

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»



М.А. Весела, Т.О. Бажинова

**МЕТОДИ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ
СИЛОВОЮ УСТАНОВКОЮ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ**

Монографія

Дніпро
НТУ «ДП»
2022

УДК 629.113

В 38

Рекомендовано до друку вченою радою НТУ «Дніпровська політехніка» (протокол № 5 від 08.12.2021).

Рецензенти:

М.Л. Шуляк, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри тракторів і автомобілів Державного біотехнологічного університету;

Ю.А. Монастирський, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри автомобільного транспорту ДВНЗ «Криворізький національний університет»;

В.В. Проців, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри технологій машинобудування та матеріалознавства НТУ «Дніпровська політехніка».

Весела М.А.

В 38 Методи адаптивного управління силовою установкою електромобіля: монографія / М.А. Весела, Т.О. Бажинова ; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Дніпро: НТУ «ДП», 2022. – 122 с.

ISBN 978-966-350-772-9

Розглянуто питання підвищення ефективності управління силовою установкою електромобіля. Вирішена задача підвищення економічності та екологічної безпеки транспортних засобів на підставі нової концепції моделювання та оптимізації управління силовою установкою електромобіля, забезпечуючи єдиний підхід к дослідженням поточних процесів залежно від схеми будови і конструктивних особливостей силової установки електромобіля. Розроблено теоретичні основи структурної та параметричної ідентифікації математичних моделей тягового електродвигуна та бортової електростанції й отримано нейромережеву модель двигуна внутрішнього згоряння бортової електростанції, яка визначає залежність ефективного крутного моменту, витрати палива від швидкості обертання колінвалу та сигналу управління потужністю, а також динамічну та статистичну моделі бортової електростанції на основі вентильного електродвигуна. Отримане оптимальне управління використовується при розробці логічних правил вибору стратегії управління, а також при дослідженні впливу основних параметрів електромобіля на показники витрати енергії.

Для студентів, інженерно-технічних працівників, співробітників вищих навчальних закладів і науково-дослідних інститутів.

Іл. 49. Бібліогр.: 101 назва.

УДК 629.113

ISBN 978-966-350-772-9

© М.А. Весела, Т.О. Бажинова, 2022

© НТУ «Дніпровська політехніка», 2022

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень.....	4
Вступ.....	5
Розділ 1 Актуальність проблеми і вибір напрямку досліджень.....	7
1.1 Електромобіль, як вид електричного транспорту.....	7
1.2 Аналіз електрохімічних систем тягового електроприводу.....	11
1.3 Вибір електрохімічної системи тягового електроприводу електромобіля.....	21
1.4 Висновки.....	25
Розділ 2 Теоретичне дослідження методів управління силовою установкою електромобіля.....	27
2.1 Загальні принципи будови системи управління силовою установкою електромобіля.....	27
2.2 Формальна постановка задачі оптимізації.....	31
2.3 Енергетична оцінка тягового електроприводу електромобіля.....	33
2.4 Математична модель тягового електродвигуна.....	42
2.5 Математична модель тягової акумуляторної батареї.....	51
2.6 Висновки.....	53
Розділ 3 Розробка методів адаптації управління силовою установкою.....	55
3.1 Адаптивне управління силовою установкою електромобіля.....	55
3.2 Застосування нейро-нечіткого адаптивного контролера при управлінні силовою установкою електромобіля.....	63
3.3 Висновки.....	67
Розділ 4 Експериментальні дослідження силової установки електромобіля.....	69
4.1 Методика і апаратура експериментальних досліджень.....	69
4.2 Ефективність роботи бортової системи електропостачання.....	82
4.3 Методологія практичного використання результатів дослідження.....	88
4.4 Висновки.....	93
Висновки.....	94
Перелік посилань.....	96
Додаток А Режими роботи силової установки електромобіля.....	103

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

СУЕ	силова установка електромобіля
ТАБ	тягова акумуляторна батарея
ЕСУ	електрична система управління
САУ	система автоматичного управління
ККД	коефіцієнт корисної дії
ДВЗ	двигун внутрішнього згоряння
ШНМ	штучна нейронна мережа

ВСТУП

В умовах експлуатації до автомобілів пред'являють жорсткі вимоги в плані паливної економічності, безпеки руху, екологічності, періодичності та вартості технічного обслуговування і ремонту. Це зумовлює необхідність використання автомобілів, що мають високу якість і пристосованість до умов експлуатації в Україні.

Зміна клімату, погіршення екології та забруднення зовнішнього середовища – проблеми, які потребують активного рішення. Відповідно Паризького рішення по клімату розглянуто обмеження глобального потепління в межах 2 градусів Цельсія (по відношенню до показників доіндустріальної епохи). Таким чином, використання електромобілів дозволяє знайти рішення в боротьбі зі зміною клімату, а також покращенню якості повітря в містах.

Електромобілі в Україні мають все більшу популярність. На сьогоднішній день перспективним напрямком для підвищення екологічної чистоти та економічності є використання електромобілів з підзарядкою на борту. Такий автомобіль включає в себе електродвигун, контур рекуперації і електростанцію з двигуном внутрішнього згоряння (ДВЗ).

Головною перевагою електромобіля з підзарядкою на борту є його здатність підтримувати найбільш економічний та екологічно безпечний режим роботи електростанції з ДВЗ при заряді акумуляторної батареї при різних вантажно-швидкісних режимах. Іншою важливою перевагою електромобіля є здатність акумулювати лишки енергії при гальмуванні, що ефективно при міському циклі руху.

До наступного часу ряд особливостей процесу управління силовою установкою електромобіля з підзарядкою на борту залишаються необслідуваними. Методи адаптації управління силовою установкою до зміни зовнішніх умов експлуатації є недостатньо ефективними. Дані обставини не дозволяють в повному обсязі розкрити можливості електромобілів.

Це визначає актуальність розробки нових методів управління силовою установкою електромобіля з підзарядкою акумуляторної батареї на борту на підставі теорії автоматичного управління, нейро-мережевого і нейро-нечіткого адаптованого управління.

Метою даної монографії є підвищення ефективності використання електромобілів за рахунок методів адаптації управління силовою установкою до умов експлуатації.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються наступні задачі:

1. Провести дослідження по удосконаленню методів моделювання та оптимізації управління силовою установкою електромобіля з підзарядкою на підставі системного аналізу підвищення економічності витрат енергії;

2. Розробити теоретичні основи структурної та параметричної ідентифікації математичних моделей силової установки електромобіля з підзарядкою.

3. Розробити концепцію багатокритеріальної оптимізації управління силовою установкою електромобіля з підзарядкою в умовах експлуатації на основі використання методів математичного програмування та нейро-нечіткого управління

4. Провести експериментальні дослідження для оцінки ефективності розробленого методу моделювання і оптимізації управління силовою установкою електромобіля з підзарядкою.

Об'єктом дослідження є процес управління силовою установкою електромобіля з підзарядкою по розподілу потужності заряду тягової акумуляторної батареї для заданих умов експлуатації

Предметом дослідження є методи управління силовою установкою електромобіля з підзарядкою на етапі експлуатації.

РОЗДІЛ 1

АКТУАЛЬНІСТЬ ПРОБЛЕМИ І ВИБІР НАПРЯМКУ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Електромобіль, як вид електричного транспорту

На даний час світова промисловість активно займається пошуком альтернативних вуглеводневому паливу джерел енергії. Розробки в цих напрямках ведуться в багатьох розвинених країнах світу. Електромобіль, є одним з приватних видів електричного транспорту. В даний час, електромобілі застосовуються для перевезення вантажів і людей у великих містах, міських парках, лісових зонах і зонах відпочинку, тобто в тих областях, де питання екологічної безпеки стоїть найгостріше.

Так, за даними Уряду України, до 60% екологічного збитку пов'язане з перевезенням пасажирів легковими автомобілями. На перевезення вантажів припадає близько 27% і на автобусні перевезення близько 13% екологічного збитку. У процентному співвідношенні шкідливих викидів, шкоди навколишньому середовищу і здоров'ю населення від викидів автотранспорту в містах визначають оксиди азоту (44,5%), акролеїн (7,5%), сажа (7,4%), оксид вуглецю (6%), діоксин сірки (3,4%), формальдегід (2,8%), бензапирен (1,3%) і ацетальдегід (1,1%).

Одним з основних шляхів зниження негативного впливу автомобіля на екологію міста є використання альтернативних екологічно чистіших джерел енергії. Інтенсивні роботи в цьому напрямку ведуться в багатьох розвинених країнах світу. Провідні автомобільні концерни інвестують мільярди доларів у розвиток транспорту та технологій альтернативних видів джерел енергії. Одним з таких альтернативних рішень є транспортні засоби на основі тягового електроприводу.

Увага конструкторів до транспортних засобів з електричною тягою підтримується тим, що крім відсутності токсичних викидів в навколишнє середовище (т.зв. технології автомобілів з нульовим викидом – zero-emission vehicles), сучасні електродвигуни мають механічні характеристики, ідеально відповідають вимогам тягового приводу, а також високий ККД. Так, ККД сучасного вентильного електродвигуна досягає 90–95 %, в той час як ККД бензинового ДВЗ становить близько 30%, дизельного – 40%, криогенних установок – 30–35%, паливних елементів – 70 %. Разом з тим, необхідно відзначити, що загальний ККД електромобіля, якщо вважати його з моменту отримання електричної енергії до факту руху електротранспорту, виявляється приблизно вдвічі вище, ніж ККД сучасного автомобіля, обладнаного ДВЗ[16].

Подальший розвиток електромобілів істотно стримують мала питома ємність сучасних ТАБ, тривалий час, що вимагається для їх зарядки, а також необхідність створення спеціальної інфраструктури – зарядних станцій. Застосування сонячних батарей не дозволяє в повній мірі вирішити проблему підзарядки ТАБ[16,17].

Однак електромобілі – це нова технологія, яка потребує створення спеціальної системи для повноцінної експлуатації. Цей процес охоплює велику кількість виробників. Крім традиційних учасників (автовиробники, дилери, виробники і установники зарядних станцій) учасниками екосистеми електромобілів є енергетичні компанії, компанії з утилізації батареї та компанії, які дають «друге життя» батареї. Велику роль в підтримці екосистеми мають державні та фінансові структури, які надають додаткові пільги для власників електротранспорту (рис. 1.1)[19].

Ще одним важливим фактором у розвитку електромобілів є перехід автомобільних парків державних компаній та представників бізнесу на електричний транспорт. Наприклад, електромобільний парк пошти в Норвегії складається з 240 Renault Kangoo Z.E., парк поліції в Німеччині сформований з Renault ZOE. В Данії є компанія, що надає послуги з обміну автомобілями (car-sharing) та володіє парком з 420 Renault ZOE, а міжнародна компанія з оренди пропонує туристам електромобілі Renault Twizy.



Рисунок 1.1 – Екосистема електромобілів

З огляду на переваги електромобіля для суспільства та екології, стрімко зростає кількість виробників на ринку електромобілів в світі. В 2011 р. розвитком напрямку електромобілів займалися тільки 4 брэнда (Renault, Nissan, Tesla, Mitsubishi), а сьогодні в цей процес вже залучено більше 20 виробників, включаючи непрофільні компанії, такі як Google, яка представила свої розробки у вигляді безпілотного електромобіля[19].

За 5 років в світі було реалізовано понад 2 млн електромобілів (включаючи гібриди, що підключаються до електромережі). У Європі лідером з продажу електромобілів є брэнд Renault, який займає 25,6% ринку. На другому і третьому місці знаходяться Nissan з часткою 22,8% і Tesla з часткою 14,2%.

Попит на даний вид транспорту поступово збільшується і в Україні. В 2016 р. на українському ринку парк електромобілів склав вже більше 2000 од.

Покупці легкових автомобілів останнім часом віддають перевагу новим економічним автомобілям. Цей факт пов'язаний з постійним зростанням цін на бензин, дизельне паливо і газ. У середньому собівартість нафтопродуктів в Україні на 20–30% перевищує їх вартість у Росії, або в США, тому використання електромобілів в Україні найбільш вигідна. Основний сектор ринку легкових автомобілів – це бюджетні автомобілі, вартість яких складає до 20 тис. у.о. Саме цей сегмент ринку складає 80% продажу нових легкових автомобілів. Втім, за підвищенням паливної економічності та екологічної чистоти покупцям доводиться платити високу ціну при покупці, наприклад, таких автомобілів як Nissan Leaf або Mitsubishi I-MiEV. Основний фактор, що стримує масове виробництво та споживання електромобілів – висока вартість тягових акумуляторних батарей і відсутність розвинутої мережі зарядних станцій. Сучасні тягові акумуляторні батареї поступаються бензину або дизельному паливу за питомою енергоемністю. Без удосконалення енергетичних характеристик акумуляторних батарей електромобілі будуть мати обмежене використання. Тому на сьогоднішній час найбільш перспективним напрямом розвитку екологічних і економічних дорожніх транспортних засобів є створення силових установок, які використовують синергетичну комбінацію ДВЗ і тягових електричних машин, які отримують живлення від електричних накопичувачів енергії – літій-іонних акумуляторних батарей.[21]

Індустрія автобудування знаходиться в безперервному процесі розвитку і вдосконалення. У свою чергу, більшість автолюбителів вже не перший рік задається питанням про автомобіль майбутнього. З огляду на еволюції авторинку, а також деяких економічних і екологічних факторів, був створений електромобіль, який, як стверджують експерти авторинку, стане домінуючим транспортним засобом в недалекому майбутньому.

Такий автомобіль вельми вигідний з точки зору споживання палива. Адже ціна на нафтопродукти зростає з кожним днем, а електроенергія може економічно використовуватися споживачами за допомогою спеціальних пристроїв зберігання енергії. При цьому, використання електромобілів не шкодитиме довкіллю.

Якщо говорити про продаж електромобілів на авторинку, варто сказати, що лідируючими виробниками є США, Японія, Франція і Китай. Вітчизняні виробники ще не впроваджують електромобілі на ринок. Якщо розглянути електромобілі, які знаходяться в серійному виробництві, можна виділити три основні групи:

- шосейні електромобілі;
- міські електромобілі;
- спортивні електромобілі.

Найшвидшими є спортивні електромобілі, які можуть розвивати швидкість більш ніж в 200 км/год.

Даний вид транспорту пересувається за допомогою використання спеціальних батарей – сонячних або акумуляторних. Проте, акумуляторний тип батарей використовується набагато частіше, ніж сонячний. Даний тип батареї можна заряджати від зовнішніх джерел або від генератора. Як правило, потужність батареї повинна бути еквівалентною потужності двигуна. Ще одним безсумнівним плюсом електромобіля є проста комплектація деталей. У

комплект деталей електромобіля входять: батарея акумуляторного або сонячного типу, електродвигун, зарядний пристрій, перетворювач струму і електронна система управління[22],[23].

