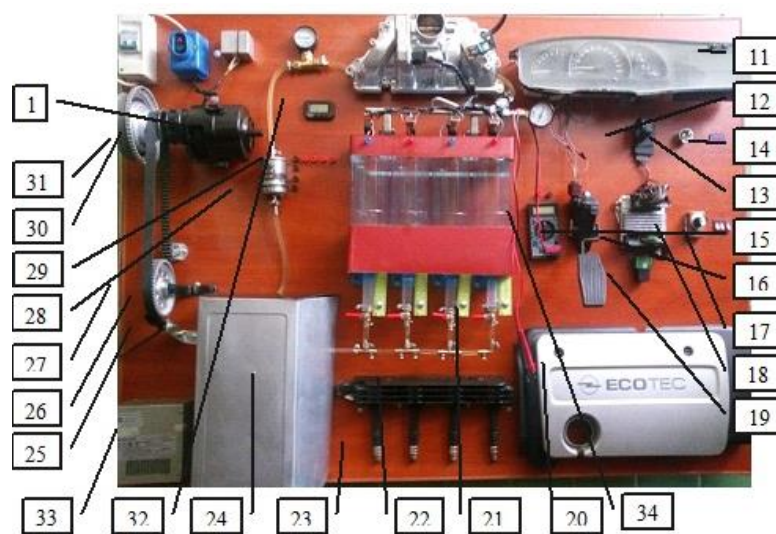
Додатково стенд обладнаний електронним модулятором кількості керуючих імпульсів 11, що подаються на блок керування 12 для імітації режимів роботи ДВЗ на різних частотах обертання колінчастого валу. Величина з імітованої частоти обертання контролюється за показами електронного тахометра розміщеного на панелі приладів 8. Тиск, що створюється електронасосом в системі паливоподачі визначається за показами манометра 3, тиск у паливній рампі 7 контролюється додатковим манометром. За потреби, керування дросельною заслінкою здійснюється педаллю акселерометра (поз. 5, 14). Візуальний контроль сигналу керування електромагнітними форсунками проводиться за увімкненням відповідних світлодіодів (поз.6). Якість розпилення палива окремими форсунками можна спостерігати через прозорі стінки колби 16 у нижній частині яких закріплені мірні колби 15 для визначення кількості пального, що подається кожною форсункою за визначений інтервал часу.

Після вимірювання паливо через запірні крани зливається у паливний бак 18. Вимірювання електричних параметрів у контрольних точках електричної схеми стенда здійснюється портативним мультиметром через роз'єми 2. Для діагностування роботи електронної системи передбачено діагностичний роз'єм 9.





Рисунок 7.13 – Вимірювальний комплекс на автомобілі



- 1 – пульт увімкнення стенда; 2 – роз'єми для вимірювання параметрів контрольних точок електричної схеми стенду; 3 – манометр магістралі живлення паливом; 4 – таймер; 5 – впускний колектор з дросельною заслінкою; 6 – електромагнітна форсунка і світловий сигналізатор роботи форсунки; 7 – паливна рампа; 8 – панель приладів тахометра; 9 – діагностичний роз'єм; 10 – імобілайзер; 11 – регулятор імпульсів; 12 – блок керування; 13 – реле насоса і форсунок; 14 – електровузол передачі акселератора; 15 – мірна колба; 16 – колби для визначення якості розпилення палива; 17 – модуль запалення; 18 – паливний бак з електричним бензонасосом; 19 – блок живлення автомобільного електрообладнання; 20 – датчики синхронізації роботи електронних систем з положенням колінчастого валу ДВЗ.

Рисунок 7.14 – Лабораторний стенд для діагностування технічного стану електромагнітних форсунок розподіленої системи впорскування ДВЗ

У ході проведення дорожніх випробувань на автомобілі Toyota Prius було визначено наступне:

– Режим руху на електротязі при рівномірному русі і зарядженому акумуляторі: визначити швидкість руху автомобіля при якій включається ДВЗ, потужність електродвигуна при включенні ДВЗ, потужність рециркуляції енергії через генератор. Дані параметри необхідні для з'ясування тієї межі потужності ДВЗ яка нераціональна при рівномірному русі.

– Режим руху на електротязі на крутий підйом. Необхідно визначити максимальну потужність електродвигуна при якій включається ДВЗ, незалежно від швидкості руху. Даний параметр також необхідний для визначення меж використання ДВЗ.

– Спільна робота електродвигуна і ДВЗ при рівномірному русі. Визначення синергетичного впливу електросилових агрегатів в процентному співвідношенні залежно від швидкості руху і запасу енергії в акумуляторі. Вимірюються потужність електродвигуна, обороти ДВЗ, витрата палива, швидкість руху, рециркуляція енергії генератора.

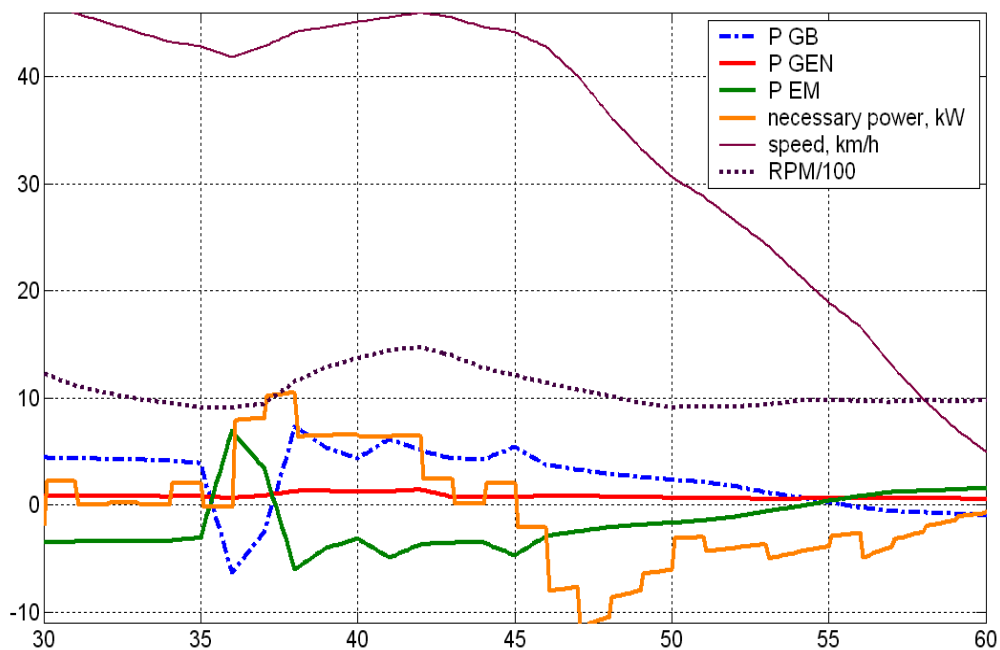
– Визначається яка величина потужності йде на заряд АКБ, впливає на питому витрату палива.

– Спільна робота електродвигуна і ДВЗ при прискоренні відповідному європейському міському циклу (до  $1\text{ м/с}^2$ ). Визначення процентного впливу ДВЗ і електродвигуна на потужні показники силової установки.

– Спільна робота електродвигуна і ДВЗ при максимальному прискоренні.

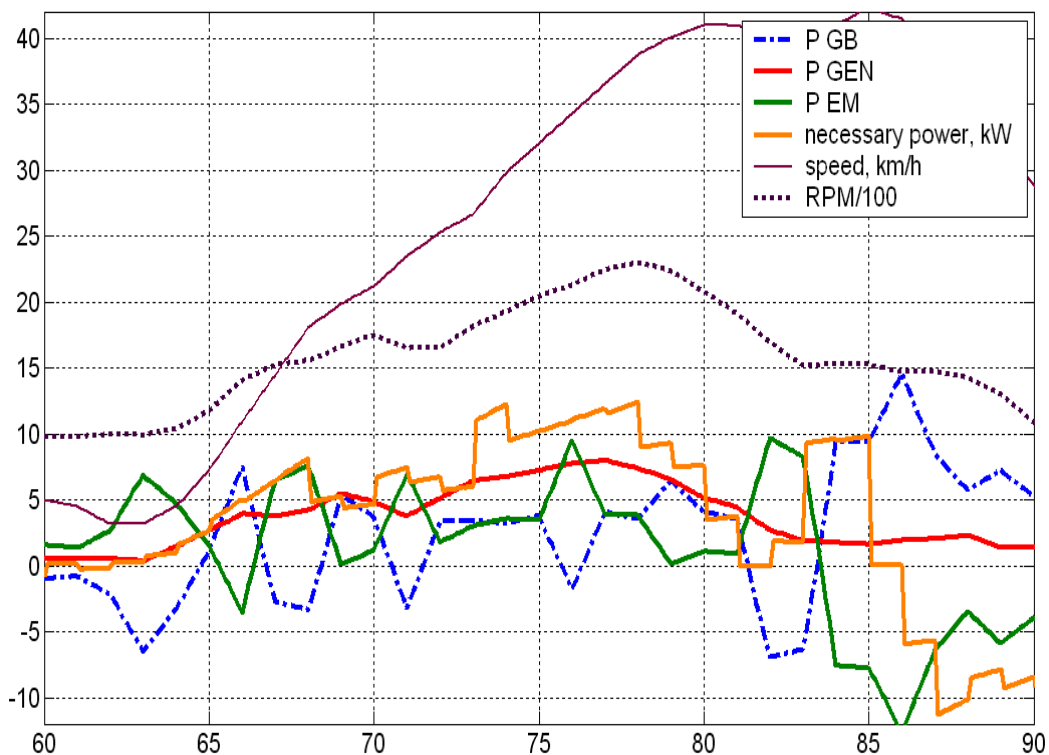
Вимірюються потужності електромашин, обороти ДВЗ і прискорення автомобіля.

Типові приклади оброблених вимірювань розподілів потоків енергії при різних режимах руху (рис. 7.15 – 7.18).



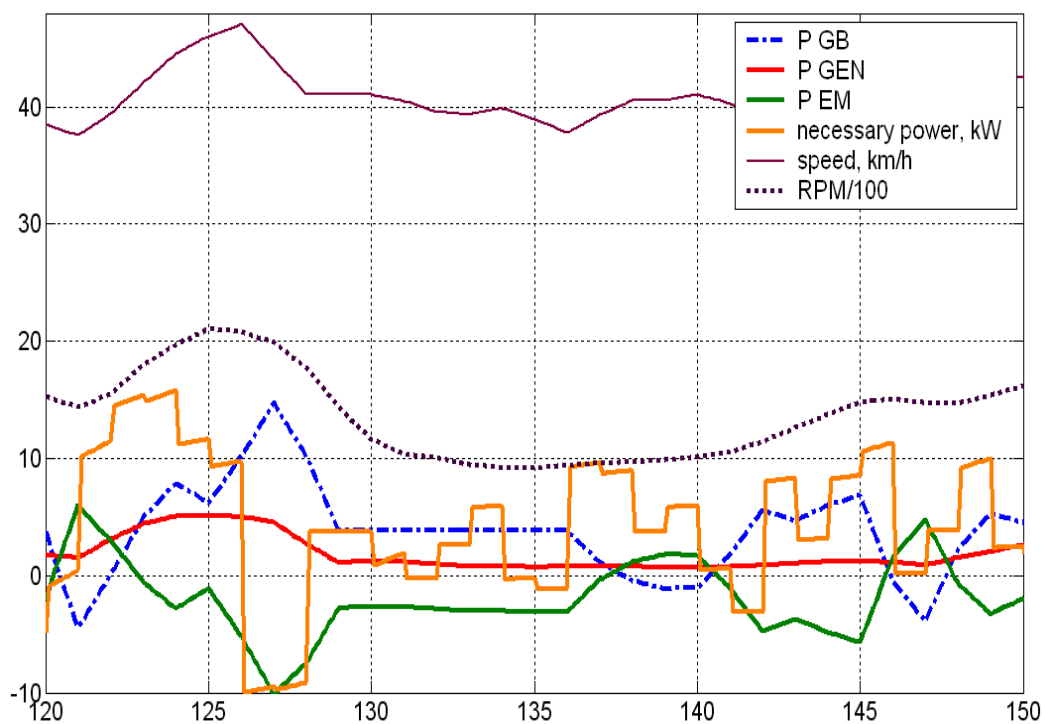
P GB – потужність АКБ, кВт; P GEN – потужність генератора, кВт; P EM – потужність електродвигуна, кВт;  
 necessary power – потужність, необхідна для руху або яка повертається при рекуперації, кВт; speed - швидкість,  
 км/ч; RPM/100 – обороти ДВЗ/100

Рисунок 7.15 – Розподіл потоків енергії з 30 по 60 секунду руху



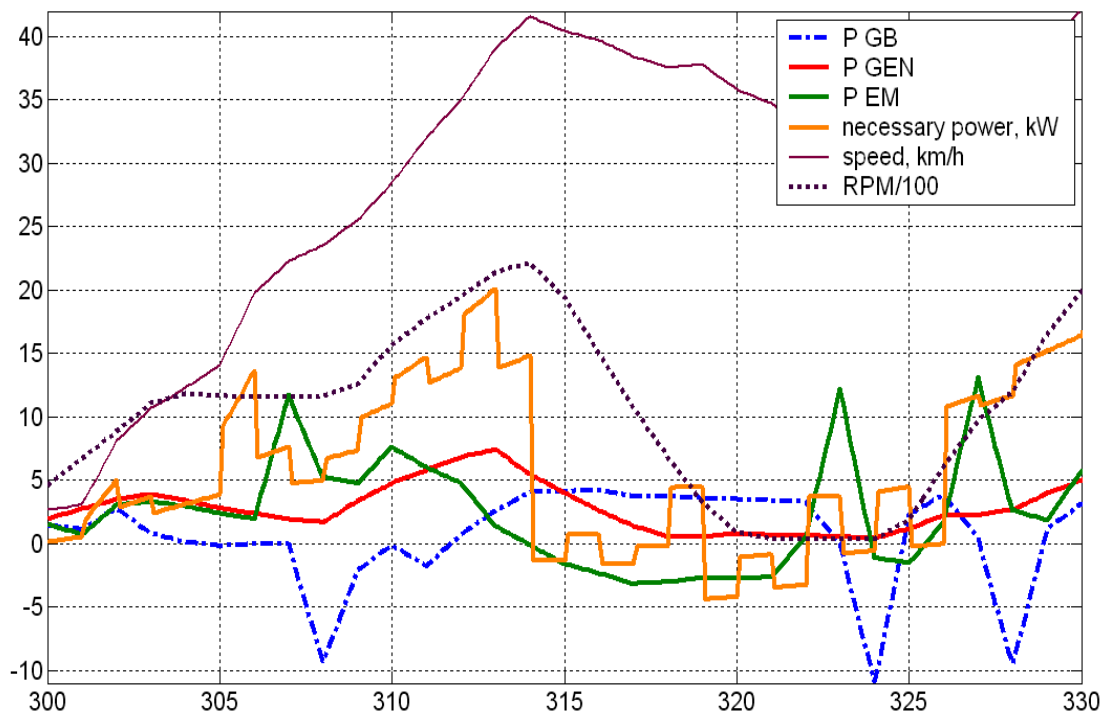
P GB – потужність АКБ, кВт; P GEN – потужність генератора, кВт; P EM – потужність електродвигуна, кВт;  
 necessary power – потужність, необхідна для руху або яка повертається при рекуперації, кВт; speed - швидкість,  
 км/ч; RPM/100 – обороти ДВЗ/100

Рисунок 7.16 – Розподіл потоків енергії з 60 по 90 секунду руху



P GB – потужність АКБ, кВт; P GEN – потужність генератора, кВт; P EM – потужність електродвигуна, кВт;  
 necessary power – потужність, необхідна для руху або яка повертається при рекуперації, кВт; speed – швидкість,  
 км/ч; RPM/100 – обороти ДВЗ/100

Рисунок 7.17 – Розподіл потоків енергії з 120 по 150 секунду руху



P GB – потужність АКБ, кВт; P GEN – потужність генератора, кВт; P EM – потужність електродвигуна, кВт;  
 necessary power – потужність, необхідна для руху або яка повертається при рекуперації, кВт; speed – швидкість,  
 км/ч; RPM/100 – обороти ДВЗ/100

Рисунок 7.18 – Розподіл потоків енергії з 300 по 330 секунду руху.

Дослідження проведені на автомобілі “Prius” показали, що для руху в міському циклі до швидкості 40 км/год з акумуляторної батареї відбирається потужність у середньому 15 кВт при прискоренні до 1 м/сек<sup>2</sup>.

Для визначення експериментальних залежності кількості палива, що вприскується кожною форсункою за певний період часу ми отримуємо залежність дійсної кількості палива від часу вприскування форсунок при певних обертах колінчастого валу в межах 1000...3000 об/хв. При цьому, тиск вприскування кожної форсунки є однаковим при дослідженнях.

При визначенні залежності кількості палива від часу вприску, при обертах колінчастого валу 3000 об/хв. максимальний час роботи форсунок становить 20 сек. з періодичністю фіксацій 10 сек. (рис. 7.19, табл. 7.1).

При визначенні залежності кількості палива від часу вприску, при обертах колінчастого валу 2000 об/хв. відповідно час (наповнюваності) більший з періодичністю фіксації 15 сек. (рис. 7.20, табл. 7.2).

При визначенні залежності кількості палива від часу вприску, при обертах колінчастого валу 1000 об/хв. відповідно час (наповнюваності) більший з періодичністю фіксації 30 сек. (рис. 7.21, табл.7.3), адже метою дослідів є визначення експериментальної залежності кількості палива, що вприскується кожною форсункою за певний період часу.

Оскільки тиск вприскування кожної форсунки є однаковим, в результаті дослідження отримуємо залежність дійсної кількості палива від часу вприскування форсунок при певних обертах колінчастого валу (імітованих).

При дослідженнях велися візуальні спостереження за характеристикою якості розпилення пального та конусом розпилення кожної електромагнітної форсунки

При визначенні залежності кількості палива від часу вприску, при обертах колінчастого валу 2000 об/хв. відповідно час (наповнюваності) більший з періодичністю фіксації 15 сек., що показано в таблиці 7.1 (рис 7.22).

Таблиця 7.1 - Залежність кількості палива від часу впорскування, при обертах колінчастого валу 3000 хв<sup>-1</sup>

Форсунка	t, с	
	Дійсна кількість палива, що впорскується форсунками, мл	
	10	20
Форсунка №1 (тиск впорскування 1,5 Атм)	8,2	12,8
Форсунка №2 (тиск впорскування 1,5 Атм)	3,4	8,6
Форсунка №3 (тиск впорскування 1,5 Атм)	4,8	5,6
Форсунка №4 (тиск впорскування 1,5 Атм)	7,8	11,8

Таблиця 7.2 - Залежність кількості палива від часу впорскування, при обертах колінчастого валу 2000 хв<sup>-1</sup>

Форсунка	t, с	
	Дійсна кількість палива, що впорскується форсунками, мл	
	15	30
Форсунка №1 (тиск впорскування 1,5 Атм)	9,8	15
Форсунка №2 (тиск впорскування 1,5 Атм)	3,8	6
Форсунка №3 (тиск впорскування 1,5 Атм)	5,6	6,6
Форсунка №4 (тиск впорскування 1,5 Атм)	8,2	11,4

При визначенні залежності кількості палива від часу впорскування, при обертах колінчастого валу 1000 об/хв. відповідно час (наповнюваності) більший з періодичністю фіксації 30 сек., що показано в таблиці 7.3 (рис 7.23, дослід 1).

Таблиця 7.3 - Залежність кількості палива від часу впорскування, при обертах колінчастого валу  $2000 \text{ хв}^{-1}$

Форсунка	t, с	
	Дійсна кількість палива, що впорскується форсунками, мл	
	30	60
Форсунка №1 (тиск впорскування 1,5 Атм)	9	14,4
Форсунка №2 (тиск впорскування 1,5 Атм)	4,6	15
Форсунка №3 (тиск впорскування 1,5 Атм)	4,2	7,6
Форсунка №4 (тиск впорскування 1,5 Атм)	8,4	11,8

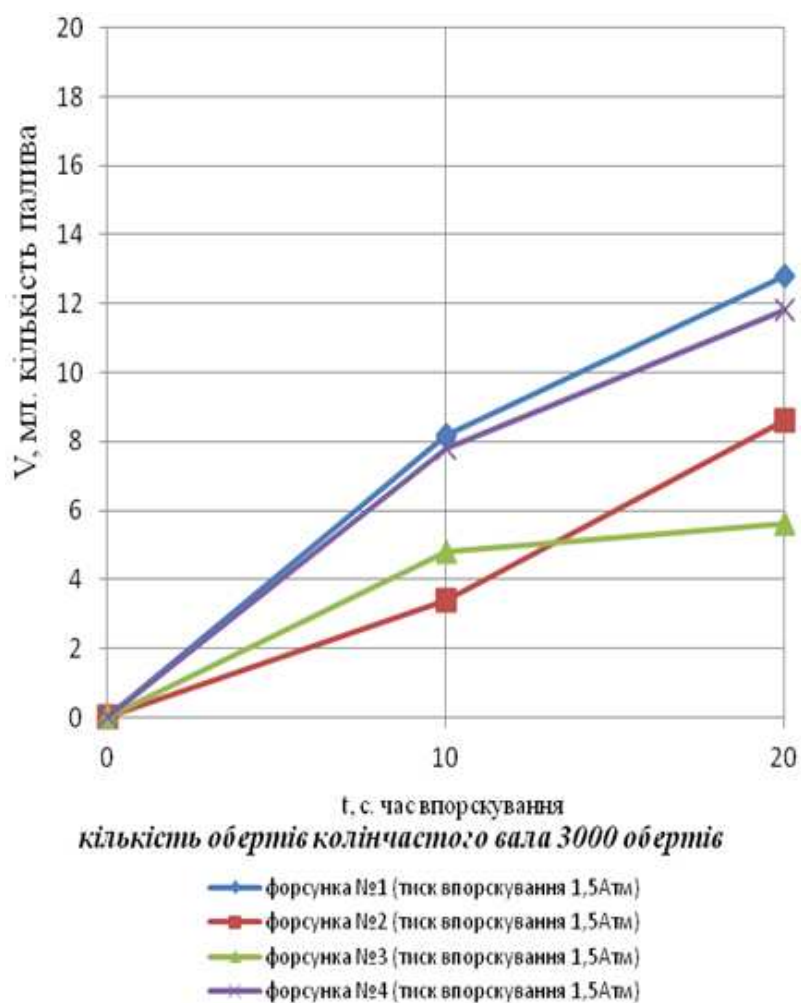


Рисунок 7.20 – Графік залежності кількості палива від часу впорскування

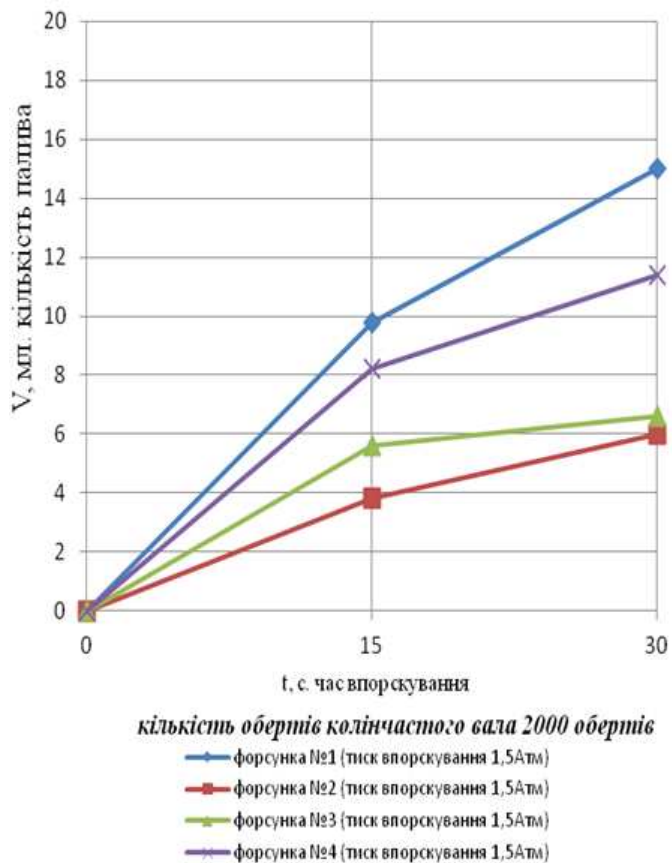


Рисунок 7.21 – Графік залежності кількості палива від часу впорскування

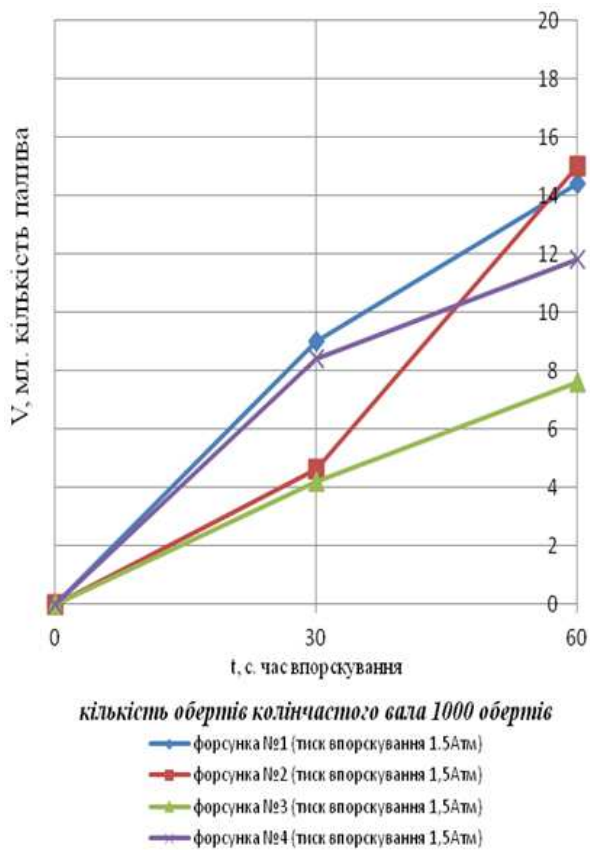


Рисунок 7.22 – Графік залежності кількості палива від часу впорскування



Метою досліджень є визначення експериментальних залежності кількості палива, що вприскується кожною форсункою за певний період часу. Оскільки тиск вприскування кожної форсунки є однаковим, в результаті досліджень отримано залежності дійсної кількості палива від часу вприскування форсунок при певних обертах колінчастого валу (імітованих).