Порівнюючи функціональні характеристики електромобіля і автомобіля, можна сміливо сказати, що електромобіль набагато переважає над простим автомобілем з огляду на наступні чинників: ККД двигуна електромобілів значно вище, ніж ККД двигуна базових автомобілів; електромобіль не вимагає використання таких шкідливих хімікалій, як антифриз, моторне масло, у електромобілів також відсутній вихлоп; наявність електродвигуна сприяє значному спрощенню всієї конструкції електромобіля; заряджати електромобіль можна як від звичайної домашньої мережі, так і на спеціалізованих заправках; гальмування здійснюється за допомогою зворотної електричної машини, що робить непотрібним наявність традиційної гальмівної системи; крім переваг електромобіля, перерахованих вище, розвиток даного виду транспорту має ще одним позитивним ефектом, конкретніше – в соціально-економічній сфері. Як і будь-яка інша технологічна новинка, електромобіль несе в собі кардинальні зміни в суспільстві в цілому.

Сфера виробництва електромобілів є високотехнологічну діяльність, яка в свою чергу дозволить використовувати сучасний потенціал численних наукових установ і промислових сфер. Також дана сфера виробництва допоможе створити умови для запитання знань, досвіду діючих фахівців і залучити у виробництво покоління молодих фахівців.

На рисунку 1.2 приведена гістограма порівняння питомих показників джерел енергії[24].

Виникають додаткові труднощі будівництва заправок для електромобілів, що працюють на акумуляторній батареї. Тут стоїть питання швидкого і безпечного поповнення паливом транспортного засобу. Стосовно до акумуляторної батареї, слід зазначити, що швидкість її заряду хоч і залежить від властивостей електрохімічної системи, але у всіх випадках час заряду значно перевершує час поповнення паливом автомобіля, що працює на основі

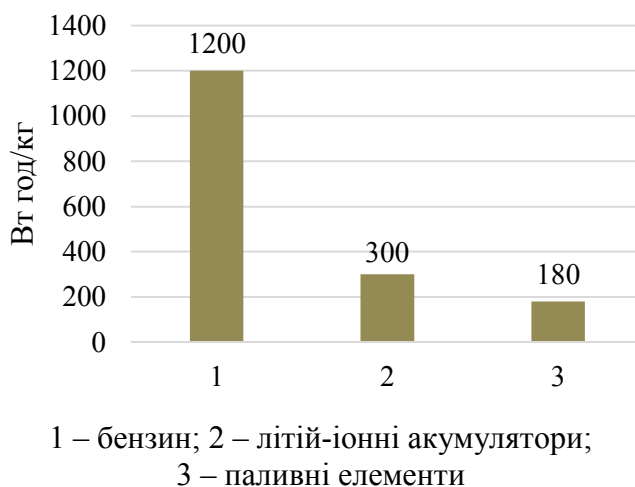


Рисунок 1.2 – Питомі характеристики джерел енергії

вуглеводного палива або електромобіля з паливними елементами. З точки зору безпеки, необхідно забезпечити гарантований захист користувача і обслуговуючого персоналу від ураження електричним струмом або витоку водню і кисню з резервуарів заправної станції і електромобіля з паливними елементами. На сьогоднішній день не спостерігається принципового прориву в дослідженнях, пов'язаних з розробкою нових джерел енергії, які дозволили б отримати питомі характеристики порівнянні з характеристиками вуглеводневого палива.

1.2 . Аналіз електрохімічних систем тягового електроприводу

У промисловості і автомобілебудуванні широке застосування отримали нікель-кадмієві (NiCd), нікель-металгідридні (NiMh), свинцево-кислотні (Pb) і літій-іонні (Li-ion) акумуляторні батареї. В останні роки розробники електронної та силовий апаратури проявляють особливий інтерес до електрохімічним накопичувачів енергії на основі літійового електрода. Нижче розглядаються властивості і особливості експлуатації вище перерахованих джерел енергії.

Нікель-кадмієві акумулятори випускаються вже більше п'ятдесяти років, тому їх структура і властивості найбільш повно вивчені. Сучасні нікель-кадмієві акумулятори випускаються в герметичному циліндричному або призматичному корпусах. Питомі енергетичні характеристики NiCd акумуляторів досягають величин 60 Вт·год/кг і 175 Вт год/дм³. Номінальна напруга герметичних акумуляторів даної електрохімічної системи становить 1,28 В.

Саморозряд герметичних NiCd акумуляторів визначається в першу чергу термодинамічною нестійкістю позитивного оксидно нікелевого електрода. Вплив на саморозряд мікроутечек між різнополярними електродами порівняно мало на початку експлуатації, але зростає з напрацюванням.

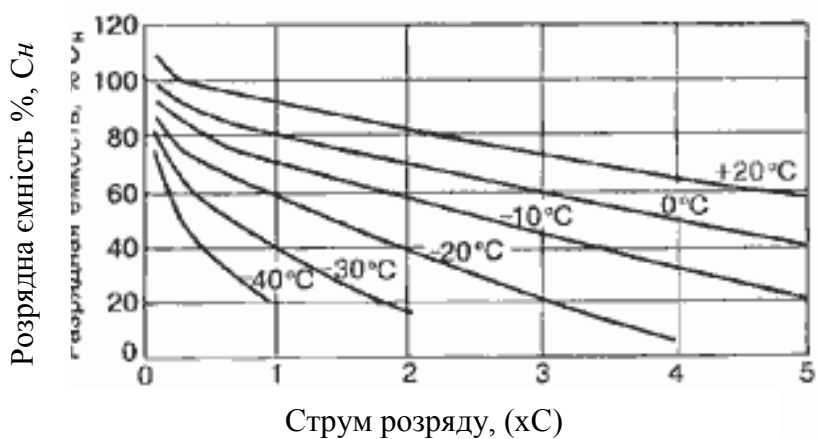


Рисунок 1.3 – Розрядна характеристика нікель-кадмієвого акумулятора (NiCd)

Процес саморозряду веде не тільки до втрати ємності, але і до загального зниження напруги (на 30 – 50 мВ). Це пов'язано як з поступовим вирівнюванням рівня зарядженості поверхневих і глибинних шарів електродів, так і з частковою пасивацією їх активних мас[26],[27].

На термін служби акумуляторів сильний вплив надає режим експлуатації: режим і глибина розряду, режим заряду, тривалість паузи між зарядом і розрядом при безперервному циклуванні, періоди експлуатації та зберігання.

Аналіз даних про відмови герметичних нікель-кадмієвих акумуляторів показує, що при їх експлуатації накопичуються ефекти, пов'язані з наступними факторами:

- втратою активних мас і перерозподілом їх на електродах;
- зниженням робочої поверхні електродів;
- протіканням процесів, пов'язаних з необоротним споживанням кисню і води, а також розпадом неорганічних речовин (різних добавок);
- зміною кількості і складу електроліту і його перерозподілом всередині акумулятора.

На закінчення слід зазначити також досить хорошу стійкість NiCd акумуляторів до випадкових перерозрядів. В цьому випадку в акумуляторі виділяється водень, рекомбінація якого дуже низька, але при нечастих перерозрядах його кількість не призводить до розгерметизації, а напруга акумулятора при знятті поляризації відновлюється.

Нікель-металогідридні (NiMh) акумулятори з'явилися в результаті заміни кадмієвого електрода на електрод сплавів нікелю з металами рідкоземельної групи.

Розвиток галузі розробок нікель-металгідридних акумуляторів почався кілька десятиліть тому. Зовнішній вигляд нікель-металгідридного акумулятора представлений на рисунку 1.4.

Напруга розімкненого ланцюга акумуляторів (НРЛ) NiMh зазвичай знаходиться в діапазоні 1,32–1,35 В і практично дорівнює НРЦ нікель-кадмієвого акумулятора. Слід зазначити, що NiMh акумулятори випускаються в таких же корпусах, що і NiCd, що робить можливою взаємозамінність цих електрохімічних систем в радіоелектронній апаратурі. Проте, NiMh акумулятори мають ряд переваг і недоліків по відношенню до нікель-кадмієвих.

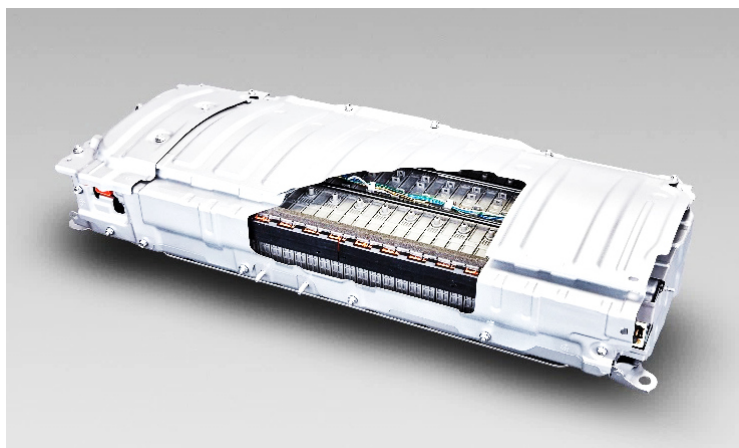


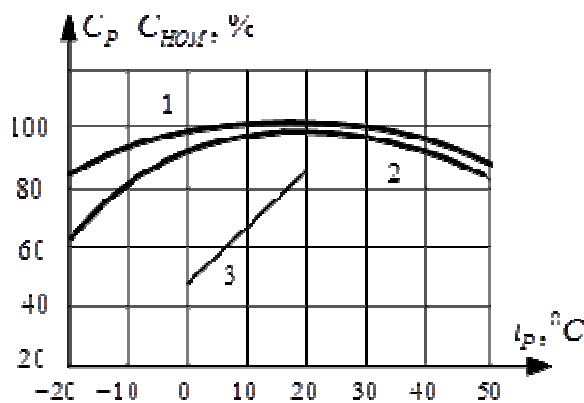
Рисунок 1.4 – Зовнішній вигляд нікель-металогідридного акумулятора

До одного з основних переваг необхідно віднести заміну негативного електрода, що дозволило в 1,3–2 рази збільшити закладку активних мас позитивного електрода, який визначає ємність акумулятора. Таким чином, нікель-металогідридні акумулятори володіють більш високими енергетичними характеристиками в порівнянні з нікель-кадмієвих накопичувачами. Так, питома вагова енергія NiMh акумуляторів досягає величини 80 Вт год/кг, а питома об'ємна енергія – 190 Вт год/л. Ємність, яку здатний віддати акумулятор, залежить як від величини його навантаження при розряді, так і від температури навколишнього середовища.

Нікель-металогідридні акумулятори за своєю конструкцією є аналогами нікель-кадмієвих акумуляторів, а по електрохімічним процесам – нікель-водневих акумуляторів. Питома енергія NiMh акумулятора значно вище питомої енергії NiCd і Ni-H₂-акумуляторів (таблиця 1.1).

З підвищенням навантаження (зменшення часу розряду) і при зниженні температури ємність NiMh акумулятора зменшується (рисунок 1.5). Особливо помітно дія зниження температури на ємність при великих швидкостях розряду і при температурах нижче 0 С.

При зберіганні відбувається саморозряд NiMh акумулятора. Через місяць при кімнатній температурі втрата ємності складає 20–30%, а при подальшому зберіганні втрати зменшуються до 3-7% на місяць. Швидкість саморозряду підвищується при збільшенні температури (рисунок 1.6).



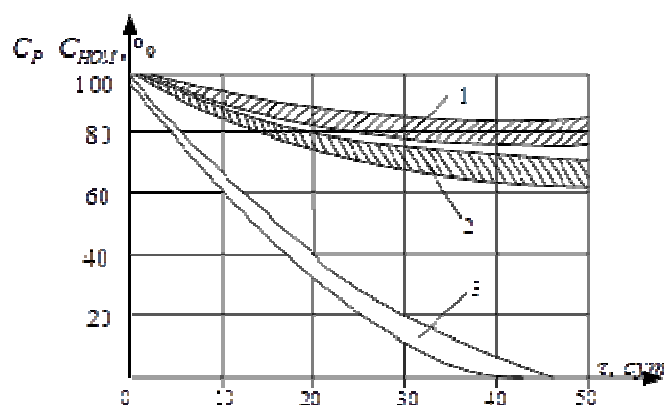
1- струм розряду 0,2 С; 2- струм розряду 1 С;
2- струм розряду 3 С

Рисунок 1.5 – Залежність розрядної ємності NiMh акумулятора від температури при різних токах розряду

Таблиця 1.1 – Порівняння типів Ni-Mh, Ni-Cd і Ni-H2-акумуляторів

Параметр	Типи акумуляторів		
	Ni-Cd	Ni-H2	Ni-Mh
Номинальна напруга, В	1,2	1,2	1,2
Питома енергія: Вт·год/кг Вт·м/дм ³	20-40	40-55	50-80
	60-120	60-80	100-270
Питома потужність, Вт/кг	50-400	50-100	50-1100
Термін служби, рік	1-5	2-7	1-5
Термін служби, цикл	500-1000	2000-3000	500-2000
Саморозряд,%	20-30 (за 28 доб.)	20-30 (за 1 доб.)	20-40 (за 28 доб.)
Робоча температура, °С	-50...+60	-20...+30	-40...+60
Шкідливі речовини	Cd	Ni	Ni

ККД NiMh акумуляторів по напрузі η_C складає 83-87 %. ККД (віддача) по ємності η_U і по енергії η_W NiMh – акумуляторів залежить від швидкостей протікання основної та побічної (виділення кисню) реакцій на оксидно-нікелевому електроді. При зарядній ємності C_3 до $0,8 C_{ном}$ швидкість побічної реакції дуже мала і $\eta_C \approx 100 \%$, $\eta_W \approx 85 \%$. При $C_3 = 1,5 \cdot C_{ном}$, $\eta_C = 67 \%$. і $\eta_W \approx 55 \%$ - 58% .



1 – при температурі 0°C; 2 – при температурі 20°C;
3 – при температурі 40°C

Рисунок 1.6 - Залежність розрядної ємності NiMh акумулятора від часу зберігання при різних температурах

Переваги та недоліки NiMh акумуляторів. Значне збільшення питомих енергетичних параметрів не єдина перевага NiMh акумуляторів перед NiCd акумуляторами. Відмова від кадмію означає також перехід до більш екологічно чистого виробництва. Легше вирішується і проблема утилізації акумуляторів, які вийшли з ладу. Ці переваги NiMh акумуляторів визначили більш швидке зростання обсягів їх виробництва у всіх провідних світових акумуляторних компаній у порівнянні з NiCd акумуляторами.

У NiMh акумуляторів немає «ефекту пам'яті», що властиве NiCd акумуляторам через утворення нікелата в негативному кадмієвому електроді. Однак ефекти, пов'язані з перезарядом оксидно-нікелевого електрода, зберігаються.

Зменшення розрядної напруги, що спостерігається при частих і довгих перезарядках так само, як і у NiCd акумуляторів, може бути усунуто при періодичному здійсненні кількох розрядів до 1 В. Такі розряди досить проводити 1 раз на місяць.