Метою досліджень «змішаного циклу» є визначення вприску палива в змішаному циклі роботи, оберти змінюються протягом деякого часу (плавно збільшуються відповідно від обертів холостого ходу (в межах 900...2000). При цьому максимальний час роботи форсунок 40 сек. Збільшення обертів здійснюється за допомогою модулятора (регулятора імпульсів), а значення спостерігаються на тахометрі панелі приладів. (табл. 7.4, рисунок 7.23)

Таблиця 7.4 – Залежність кількості палива від часу вприску в змішаному циклі до  $2000 \text{ хв}^{-1}$

Форсунка	t, с			
	Дійсна кількість палива, що вприскується форсунками, мл			
	15	20	30	40
Форсунка №1 (тиск вприскування 1,5 Атм)	6,8	10,8	11	14,2
Форсунка №2 (тиск вприскування 1,5 Атм)	7	10	10,8	13,8
Форсунка №3 (тиск вприскування 1,5 Атм)	5,4	7,4	8,6	11,6
Форсунка №4 (тиск вприскування 1,5 Атм)	6,4	8,6	9,6	12,4

При визначенні залежності кількості палива від часу вприскування в змішаному циклі більше  $2000 \text{ об/хв}$ . ( $2000...3000$ ), час роботи форсунок як і в попередньому дослідженні максимальні 40 сек. (таблиця 7.5, рисунок 7.24)

Таблиця 7.5 – Залежність кількості палива від часу вприску в змішаному циклі більше  $2000 \text{ хв}^{-1}$

Форсунка	t, с			
	Дійсна кількість палива, що вприскується форсунками, мл			
	15	20	30	40
Форсунка №1 (тиск вприскування 1,5 Атм)	9,3	11,7	13,4	16,1
Форсунка №2 (тиск вприскування 1,5 Атм)	8,6	13,2	12,4	15,6
Форсунка №3 (тиск вприскування 1,5 Атм)	10,7	10	8,8	12,5
Форсунка №4 (тиск вприскування 1,5 Атм)	8,9	8	10,9	13,3

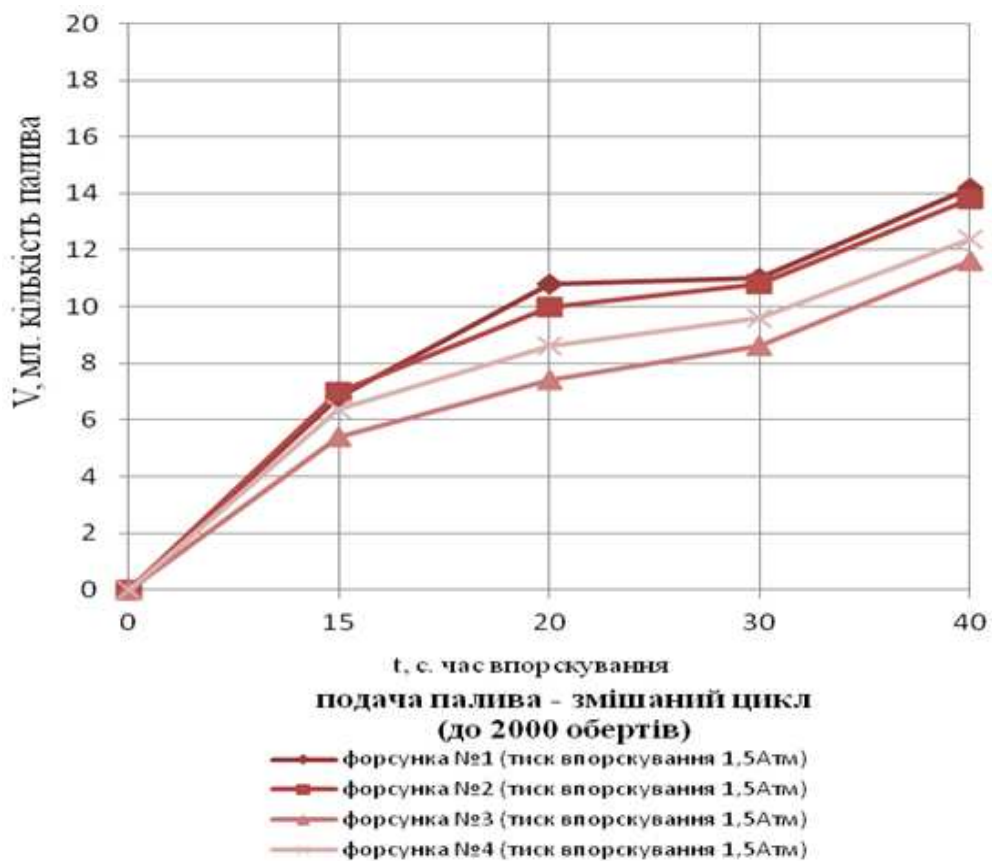


Рисунок 7.23 – Графік залежності кількості палива від часу впорскування

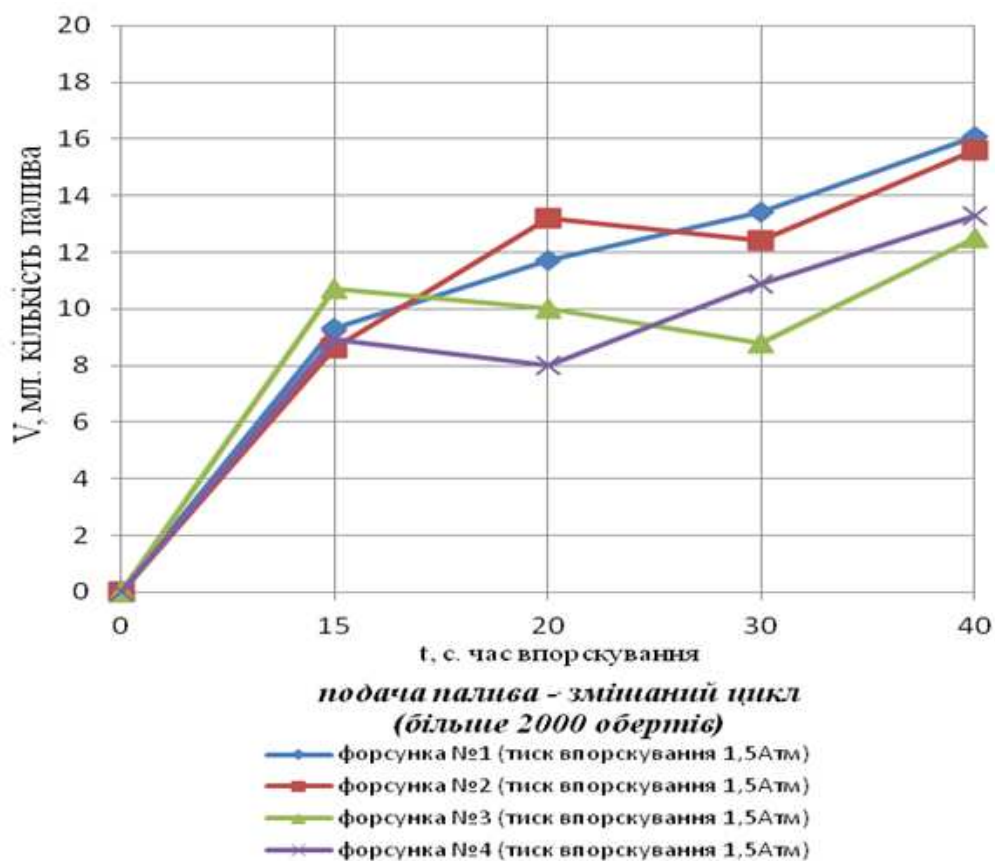


Рисунок 7.24 – Графік залежності кількості палива від часу впорскування

Під час експериментальних досліджень визначено та проаналізовано продуктивність подачі палива окремими форсунками при різних імітованих частотах обертання колінчастого валу ДВЗ. Отримані показники продуктивності роботи електромагнітних форсунок вказують на потребу їх дефектування або відновлення пропускної здатності.

Підвищення ефективності діагностування технічного стану гібридної силової установки є впровадження інтелектуальної інформаційно-керуючої системи інваріантної різним гібридним автомобілям, що дозволяє оперативно усунути несправності, що мінімізує енерго- або ресурсоспоживання в заданих умовах експлуатації.

## 8. РЕКОМЕНДАЦІ ЕФЕКТИВНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ГІБРИДНОЇ СИЛОВОЇ УСТАНОВКИ

ГСУ як об'єкт управління характеризується змінною структурою, суттєвою нелінійністю основних своїх елементів, параметричною невизначеністю. Ефективність застосування ГСУ значною мірою визначається характеристиками її системи автоматичного управління (САУ), яка повинна вирішувати наступні основні задачі

- ідентифікація поточного стану елементів ГСУ;
- ідентифікація і прогнозування тягово-швидкісного режиму руху автомобіля;
- вибір оптимального режиму роботи (варіанту кінематичної схеми) ГСУ залежно від її поточного стану і режиму руху ТЗ;
- оптимальний перерозподіл потоків потужності між агрегатами ГСУ на всіх тягово-швидкісних режимах, що задаються;
- управління рекуперацією енергії гальмування ТЗ;
- управління заряджанням і витрачанням енергії накопичувача;
- забезпечення стоп-стартового режиму, що мінімізує використання холостого ходу ДВЗ при короткочасних зупинках ТЗ;
- стабілізація заданих режимів роботи окремих агрегатів;
- забезпечення інтерфейсу водія, що імітує управління традиційним ТЗ.

Задачі, що вирішуються САУ ГСУ, мають ієрархічну організацію.

Першому рівню ієрархії відповідають задачі стабілізації заданих режимів роботи окремих агрегатів, що входять до складу ГСУ, а також забезпечення необхідної якості перехідних процесів. При цьому закони регулювання повинні характеризуватися достатньою грубістю до зміни параметрів відповідних об'єктів регулювання або мати можливість адаптації. Вирішення даних задач покладається на локальні регулятори відповідних агрегатів: САУ ДВЗ, регулятор частоти

обертання тягового електроприводу, блок управління рекуперацією енергії і так далі.

До другого рівня ієрархії відносяться завдання вибору оптимальних режимів роботи і особливостей взаємодії агрегатів і підсистем ГСУ, перерозподіл потоків потужності між агрегатами залежно від поточного стану ГСУ, режиму руху ТЗ, управляючих і збурюючих впливів. При цьому повинен забезпечуватися найбільш економічний і екологічно безпечний режим роботи ДВЗ, а також достатній запас енергії в накопичувачі для парирування пікових навантажень за допомогою допоміжного двигуна. Заряджання накопичувача може здійснюватися або за наявності надлишку потужності основного двигуна, або шляхом рекуперації енергії гальмування транспортного засобу.

До третього рівня ієрархії можна віднести завдання забезпечення інтерфейсу водія, що імітує управління традиційним транспортним засобом і, в той же час, що забезпечує відображення поточного стану і режиму роботи ГСУ. Дане завдання має відношення до САУ ГСУ, оскільки управління гібридним автомобілем здійснюється по концепції drive-by-wire, згідно якої водій управляє бортовим комп'ютером, а не безпосередньо силовою установкою. Особливості вирішення даної задачі диктуються ергономічними міркуваннями і не впливають на ефективність функціонування гібридної силової установки безпосередньо.

Завдання, віднесені до другого рівня ієрархії, що визначають стратегію управління ГСУ, є характерними саме для гібридних ТЗ, коли об'єктами управління є декілька джерел потужності в складній конфігурації. Ефективність гібридного автомобіля вирішальним чином залежить від відповідності вибраного режиму роботи ГСУ тягово-швидкісному режиму руху, а також від якості управління перерозподілом потоків потужності між основними агрегатами ГСУ. Цільовою функцією такого управління є мінімізація витрати палива і викидів токсичних компонентів з відпрацьованими газами ДВЗ при обмеженнях, обумовлених вимогами керованості, надійності, запасу енергії в ТАБ і так далі [25]. Часто рішення даної оптимізаційної задачі припускає перетворення електричної потужності в еквівалентну кількість спалюваного палива для того, що

б оцінити загальні витрати палива [12, 27]. Згодом оптимальний перерозподіл потужності між ДВЗ і електродвигуном здійснюється на підставі аналізу статичних карт питомої витрати палива ГСУ. Оптимізація перерозподілу потоків потужності актуальна, насамперед, для автомобілів з паралельною і послідовно-паралельною схемами побудови ГСУ.

У багатьох випадках задачі, характерні для другого рівня ієрархії допускають постановку в узагальненому вигляді і не вимагають конкретизації принципів функціонування допоміжного двигуна і контуру рекуперації енергії.

Існує три підходи до побудови САУ ГСУ, які розрізняються принципами вирішення задач, що відносяться до другого рівня ієрархії: використання логічних правил вибору стратегії, використання методів теорії оптимального управління і застосування алгоритмів адаптації до поточного їздового циклу і очікуваних його змін.

Найбільше поширення на сьогоднішній день набули САУ, які реалізують метод використання логічних правил вибору стратегії управління ГСУ, хоч вони і не дозволяють в повній мірі виявити всі переваги гібридних технологій. Спрощений змістовний опис алгоритму логічного вибору впливів, що управляють, може бути представлений в наступному вигляді.

При гальмуванні, коли потрібний момент обертання ГСУ  $M_{GSU.zd} < 0$ :

– ДВЗ вимкнений,  $\beta_D = -1$ ;

– передавальне відношення трансмісії на  $k$ -ому кроці управління  $\gamma(k) = \gamma(k-1)$ ;

– при повністю зарядженій ТАБ, коли  $\theta_{TAB} \geq \theta_{ex.max}$  рекуперативне гальмування не використовується  $\beta_M = 0$ . Сигнал управління гідравлічною системою гальмування

$$\beta_T = \frac{-M_{GSU.zd}}{M_{trm.max}}; \quad (8.1)$$

– при не повністю зарядженій ТАБ, коли  $\theta_{TAB} < \theta_{ex.max}$ , обчислюється максимальний гальмівний момент ВЕД в генераторному режимі  $M_{VD.min}^{ogr}$  з урахуванням конструктивних особливостей ВЕД і максимально допустимого струму зарядки ТАБ, відповідного її поточному стану

$$M_{VD.min}^{ogr} = \max \left\{ \frac{P_{VD.TAB}}{\omega_M \cdot \eta_{VD}}, M_{VD}(\omega_M, \beta_M = -1) \right\}, \quad (8.2)$$

де  $P_{VD.TAB} = (P_{TAB.chg.max} - P_{dop}) \cdot \eta_{inv}^{-1}$  – обмеження потужності ВЕД в генераторному режимі можливостями ТАБ;  $\eta_{VD}$  – ККД ВЕД;  $\eta_{inv}$  – ККД трифазного інвертора з ШИМ;  $P_{TAB.chg.max} = (E_{TAB} - I_{TAB.chg.max} \cdot R_{TAB}) \cdot I_{TAB.chg.max}$  – потужність, що надходить в ТАБ при зарядці максимально-допустимим струмом;  $P_{dop}$  – потужність, споживана від бортової мережі додатковим електроустаткуванням;  $I_{TAB.chg.max}$  – максимальний струм заряду ТАБ;  $R_{TAB}$  – еквівалентний внутрішній опір ТАБ;  $E_{TAB}$  – еквівалентна ЕДС ТАБ.

Якщо  $M_{GSU.zd} > (M_{VD.min}^{ogr} \cdot \gamma_M)$ , гідравлічна система гальмування не використовується  $\beta_T = 0$ , гальмівне зусилля створюється за допомогою ВЕД

$$\beta_M = \frac{M_{GSU.zd}}{M_{VD.max} \cdot \gamma_M}. \quad (8.3)$$

Якщо  $M_{GSU.zd} \leq (M_{VD.min}^{ogr} \cdot \gamma_M)$ , використовується максимальний гальмівний момент ВЕД в генераторному режимі:  $\beta_M = -1$ . Нестача гальмівного моменту доповнюється за рахунок гідравлічної системи гальмування

$$\beta_T = \frac{M_{VD}(\omega_M, \beta_M) \cdot \gamma_M - M_{GSU.zd}}{M_{trm.max}}. \quad (8.4)$$

При необхідному моменті обертання ГСУ  $M_{GSU.zd} \geq 0$ :

- гідравлічна система гальмування не використовується  $\beta_T = 0$ ;
- вибір передаточного відношення трансмісії на  $k$ -ому кроці діагностування при  $\beta_D(k) \neq -1$  виконується виходячи з таких правил:

$$\begin{aligned} \gamma = \gamma_1 \quad \text{і} \quad \text{д} \text{е} \quad \omega < (\omega_{P,1} - \Delta\omega_P) \vee \\ \vee (\omega < (\omega_{P,1} + \Delta\omega_P)) \wedge \gamma(k-1) > \gamma_2; \end{aligned} \quad (8.5)$$

$$\begin{aligned} \gamma = \gamma_2 \quad \text{і} \quad \text{д} \text{е} \quad ((\omega_{P,1} - \Delta\omega_P) \leq \omega < (\omega_{P,1} + \Delta\omega_P)) \wedge (\gamma(k-1) \leq \gamma_2) \vee \\ \vee (\omega_{P,1} + \Delta\omega_P) \leq \omega < (\omega_{P,2} - \Delta\omega_P) \vee \\ \vee ((\omega_{P,2} - \Delta\omega_P) \leq \omega < (\omega_{P,2} + \Delta\omega_P)) \wedge (\gamma(k-1) > \gamma_3); \end{aligned} \quad (8.6)$$

$$\begin{aligned} \gamma = \gamma_3 \quad \text{і} \quad \text{д} \text{е} \quad ((\omega_{P,2} - \Delta\omega_P) \leq \omega < (\omega_{P,2} + \Delta\omega_P)) \wedge (\gamma(k-1) \leq \gamma_3) \vee \\ \vee (\omega_{P,2} + \Delta\omega_P) \leq \omega < (\omega_{P,3} - \Delta\omega_P) \vee \\ \vee ((\omega_{P,3} - \Delta\omega_P) \leq \omega < (\omega_{P,3} + \Delta\omega_P)) \wedge (\gamma(k-1) > \gamma_4); \end{aligned} \quad (8.7)$$

$$\begin{aligned} \gamma = \gamma_4 \quad \text{і} \quad \text{д} \text{е} \quad ((\omega_{P,3} - \Delta\omega_P) \leq \omega < (\omega_{P,3} + \Delta\omega_P)) \wedge \gamma(k-1) \leq \gamma_4 \vee \\ \vee (\omega_{P,3} + \Delta\omega_P) \leq \omega < (\omega_{P,4} - \Delta\omega_P) \vee \\ \vee ((\omega_{P,4} - \Delta\omega_P) \leq \omega < (\omega_{P,4} + \Delta\omega_P)) \wedge (\gamma(k-1) > \gamma_5); \end{aligned} \quad (8.8)$$

$$\begin{aligned} \gamma = \gamma_5 \quad \text{і} \quad \text{д} \text{е} \quad ((\omega_{P,4} - \Delta\omega_P) \leq \omega) \wedge \gamma(k-1) \leq \gamma_5 \vee \\ \vee (\omega_{P,4} + \Delta\omega_P) \leq \omega, \end{aligned} \quad (8.9)$$

де  $\omega_P = [\omega_{P,1}, \omega_{P,2}, \omega_{P,3}, \omega_{P,4}]$  – вектор порогових швидкостей руху автомобіля, який визначається на підставі залежності ефективного ККД ДВЗ від його тягово-швидкісного режиму.

При  $\beta_D(k-1) > 0,5$  вектор  $\omega_P$  помножується на поправочний коефіцієнт  $K_{PP}(k) = 1 + 0,58 \cdot (\beta_D(k-1) - 0,5)$ , що враховує навантаження ДВЗ;  $\Delta\omega_P$  – приріст порогових швидкостей, що дозволяє уникнути «брязкоту» перемикання передач. При  $\beta_D(k) = -1$ , коли ДВЗ відключений, передаточне відношення не змінюється:  $\gamma(k) = \gamma(k-1)$ ;



– якщо виконується умова  $(\omega < \omega_{P.DVS}) \wedge (\theta_{TAB} > \theta_{ex.min})$ , де  $\omega_{P.DVS}$  – порогова швидкість включення ДВЗ, рух здійснюється за допомогою тягового електродвигуна за наявності достатнього запасу енергії в ТАБ.

Максимально можливий момент обертання ВЕД з урахуванням обмежень його конструктивних особливостей і стану ТАБ може бути отриманий із виразу:

$$M_{VD.max}^{ogr} = \min \left\{ \frac{P_{VD.TAB} \cdot \eta_{VD}}{\omega_M}, M_{VD}(\omega_M, \beta_M = 1) \right\}, \quad (8.10)$$

$$\text{де } P_{VD.TAB} = (P_{TAB.max} - P_{dop}) \cdot \eta_{inv}; \quad P_{TAB.max} = \frac{E_{TAB}^2}{4 \cdot R_{TAB}}.$$

У випадку, коли  $M_{GSU.zd} \leq (M_{VD.max}^{ogr} \cdot \gamma_M)$  сигнал управління тяговим електроприводом  $\beta_M = M_{GSU.zd} / (M_{VD.max} \cdot \gamma_M)$ , а сигнал управління потужністю ДВЗ відповідає його вимкненому стану  $\beta_D = -1$ .

При  $M_{GSU.zd} > (M_{VD.max}^{ogr} \cdot \gamma_M)$  електропривод переймає на себе максимально-можливе навантаження:  $\beta_M = 1$ , а нестача потужності доповнюється за рахунок ДВЗ

$$\beta_D = M_{DVS}^{-1}(\omega_{KV}, M_{DVS.zd}), \quad (8.11)$$

$$\text{де } M_{DVS.zd} = \frac{M_{GSU.zd} - M_{VD}(\omega_M, \beta_M) \cdot \gamma_M}{\gamma \cdot K_{scp}} - \text{необхідний ефективний момент ДВЗ;}$$

$K_{scp}$  – коефіцієнт прослизання зчеплення.

$$K_{scp} = \begin{cases} 1, & \text{ї дè } \omega_{KV} \geq \omega_{KV.min} \\ \frac{\omega_{KV} \cdot (1 - K_{scp.0})}{\omega_{KV.min}} + K_{scp.0} & \text{ї дè } \omega_{KV} < \omega_{KV.min}; \end{cases} \quad (8.12)$$

$K_{scp.0}$  – коефіцієнт прослизання зчеплення при  $\omega_{KV} = 0$ .

При моделюванні ДВЗ у випадку  $\omega \cdot \gamma < \omega_{KV.min}$  з урахуванням буксування муфти зчеплення вважатимемо, що  $\omega_{KV} = \omega_{KV.min}$ ;

– якщо виконується умова  $(\omega < \omega_{P.DVS}) \wedge (\theta_{TAB} \leq \theta_{ex.min})$ , коли ТАБ розряджена, рух здійснюється за допомогою ДВЗ при відключеному електроприводі:  $\beta_M = 0$ .

В цьому випадку  $\beta_D = M_{DVS}^{-1}(\omega_{KV}, M_{DVS.zd})$ , де  $M_{DVS.zd} = M_{GSU.zd} \cdot \gamma^{-1}$ ;

– при швидкості руху автомобіля, що перевищує порогову швидкість включення ДВЗ, коли виконується умова  $\omega \geq \omega_{P.DVS}$ , ВЕД використовується для наближення тягово-швидкісного режиму ДВЗ до області оптимальних режимів. Оптимальний момент обертання ДВЗ для поточної швидкості обертання КВ  $\omega_{KV}$  знаходиться із умови

$$M_{DVS}^* = M_{DVS}(\omega_{KV}, \beta_D^*), \beta_D^* = \arg \min_{\beta_D} \{g_e(\omega_{KV}, \beta_D)\}. \quad (8.13)$$

При виконанні умови  $(M_{GSU.zd} \geq M_{DVS}^* \cdot \gamma) \vee (\theta_{TAB} \geq \theta_{ex.opt})$  відведення потужності від ДВЗ для заряджання ТАБ недоцільно.

Якщо  $(M_{GSU.zd} > \gamma \cdot M_{DVS}(\omega_{KV}, \beta_D = 1)) \wedge (\theta_{TAB} \geq \theta_{ex.min})$ , існує необхідність і можливість доповнити нестачу потужності ДВЗ за допомогою ВЕД. В цьому випадку сигнал управління потужністю ДВЗ приймається рівним  $\beta_D = 1$ , а сигнал управління потужністю ВЕД визначається із виразу

$$\beta_M = \begin{cases} \frac{M_{VD.zd}}{M_{VD.max}} & \text{і } \delta \text{è } M_{VD.zd} < M_{VD.max}^{ogr} \\ 1 & \text{і } \delta \text{è } M_{VD.zd} \geq M_{VD.max}^{ogr}, \end{cases} \quad (8.14)$$

де

$$M_{VD.zd} = \frac{M_{GSU.zd} - \gamma \cdot M_{DVS}(\omega_{KV}, \beta_D)}{\gamma_M}, \quad (8.15)$$

$$M_{VD.max}^{ogr} = \min \left\{ \left( \frac{E_{TAB}^2}{4 \cdot R_{TAB}} - P_{dop} \right) \cdot \frac{\eta_{inv} \cdot \eta_{VD}}{\omega_M}, M_{VD}(\omega_M, \beta_M = 1) \right\}. \quad (8.16)$$

Інакше, коли виконується умова

$$\left( M_{GSU.zd} \leq \gamma \cdot M_{DVS}(\omega_{KV}, \beta_D = 1) \right) \vee \left( \theta_{TAB} < \theta_{ex.min} \right), \quad (8.17)$$

рух здійснюється без використання тягового електроприводу:  $\beta_D = 0$ . Сигнал управління потужністю ДВЗ в цьому випадку  $\beta_D = M_{DVS}^{-1}(\omega_{KV}, M_{DVS.zd})$ , де

$$M_{DVS.zd} = \min \left\{ \frac{M_{GSU.zd}}{\gamma}, M_{DVS}(\omega_{KV}, \beta_D = 1) \right\}. \quad (8.18)$$

При виконанні умови  $(M_{GSU.zd} < M_{DVS}^* \cdot \gamma) \wedge (\theta_{TAB} < \theta_{ex.opt})$  ДВЗ працює в оптимальному режимі, а надлишок потужності відводиться для заряджання ТАБ за допомогою використання ВЕД в режимі генератора.