Однак нікель-металогідридні акумулятори поступаються нікель-кадмієвих, які вони покликані замінити, за деякими експлуатаційними характеристиками:

- NiMh акумулятори ефективно працюють в більш вузькому інтервалі робочих струмів, що пов'язано з обмеженою десорбцією водню металогідридного електрода при дуже високих швидкостях розряду;

- NiMh акумулятори мають більш вузький температурний діапазон експлуатації: велика їх частина непридатна при температурі нижче -10°C і вище $+40^{\circ}\text{C}$, хоча в окремих серіях акумуляторів коригування рецептур забезпечила розширення температурних меж;

- протягом заряду NiMh акумуляторів виділяється більше теплоти, ніж при заряді NiCd акумуляторів, тому з метою попередження перегріву батареї з NiMh акумуляторів в процесі швидкого заряду і/або значного перезарядження в них встановлюють термо-запобіжники або термо-реле, які мають у своєму розпорядженні на стінці одного з акумуляторів в центральній частині батареї;

- NiMh акумулятори мають підвищений саморозряд, що визначається неминучістю реакції водню, розчиненого в електроліті, з позитивним оксидно-нікелевим електродом (завдяки використанню спеціальних сплавів негативного електрода, вдалося домогтися зниження швидкості саморозряду до величин, близьких до показників для NiCd акумуляторів);

- небезпеку перегріву при заряді одного з NiMh акумуляторів батареї, а також переполюсованія акумулятора з меншою ємністю при розряді батареї, зростає з неузгодженістю параметрів акумуляторів в результаті тривалого циклювання, тому створення батарей більш ніж з 10 акумуляторів не рекомендується усіма виробниками.

Як вже зазначалося раніше, деградація NiMh акумуляторів визначається, перш за все, зниженням при циклюванні сорбуючою здатності негативного електрода. У циклі заряду-розряду відбувається зміна обсягу кристалічної решітки сплаву, що призводить до утворення тріщин і подальшої корозії при реакції з електролітом. Утворення продуктів корозії відбувається з поглинанням кисню і водню, в результаті чого зменшується загальна кількість електроліту і підвищується внутрішній опір акумулятора.

Слід зауважити, що характеристики NiMh акумуляторів істотно залежать від сплаву негативного електрода і технології обробки металу для підвищення стабільності його складу і структури. Це змушує виробників акумуляторів уважно ставитися до вибору постачальників сплаву, а споживачів акумуляторів – до вибору компанії-виробника.

Найбільш часто в електромобілях застосовують літій-іонні (Li-ion) акумулятори. Це пов'язано з їх перевагами в порівнянні з широко використовуваними раніше нікель-металогідридними (NiMh) і нікель-кадмієвих (NiCd) акумуляторами. У Li-ion акумуляторів значно кращі параметри. Однак слід враховувати, що NiCd акумулятори мають одну важливу гідність: здатність забезпечувати великі струми розряду. Це властивість не є критично важливим при харчуванні ноутбуків або стільникових телефонів (де частка Li-ion доходить до 80% і їх частка стає все більше і більше), але існує досить багато пристроїв, які споживають великі струми, наприклад всілякі електроінструменти, електробритви і т.п. До сих пір ці пристрої були зроблені майже виключно з NiCd акумуляторів. Однак в даний час, особливо в зв'язку з обмеженням застосування кадмію відповідно до директиви RoHS, різко активізувалися дослідження по створенню безкадмієвих акумуляторів з великим розрядним струмом[24].

Літій-іонний акумулятор (Li-ion). Вторинні джерела енергії на основі літійового електрода, з яких особливо виділяються літій-іонні системи, все більше завойовують ринок як слабкострумної, так і силової електроапаратури. Прорив літій-іонних джерел пов'язаний з очікуваними високими питомими характеристиками і значним розширенням робочого температурного діапазону. Конструктивно літій-іонні акумулятори випускаються в призматичних і циліндричних варіантах.

В циліндричних акумуляторах скручений у вигляді рулону пакет електродів і сепаратора поміщений в алюмінієвий корпус, з яким з'єднаний негативний електрод. Позитивний електрод акумулятора виведений через ізолятор на кришку. Зовнішній вигляд літій-іонного акумулятора електромобіля Nissan Leaf представлений на рисунку 1.7.

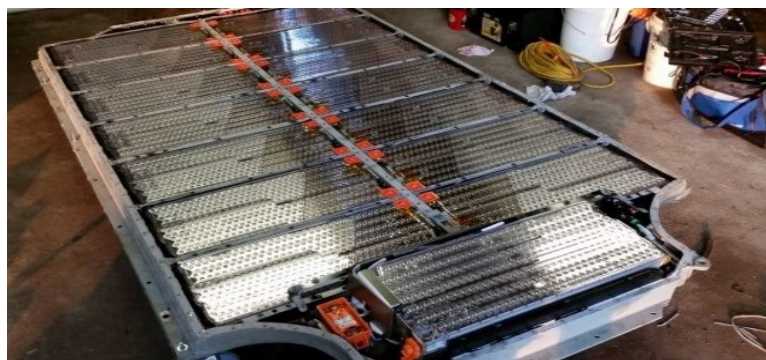


Рисунок 1.7 – Літій-іонна акумуляторна батарея електромобіля Nissan Leaf

Літій-іонний акумулятор для електромобіля зібраний з 192 осередків. До складу акумулятора включений манганат літію на позитивних пластинах і графіт на негативному електроді. Маса акумулятора близько 270 кг і розташована він під сидіннями електромобіля (рисунок 1.8). При ємності батареї 24 кВт·год і можливості рекуперативного гальмування запас ходу електромобіля складе близько 240 км. Життєвий цикл даного акумулятора

складає більше 5 років. Повний цикл заряду Li-ion акумуляторів від побутової електромережі з напругою 220 В і силою струму 12 А триває близько 9 год, 80 % ємності на спеціальному зарядному пристрої Nissan заповнюються за 30 хв. Електромобіль обладнаний двома гніздами для зарядних пристроїв в передній частині машини: одне для стандартної і інше для прискореної підзарядки (рисунок 1.9).



Рисунок 1.8 – Розміщення літій-іонної акумуляторної батареї в електромобілі Nissan Leaf

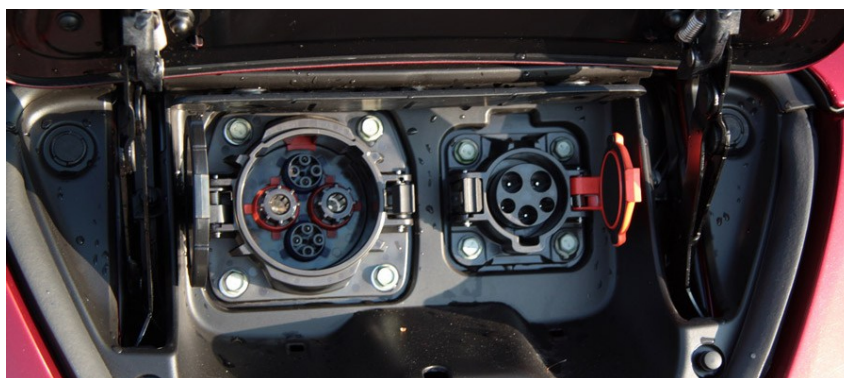


Рисунок 1.9 – Роз'єми для заряду електромобіля Nissan Leaf

В основі роботи електродів Li-ion акумулятора лежить принцип впровадження-вилучення іонів літію в матрицю певної структури. Такі матриці виступають в ролі «господаря», що представляють вільні простори своєї структури «гостю», яким є іон літію. При цьому гість, при здійсненні заряду або розряду акумулятора впроваджується в одну з матриць і відповідно йде з іншого. Завдяки цьому, подібну структуру називають «крісло-качалка». Середовищем, через яку відбувається перенесення іона літію, є електроліт. Зображення структури Li-ion акумулятора («крісло-качалка») показано на рисунку 1.10.

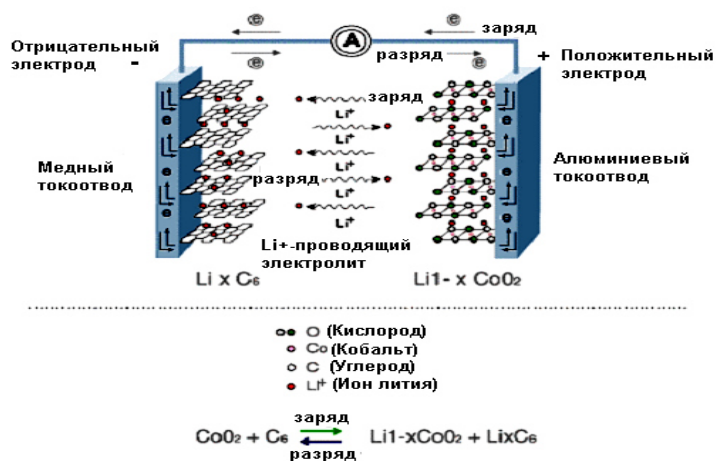


Рисунок 1.10 – Структурне зображення літій-іонного акумулятора

Зі схеми видно, що процес не обмежується тільки перенесенням іона літію. Одночасно в тому ж напрямку відбувається перенос електрона, так що спад позитивного заряду на аноді акумулятора компенсується відходом електрона, а прибуття позитивного заряду на катоді компенсується приходом електрона. При заряді іон літію залишає матрицю позитивного електрода і впроваджується в вуглецеву матрицю (негативний електрод). При розряді відбувається зворотний процес. Середовище, через котре відбувається перенесення іонів літію від електрода до електрода, служать рідкі або тверді електроліти. Перенесення електронів здійснюється за допомогою зовнішнього провідника, що з'єднує два електроди[25].

Сучасні літій-іонні акумулятори досягли високих питомих показників: 100–180 Вт·год/кг і 250–400 Вт·год/л. Робоча напруга акумуляторів 3,5–3,7 В. Сучасні акумулятори працездатні при токах розряду до 20 С. Ставлення зарядної ємності літій-іонних акумуляторів до їх розрядної ємності близько до одиниці. Як правило, кількість циклів перезарядження акумулятора не більше 1000.

На рисунку 1.11 наведена розрядна характеристика літій-іонного акумулятора при різних температурах навколишнього середовища + 20° С і при різних токах розряду.

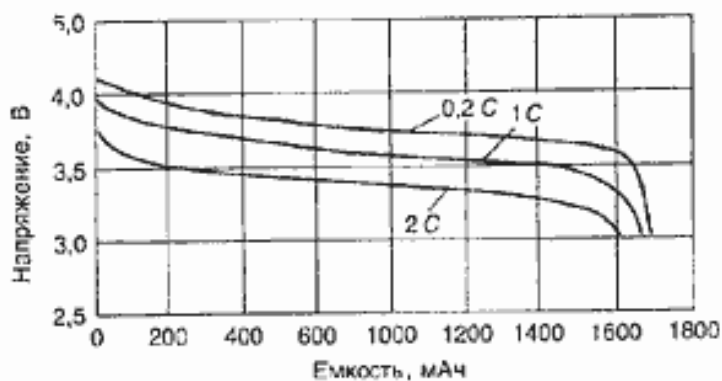


Рисунок 1.11 – Розрядна характеристика літій-іонного акумулятора

Як видно з графіка, для даного акумулятора розряд (при температурі $+20^{\circ}\text{C}$) при токах навантаження 0,2С, 1С і 2С не робить істотного впливу на його розрядні характеристики.

Li-іон акумулятори заряджаються в комбінованому режимі: спочатку при постійному струмі (в діапазоні від 0,2С до 1С) до напруги 4,1–4,2 В (в залежності від рекомендацій виробника), далі при постійній напрузі. Перша стадія заряду може тривати близько 40 хв, друга стадія довше. Більш швидкий заряд може бути досягнутий при імпульсному режимі.

У початковий період, коли тільки з'явилися Li-іон акумуляторні батареї, що використовують графітову систему, потрібно обмеження напруги заряду з розрахунку 4,1 В на елемент. Хоча використання більш високої напруги дозволяє підвищити енергетичну щільність, окислювальні реакції, які відбуваються в елементах такого типу при напрузі, що перевищують поріг 4,1 В, приводили до скорочення їх терміну служби. Згодом цей недолік ліквідували за рахунок застосування хімічних добавок, і в даний час Li-іон елементи можна заряджати до напруги 4,20 В. Допустиме відхилення напруги становить лише близько $\pm 0,05$ В на елемент. Li-іон акумуляторні батареї промислового і військового призначення повинні мати більший термін служби, ніж батареї для комерційного використання. Тому для них гранична напруга кінця заряду становить 3,90 В на елемент[26]. Хоча енергетична щільність (кВт/кг) у таких батареях нижче, підвищений термін служби при невеликих розмірах, малій вазі і більш висока в порівнянні з батареями інших типів енергетична щільність, ставлять Li-іон батареї поза конкуренцією. При заряді Li-іон акумуляторних батарей струмом 1 С час заряду становить 2-3 год. Li-іон батарея досягає стану повного заряду, коли напруга на ній стає рівним напрузі відсічення, а струм при цьому значно зменшується і складає приблизно 3 % від початкового струму заряду (рисунок 1.12).

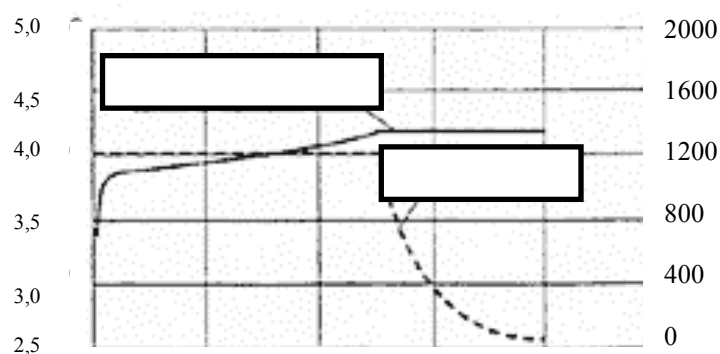
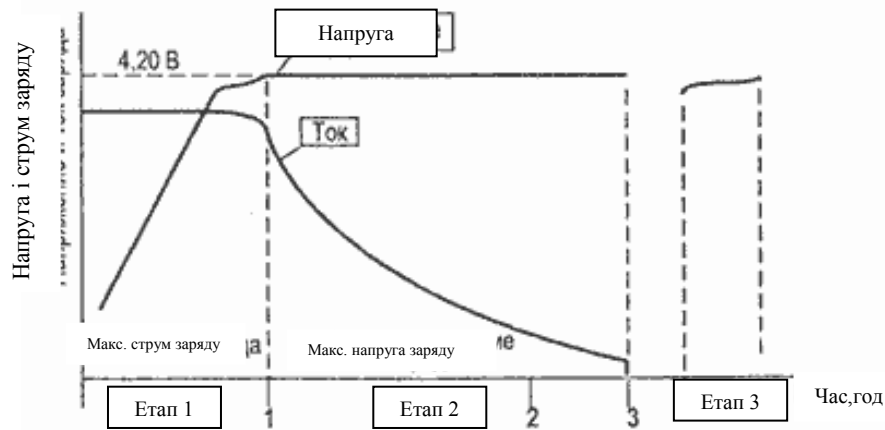


Рисунок 1.12 – Залежність напруги і струму від часу заряду літій-іонного (Li-іон) акумулятора

Етап струмової підзарядки для Li-іон акумуляторів непридатний через те, що вони не можуть поглинати енергію при перезаряді. Більш того, струмова підзарядка може викликати металізацію літію, що робить роботу акумулятора нестабільною.