В цьому випадку момент опору ВЕД, потрібний для забезпечення оптимального режиму ДВЗ

$$M_{VD.zd} = \frac{M_{GSU.zd} - \gamma \cdot M_{DVS}^*}{\gamma_M}. \quad (8.19)$$

Обмеження даного моменту опору, обумовлене конструктивними особливостями ВЕД і максимально допустимим струмом зарядки ТАБ, відповідним її поточному стану

$$M_{VD.min}^{ogr} = \max \left\{ \frac{P_{VD.TAB}}{\omega_M \cdot \eta_{VD}}, M_{VD}(\omega_M, \beta_M = -1) \right\}, \quad (8.20)$$

де

$$P_{VD.TAB} = \frac{(E_{TAB} - I_{TAB.chg.max} \cdot R_{TAB}) \cdot I_{TAB.chg.max} - P_{dop}}{\eta_{inv}}. \quad (8.21)$$

При  $M_{VD.zd} > M_{VD.min}^{ogr}$  управляючі впливи на ВЕД і ДВЗ

$$\beta_M = \frac{M_{VD.zd}}{M_{VD.max}}; \beta_D = M_{DVS}^{-1}(\omega_{KV}, M_{DVS}^*). \quad (8.22)$$

При  $M_{VD.zd} \leq M_{VD.min}^{ogr}$  режим ДВЗ може відхилитися від оптимального із за обмежень області допустимих режимів ВЕД

$$\beta_M = -1; \beta_D = M_{DVS}^{-1}(\omega_{KV}, M_{DVS.zd}), \quad (8.23)$$

де

$$M_{DVS.zd} = \min \left\{ \frac{M_{GSU.zd}}{\gamma}, M_{DVS}(\omega_{KV}, \beta_D = 1) \right\}. \quad (8.24)$$

Момент обертання ГСУ  $M_{GSU.zd}$ , потрібний для забезпечення заданого тягово-швидкісного режиму гібридного автомобіля, визначається з використанням ПІ-регулятора

$$M_{GSU.zd}(k) = k_{p.V} \cdot e(k) + k_{i.V} \cdot \sum_{n=0}^k e(n), \quad (8.25)$$

де  $e(k) = V_{zd}(k) - V(k)$  – помилка регулювання за швидкістю руху автомобіля;

$k_{p.V}, k_{i.V}$  – параметри ПІ – регулятора.

## 9. ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМ НЕЧІТКОГО ВИСНОВКУ ТА ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГІБРИДНОЇ СИЛОВОЇ УСТАНОВКИ

Ідентифікація нелінійної залежності  $P_k = f(I_{st}, U_{ab}, n_{kv}, T_m)$   $P_m = f(T_m, n_{kv}, S_{\hat{\alpha}})$  за експериментальними даними традиційними методами виявляється важко здійснюваним завданням і пов'язана зі значними складнощами при зборі достатнього обсягу даних і труднощами обчислювального характеру.

Разом з тим існують методи, що дозволяють успішно ідентифікувати залежності складних функцій на підставі експериментальних досліджень при обмеженій кількості даних. Серед таких підходів можна виділити використання штучних нейронних мереж і систем нечіткого виводу [13, 34]. До переваг останніх можна віднести можливість формалізації та використання апріорної інформації про досліджувані явища. Однак в даний час не існує обґрунтованих рекомендацій щодо застосовності конкретного методу. Для вибору найбільш обґрунтованого підходу до апроксимації необхідної залежності проведемо дослідження можливостей нечітких систем, штучних нейронних мереж і гібридних нейронних мереж.

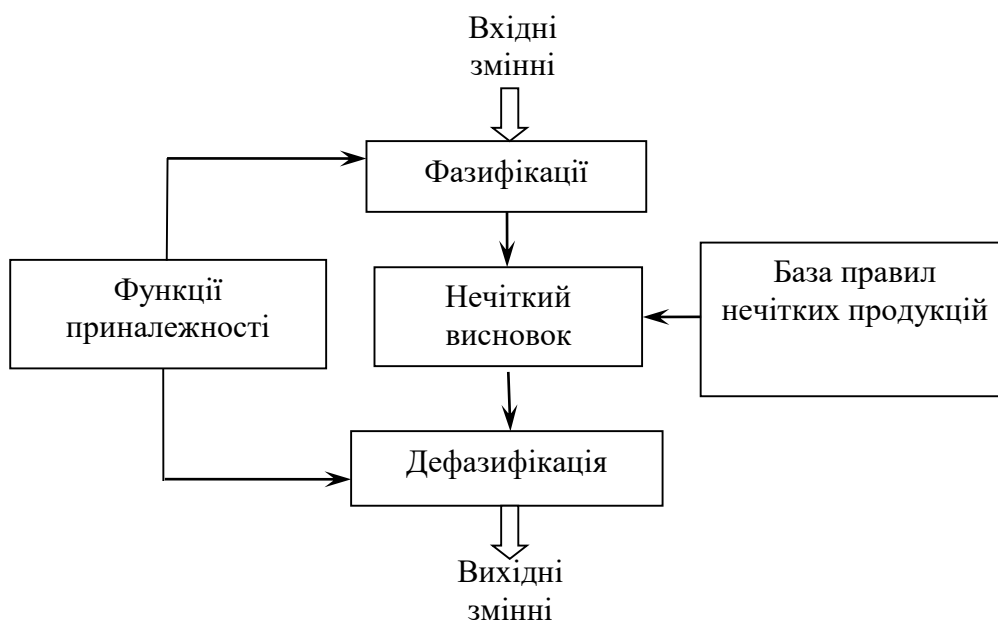


Рисунок 9.1. Структура нечіткої моделі Мамдані

Серед різних систем нечіткого виводу використовуємо систему Мамдані, як найбільш прозору з точки зору формулювання правил нечітких продукцій. Структуру моделі нечіткого висновку Мамдані показана на рис.9.1.

Фазифікації вхідних змінних  $I_{st}$ ,  $U_{ab}$ ,  $n_{kv}$ ,  $T_m$ ,  $V_a$  виконується шляхом завдання їх терм-множини  $I_{st} = \{L, LM, M, MB, B\}$ ,  $U_{ab} = \{L, M, B\}$ ,  $n_{kv} = \{L, M, B\}$ ,  $T_m = \{L, M, B\}$ , де термам присвоєні наступні значення: L – «мале», LM – «менше середнього», M – «середнє», MB – «більше середнього», B – «велике». Вихідної змінної системи є  $P_k = \{L, LM, M, MB, B\}$ .

Терми можуть бути представлені нечіткими множинами, які використовують гауссову функцію приналежності

$$\mu(u) = \exp\left(-\frac{(u-b)^2}{2c^2}\right), \quad (9.1)$$

де  $u$  – нормоване значення відповідної змінної;  $b$  – координата максимуму;  $c$  – коефіцієнт концентрації.

Перевагою даної функції приналежності є те, що для її завдання необхідно тільки два параметри:  $b$  і  $c$ .

Дефазифікація вихідних змінних, що полягає в перетворенні нечіткого безлічі в точну цифру, виконується за допомогою методу центру тяжіння

$$\bar{P}_{k \text{ mod}} = \frac{\int_0^1 \bar{P}_k \mu_p(\bar{P}_k) d\bar{P}_k}{\int_0^1 \mu_p(\bar{P}_k) d\bar{P}_k}, \quad (9.2)$$

де  $\bar{P}_k$  – нормоване значення вихідної змінної;  $\mu_p(\bar{P}_k)$  – ступінь приналежності елемента  $\bar{P}_k$  нечітких множин.

Для синтезу нечіткої системи ідентифікації залежності  $P_k = f(I_{st}, U_{ab}, n_{kv}, T_m)$  будемо використовувати метод двоетапної ідентифікації нелінійної залежності Ротштейна [14]. Згідно даного методу, спочатку формується база нечітких правил виду «Якщо щось» (структурна ідентифікація), після чого виконується

параметрична ідентифікація залежності шляхом знаходження таких ваг правил і параметрів функцій належності нечітких термів, які мінімізують відхилення результатів нечіткого моделювання від експериментальних даних.

Базу нечітких правил складемо на основі слабоформалізованих емпіричних знань про роботу ДВС при різних ступенях технічного стану. У табл.9.1. приведена отримана база, яка містить 127 правил.

Таблиця 9.1 – База правил нечітких продукції

$I_{st}$	$n_{kv}$	$T_m$	L			LM			M			MB			B		
			L	M	B	L	M	B	L	M	B	L	M	B	L	M	B
			$U_{ab}$														
B	B		B	B	B	B	B	B	MB	B	B	MB	MB	B	M	MB	B
	M		B	B	B	MB	B	B	MB	B	B	MB	MB	B	M	MB	B
	L		B	B	B	MB	B	B	MB	MB	B	MB	MB	B	M	MB	MB
MB	B		MB	B	B	MB	MB	B	MB	MB	B	M	MB	MB	M	MB	MB
	M		MB	MB	B	M	MB	B	M	MB	MB	M	MB	MB	M	M	MB
	L		MB	MB	B	M	MB	MB	M	M	MB	M	M	MB	LM	M	MB
M	B		M	MB	MB	M	M	MB	M	M	MB	M	M	MB	LM	M	M
	M		M	MB	MB	M	M	MB	M	M	MB	M	M	MB	LM	LM	M
	L		M	M	MB	M	M	MB	M	M	MB	LM	M	M	LM	LM	M
LM	B		LM	M	MB	LM	M	M	LM	M	M	LM	LM	M	LM	LM	LM
	M		LM	M	M	LM	LM	M	LM	LM	M	LM	LM	M	L	LM	LM
	L		LM	LM	M	LM	LM	M	LM	LM	M	L	LM	LM	L	L	LM
L	B		LM	LM	M	L	LM	M	L	LM	LM	L	L	LM	L	L	L
	M		L	LM	M	L	LM	M	L	L	LM	L	L	LM	L	L	L
	L		L	LM	M	L	LM	LM	L	L	LM	L	L	L	L	L	L

Оскільки у всіх нечітких правилах як логічної зв'язки для під умови застосовується тільки нечітка кон'юнкція (зв'язка «I»), то в якості методу агрегування обрана операція min-кон'юнкції. При визначенні результату логічної кон'юнкції нечітких висловлювань і будемо використовувати вираз

$$T(A \wedge B) = \min\{T(A), T(B)\}, \quad (9.3)$$

де  $T(\bullet)$  – ступінь істинності відповідного висловлювання.

Для акумуляції висновків правил використовується метод max-диз'юнкції. При визначенні результату логічної диз'юнкції (зв'язка «АБО») нечітких висловлювань А і В будемо використовувати вираз:

$$T(A \vee B) = \max\{T(A), T(B)\}. \quad (9.4)$$

Для визначення ступеня істинності заперечення нечіткого висловлювання («НЕ») будемо використовувати вираз:

$$T(\bar{A}) = 1 - T(A). \quad (9.5)$$

Параметрична ідентифікація моделі виконується на масиві експериментальних даних, отриманих при дослідженні гібридної силової установки Toyota Prius.

Після попередньої обробки результатів експериментів з отриманих даних була сформована матриця, кожна з 313 рядків якої містить результати окремого виміру параметрів  $I_{st}$ ,  $U_{ab}$ ,  $n_{kv}$ ,  $T_m$  і  $P_k$ , відповідних моменту руху до швидкості  $0,3 V_{max}$ . Масив даних був розділений на навчальну і контрольну вибірки щодо 2:1.

В якості вхідних змінних нечіткої моделі використовувалися нормовані значення  $\bar{I}_{st}$ ,  $\bar{U}_{ab}$ ,  $\bar{n}_{kv}$ ,  $\bar{T}_m$  з навчальної вибірки. Нормування, що мало на меті приведення значень вхідних змінних в інтервал  $[0, 1]$ , виконувалося відповідно до виразу:

$$\bar{x}_i = \frac{x_i - \min\{x\}}{\max\{x\} - \min\{x\}}, \quad i = \overline{1, N}, \quad (9.6)$$

де  $\bar{x}$  – нормоване значення параметра,  $x$  – вимірне значення параметра,  $\min\{x\}$ ,  $\max\{x\}$  – мінімальне і максимальне значення відповідного безлічі значень параметрів.