- ЕТАП 1 - Через акумулятор протікає максимально допустимий струм заряду, поки напруга на ньому не досягне порогового значення;
- ЕТАП 2 - Максимальна напруга на акумуляторі досягнуто, струм заряду поступово знижується до тих пір поки він повністю не зарядиться. Момент завершення заряду настає, коли величина струму заряду знизиться до значення 3 % від початкового;
- ЕТАП 3 - Періодичний компенсуючий заряд, який проводиться при зберіганні акумулятора, орієнтовно через кожні 500 год зберігання

Рисунок 1.13 - Залежність напруги і струму від часу при заряді Li-іон акумулятора

Навпаки, коротка підзарядка постійним струмом здатна компенсувати невеликий саморозряд Li-іон батареї і компенсувати втрати енергії, викликані роботою її пристрою захисту. Залежно від типу зарядного пристрою і ступеня саморозряду Li-іон батареї така підзарядка може виконуватися через кожні 500 год, або 20 днів. Зазвичай її слід здійснювати при зниженні напруги холостого ходу до 4,05 В/елемент і припиняти, коли воно досягне 4,20 В/елемент.

У деяких типах зарядних пристроїв для заряду літій-іонної акумуляторної батареї потрібно не більше 1 год часу. У таких зарядних пристроях етап 2 виключено, і батарея переходить в стан готовності відразу після закінчення етапу 1 (рисунок 1.13). У цій точці Li-іон батарея буде заряджена приблизно на 70%, і після цього можлива додаткова підзарядка.

Отже, Li-іон акумулятори мають низьку стійкість до перезаряду. На негативному електроді на поверхні вуглецевої матриці при значному перезаряді стає можливим осадження металевого літію, що володіє великою реакційною здатністю до електроліту, а на катоді починається активне виділення кисню. Виникає загроза теплового розгону, підвищення тиску і розгерметизації. Тому заряд Li-іон акумуляторів можна вести тільки до напруги, рекомендованої виробником. При збільшеній зарядній напрузі ресурс акумуляторів знижується.

Безпечній роботі Li-іон акумуляторних батареї повинна приділятися серйозна увага. В Li-іон батареї комерційного призначення є спеціальні пристрої захисту, що запобігають перевищенню напруги заряду вище певного порогового значення. Додатковий елемент захисту забезпечує завершення заряду, якщо температура батареї досягне 90° С. Найбільш досконалі за конструкцією батареї мають ще один елемент захисту - механічний вимикач,

який спрацьовує при збільшенні внутрішньокорпусного тиску батареї. Вбудована система контролю напруги налаштована на дві напруги відсічення - верхнє і нижнє. Є й винятки – Li-ion акумуляторні батареї, в яких пристрої захисту взагалі відсутні. Це акумуляторні батареї, до складу яких входить марганець. Завдяки його наявності, при перезаряді реакції металізації анода і виділення кисню на катоді відбуваються настільки повільно, що стало можливим відмовитися від застосування пристроїв захисту. Збереження Li-ion акумуляторів. Все літєві акумулятори характеризуються досить гарною схоронністю. Втрата ємності за рахунок саморозряду 5-10% в рік[25].

Наведені показники слід розглядати як деякі номінальні орієнтири. Для кожного конкретного акумулятора, наприклад, розрядна напруга залежить від струму розряду, рівня розрядженості, температури; ресурс залежить від режимів (струмів) розряду і заряду, температури, глибини розряду; діапазон робочих температур залежить від рівня вироблення ресурсу, допустимої робочої напруги і т.і.

До недоліків Li-ion акумуляторів слід віднести чутливість до перезаряду і перерозряду, через це вони повинні мати обмежувачі заряду і розряду. Що стосується експлуатації Li-ion акумуляторів взагалі, то, з огляду на всі конструктивні і хімічні способи захисту акумуляторів від перегріву і вже стало уявлення про необхідність зовнішньої електронного захисту акумуляторів від перезаряду і переразряду, можна вважати проблему безпеки експлуатації Li-ion акумуляторів вирішеною. А нові катодні матеріали часто забезпечують ще більшу термічну стабільність Li-ion акумуляторів.

1.3. Вибір електрохімічної системи для тягового електроприводу автомобіля

В даний час експлуатаційні характеристики електромобіля визначаються, перш за все, параметрами електрохімічного джерела енергії (акумуляторною батареєю). Потужність джерела енергії визначає його динамічні характеристики (час розгону, рух на підйом), а ресурс роботи і надійність – ресурс електромобіля в цілому. Як приклад для вибору хімічного джерела енергії, наводяться параметри тягової акумуляторної батареї електромобіля для пересування в межах невеликої території, зокрема ділового центру міста:

- енергоємність, E , Вт·год – 15000;
- максимальна потужність, P_{max} , Вт, і час t її реалізації – 22500, не більш 16 с і тривало реалізована потужність, P_{pm} Вт – 5700;
- маса акумуляторної батареї, кг, не більш – $100 \pm 10\%$;
- габаритні розміри, не більше, dm^3 – 96;
- температурний діапазон, °C, $-40 \dots +50$.

Проведемо порівняння основних параметрів свинцево-кислотної, нікель-кадмієвої, нікель-металогідридної і літій-іонної електрохімічних систем. За результатами порівняння параметрів, вибирається джерело енергії тягового приводу електромобіля. Для більш наочного уявлення, характеристики джерел струму представлені в графічному вигляді.

На рисунку 1.14 показані розрядні характеристики одиничних акумуляторів Pb, NiCd, NiMh, Li-іон електрохімічних систем при постійному струмі розряду величиною 1 С і температурі +20°C.

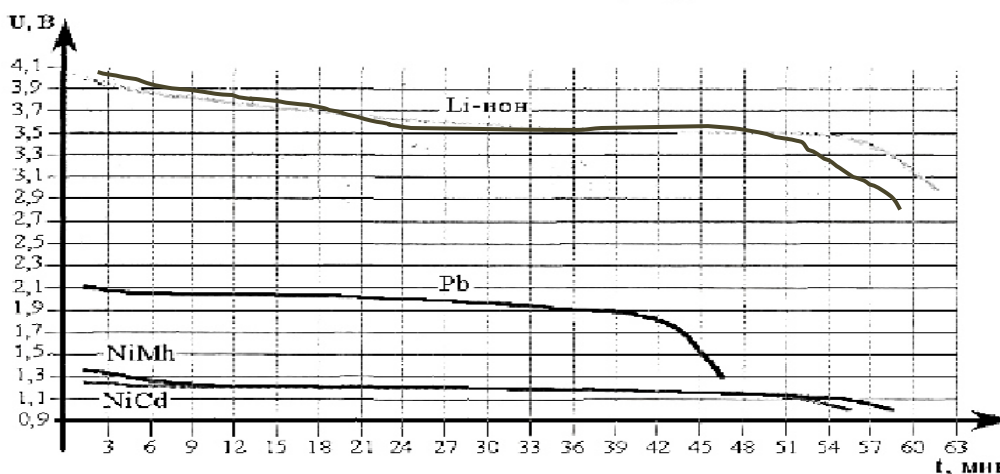


Рисунок 1.14 – Розрядні криві акумуляторних батарей

Кінцеві розрядні напруги для Pb, NiCd, NiMh, Li-іон електрохімічних систем - 1,38, 1,08, 1,08, 3,08 відповідно. Як видно з рис. 1.14, найбільшу кількість своєї енергії акумулятор віддає на лінійній ділянці розрядної кривої. Середня енергія, віддана акумуляторами при розряді на лінійній ділянці кривої, розраховується за формулою

$$E_{cp} = U_{cp} \cdot I_p \cdot t, \quad (1.1)$$

де E_{cp} - середня енергія, віддана акумулятором при розряді;

U_{cp} - середня розрядна напруга;

I_p - розрядний струм рівний С;

t - час.

Розрахована за формулою (1.1) розрядна енергія, Вт·год: Pb - 1,17·1 С; NiCd - 0,89·1 С; NiMh - 0,93·1 С; Li-іон - 2,74·1С, где 1 С – розрядний струм акумулятора.

Розрядний струм для кожної електрохімічної системи становить 1 С і залишається постійним на всьому проміжку розрядної кривої, то рис. 1.15 дає наочне якісне уявлення про енергетичні властивості розглянутих накопичувачів енергії.

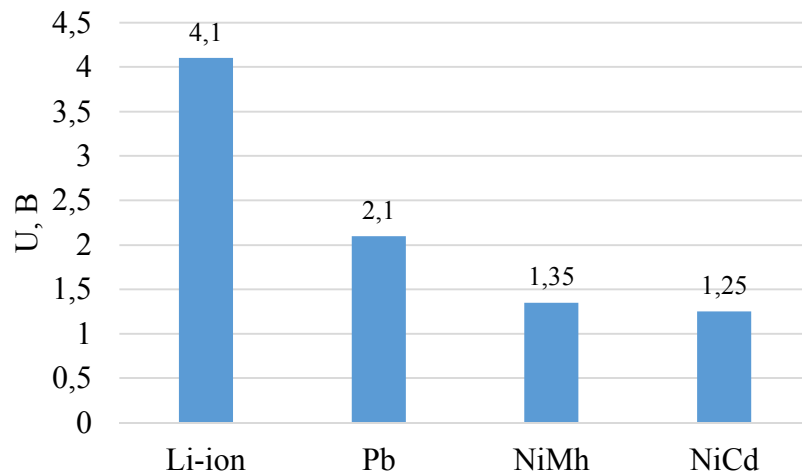


Рисунок 1.15 – Якісне представлення кривих електрохімічних систем

Як видно з розрахунку і гістограм при однакових умовах розряду, енергія Li-ion акумулятора, більш ніж в 2,3 рази перевищує розрядну енергію Pb акумулятора і приблизно в 3 рази перевищує енергію NiCd і NiMh електрохімічних систем.

Розрахункова енергія акумуляторної батареї електромобіля (пробіг 150 км) для руху в межах ділового центру міста становить не більше 15 кВт год.

Важливою характеристикою при оцінці ресурсу електрохімічної системи є число робочих циклів заряду-розряду. У довідковій літературі в основному приведено кількість циклів акумуляторів, при якому знімаема ємність зменшується до 80%. На рисунку 1.16 показаний ресурс Pb, NiCd, NiMh, Li-ion електрохімічних систем при зниженні їх ємності до 80 %.

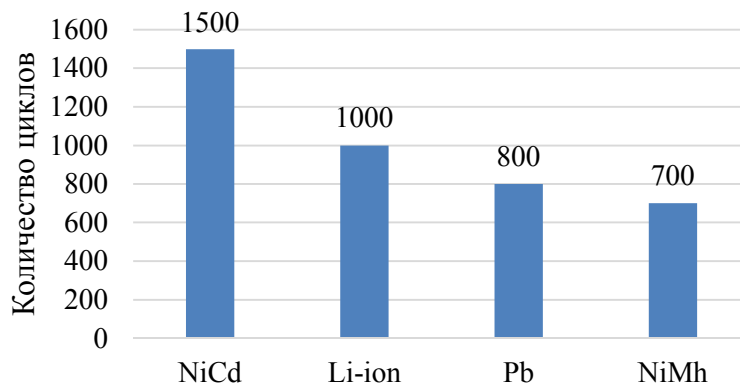


Рисунок 1.16 – Ресурс акумуляторів при зниженні ємності до 80 %

Як видно з рисунку 1.16, найбільший ресурс у NiCd електрохімічної системи (1500 робочих циклів), найменший у NiMh (700 робочих циклів). При виборі джерела струму слід розглядати економічну складову, яка, як правило, виражається вартістю одиниці енергії (Вт год) електрохімічного джерела струму.

На рисунку 1.17 представлена гістограма енергоемності різних систем накопичувачів, включаючи циліндричне і призматичне виконання літій-іонного акумулятора. Як видно, найнижча вартість енергії у свинцево-кислотного

акумулятора (0,12 \$ / Вт год). Li-ion акумулятор в призматичному виконанні є найбільш дорогим з представлених систем, вартість одиниці енергії якого на сьогоднішній день становить (1,0 \$/Вт·ч). Li-ion акумулятори в циліндричному виконанні (0,35 \$/Вт год) обходяться дешевше призматичних в – 2,86, в – 1,43 рази дешевше NiCd і NiMh, і в 2,92 рази дорожче свинцево-кислотних.

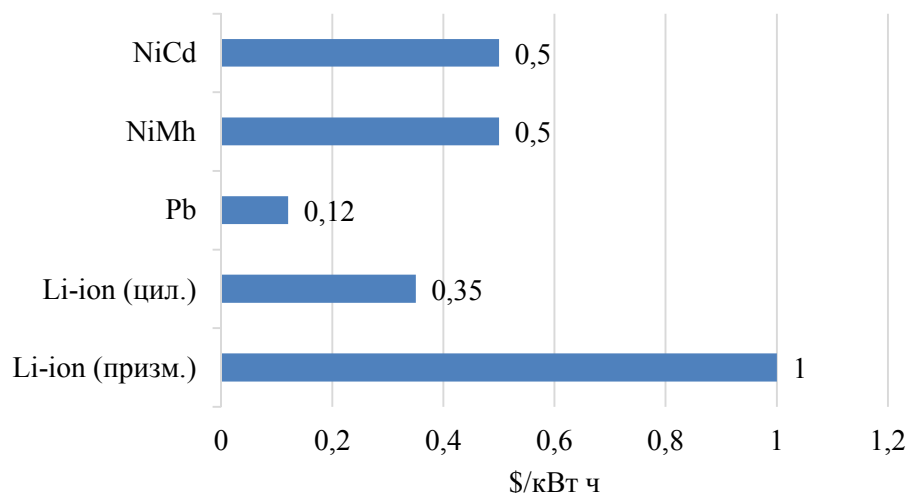


Рисунок 1.17 – Вартість одиниці енергії акумуляторних батарей

Але, не дивлячись на перевагу циліндричних Li-ion акумуляторів за вартістю, їх питомі енергетичні характеристики нижчі в порівнянні з акумуляторами призматичної конструкції, до того ж їх об'єднання в батарею досить незручно. У перспективі, з ростом виробництва Li-ion джерел струму, вартість енергії значно знизиться, і за прогнозами фахівців, в найближчі 3-5 років, буде порівнянна з вартістю свинцево-кислотних акумуляторів.

Так як транспортний засіб експлуатується при різних температурах навколишнього середовища, необхідно враховувати вплив температури акумулятора на його здатність віддавати енергію (рисунок 1.18).

Як видно з рисунка 1.18, найкращі розрядні характеристики для всіх без винятку електрохімічних систем досягаються при температурі вище 0⁰ С. На ділянці негативних температур від -40⁰ до -20⁰ С, розрядні характеристики електрохімічних систем практично збігаються. На інших ділянках температурної шкали, найбільша ефективність розряду у Li-іонної системи, а найменша у нікель-кадмієвого акумулятора.

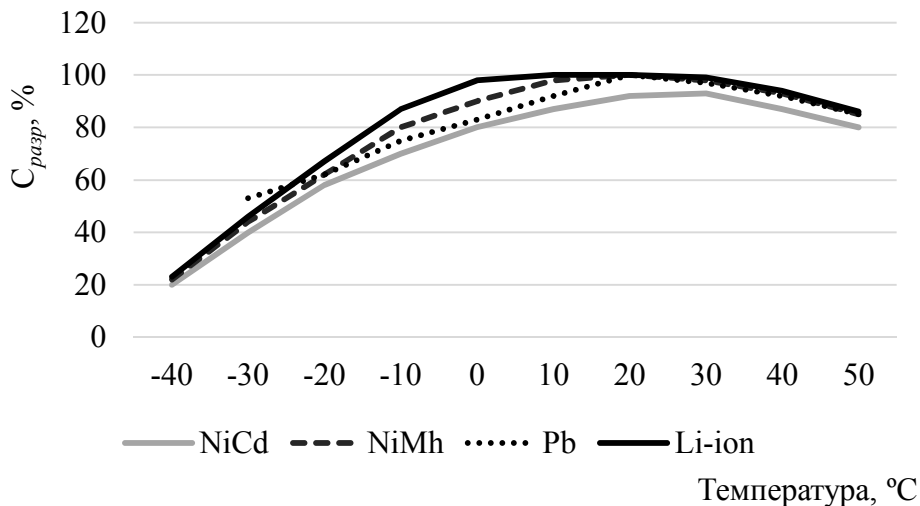


Рисунок 1.18 – Ефективність розряду при різних температурах

Як показано вище, Li-ion акумулятори перевершують розглянуті електрохімічні системи практично за всіма показниками за винятком вартості енергії і в порівнянні з ресурсними характеристиками NiCd акумуляторів. Але тут слід зазначити, що Li-ion акумулятора на відміну від нікель-кадмієвого не є притаманним «ефект пам'яті» який значно знижує його ресурс. Для зниження «ефекту пам'яті» або відновлення властивостей акумулятора потрібне додаткове дорозрядне обладнання, яке впливає на економічну складову комплексу обслуговування батареї[25].

Після проведеного порівняльного аналізу характеристик видно, що очевидні переваги практично за всіма основними параметрами мають Li-ion акумулятори, а накопичувач енергії побудований на базі цих акумуляторів відповідає вимогам технічного завдання на джерело енергії тягового електроприводу.

Li-ion акумулятори, зі своїми високими питомими характеристиками, завойовують все більш широкий ринок і поступово відтісняють інші електрохімічні системи використовуються в даний час в тяговому приводі електромобілів. На сьогоднішній день, альтернатива Li-ion акумулятора є Li-полімерне джерело струму, який можна розглядати як окремий випадок Li-ion електрохімічної системи. Його питомі характеристики перевищують показники Li-ion системи, однак, Li-полімер має набагато більш високу вартість, що в даний час робить його практично не конкурентоспроможним на світовому ринку.

1.4 Висновки

1. Найбільш перспективним напрямком підвищення енергоефективності та екологічної безпеки транспортних засобів, які пересуваються без зовнішнього підводу енергії, є ЕСУ, котрі мають комбінацію різних фізичних принципів акумулявання і перетворювання енергії в межах енергетичної установки. В більших випадках до складу ЕСУ з підзарядкою входять ДВЗ і

генератор в якості зарядної станції на борту електромобіля, тяговий електродвигун-генератор і система рекуперації енергії на основі ТАБ.

2. Аналіз конструктивних рішень ЕСУ електромобіля визначає особливості математичних моделей і методів синтезу системи управління. Розрахунковий експеримент повинен опиратися на експериментальні характеристики складових ЕСУ, а також на чисельні методи розрахунку експлуатаційних показників в залежності від типу автомобіля, прийнятого їздового циклу, схеми силової установки.

3. Експлуатаційні якості електромобілів в значній мірі визначаються характеристиками САУ. Є три підходи до синтезу управління ЕСУ: використання логічних правил вибору стратегії, використання методів теорії оптимального управління та алгоритмів адаптації до поточного їздового циклу.

4. Підвищення енергозбереження та екологічної безпеки ЕСУ на підставі підвищення ефективності методів чисельної оптимізації за рахунок нових способів зменшення розміру оптимізаційних задач та визначення адекватного рівня ідеалізації математичних моделей, використання можливостей нейромережевого і нейронечіткого управління.

5. Для рішення задачі наукового обґрунтування базових параметрів і характеристик ЕСУ необхідні методика по проведенню розрахункових експериментів з відповідними математичними моделями та аналізу різних ЕСУ на їздовому циклі при оптимальному управлінні.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ УПРАВЛІННЯ СИЛОВОЮ УСТАНОВКОЮ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

2.1 Загальні принципи будови системи управління силовою установкою електромобіля

Електромобіль с зарядною станцією на борту 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}

$$\mathbf{x} \in \mathbf{X} \subset \mathbb{R}_+^2, \quad \forall t \in T, \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} 0 \leq \omega \leq \omega_{\max} \\ 0 \leq \theta_{TAB} \leq 1 \end{bmatrix}, \quad (2.1)$$

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

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

$$\mathbf{X}_{ex} = \begin{bmatrix} 0 \leq \omega \leq \omega_{ex.\max} \\ \theta_{ex.\min} \leq \theta_{TAB} \leq \theta_{ex.\max} \end{bmatrix} \subset \mathbf{X}. \quad (2.2)$$

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

Розглядатимемо електромобіль з бортовою станцією як багатовимірний нелінійний стаціонарний об'єкт виду

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \xi) \\ \mathbf{y} = h(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \end{cases}, \quad (2.3)$$

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

β_D – сигнал управління бортової електростанцією. $\beta_D = -1$ відповідає відключеному стану генератор-ДВЗ;

β_M – сигнал управління силовою установкою (електромагнітним моментом ВЕД);

β_T – сигнал управління системою гальмування;

γ – передавальне число трансмісії автомобіля;

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

α – коефіцієнт опору дороги;

ϑ_0 – фактор обтічності;

\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 зарядної станції;

$E_T = f_T(C_{NOx}, C_{CO}, C_{HC})$ – 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;

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

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

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \beta_D = -1, & 0 \leq \beta_D \leq 1 \\ -1 \leq \beta_M \leq 1 \\ 0 \leq \beta_T \leq 1 \\ \gamma \in \{\gamma_i\}, i = \overline{1,2} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

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 вектора управління в значній мірі визначаються типом бортової електростанції. До складу вектора управління включено керуючий вплив на генератор-ДВЗ.

Основною функцією системи управління електромобілем 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 задовільняти ряду додаткових умов:

- мінімізації витрати пального бортової електростанції,
- 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[40].

Крім цього, критерії мають бути незалежні і монотонні по преференції, тобто покращенню якості управління повинне відповідати зменшення значення відповідного критерію [50].

Для формальної постановки задачі оптимізації управління електромобілем 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 [49]

$$\mathbf{J}_i = \frac{\tilde{\mathbf{J}}_i - \mathbf{J}_{\min.i}}{\mathbf{J}_{O.i} - \mathbf{J}_{\min.i}}, \quad i = \overline{1, 4}, \quad (2.5)$$

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

Визначимо критерії оптимальності управління електромобіля на заданому їздовому циклі таким чином за такими критеріями:

1. Критерій точності управління за швидкістю

$$\mathbf{J}_1 = J_V(V, T) = K_{NV} \cdot \int_{t_s}^{t_f} \left((V_{zd}(t) - V(t))^2 + S_V^2(V(t)) \right) dt, \quad (2.6)$$

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

$$S_V(V(t)) = \begin{cases} 0, & \text{при } V(t) \leq V_{ex.max}, \\ V(t) - V_{ex.max}, & \text{при } V(t) > V_{ex.max}; \end{cases} \quad (2.7)$$

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

2. Критерій використання енергії ТАБ

$$\mathbf{J}_2 = \mathbf{J}_\theta(\theta_{TAB}, T) = K_{N\theta} \cdot \int_{t_s}^{t_f} \left((\theta_{ex.opt} - \theta_{TAB}(t))^2 + S_\theta^2(\theta_{TAB}(t)) \right) dt, \quad (2.8)$$

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

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

$$S_\theta(\theta_{TAB}(t)) = \begin{cases} 0, & \text{при } \theta_{ex.min} \leq \theta_{TAB}(t) \leq \theta_{ex.max}, \\ |\theta_{ex.min} - \theta_{TAB}(t)|, & \text{при } \theta_{ex.min} > \theta_{TAB}(t) > \theta_{ex.max}; \end{cases} \quad (2.9)$$

3. Критерій економічності тягового електроприводу

$$\mathbf{J}_3 = \mathbf{J}_G(G_T, T) = K_{NG} \cdot \int_{t_s}^{t_f} G_T^2(t) dt; \quad (2.10)$$

4. Критерій ступеня токсичності відпрацьованих газів ДВЗ бортової електростанції

$$\mathbf{J}_4 = \mathbf{J}_E(E_T, T) = K_{NE} \cdot \int_{t_s}^{t_f} E_T(t) dt, \quad (2.11)$$

де

$$E_T(t) = K_{ENox} \cdot C_{NOx}^2(t) + K_{ECO} \cdot C_{CO}^2(t) + K_{EHC} \cdot C_{HC}^2(t); \quad (2.12)$$

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

$$K_{ENox} + K_{ECO} + K_{EHC} = 1. \quad (2.12)$$

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

2.2 Формальна постановка задачі оптимізації управління

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 багатокритеріальної задачі оптимізації управління приводить до формування множини \mathbf{U}^P непокрощуваних по Парето (Парето-оптимальних) управлінь $\mathbf{u}^{*P} \in \mathbf{U}^P \subset \mathbf{U}$ [52, 53]

$$\mathbf{U}^P = \left\{ \mathbf{u}^{*P} \in \mathbf{U} \mid \nexists \mathbf{u} \in \mathbf{U} : \mathbf{J}_i(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T) \leq \mathbf{J}_i(\mathbf{x}, \mathbf{u}^{*P}, T), i = \overline{1, 4}; \mathbf{u} \neq \mathbf{u}^{*P} \right\}, \quad (2.13)$$

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

Управління, що належать множині \mathbf{U}^P не можуть бути покращувані 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. Цей метод працює, коли пріоритет показників установити достатньо важко або неможливо, тоді з множини альтернатив слід шукати ті значення, які краще інших альтернатив по всьому набору показників.

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[50].

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

$$\mathbf{u}^*(t) = \arg \min_{\mathbf{u} \in \mathbf{U}} \max_{i=1,4} \mathbf{J}_i(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T), \quad \forall t \in T. \quad (2.14)$$

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

$$\mathbf{K}_P = [K_{PV}, K_{P\theta}, K_{PG}, K_{PE}]^T \sum_i \mathbf{K}_{P,i} = 1, \quad \mathbf{K}_{P,i} > 0, \quad i = \overline{1, 4}.$$

Вибір компонентів вектора \mathbf{K}_P є нетривіальною задачею. Для її вирішення можуть бути використані метод аналізу ієрархій або метод класифікації альтернатив, викладені в [50].

Векторна функція оптимального управління при нерівнозначних критеріях

$$\mathbf{u}^*(t) = \arg \min_{\mathbf{u} \in U} J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T), \quad \forall t \in T, \quad (2.15)$$

де J_{SV} – згортка векторного функціонала якості,

$$J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T) = \max_{i=1,4} \{ \mathbf{K}_{P,i} \cdot \mathbf{J}_i(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T) \}, \quad J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T) \in \mathbb{R}_+^1. \quad (2.16)$$

Управління, що є рішенням мінімаксної задачі, в порівнянні з іншими управліннями гарантує найбільше віддалення найгіршого з компонентів векторного функціонала від межі області допустимих значень[53].

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 багатокритеріальної оптимізації до однокритеріальної шляхом лінійного згортання векторного критерію в суперкритерій

$$J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T) = \sum_{i=1}^4 \mathbf{K}_{P,i} \cdot \mathbf{J}_i(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T), \quad J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T) \in \mathbb{R}_+^1. \quad (2.17)$$

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 $\mathbf{u}^* \in U^p$ 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[58].

Задачу оптимізації управління силовою установкою електромобіля 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

$$J_{SV}^* = J_{SV}(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*, T) = \min_{\mathbf{u}} J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T), \quad (2.18)$$

$$\mathbf{x}^* \in \mathbf{X}, \quad \mathbf{u}^* \in \mathbf{U}, \quad f_c(\dot{\mathbf{x}}^*, \mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*) = 0, \quad \forall t \in T. \quad (2.19)$$

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

$$\mathbf{u}^*(t) = \arg \min_{\mathbf{u}} J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T), \quad (2.20)$$

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 електромобіля і визначаються кінематичною схемою силової установки електромобіля.

2.3 Енергетична оцінка тягового електроприводу електромобіля

Тяговий електропривод електромобіля з підзарядкою від бортової електростанції має можливість використання ДВЗ-генератор для поповнення ємності ТАБ під час руху. Система ДВЗ-генератор включається в роботу при умовах зниження напруги ТАБ до встановленого значення (рис. 2.1).

В залежності від умов руху привід ведучих коліс виконується за рахунок тягового електроприводу, отримуючи енергію від ТАБ і генераторної установки (St/G+ДВЗ).

В якості тягового електроприводу (G/M) використовується зворотна електрична машина. Працюючи в генераторному режимі при гальмуванні електромобіля, електрична машина створює необхідний гальмівний момент, забезпечує одночасно рекуперацію залишків енергії.

Після того, як зменшилася ємність ТАБ, включається бортова електростанція, яка виробляє електроенергію і надає її на електродвигун тягового електроприводу, а також на зарядку ТАБ.



Рисунок 2.1 – Схема тягового електроприводу з зарядкою від бортової електростанції

Керування розглянутого тягового електроприводу з зарядкою від бортової електростанції виконується на підставі наступних керуючих впливів:

- сигнал керування крутним моментом або гальмівним моментом зворотної електричної машини G/M тягового електроприводу ($\beta\omega_w$);
- положення органу керування бортової електростанції (β_D);
- сигнал керування моментом генератора бортової електростанції (β_G);
- сигнал керування системою гальмування (β_T).

Двигун внутрішнього згоряння, будучи основним двигуном бортової електростанції, багато в чому визначає її показники економічності і екологічної безпеки.

Для вирішення завдань аналізу, синтезу і оптимізації системи управління бортової електростанції, ключовою є проблема ідентифікації статичних і динамічних характеристик (математичній моделі) ДВЗ.