До отриманого на виході нечіткої системи нормованому значенню коефіцієнта технічного стану ГСУ  $\bar{P}_{k \text{ mod}} \in [0, 1]$  застосовувалася операція денормування



$$P_{k \text{ mod}} = \bar{P}_{k \text{ mod}} [\max\{P_k\} - \min\{P_k\}] + \min\{P_k\}, \quad (9.7)$$

де  $P_{k \text{ mod}}$  – денормування значення коефіцієнта технічного стану ГСУ.

відповідність дійсних  $P_k$  і модельних  $P_{k \text{ mod}}$  значень коефіцієнта технічного стану

ГСУ на навчальній та контрольній вибірках показано на рис.4.2.

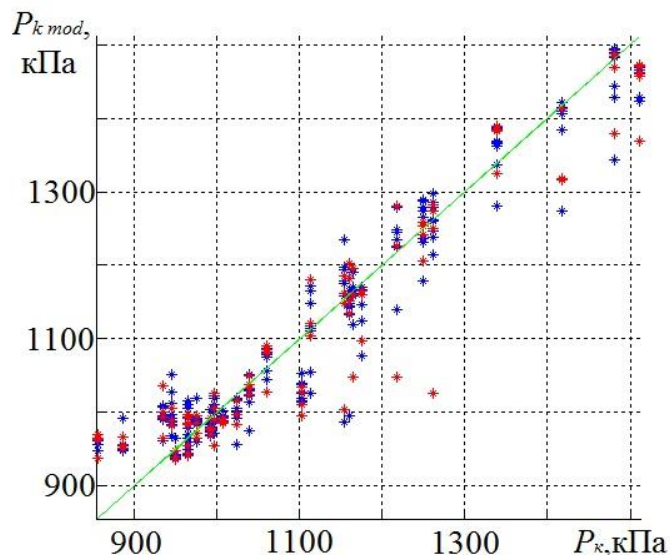


Рисунок 9.2. Тестування нечіткої моделі Мамдані до навчання

Для оцінки якості синтезованої нечіткої моделі можна використовувати математичне очікування  $M_{P_k}$  і середньоквадратичне відхилення  $\sigma_{P_k}$  нев'язки між дійсними і модельованими величинами коефіцієнта технічного стану ГСУ. Для зручності порівняння отриманих результатів з результатами інших моделей були обчислені також їх відносні значення  $M_{P_k \%}$  і  $\sigma_{P_k \%}$ :

$$M_{P_k \%} = \frac{M_{P_k}}{\max\{P_k\} - \min\{P_k\}} \cdot 100\%, \quad (9.8)$$

$$\sigma_{P_k \%} = \frac{\sigma_{P_k}}{\max\{P_k\} - \min\{P_k\}} \cdot 100\%. \quad (9.9)$$

$$P_k = f(I_{st}, U_{ab}, n_{kv}, T_m) \quad (9.10)$$

Значення цих величин, наведені в табл. 9.2, свідчать про недостатню якість створеної нечіткої моделі і необхідності її налаштування.

Таблиця 9.2 – Значення математичного очікування і середньоквадратичного відхилення помилки для різних способів апроксимації залежності

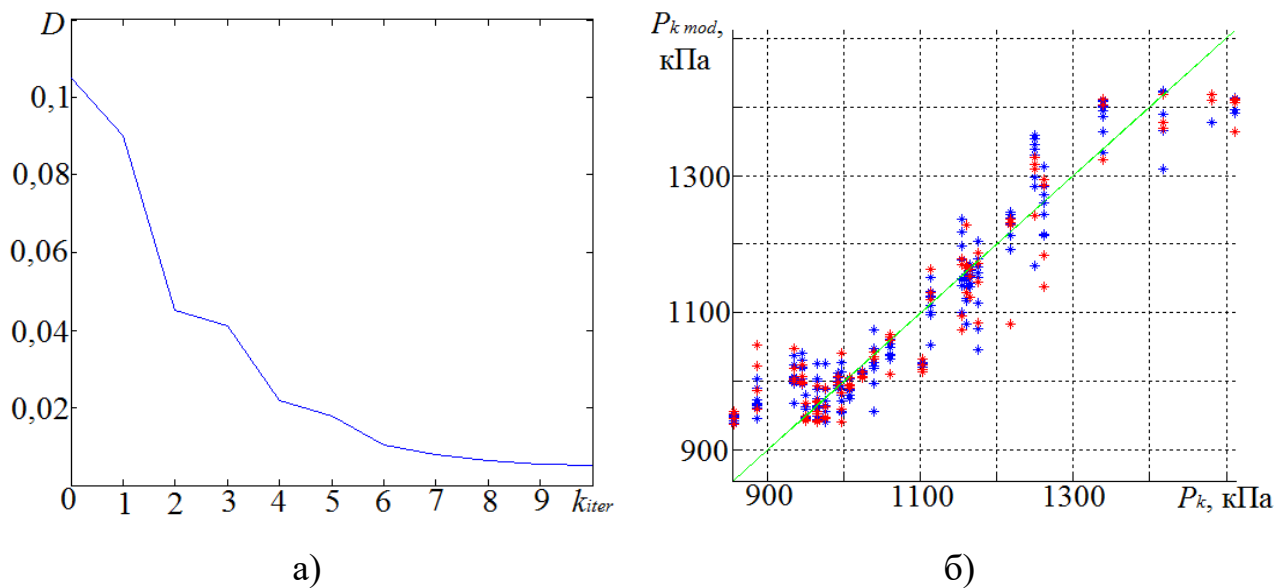
Методи		Навчальна підмножина				Контрольна підмножина			
		$M_{P_k}$ ,	$M_{P_k\%}$ , %	$\sigma_{P_k}$ ,	$\sigma_{P_k\%}$ , %	$M_{P_k}$ ,	$M_{P_k\%}$ , %	$\sigma_{P_k}$ ,	$\sigma_{P_k\%}$ , %
Модель Мамдані	до налаштува ння	0,937	1,43	0,209	13,2	0,89	2,42	0,714	32,75
	після налаштува ння	-1,75	-0,27	47,65	7,26	0,482	0,74	0,63	8,78
Нейронна мережа		0,03	0,004	28,42	4,05	0,463	0,71	0,50	5,41

Налаштування є знаходження таких параметрів функцій приналежності і таких вагових коефіцієнтів правил, які мінімізують відхилення між експериментальними значеннями коефіцієнта технічного стану ГСУ  $\{P_k\}$  і значеннями  $\{P_{k\text{mod}}\}$ , отриманими за допомогою нечіткої моделі, на навчальній вибірці [3]. Велика кількість правил і неочевидність взаємозв'язків між параметрами дають підставу вважати, що використання стандартних функцій оптимізації краще «ручний» настройки системи.

В даному випадку навчання нечіткої моделі було здійснено з використанням функції `fmincon` пакета `Optimization Toolbox`, яка призначена для вирішення завдань оптимізації методом нелінійного програмування і заснована на методі найменших квадратів. Зі збільшенням кількості ітерацій (в даному випадку виконувалося 10 ітерацій) середній квадрат помилки моделювання для нормованих значень коефіцієнта технічного стану ГСУ

$$D = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (\bar{P}_{k\text{mod}} - \bar{P}_k)^2, \quad (9.11)$$

де  $n$  – кількість точок в контрольній вибірці, змінюється в діапазоні 0,1048...0,0066 (см. рис. 9.3а).



а) динаміка зміни середнього квадрата помилки в процесі настройки;

б) тестування нечіткої моделі після настройки

Рисунок 9.3 – Налаштування нечіткої моделі Мамдані

В результаті настройки системи розкид точок  $(P_k, P_{k\ mod})$  зменшився, що відображено на (рис.9.3 б) і свідчить про успішне завершення налаштування. Також значно зменшилися величини  $M_{P_k}$  і  $\sigma_{P_k}$ , характеризують нев'язку між експериментальними даними та результатами нечіткого моделювання на навчальній та контрольній вибірках (табл. 4.4).

Після серії проведених обчислювальних експериментів для вирішення даної задачі із застосуванням штучної нейронної мережі (ІНС) була обрана тришарова ІНС прямого поширення з наступною конфігурацією: перший прихований шар містить 10 нейронів, другий прихований шар – 4 нейрона (рис.4.4). Як активаційної функції першого і другого шарів використовується функція гіперболічного тангенса:

$$f(s) = th(s) = \frac{2}{1 + e^{-2s}} - 1. \quad (9.12)$$

Третій, вихідний шар, має лінійну активаційну функцію.

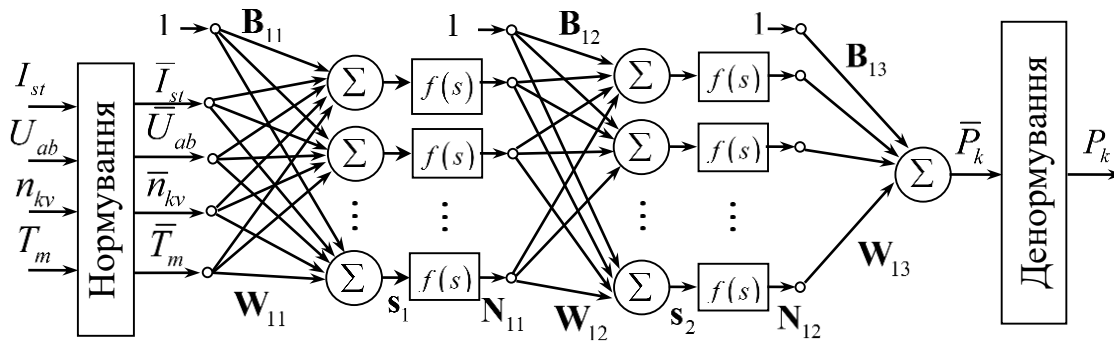


Рисунок 9.4 – Структурна схема штучної нейронної мережі

Функціонування нейронної мережі описується виразами:

$$\begin{cases} \mathbf{N}_{11} = 2 \cdot \left( 1 + \exp \left( -2 \cdot \left( \mathbf{W}_{11} \cdot [\bar{I}_{st}, \bar{U}_{ab}, \bar{n}_{kv}, \bar{T}_m]^T + \mathbf{B}_{11} \right) \right) \right) - 1 \\ \mathbf{N}_{12} = 2 \cdot \left( 1 + \exp \left( -2 \cdot \left( \mathbf{W}_{12} \cdot \mathbf{N}_{11} + \mathbf{B}_{12} \right) \right) \right) - 1 \\ [\bar{P}_k]^T = \mathbf{W}_{13} \cdot \mathbf{N}_{12} + \mathbf{B}_{13} \end{cases}, \quad (9.13)$$

де  $\mathbf{N}_{11}$ ,  $\mathbf{N}_{12}$  – вектори виходів нейронів першого і другого шарів відповідно;  $\mathbf{W}_{11}$ ,  $\mathbf{W}_{12}$ ,  $\mathbf{W}_{13}$  – матриці вагових коефіцієнтів нейронів першого, другого і третього шарів відповідно;  $\mathbf{B}_{11}$ ,  $\mathbf{B}_{12}$ ,  $\mathbf{B}_{13}$  – вектори зсувів нейронів першого, другого і третього шарів відповідно.

Нормування вхідних і денормування вихідних змінних здійснюється аналогічно попередньому випадку.

Для вирішення задачі параметричної ідентифікації можуть бути використані відомі методи навчання нейронних мереж [35, 46]. Одним з таких методів, який показав свою високу ефективність при вирішенні даної задачі, є алгоритм SCG (scaled conjugate gradient algorithm), запропонований Моллером (Moller). Цей алгоритм об'єднує ідеї методу сполучених градієнтів з квазіньютонівими методами [57]. Алгоритм SCG може зажадати більшого числа ітерацій, ніж інші алгоритми методу сполучених градієнтів, але при цьому кількість обчислень на кожній ітерації істотно скорочено.

Одна з найбільш серйозних труднощів, що виникають при навчанні ІНС, пов'язана з явищем перенавчання (overfitting). Воно полягає в тому, що мережа мінімізує помилку на деякому обмеженому навчальній множині, що може привести до нестійкості результатів поза даного безлічі.

В роботі [75] стверджується, що перенавчання може наступити в тому випадку, коли кількість точок множини, на якому проводиться навчання нейронної мережі,  $N < 30 \cdot k_F$ , де  $k_F$  – кількість вільних параметрів мережі. Разом з тим необхідно враховувати, що крім структури ІНС і обсягу навчальної множини, на ефект перенавчання впливає також характер аппроксимууючої залежності і розподіл точок навчальної множини.

Для подолання ефекту перенавчання безліч вихідних даних може бути розділене на два підмножини: навчальне (training set) і контрольне (validation set). Навчання мережі здійснюється з використанням навчального підмножини. Контрольне підмножина використовується тільки для контролю помилки навчання. На початковій фазі навчання помилка для контрольного підмножини зменшується так само, як і для навчального підмножини. На певному етапі зменшення помилки для контрольного підмножини припиняється або вона починала зростати. У цей момент необхідно перервати процедуру навчання для запобігання явища перенавчання.