Під математичною моделлю ДВЗ розумітимемо деякого оператора

$$\mathbf{F}_{DVS} : \mathbf{U}_{DVS} \mapsto \mathbf{Y}_{DVS}, \quad (2.21)$$

відповідно до якого кожному вхідному вектору

$$\mathbf{u}_{DVS} = \begin{bmatrix} \omega_{KV} \\ \dot{\omega}_{KV} \\ \beta_D \\ \dot{\beta}_D \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u}_{DVS} \in \mathbf{U}_{DVS} \subset \mathbb{R}^4, \quad \forall t;$$

$$\mathbf{U}_{DVS} = \begin{bmatrix} \omega_{KV.min} \leq \omega_{KV} \leq \omega_{KV.max} \\ \dot{\omega}_{KV.min} \leq \dot{\omega}_{KV} \leq \dot{\omega}_{KV.max} \\ 0 \leq \beta_D \leq 1 \\ \dot{\beta}_{D.min} \leq \dot{\beta}_D \leq \dot{\beta}_{D.max} \end{bmatrix}, \quad (2.22)$$

ставиться у відповідність вихідний вектор

$$\mathbf{y}_{DVS} = \begin{bmatrix} M_{DVS} \\ G_T \\ C_{NOx} \\ C_{CO} \\ C_{HC} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{y}_{DVS} \in \mathbf{Y}_{DVS} \subset \mathbb{R}^5, \quad \forall t;$$

$$\mathbf{Y}_{DVS} = \begin{bmatrix} M_{DVS.min} \leq M_{DVS} \leq M_{DVS.max} \\ 0 \leq G_T \leq G_{T.max} \\ 0 \leq C_{NOx} \leq C_{NOx.max} \\ 0 \leq C_{CO} \leq C_{CO.max} \\ 0 \leq C_{HC} \leq C_{HC.max} \end{bmatrix}, \quad (2.24)$$

Тобто

$$\mathbf{y}_{DVS} = \mathbf{F}_{DVS}(\mathbf{u}_{DVS}), \quad (2.25)$$

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} [62]

$$\mathbf{F}_{DVS} = \langle \mathbf{\Omega}_{DVS}, \mathbf{P}_{DVS} \rangle. \quad (2.26)$$

Отримана в результаті ідентифікації математична модель повинна задовольняти ряду вимог:

- вихід моделі повинен максимально точно, згідно вибраній матриці, 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, які використовують 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.

Важливим питанням у сфері використання енергоресурсів на транспорті є питання енергозбереження. В цьому відношенні автомобіль не може бути винятком. Більш того, для автомобілів це питання має особливе значення, оскільки автомобіль в наш час стає чи не найбільш поширеним технічним засобом, використовуваним людиною в своїй діяльності.

Загально визнано вважати, що великою нацією нас робить не наше багатство, а то, як раціонально ми його використовуємо. Стосовно до автомобіля можна сказати так: «важливо не те, який обсяг перевізної роботи ми виконуємо автомобілем, а то, як раціонально ми його створюємо, які при цьому витрати енергії». У зв'язку з цим, іншим повинен бути і підхід до оцінки якості синергетичних автомобілів. Розробка досить точних моделей, що відображають енергетичні втрати автомобілів у різних умовах експлуатації є найважливішою науковою задачею. Експериментальні дослідження зміни енергетичних втрат при стабільних умовах експлуатації скрутні, тому необхідно створювати досконалі розрахункові аналітичні методи. Вони можуть бути широко використані при проектуванні гібридних автомобілів і створенні нормативної бази для автотранспортних підприємств.

Автомобіль – це силова машина. А, як відомо, продуктивність будь-якої машини визначається потужністю, тобто кількістю механічної роботи, виконаної в одиницю часу. В цьому випадку ККД автомобіля слід відносити до додаткових показників. Адже саме ККД є основним критерієм досконалості автомобіля з енергетичної точки зору. Потужність і ККД – це найважливіші показники.

Як показують різні дослідження [90] виникає гостра необхідність одночасно вимірювати як фактичний обсяг виконаної автомобілем корисної роботи, так і кількість витраченої енергії, і за даними давати оцінку транспортного процесу в цілому за допомогою найважливішого критерію, яким є ККД.

У зв'язку з цим доречно нагадати слова великого італійського вченого Г. Галілея: «вимірювати все, що вимірюється, і прагнути, щоб стало вимірюваним те, що їм ще не є». Роль і значення вимірювань ясно оцінив і великий

російський вчений Д.І. Менделєєв, сказавши, що «в природі міра і вага – суть головного знаряддя – пізнання. Наука починається тоді, коли починають вимірювати»[91].

Нафтові палива як джерело енергії мають дуже високими питомими характеристиками: зокрема, в 1 кг бензину міститься 11,6 кВт год енергії. Акумулятори будь-яких можливих електрохімічних систем мають теоретичний запас енергії приблизно в 6 – 10 разів менший. З цієї причини, питання раціонального використання наявної на електромобілі енергії є найважливішими для тягових електричних систем будь-яких типів.

Зауважимо, що електричні тягові системи мають набагато менші втрати енергії, ніж системи з тепловими двигунами, в тому числі і з двигунами внутрішнього згоряння. Коефіцієнт корисної дії існуючих теплових двигунів становить 25 – 30%, тому тільки близько 3 кВт год/кг вихідної питомої енергії палива корисно використовується на виході двигуна.

Ступінь корисного використання енергії електрохімічного акумулятора (при сучасному стані техніки) може бути набагато вище, а досягнутий рівень ККД електродвигунів складає 85 – 90%. Таким чином, рівень корисно використовуваної питомої енергії електрохімічних джерел може досягти 25–30% від наведеної вище величини на виході теплового двигуна. Цей орієнтовний підрахунок показує, що, істотно програючи в вихідній теоретичній енергії енергоносія, електричні тягові системи можуть частково компенсувати це при реалізації наявних можливостей більш ефективного її використання. Ця обставина має важливе значення для оцінки перспектив розвитку екологічних чистих транспортних засобів.

Метою даного розділу є дослідження особливостей завдання керування силовою установкою при раціональній витраті енергії при транспортному процесі, що здійснюється автомобілем дотримуючись високого рівня як безпеки руху, так і екологічної безпеки.

Розглянутий підхід до формування структури рухомого складу дозволяє значно зменшити енергетичні витрати на транспортну роботу.

Автомобіль відповідно за принципом його дії, здійснює механічну роботу за рахунок сили тяги, яка додається до ведучих коліс автомобіля, і базується на розгорнутому рівнянні тягового балансу автомобіля, прийнятого в теорії автомобіля, для загального випадку прямолінійного руху автомобіля ця робота повинна визначатися за формулою:

$$A = F_K \cdot S = [m \cdot g \cdot \psi + W_B (v_a \pm v_B)^2 \pm m \cdot \delta \cdot a] \cdot S, \quad (2.27)$$

де A – робота, Дж (Н · м);

F_K – сила тяги, Н;

S – шлях, м;

$m = m_a + m_z$ – повна маса автомобіля, кг;

m_a – власна маса автомобіля, кг;

m_r – маса корисного вантажу, кг;

$\psi = f \pm i$ – коефіцієнт опору дороги;

f – коефіцієнт опору коченню;
 i – поздовжній ухил дороги (знак «+» відповідає руху на підйомі, знак «-» - на спуску);
 W_B – фактор обтічності, $\text{H} \cdot \text{с}^2/\text{M}^2$;
 v_a – швидкість руху автомобіля, м/с ;
 v_B – швидкість вітру, м/с (знак «+» ставитися до зустрічному вітрі, знак «-» - до попутному);
 m δ a – сила інерції, H (знак «+» відповідає прискоренню, знак «-» - уповільнення);
 δ – коефіцієнт обліку обертових мас автомобіля;
 $a = dv_a/dt$ – абсолютна величина прискорення або уповільнення, м/с^2 .

При цьому, для випадку переміщення автомобіля в сталому режимі (рух при постійній швидкості) і при відсутності вітру маємо:

$$A = F_K \cdot S = (m \cdot g \cdot \psi + W_B v^2) \cdot S, \quad (2.28)$$

Беручи до уваги те, що автомобіль є силовий машиною. А продуктивність силових машин, як відомо з курсу фізики, прийнято оцінювати їх потужністю, і базуючись на розгорнутому рівнянні потужного балансу, прийнятому в теорії автомобіля, слід в якості вимірювача продуктивності автомобіля прийняти потужність на ведучих колесах автомобіля, яка в будь-який момент часу руху автомобіля дорівнює:

$$P = N_K = F_K \cdot v_a \cdot 10^{-3} = [m \cdot g \cdot \psi + W_B (v_a \pm v_B)^2] \pm m \cdot \delta \cdot a \cdot v_a \cdot S, \quad (2.29)$$

де P – продуктивність автомобіля, кВт;

N_K – потужність автомобіля (потужність на його провідних колесах, кВт).

Як видно, продуктивність дорівнює добутку сили (сили тяги) на швидкість. При цьому для випадку руху автомобіля при постійній швидкості і відсутності вітру матимемо

$$P = N_K = F_K \cdot v_a \cdot 10^{-3} = (m \cdot g \cdot \psi + W_B \cdot v_a^2) v_a \quad (2.30)$$

В даний час серед оціночних показників автомобіля особливе місце повинні зайняти показники паливної економічності. При цьому в якості узагальнюючого (інтегрального) показника паливної економічності автомобіля доцільно користуватися коефіцієнтом корисної дії (ККД).

Як відомо, для будь-якої системи ККД визначається за формулою

$$\eta = E_{\Pi} / E, \quad (2.31)$$

де E_{Π} – енергія, корисно використана системою;

E – енергія, що отримана системою.

Слід визнати, що ККД автомобіля – вкрай необхідне поняття, що дозволяє не тільки оцінювати паливну економічність автомобіля, але і найбільш повно і «неупереджено» порівнювати автомобілі і вибирати правильні напрямки їх вдосконалення.

Під терміном ККД автомобіля, розуміється відношення потужності N_K , тобто потужність, яка підведена до ведучих коліс (потужність, яка розвивається автомобілем) до витраченої потужності $N_3 = q \cdot G$, тобто потужність підведена до автомобіля. Тому ККД автомобіля, як і силової установки, представляється відношенням потужності N_K до потужності N_3

$$\eta = \eta_{cy} = \frac{N_k}{N_3} = \frac{N_k}{q \cdot G} \quad (2.32)$$

де η – ККД автомобіля як силової установки;

$\eta_a = \eta_{cy}$ – низька теплота згоряння.

Отже, те, що потужність N_K , є корисною, не викликає сумніву, якщо розглядати автомобіль лише як силову установку.

При розгляді руху автомобіля визнано доцільним мати справу не з коефіцієнтом тертя кочення f' , а коефіцієнтом опору коченню f , що визначається за формулою

$$f = \frac{F_f}{P} \quad (2.33)$$

де F_f – сила опору коченню, Н;

P – повна вага автомобіля, Н.

При такому підході сила F_f повинна визначатися за формулою

$$F_f = f \cdot P = f \cdot m \cdot g. \quad (2.34)$$

Але в дійсності рівномірному руху перешкоджає сила. У реальних дорожніх умовах виникає сила підйому і сила опору повітряного середовища.

Відповідно такого підходу загальна формула, що характеризує процес рівномірного руху автомобіля, має такий вигляд

$$F_K = F_f + F_a + F_B = m \cdot g (f \pm i) + W_B \cdot v_a^2 = m \cdot g \cdot \psi + W_B \cdot v_a^2 \quad (2.35)$$

де F_K – сила, прикладена до ведучих коліс автомобіля, Н;

i – ухил дороги;

$\psi = f \pm i$ – коефіцієнт опору дороги.

Як відомо, рівняння, представлене формулою, носить назву рівняння тягового балансу.

Як видно, права частина характеризує не величину втрат, а зовнішнє, по відношенню до автомобіля, силове навантаження, на подолання якої витрачається сила F_K , в результаті чого автомобіль пересувається по дорозі.

Якщо ліву і праву частину рівняння помножити на величину $v \cdot 10^{-3}$, то можна отримати рівняння, яке носить назву рівняння потужного балансу

$$N_K = (m \cdot g \cdot \psi + W_B \cdot v^3_a) v \cdot 10^{-3} \quad (2.36)$$

На підставі викладеного вище, ККД автомобіля як силової установки визначається за формулою

$$\eta = \eta_{cy} = \frac{N_k}{N_s} = \frac{N_k}{q \cdot G} = \frac{(m \cdot g \cdot \varphi + W_B \cdot V^2_a) \cdot v \cdot 10^{-3}}{q \cdot G} \quad (2.37)$$

Для обґрунтування правомірності такого підходу до розрахунку ККД автомобіля як силової установки, розглянемо зміни витрати палива і електроенергії гібридного автомобіля в залежності від середньої швидкості руху автомобіля.

Електричні тягові системи мають набагато менше втрат енергії, ніж системи з двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ). ККД існуючих ДВЗ гібридних силових установок (ГСУ) становить 32 – 36 %, тому тільки близько 3 кВт·год/кг вихідної питомої енергії палива корисно використовується на виході ДВЗ.

Ступінь використання енергії електрохімічного акумулятора набагато вище, а ККД електродвигунів складає 85 – 90%. Таким чином, рівень корисно використовуваної питомої енергії електрохімічних джерел досягає 25 – 30% від наведеної величини на виході ДВЗ. Цей розрахунок показує, що електричні тягові системи можуть частково компенсувати ці втрати. Це при реалізації наявних можливостей більш ефективного її використання. Ця обставина має важливі значення для оцінки перспектив розвитку та оцінки технічного стану електричних тягових систем, а також для гібридного підходу до їх створення.

В основу дослідження енергетичних витрат електричної силової установки гібридного автомобіля покладено метод балансу енергії. З аналізу конструкцій і схем ГСУ слід, що будь-яка електрична силова установка складається з наступних енергетичних модулів, які здійснюють послідовні перетворення енергії; тягової акумуляторної батареї інвертора, контролера, тягового електродвигуна, трансмісії.

Загальне рівняння балансу електричної енергетичної установки гібридного автомобіля в режимі руху на електротязі складе

$$E_{\delta} + E_p = P_{\delta} + P_u + P_s + P_{mp} + P_{\delta}, \quad (2.38)$$

де E_{δ} – енергія акумуляторної батареї;

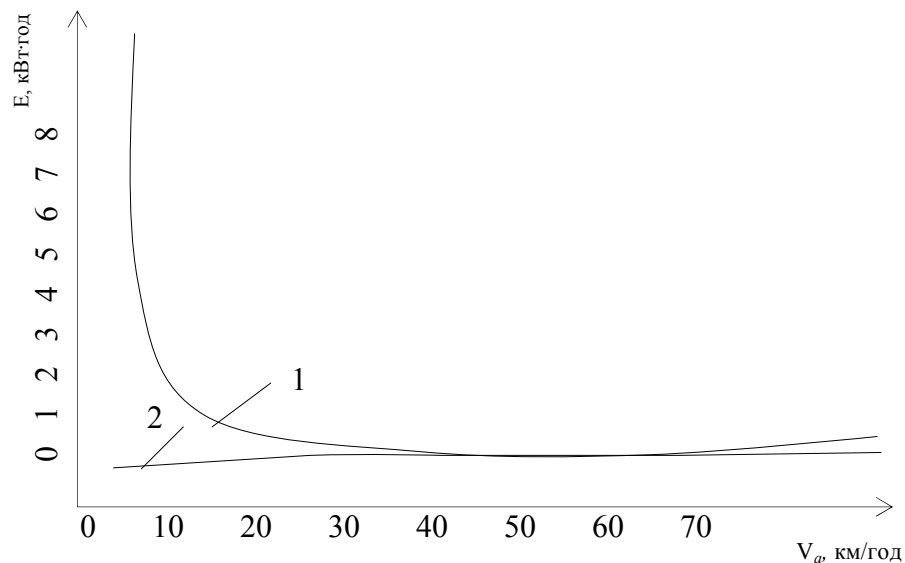
E_p – енергія рекуперації;

$P_b, P_w, P_e, P_{тр}$ – втрати енергії в модулях енергетичної установки – акумуляторної батареї, інвертора, електродвигуна, трансмісії;

P_d – втрати енергії при русі гібридного автомобіля.

Крім балансу енергії, прийнято в ряді випадків, розглядається рівняння балансу потужності, яке є первинним по відношенню до балансу енергії. Однак умови перевірки енергетичної установки гібридного автомобіля характеризуються сталим рухом транспортного засобу при заданій швидкості руху. У зв'язку з цим практично більшу цінність представляє баланс енергії гібридної силової установки, що складається для контрольного циклу руху.

Найбільш ефективним для гібридних автомобілів є випробувальний цикл в режимі швидкостей руху 30 – 60 км/год. Тому оцінку технічного стану гібридної силової установки доцільно проводити саме для цього циклу, який визначає по швидкості руху автомобіля закінчення роботи електроустановки і початок включення роботи ДВЗ. Для циклових розрахунків рівняння балансу енергії дає значно більше інформації, ніж рівняння балансу потужності: крім того досить важливим показником для оцінки технічного стану ГСУ є витрата енергії за цикл. Нижче наведені графіки залежності витрати енергії в залежності від середньої швидкості руху (рис.2. 2).



1 – при роботі на бензині; 2 – в режимі електромобіля

Рисунок 2.2 – Зміна енергії, отриманої автомобілем, що залежить від середньої швидкості руху

З рисунку видно, що енерговитрати в режимі електромобіля будуть оптимальні при низькій середній швидкості до 40 км/год. При середній швидкості понад 60 км/год ефективно використовувати автомобіль в режимі роботи двигуна внутрішнього згорання. Це викликано тим, що ККД електродвигуна знижується при навантаженні близькою до максимальної, а ККД бензинового двигуна підвищується і буде максимальним при високих навантаженнях.

Розробка досить точних моделей, що відображають енергетичні втрати автомобілів у різних умовах експлуатації є можливістю наукових завдань. Експериментальні дослідження зміни енергетичних втрат при статичних умовах експлуатації скрутні, тому необхідно створювати досконалі розрахункові методи. Вони можуть бути широко використовувані при проектуванні електромобілів і створенні нормативної бази витрати енергії для автотранспортного підприємства.

Автомобіль – це силова машина. А, як відомо, продуктивність будь-якої силової машини визначається потужністю, тобто кількістю (об'ємом) механічної роботи, виконаної в одиницю часу. Не можна погодитися і з тим, що ККД автомобіля слід відносити до додаткових показників. Адже саме ККД є основним критерієм досконалості автомобіля з енергетичної точки зору. Потужність і ККД - це найважливіші показники. Що стосується роботи – це похідний, причому інтегрального (підсумкового) характеру, показник. Але потужність і робота знаходяться в прямій залежності: чим більше потужність, тим за менший відрізок часу автомобіль може виконати заданий обсяг роботи.

На підставі аналізу енергетичних втрат автомобіля з СУЕ слід, що при низьких середніх швидкостях руху 5–40 км/год дуже ефективно використовувати режим руху на електротязі, а при середніх швидкостях вище 60 км/год – рух з використанням бортової електростанції. Очевидно, що електромобілі найбільш ефективно використовують енергію на виконання транспортної роботи на відміну від інших видів транспортних машин.

2.4 Математична модель тягового електродвигуна

Основною вимогою до тягового електродвигуна електромобіля, 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 зворотною електричною машиною і забезпечувати рекуперацію енергії гальмування транспортного засобу при роботі в генераторному режимі.

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 в тяговому електроприводі електромобіля.

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)[68].

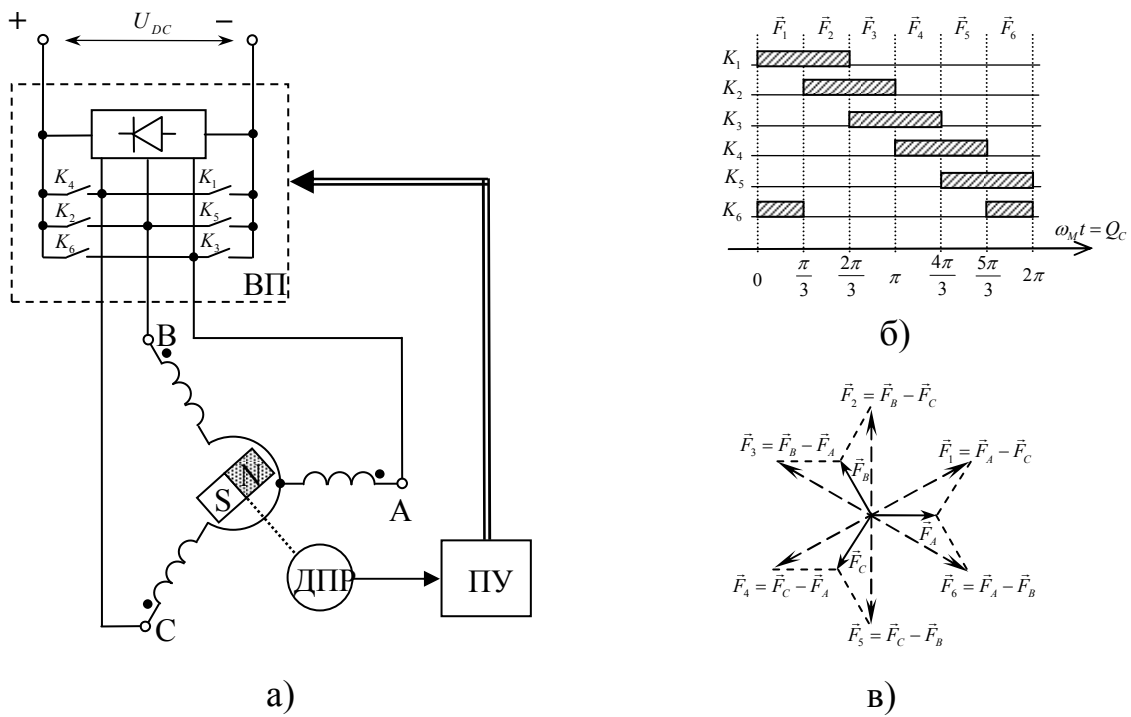
Використання ВП і ПУ, що виконують функцію щітко-колекторного вузла, наділяє ВЕД властивостями безколекторного ДПС і дозволяє використовувати прості структури управління електроприводу постійного струму.

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[69].

Функціональна схема ВЕД на основі СДПМ приведена на рис.2.3. 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 (див. рис.2.4) з кутовим інтервалом 60 електричних градусів (ел.град)[71].

Для спрощення розгляду прийнято, що число пар полюсів дорівнює одиниці, що дозволяє не розрізняти фізичний і електричний простори (1 ел.град = 1).



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

Рисунок 2.3 – Функціональна схема ВЕД на основі СДПМ

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 (рис.2.3).

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 розгодження $Q_{md} = \pi/2$.

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

$$M_{VD} = \frac{3}{2} |\vec{F}| |\vec{\Phi}| \sin Q \quad (2.39)$$

На рис.2.4 – приведена залежність електромагнітного моменту СДПМ від кута Q [71]. Під дією електромагнітного моменту ротор двигуна повертається, і

кут Q зменшується. Характер залежності електромагнітного моменту від кута повороту ротора Q_C показаний на рис.2.4.

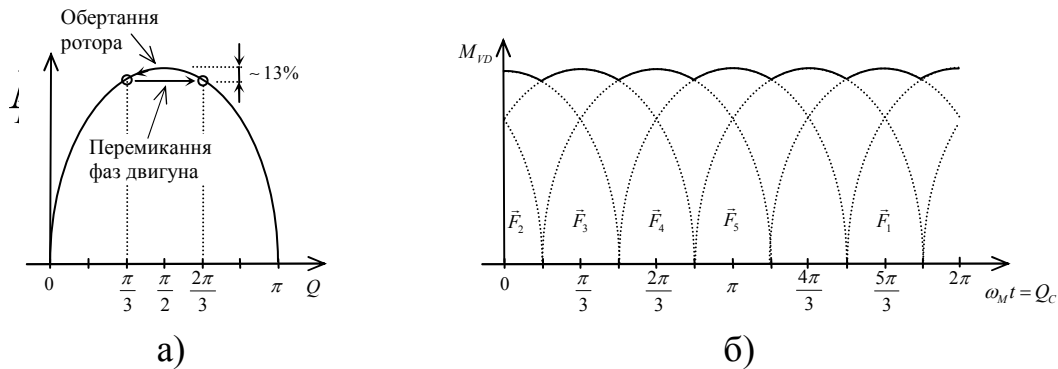


Рисунок 2.4 – Залежність електромагнітного моменту вентильного двигуна від кута між векторами потоку статора і ротора (а) і від кутового положення ротора (б)

При визначенні кута Q_C за початок відліку узятий напрям вектору МРС фази A при підключенні початку обмотки до позитивного полюса джерела живлення (див. рис.2.5).

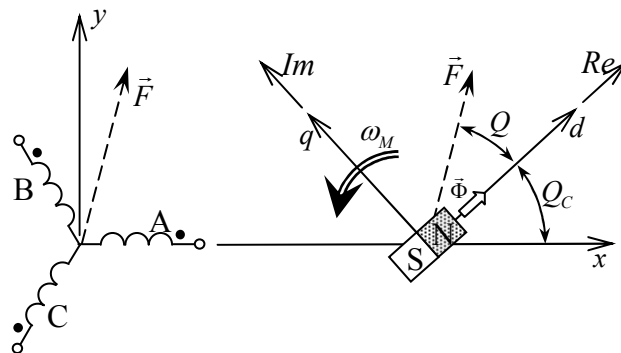


Рисунок 2.5 – Взаємозв'язок нерухомих систем координат СДПМ і систем координат що обертаються

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 МРС $|\vec{F}|$.

Для здійснення режиму гальмування алгоритм управління ВП має бути змінений так, щоб результуючий вектор МРС статора відставав від вектору магнітного потоку ротора. Для забезпечення можливості рекуперації енергії гальмування до складу ВП замість діодного моста повинен входити керований випрямляч [67-68].

Розглянемо систему координат (d, q) пов'язану з ротором ВЕД і нерухому відносно нього. Вважатимемо, що вісь d суміщена з віссю магнітного потоку ротора [70-72].

Взаємозв'язок системи координат, що обертається (d, q) і нерухомої (x, y) системи координат розглянемо на прикладі просторового вектору МРС \vec{F} , який випереджає вектор магнітного потоку ротора $\vec{\Phi}$ на кут Q (рис.2.5).

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

$$\vec{F}_{xy} = F_x + j \cdot F_y = F_{\max} \cdot (\cos(Q + Q_C) + j \cdot \sin(Q + Q_C)) = F_{\max} \cdot e^{j(Q+Q_C)}. \quad (2.40)$$

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

$$\vec{F}_{dq} = F_d + j \cdot F_q = F_{\max} \cdot (\cos(Q) + j \cdot \sin(Q)) = F_{\max} \cdot e^{jQ} \quad , (2.41)$$

де F_x, F_y, F_d, F_q – проекції вектору \vec{F} на відповідні осі;

F_{\max} – амплітуда МРС.

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

$$\vec{F}_{xy} = \vec{F}_{dq} \cdot e^{-jQ} \cdot e^{j(Q+Q_C)} = \vec{F}_{dq} \cdot e^{jQ_C}. \quad (2.42)$$

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

$$\begin{cases} \vec{u}_{dq} \cdot e^{jQ_C} = R_1 \cdot \vec{i}_{dq} \cdot e^{jQ_C} + \frac{d}{dt} (\vec{\psi}_{dq} \cdot e^{jQ_C}) \\ \vec{\psi}_{dq} \cdot e^{jQ_C} = L_1 \cdot \vec{i}_{dq} \cdot e^{jQ_C} + \psi_{mag} \cdot e^{jQ_C} \end{cases}, \quad (2.43)$$

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

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

Після скорочення лівої і правої частини даних рівнянь на $e^{j\Omega_c}$ отримаємо

$$\begin{cases} \vec{u}_{dq} = R_1 \cdot \vec{i}_{dq} + \frac{d\vec{\psi}_{dq}}{dt} + j \cdot p_p \cdot \omega_M \cdot \vec{\psi}_{dq} \\ \vec{\psi}_{dq} = L_1 \cdot \vec{i}_{dq} + \psi_{mag} \end{cases} \quad (2.44)$$

Представимо просторові вектори, що входять в дані рівняння, через їх проекції на осі координат [70]

$$\begin{aligned} \vec{u}_{dq} &= u_d + j u_q; \\ \vec{i}_{dq} &= i_d + j i_q; \quad \vec{\psi}_{dq} = \psi_d + j \psi_q. \end{aligned} \quad (2.45)$$

В цьому випадку можна записати

$$\begin{cases} u_d + j u_q = R_1 \cdot i_d + j R_1 \cdot i_q + \frac{d\psi_d}{dt} + j \frac{d\psi_q}{dt} + j p_p \cdot \omega_M \cdot \psi_d - p_p \cdot \omega_M \cdot \psi_q, \\ \psi_d + j \psi_q = L_{1d} \cdot i_d + j L_{1q} \cdot i_q + \psi_{mag,d} + j \psi_{mag,q} \end{cases} \quad (2.46)$$

де L_{1d} і L_{1q} – повні індуктивності обмоток статора по подовжній і поперечній осях. Якщо СДПМ виконаний із не з'явнополюсним ротором, $L_{1d} = L_{1q} = L_1$;

$\psi_{mag,d}$ и $\psi_{mag,q}$ – проекції вектору потокозчеплення статора від магнітного потоку ротора на осі координат. Оскільки вісь d суміщена з віссю магнітного потоку ротора – $\psi_{mag,d} = \psi_{mag}$; $\psi_{mag,q} = 0$ [72].