Якщо помилка для контрольного підмножини значно перевищує помилку для навчального підмножини, можна зробити висновок, що вихідні дані непередставницьким.

Навчання ІНС виконувалося на навчальній вибірці, що містить 208 вимірювань. У свою чергу контрольна вибірка містила 105 вимірювань. Тривалість навчання становила 525 епох. Результати функціонування навченої ІНС наведено на (рис.9.5).

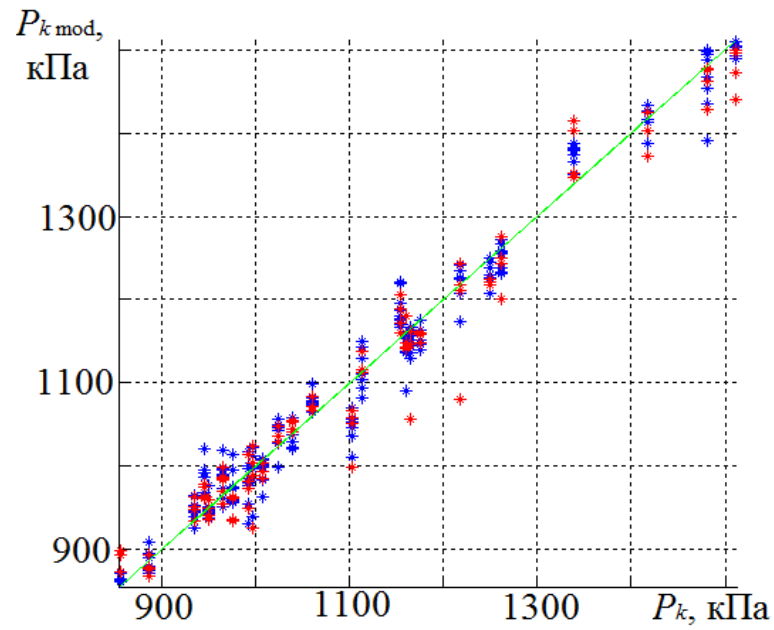


Рисунок 9.5. Результати функціонування штучної нейронної мережі

В результаті навчання ІНС середньоквадратичне відхилення помилки на контрольній вибірці досягло значення в 0,012 (5,41 %). Це істотно краще за показники помилки нечіткого моделювання (табл.4.4).

## ЗАКЛЮЧЕННЯ

В монографії вирішена задача підвищення ефективності експлуатації функціональних систем гібридної силової установки на підставі нової концепції діагностування технічного стану гібридних автомобілів. Це забезпечує єдиний підхід к дослідженню діагностичних параметрів в залежності від схеми будови та конструктивних особливостей ГСУ, яка використовує нейромережеву апроксимацію характеристики діагностичних параметрів при використанні енергетичних показників.

Ефективність діагностування технічного стану гібридного автомобіля значно залежить від обраної стратегії управління ГСУ – відповідно її режиму роботи та управління розподілом енергії між ДВЗ, тягової акумуляторної батареї в залежності від технічного стану складових автомобіля. Це визначає необхідність розробки нових методів діагностування технічного стану ГСУ на підставі сучасних досягнень інформаційних технологій.

В монографії наведено теоретичні основи структурної та параметричної ідентифікації математичної моделі технічного стану ГСУ. Отримано нейромережеву модель діагностування технічного стану ГСУ, яка визначає залежність критерія показника ресурсу від енергетичних витрат автомобіля. Швидкість руху автомобіля, напруга і струм ТАБ, час впорскування палива форсункою та швидкість обертання колінчастого валу ДВЗ є енергетичними показниками діагностування технічного стану ГСУ.

Розроблено метод діагностики технічного стану ГСУ, який використовує штучні нейронні мережі та системи нечіткого висновку для ідентифікації коефіцієнта технічного стану ДВЗ та тягової акумуляторної батареї. Встановлено, що при використанні штучної нейронної мережі найкращі характеристики забезпечує тришарова мережа прямого розповсюдження, в першому скритому слої знаходиться 10 нейронів з сигмоїдальними активаційними функціями, а в другому – 4 нейрона.

Навчання штучної нейронної мережі виконувалося на навчальній виборці з використанням навчальної множини. Контрольна підмножина використовувалася для контролю похибки навчання. В результаті налагоджування системи розкид точок експериментальних і розрахункових зменшився, що підтверджує якість налагоджування тестованої нечіткої моделі. В результаті навчання ШНМ середньоквадратичне відхилення похибки на контрольній виборці склало  $0,012 K_p$  (5,41 %).



## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Бажинов О.В. Метод визначення ефективної роботи силової установки гібридного автомобіля» / Бажинов О.В., Заверуха Р.Р., Бажинова Т.О. // Журнал «Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів». 2021 №21 С. 180-187
2. Бажинов О.В., Заверуха Р.Р., Бажинова Т.О. Інформаційна комплексна система діагностики гібридних і електромобілів //Науковий журнал «Інженерія природокористування». – 2020. – №. 2 (16). – С. 12-18.
3. Бажинов О.В. Діагностика функціональних систем силової установки гібридного автомобіля / Бажинов О.В., Заверуха Р.Р.//Науковий журнал «Технічний сервіс агропромислового лісового та транспортного комплексів». – 2020. – №. 21. – С. 195-200.
4. Бажинова Т.О. Інтелектуальні та інтелектуалізовані інформаційні системи автомобілів / Бажинова Т.О. // Міжнародної науково-практичної конференції “Новітні технології розвитку автомобільного транспорту” 16-19 жовтня 2018 р. С. 468-469
5. Бажинов А.В. Концепция создания экологически чистого автомобиля. / А.В. Бажинов, О.П. Смирнов // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2006. – №7. – С. 15-19. Мигаль В.Д. Средства информационных систем автомобиля: справ. пособ. / В. Д. Мигаль. – Х. : Майдан, 2012. – 444 с.
6. Мигаль В.Д. Мехатронні та телематичні системи автомобіля: навч. посіб. / В.Д. Мигаль. – Х.: Вид-во Майдан, 2017. – 313 с.
7. Мигаль В.Д. Автомобильные двигатели внутреннего сгорания. Параметры и системы управления: учеб. пособ. / В. Д. Мигаль. – Х.: Майдан, 2016. – 320 с.
8. Мигаль В.Д. Інтелектуальні системи в технічній експлуатації автомобілів: монографія / В.Д. Мигаль. – Х.: «Майдан», 2018. – 262 с.

9. Бороденко Ю.М. Діагностика електронних систем автомобілів: підручник / Ю.М. Бороденко, О.А. Дзюба, О.М. Биков. – Х: ХНАДУ, 2016. – 320 с.
10. Синергетичний автомобіль. Теорія і практика / [Бажинов О.В., Смирнов О.П., Серіков С.А., Двадненко В.Я.]. – Х.: ХНАДУ, 2011. – 236 с.
11. Гібридні автомобілі / [Бажинов О.В., Смирнов О.П., Серіков С.А. та ін.]. – Х.: ХНАДУ, 2008. – 327 с.
12. Соснин Д.А., Яковлев В.Ф. Новейшие автомобильные электронные системы. — М.: СОЛОН-Пресс, 2005. — 240 с
13. Бажинова Т.О. Характеристика розв'язання неформалізованих задач стосовно до транспортних засобів / Бажинова Т.О., Берус С.В. // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка: зб. наук. пр. 2019. Вып. 198.С. 388–392.
14. Bazhynova T., Kravchenko, O., Barta D., Haievuyi, O., Pavelcik V. Neural Network Model of Assessing the Technical Condition of the Power Unit of a Hybrid Vehicle //2020 XII International Science-Technical Conference AUTOMOTIVE SAFETY. – IEEE, 2020. – С. 1-7.
15. Борисенко А.О., Бажинова Т.О. Експлуатаційні властивості гібридних автомобілів: монографія. Х.: ФОП Бровін О.В., 2016. – 104 с.
16. Гаєк Є.А. Аналіз впровадження інтелектуальних технологій в сільське господарство / Гаєк Є.А // Міжнародна науково-практичної конференції «Молодь і технічний прогрес в АПВ» – 2019. С 181-182
17. Бажинов О.В, Бажинова Т.О., Кравцов М.М. Основи ефективного використання екологічно-чистих автомобілів: монографія. Х.: ФОП Панов А.М., 2018. – 200 с. ISBN 978-617-7722-30-3
18. Бажинов А.В., Нечитайло Ю.А. Особенности оценки технического состояния гибридных автомобилей //Вісник СевНТУ. – 2011. – №. 121. – С. 34-37.
19. Раков В.А. Средства диагностирования гибридных силовых установок автомобилей //Прогрессивные технологии и процессы. 2014. С. 155-159.

20. Зарипова Н.А. и др. Оценка технического состояния гибридных силовых установок автомобилей //Иновационные технологии в АПК, как фактор развития науки в современных условиях. – 2019. – С. 103-108.
21. Раков В.А. Оценка технического состояния гибридных силовых установок автомобилей //Автотранспортное предприятие. – 2012. – №. 1. – С.49-52.
22. Almeida D.M., de Mattos Neto P.S.G., Cunha D.C. Hybrid Time Series Forecasting Models Applied to Automotive On-Board Diagnostics Systems //2018 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). –IEEE, 2018. –С. 1-8.
23. Бороденко Ю.М. Система керування гібридною силовою установкою з пневмодвигуном / Ю.М. Бороденко, С.А. Серіков, О.П. Смирнов // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту «ДонНТУ». – 2008. – № 1(6), С. 32-38.
24. Ивлиев В.А., Шафиев Э.Р. Перспективы использования гибридных силовых установок на автомобильном транспорте и анализ проблем их технического обслуживания //Перспективное направление развития автотранспортного комплекса-2018. – 2018. – С. 37-42.
25. Нечитайло Ю.А. Методика определения состояния аккумуляторной батареи гибридного автомобиля //Вісник СевНТУ. – 2012. – №. 134. – С. 139-142.
26. Угай С.М., Каминский Н.С., Пермякова О.Г. Неисправности гибридных автомобилей при эксплуатации //Автомобильный транспорт Дальнего Востока. – 2018. – №. 1. – С. 288-294.
27. Стародубцева И.В. Диагностирование как метод контроля и обеспечения надежности гибридных автомобилей и электромобилей при эксплуатации //Международная научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 150-летию РГАУ-МСХА имени. – 2015. – С. 287..
28. Попов И.В., Толмачев П.В., Хмелев Р.Н. Особенности диагностирования силовой установки гибридных автомобилей //Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. – 2016. – Т. 3. – №. 3. – С. 253-256.

29. Червенчук В.Д., Забудский А.И. К вопросу о специфике технического обслуживания и ремонта гибридных энергетических силовых установок //Вестник Омского государственного аграрного университета. – 2018. – №. 3 (31).
30. Prajwowski K., Osipowicz T. Hybrid vehicle diagnostics //Journal of KONES. –2017. –Т. 24. –№. 1. –С. 309-315
31. Дунин Г.В. Диагностика автомобилей с ДВС и электромобилей //Новые информационные технологии в науке. – 2017. – С. 38-41.
32. Набоких В. А., Сафронов А. В. Способы диагностирования датчиков автомобильных электронных систем управления с гибридной силовой установкой //Известия Московского государственного технического университета МАМИ. – 2013. – Т. 1. – №. 2 (16). С. 185-188.
33. Предигер В., Хоффманн Й., Трентманн В., Костилов С., Ломан Е., Селифонов В.В., Карпухин К.Е., Баулина Е.Е. Автоматическое управление гибридной силовой установкой полноприводного автомобиля // Известия МГТУ. 2009. №1. С.60-67.
34. Бажинов О.В., Батигін Ю.М., Смирнов О.С. Науково-практичний комплекс підготовки фахівців з розроблення та ремонту гібридних автомобілів //Новий Колегіум. – 2014. – №. 4. – С. 27-29.
35. Шевченко І.О., Гожа В.В. Особливості використання гібридних автомобілів. // Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції ННІ механотроніки і систем менеджменту. – 2018. – №9 – С.17-18
36. Мармут И.А. К вопросу выбора оборудования для диагностирования гибридных автомобилей и электромобилей //Наукові нотатки. – 2019. – № 65. – С. 153-158.
37. Кубіч В.І. Гібридні силові установки легкових автомобілів : навчальний посібник. – Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2021. – 193 с.
38. Гладченко В. Experimental research of a re-equipment wheeled vehicle category M1 into electromobile //Системні технології. – 2021. – Т. 4. – №. 135. – С.23-34.

39. Проців В.В., Зіборов К.А., Кривда В.В., Федоряченко С.О., Ванжа Г.К. Системний підхід до розміщення функціонального обладнання для обслуговування електричних і гібридних автомобілів //Збірник наукових праць Національного гірничого університету. – 2018. – №. 56. – С. 136-148.
40. Тімков О.М. Аналіз послідовної схеми гібридного автомобіля //Управління проектами, системний аналіз і логістика. Технічна серія. – 2011. – №. 8. – С. 193-197.
41. Sergey A. Serikov. Synthesis of Optimal Control of Hybrid Engine Unit. // Journal of Automation and Information Sciences. Begell House, Inc. (USA) '2009, Volume 41, Issue 3. – Pages 71-81. DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v41.i3.80 <http://www.begellhouse.com/journals/2b6239406278e43e,685626ff507e6e58,6ad729b516535438.html>
42. S.A. Serikov. Neural network model of internal combustion engine. // Cybernetics and Systems Analysis. Springer (USA): Vol.46(6) (2010). – P.998–1007. DOI:10.1007/s10559-010-9281-3 <http://www.springerlink.com/openurl.asp?genre=article&id=doi:10.1007/s10559-010-9281-3>
43. Кукурудзяк Ю.Ю. Аналіз методів і систем отримання інформації про технічний стан автомобіля //Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. – 2012. – №. 10 (2). – С. 106-109.
44. Кужель В.П. Сучасні гібридні силові установки для легкових автомобілів / В.П. Кужель, Д.С. Стаднійчук // Матеріали VI міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту», 21–23 жовтня, 2013 р.: Збірник наукових праць. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – С. 145 – 147.
45. Тімков О.М. Аналіз конструктивних схем гібридних автомобілів / О.М. Тімаков // – Вісник СХУ ім. Володимира Даля – 2010 – № 7(149). – С.1-4.
46. Калухов О.Ф., Остроух А.В., Солнцев А.А., Ягудаев Г.Г. Математическая модель связей в системе диагностики электрооборудования автомобилей //Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2010. – №. 2. – С. 66-70.

47. Акимов С.В. Электрооборудование автомобилей. Учебник для вузов. / С.В. Екимов, Ю.П. Чишков. – М.: ООО Книжное издательство "За рулем", 2005. – 336 с.
48. Р. Мэк. Импульсные источники питания. Теоретические основы проектирования и руководство по практическому применению. – М.: Додека, 2008. – 272 с.
49. Паникарский А.С. Экономические предпосылки развития гибридного автотранспорта в Украине Автомобильный транспорт. Сб. научных трудов, Вып.18, ХНАДУ, Харьков .2006
50. Бажинов О.В. Вибір оптимальних параметрів компонентів електросилової установки гібридного автомобіля. / Бажинов О.В, Боженів В.С, Паникарский А.С. // Вестник ХНАДУ. – № 34-35. – 2006. – С. 224-227
51. Колесніков В.О. Взаємозв'язок між матеріалознавством, комп'ютерним моделюванням (графікою) та діагностикою технічних систем / В.О. Колесніков, Ю.В. Павлова, В.В. Савінова, Т.В. Прохорова // Конференція молодих науковців і спеціалістів Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України (КМН–2017), 2017. - С. 133–136.
52. Мирошник И.В. Теория автоматического управления. Нелинейные и оптимальные системы. – СПб.: Питер, 2006. – 272 с.: ил.
53. Лотов А.В. Многокритериальные задачи принятия решений / А.В. Лотов, И.И. Пospelова: Учебное пособие – М.: МАКС Пресс, 2008. – 197 с.
54. Подиновский В.В. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач / В.В. Подиновский, В.Д. Ногин. – М.: Наука, 1982. – 255 с.
55. Лазарев Ю.Н. Алгоритм решения многокритериальных задач управления / Ю.Н. Лазарев, М.И. Гераськин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Т. 3, №1. – 2001. – С.80 – 85.
56. Зарубин В.С. Математическое моделирование в технике: Учеб. для вузов / Под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. – 2-е изд., стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 496 с.

57. Маркеев А. П. Теоретическая механика: Учебник для университетов. — Москва: ЧеРо, 1999, 572 стр.
58. Al-Sheikh H. et al. Study on power converters used in hybrid vehicles with monitoring and diagnostics techniques //MELECON 2014-2014 17th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference. – IEEE, 2014. – С. 103-107.
59. Rimpas D., Papadakis A., Samarakou M. OBD-II sensor diagnostics for monitoring vehicle operation and consumption //Energy Reports. – 2020. – Т. 6. – С.55-63.
60. Prokhorov D. V. Toyota Prius HEV neurocontrol and diagnostics //Neural Networks. – 2008. – Т. 21. – №. 2-3. – С. 458-465.
61. P. Caratozzolo, M. Serra, J. Riera, Energy manage strategies for hybrid electric vehicles, Proceedings of the IEEE Electric Machines and Drives Conference (IEMDC'03), 2003, pp. 241-248.
62. C.C. Lin, Huei Peng, J. W. Grizzle, Power management strategy for a parallel hybrid electric truck, IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol.11, no.6, Nov. 2003, pp.839-849.
63. Atkinson C.M., Long T.W., Hanzevack E.L. Virtual sensing: a neural network-based intelligent performance and emissions prediction system for on-board diagnostics and engine control //Progress in Technology. – 1998. – Т. 73. – №. 301-314. – С. 2-4.
64. Małek A., Taccani R. Innovative approach to electric vehicle diagnostics //The Archives of Automotive Engineering–Archiwum Motoryzacji Vol.1 – 2021. – Т.92. – №. 2. – P.47
65. Murphey Y.L. et al. Intelligent hybrid vehicle power control—Part I: Machine learning of optimal vehicle power //IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2012. – Т. 61. – №. 8. – С. 3519-3530.
66. Geng Z. et al. On-board impedance diagnostics method of Li-ion traction batteries using pseudo-random binary sequences //2018 20th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'18 ECCE Europe). – IEEE, 2018. –P.1- 9.

67. Chen X. et al. Identifying and Recognizing Usage Pattern of Electric Vehicles Using GPS and On-Board Diagnostics Data //International Conference on Transportation and Development 2020. – Reston, VA : American Society of Civil Engineers, 2020. – P. 85-97.

68. Guo Y. On the Expansion of On-Board Diagnostics (OBD) to Electric Propulsion Systems in Battery Electric Vehicles. – SAE Technical Paper, 2021. – №.2021-01-0439.

69. Murphey Y. L. et al. Intelligent hybrid vehicle power control—Part II: Online intelligent energy management //IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2012. – Т. 62. – №. 1. – P. 69-79.

70. Лепешкин А.В., Курмаев Р.Х., Катанаев Н.К. Идентификация работы двигателя самоходной машины для использования в математической модели ее движения (на примере двигателя DT466). Известия МГТУ «МАМИ» №2(4), 2007. С. 68 – 73

71. Oliver Nelles. Nonlinear System Identification From Classical Approaches to Neural Networks and Fuzzy Models. – Springer. Engineering online library. – 2001. – 779 p. <http://www.springer.de/engine/>

72. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления / Под ред. Н.Д. Егупова; издание 2-е, стереотипное. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2002. – 744 с.;

73. Zhang Y., Du X. Connected Vehicle Diagnostics and Prognostics //Prognostics and Health Management of Electronics: Fundamentals, Machine Learning, and the Internet of Things. – 2018. – P. 479-501.

74. Круглов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. – 2-е изд., стереотип. – М.: Горячая линия –Телеком, 2002. – 382 с.

75. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / Пер. с польского И.Д. Рудинского. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 344 с.

76. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс, 2-е издание /Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.



77. Бондаренко Е.В. и др. Обеспечение безопасности автотранспортных средств с учетом технического состояния элементов электрооборудования // Мир транспорта и технологических машин. – 2012. – №. 2. – С. 100-106.
78. Руденко О.Г., Бодянский Е.В. Искусственные нейронные сети: Учебное пособие. – Харьков: ООО «Компания СМИТ», 2005. – 408 с.
79. Тарасик В.П. Интеллектуальные системы управления автотранспортными средствами / В.П. Тарасик, С.А. Рынкевич. - Минск : Технопринт, 2004. – 512 с.
80. Тарасик В.П., Рынкевич С.А. Проблемы диагностирования автотранспортных средств и пути их решения // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2007. – №1(14). – С.57-66
81. Ференец А.В., Шевченко А.А., Анпилогов В.С., Плетнев С.В. Интеллектуальные системы диагностики автомобиля на основе современных мировых стандартов //Современные проблемы безопасности жизнедеятельности: интеллектуальные транспортные системы. – 2016. – С. 524-529.
82. Коцоева Т.М. Электронные и интеллектуальные системы современных автомобилей //Студенческая наука-агропромышленному комплексу. – 2017. – С. 70-73.
83. Назыров М.Б., Ерёмина Д.В. Интеллектуальные системы автомобиля //Актуальные вопросы науки и хозяйства: новые вызовы и решения. – 2019. – С. 458-461.
84. Козловский В.Н., Петровский С.В., Новикова А.П. Интеллектуальная информационная система диагностики состояния автономных транспортных объектов //Фундаментальные исследования. – 2016. – №. 6-1. – С. 73-77.
85. Комарцова Л.Г., Максимов А.В., Нейрокомпьютеры: Учеб. пособие для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 320 с.
86. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритма и нечеткие системы: Пер. с польск. И.Д. Рудинского. – М.: Горячая линия –Телеком, 2004. – 452 с.

87. Günther B. Künstliche Intelligenz in der Automobilindustrie: Von den ersten Visionen bis zu selbst denkenden Autos // Betriebswirtschaftliche KI-Anwendungen. – Springer Vieweg, Wiesbaden, 2021. – С. 245-266.

88. Вороновский Г.К. и др. Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности / Г.К. Вороновский, К.В. Махотило, С.Н. Петрашев, С.А. Сергеев. – Х.: ОСНОВА, 1997. – 112 с.

89. Аулин В.В. Обоснование использования современных подходов для усовершенствования диагностирования систем и агрегатов автомобиля / В. В. Аулин, Т. Н. Замота, А. В. Гринькив [и др.] // Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки : зб. наук. пр. - Кропивницький : ЦНТУ, 2019. - Вип. 2 (33). - С. 65-75.

90. Медведев В.С., Потемкин В.Г. Нейронные сети. MATLAB 6 / Под общ. ред. В.Г.Потемкина. – М.: Диалог-МИФИ, 2002. – 496 с.

91. Червяков Н.И., Рудакова Т.А., Щербина С.Ю. Сравнение алгоритмов обучения нейросетевой модели управления динамическими системами // Нейрокомпьютеры: разработка, применение, №1-2, 2008 г. – С.57-63.

92. Moller M.F. A scaled conjugate gradient algorithm for fast supervised learning // Neural Networks, Vol. 6, 1993, pp. 525-533.

93. Терехов В.М., Осипов О.И. Система управления электроприводов / Под. ред. Терехова В.М. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 300 с.

94. Онищенко Г.Б. Электрический привод. Учебник для вузов – М.: РАСХН. 2003. – 320.

95. Oskar Wallmark. On control of permanent-magnet synchronous motors in hybrid-electric vehicle applications. Technical reports at the school of electrical engineering. Department of electric power engineering. Chalmers university of technology. Sweden. – 2004. 115 pp.

96. Li Liu, Wenxin Liu, David A. Cartes. Permanent magnet synchronous motor parameter identification using particle swarm optimization // International journal of computational Intelligence research. Vol.4. No.2 – 2008, pp. 211 – 218.

97. Arash Hassanpour Isfahani, Siavash Sadeghi. Design of a permanent magnet synchronous machine for the hybrid electric vehicle // Proceedings of world academy of science, engineering and technology (PWASET). Vol.35, november. – 2008, pp.567 – 571.

98. Дука А.К., Чернышев В.М., Демченко Ф.О., Загарий Г.И., Семчук Р.В. Моделирование тягового частотно управляемого электропривода на базе синхронных двигателей с постоянными магнитами // Інформаційно-керуючі системи не залізничному транспорті. – 2006. – №5-6. – С.80 – 86.

99. Bitsche O., Gutmann G. Systems for hybrid cars //Journal of power sources. – 2004. – Т. 127. – №. 1-2. – С. 8-15.

100. Teuschl G. Hybrid-und Elektrofahrzeuge //ATZ-Automobiltechnische Zeitschrift. – 2009. – Т. 111. – №. 6. – С. 434-440.

101. Reif K., Noreikat K. E., Borgeest K. (ed.). Kraftfahrzeug-Hybridantriebe: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen. – Springer-Verlag, 2012. 353 p.

102. Gröschel M., Roth-Dietrich G., Neundorf C. C. Anwendungspotenziale der Künstlichen Intelligenz im Autohandel //Кünstliche Intelligenz in der Anwendung. – Springer Vieweg, Wiesbaden, 2021. – С. 51-73.

103. Дембіцький В. М. Вибір компоновальної схеми гібридного автомобіля та визначення режимів його руху //Наукові нотатки. – 2012. – №. 37. – С. 75-80.

104. Тімков О.М., Луцик А.П. Визначення та порівняння витрати палива гібридного автомобіля з паралельною силовою установкою та автомобіля з двигуном внутрішнього згоряння //Управління проектами, системний аналіз і логістика. Технічна серія. – 2013. – №. 12. – С. 180-185.

105. Тімков О.М., Іванов О.С. Визначення потужності агрегату для рекуперації кінетичної енергії та мінімальної швидкості з якої доцільно починати рекупераційне гальмування для гібридного автомобіля в залежності від їздового циклу //Управління проектами, системний аналіз і логістика. Технічна серія. – 2012. – №. 9. – С. 197-201.