Розділивши дійсні і уявні частини рівнянь, отримаємо скалярний опис ВЕД

$$\begin{cases} u_d = R_1 \cdot i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - p_p \cdot \omega_M \cdot \psi_q \\ \psi_d = L_{1d} \cdot i_d + \psi_{mag} \\ u_q = R_1 \cdot i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + p_p \cdot \omega_M \cdot \psi_d \\ \psi_q = L_{1q} \cdot i_q \end{cases} \quad (2.47)$$

або

$$\begin{cases} u_d = R_1 \cdot i_d + L_{1d} \cdot \frac{di_d}{dt} - p_p \cdot \omega_M \cdot L_{1q} \cdot i_q \\ u_q = R_1 \cdot i_q + L_{1q} \cdot \frac{di_q}{dt} + p_p \cdot \omega_M \cdot L_{1d} \cdot i_d + p_p \cdot \omega_M \cdot \psi_{mag} \end{cases} \quad (2.48)$$

Потужність, споживану ВЕД, можна визначити як суму миттєвих потужностей фаз статора [70]

$$P_{ptr} = u_A \cdot i_A + u_B \cdot i_B + u_C \cdot i_C \quad (2.49)$$

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

$$\vec{u}_{xy} = \mathbf{a} \cdot [u_A \quad u_B \quad u_C]^T = \frac{2}{3} \left(u_A - \frac{1}{2}(u_B + u_C) + j \frac{\sqrt{3}}{2}(u_B - u_C) \right) = u_x + j u_y; \quad (2.50)$$

$$\vec{i}_{xy} = \mathbf{a} \cdot [i_A \quad i_B \quad i_C]^T = \frac{2}{3} \left(i_A - \frac{1}{2}(i_B + i_C) + j \frac{\sqrt{3}}{2}(i_B - i_C) \right) = i_x + j i_y, \quad (2.51)$$

звідки

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

підставивши їх у вираз для споживаної потужності, запишемо

$$P_{ptr} = u_x \cdot i_x + \frac{1}{4}(u_x - \sqrt{3} \cdot u_y)(i_x - \sqrt{3} \cdot i_y) + \frac{1}{4}(u_x + \sqrt{3} \cdot u_y)(i_x + \sqrt{3} \cdot i_y) = \frac{3}{2}(u_x \cdot i_x + u_y \cdot i_y) \quad (2.52)$$

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

$$P_{ptr} = \frac{3}{2}(u_d \cdot i_d + u_q \cdot i_q) \quad (2.53)$$

Підставивши в дану формулу вирази для u_d і u_q отримаємо

$$P_{ptr} = \frac{3}{2} \left(R_1 \cdot (i_d^2 + i_q^2) + \frac{d\psi_d}{dt} \cdot i_d + \frac{d\psi_q}{dt} \cdot i_q + p_p \cdot \omega_M \cdot (\psi_d \cdot i_q - \psi_q \cdot i_d) \right) \quad (2.54)$$

У цьому виразі можна виділити три складові
– потужність активних втрат в міді статора ВЕД;

$$P_{CU} = \frac{3}{2} \cdot R_1 \cdot (i_d^2 + i_q^2) \quad (2.55)$$

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

$$P_{MG} = \frac{3}{2} \left(\frac{d\psi_d}{dt} \cdot i_d + \frac{d\psi_q}{dt} \cdot i_q \right) \quad (2.56)$$

– електромагнітна потужність.

$$P_{EM} = \frac{3}{2} \cdot p_p \cdot \omega_M \cdot (\psi_d \cdot i_q - \psi_q \cdot i_d) \quad (2.57)$$

Момент обертання ВЕД можна виразити через електромагнітну потужність і кутову швидкість обертання ротора [73]

$$M_{VD} = \frac{P_{EM}}{\omega_M} = \frac{3}{2} \cdot p_p \cdot (\psi_d \cdot i_q - \psi_q \cdot i_d) = \frac{3}{2} \cdot p_p \cdot (\psi_{mag} + i_d \cdot (L_{1d} - L_{1q})) \cdot i_q \quad (2.58)$$

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

$$M_{VD} = \frac{3}{2} \cdot p_p \cdot \psi_{mag} \cdot i_q \quad (2.59)$$

Розглянемо режим роботи ВЕД, при якому струми i_d і i_q залишаються постійними або міняються достатньо повільно ($di_d/dt = 0$; $di_q/dt = 0$) [75].

В цьому випадку можна записати

$$\begin{cases} u_d = R_1 \cdot i_d - p_p \cdot \omega_M \cdot L_{1q} \cdot i_q \\ u_q = R_1 \cdot i_q + p_p \cdot \omega_M \cdot L_{1d} \cdot i_d + p_p \cdot \omega_M \cdot \psi_{mag} \\ M_{VD} = \frac{3}{2} \cdot p_p \cdot (\psi_{mag} + i_d \cdot (L_{1d} - L_{1q})) \cdot i_q \end{cases} \quad (2.60)$$

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 [76].

Якщо ВЕД має явно виражені полюси, індуктивності обмотки статора по подовжній і поперечній вісью різні.

В цьому випадку, момент обертання ВЕД залежить від обох складових струму, а модуль вектору струму статора (повний струм споживання ВЕД) визначається виразом

$$I_M = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} = \sqrt{i_d^2 + \left(\frac{2 \cdot M_{VD}}{3 \cdot p_p} \right)^2 \cdot \frac{1}{(\psi_{mag} + i_d \cdot (L_{1d} - L_{1q}))^2}} \quad (2.61)$$

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

$$\begin{cases} i_d^* = \arg \min_{i_d \in [-I_{\max}, 0]} (I_M(i_d, M_{VD})) \\ I_M^* = I_M(i_d^*, M_{VD}) \\ i_q^* = \sqrt{(I_M^*)^2 - (i_d^*)^2} \end{cases}, \quad M_{VD} = const \quad (2.62)$$

Окрім мінімізації повного струму статора ВЕД можливі і інші критерії оптимальності при визначенні подовжньої і поперечною складових струму. Деякі з них розглянуті в [73].

Область допустимих режимів роботи ВЕД обмежена співвідношеннями

$$\sqrt{i_d^2 + i_q^2} \leq I_{\max}; \quad \sqrt{u_d^2 + u_q^2} \leq U_{\max}, \quad (2.63)$$

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 $\omega_e L_{1d} i_d$ [70].

Таким чином, в загальному випадку $[i_d^*, i_q^*] = f(M_{VD}, \omega_M)$

2.5 Математична модель тягової акумуляторної батареї

У ролі накопичувача енергії тягового електроприводу найчастіше виступають електрохімічні джерела струму – тягові акумуляторні батареї (ТАБ). Є велика кількість типів акумуляторів, придатних для використання в ТАБ електромобілів. Однак жоден з цих типів в повній мірі не відповідає всім вимогам, що пред'являються до ТАБ, і не існує однозначної критерію вибору оптимального акумулятора.

Акумуляторна батарея електромобіля повинна володіти високими питомими значеннями енергії і потужності, високим ККД, великим числом циклів «заряд-розряд», низькою вартістю, безпекою в експлуатації, надійністю, низькою вартістю технічного обслуговування, малим часом заряду. Характеристики основних типів акумуляторних батарей, що застосовуються в тяговому електроприводі, наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Характеристики основних типів акумуляторних батарей, що застосовуються в тяговому електроприводі

Параметр	Тип акумулятору						
	Свинцово-кислотні	Залізо-нікелеві	Нікель-кадмієві	Нікель-металгідриди	Нагрієво-сірчані	Нікель-хлоридні	Літій-іонні
Питома потужність, Вт/кг	35...300	70...130	100...200	140...200	90...120	150	100
Щільність енергії, Вт·год/дм ³	50...90	60...100	60...100	100...210	75...110	160	100
Питома енергія, Вт·год/кг	15...45	35...60	30...60	55...80	80...120	100	150
Число циклів «заряд-розряд»	300...600	400...1200	1000...1500	1000	250...500	500	500
Ціна у.о./кВт·год	70...400	400...500	500	150...800	300	>1000	>1000

В даний час більшість виробників електромобілів віддають перевагу нікель-металогідридним акумуляторним батареям (NiMH), які мають хороші питомі показники і термін служби, але на сьогоднішній день досить коштовні.

Номінальна напруга акумулятора у батареї даного типу становить $E_{AK} = 1,2$ В. Залежність ємності ТАБ від ступеня зарядженості може бути апроксимована виразом

$$E_{ТАБ} = n_{ТАБ} \cdot (-8,2816 \cdot (1 - \theta_{ТАБ})^7 + 23,5749 \cdot (1 - \theta_{ТАБ})^6 - 30,0 \cdot (1 - \theta_{ТАБ})^5 + 23,7053 \cdot (1 - \theta_{ТАБ})^4 - 12,5877 \cdot (1 - \theta_{ТАБ})^3 + 4,1315 \cdot (1 - \theta_{ТАБ})^2 - 0,8658 \cdot (1 - \theta_{ТАБ}) + 1,37) \quad (2.64)$$

де $n_{ТАБ}$ – кількість циклів заряд-розряд.

Внутрішній опір NiMH ТАБ досить низька і, в першому наближенні, може бути отримано з виразу

$$R_{ТАБ} = n_{ТАБ} \cdot \frac{0,06}{C_{ТАБ,ном}} \quad (2.65)$$

Саморозряд NiMH ТАБ становить близько 5% на день. Час повного заряду – 1 год. Можливий режим швидкого заряду до 60% номінальної ємності за 20 хв.

Перспективними для використання в тяговому електроприводі вважаються акумулятори на основі літію (літій-іонні, літій-полімерні і т.і.). Номінальна ємність акумулятора літій-іонних батарей становить $E_{таб} = 3,5$ 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.

В процесі функціонування тягового електроприводу електронний блок управління забезпечує підтримання ступеня зарядженості ТАБ ($\theta_{ТАБ} = C_{ТАБ}/C_{ТАБ,ном}$, де $C_{ТАБ}$ – ємність 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 моделюванні роботи тягового електроприводу ступінь зарядженості ТАБ можна оцінити відповідно до виразу

$$\theta_{ТАБ} = \theta_{ТАБ,0} - \frac{1}{3600 \cdot C_{ТАБ,ном}} \cdot \int_{t_s}^{t_f} I_{ТАБ} dt \quad (2.66)$$

де $\theta_{ТАБ,0}$ – ступінь зарядженості ТАБ в момент часу.

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

$$U_{ТАБ} = E_{ТАБ} - I_{ТАБ} \cdot R_{ТАБ} \quad (2.67)$$

Цей вираз не враховує динамічні властивості ТАБ, якими при дослідженні властивостей 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 ($I_{ТАБ}$)

$$E_{ТАБ} = E_{ТАБ}(\theta_{ТАБ}, I_{ТАБ}, t_{ТАБ}^0), \quad R_{ТАБ} = R_{ТАБ}(\theta_{ТАБ}, I_{ТАБ}, t_{ТАБ}^0) \quad (2.68)$$

Потужність, що віддається або споживана акумуляторною батареєю, визначається виразом

$$P_{ТАБ} = U_{ТАБ} \cdot I_{ТАБ} = (E_{ТАБ} - I_{ТАБ} \cdot R_{ТАБ}) \cdot I_{ТАБ} \quad (2.69)$$

Отже,

$$I_{ТАБ} = \frac{1}{2 \cdot R_{ТАБ}} \cdot \left(E_{ТАБ} - \sqrt{E_{ТАБ}^2 - 4 \cdot R_{ТАБ} \cdot P_{ТАБ}} \right) \quad (2.70)$$

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

$$P_{max} = \frac{E_{ТАБ}^2}{4 \cdot R_{ТАБ}} \quad (2.71)$$

Якщо живлення ТАБ

$$\begin{cases} P_{ТАБ} = \frac{P_{VD}}{\eta_{inv}} + P_{dop} , \text{ при} \\ P_{ТАБ} = P_{VD} \cdot \eta_{inv} + P_{dop} \end{cases} \quad (2.72)$$

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

$$P_{VD} = \frac{3}{2} \cdot (u_d \cdot i_d + u_q \cdot i_q) \quad (2.73)$$

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 електроустаткуванням;

η_{inv} – ККД трифазного інвертора з ШІМ.

2.6 Висновки

1. Виконана формальна постановка оптимізаційної задачі управління тяговим електроприводом при векторному функціоналі якості управління. Компонентами векторного функціоналу є: критерій точності управління за швидкістю, критерій якості використання енергії ТАБ, критерій економічності бортової електростанції і критерій ступеня токсичності відпрацьованих газів ДВЗ. В основі синтезу математичної моделі лежить апроксимація нейронними сітками статистичних експериментальних характеристик ДВЗ, які знімаються в процесі стендових випробувань двигунів.

2. Отримано динамічну та статистичну математичні моделі тягового електродвигуна на базі вентильного електродвигуна. Розглянуті особливості управління вектором струму статора ВЕД, які забезпечують мінімізацію загального струму живлення на заданому тягово-швидкісному режимі на високій швидкості обертання ротора з використанням режиму «послаблення поля».

3. Розглянуто структурну схему та математичну модель системи управління тяговим електродвигуном, яка відображає динамічні властивості ВЕД, регулятора струму і трифазного інвертора з широтно-імпульсним модулятором. Надані принципи спрощення математичного опису тягового електроприводу, враховуючи тільки статистичні властивості ВЕД при оптимальному управлінні продовжньої та поперечної складової струму статора.

4. При моделюванні накопичувача енергії система управління електромобілем на підставі NiMH акумуляторної батареї використовується математична модель послідовного з'єднання еквівалентної ЕРС ТАБ та еквівалентного внутрішнього опору. В загальному випадку ЕРС і внутрішній опір є функціями ступеню зарядженості ТАБ, температури електроліту, величини і напрямленню струму.

РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА МЕТОДІВ АДАПТАЦІЇ УПРАВЛІННЯ

3.1 Адаптивне управління силової установки електромобілів

Рішення завдання оптимізації управління СУЕ нашоїхує на ряд труднощів, пов'язаних з ідентифікацією математичних моделей СУЕ як об'єктів управління, а також з недоліком апріорної інформації про параметри їздового циклу зовнішніх умов експлуатації.

Одним із способів подолання зазначених труднощів є використання концепції адаптивного управління, коли низька точність математичних моделей і недолік апріорної інформації заповнюються за рахунок більш повного використання поточної інформації. У цьому випадку характеристики системи управління доцільно представити у вигляді параметричних даних, що задаються апроксимуючими функціями, а настройку виробляти шляхом ітеративної оптимізації параметрів. При цьому САУ СУЕ повинна мати в своєму складі блок адаптації, що забезпечує асимптотичне наближення $J_{SV} \rightarrow J_{SV}^*$ і при $t \rightarrow \infty$ шляхом налаштування параметрів регулятора (рис. 3.1).

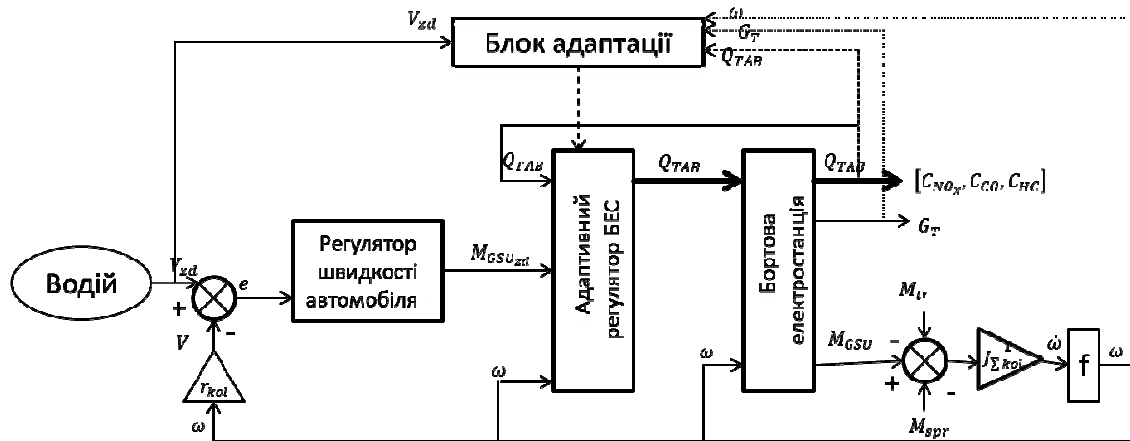


Рисунок 3.1 – Система адаптивного керування силовою установкою електромобіля

Дана САУ забезпечує отримання управління оптимального або близького до оптимального за рахунок замикання системи по змінним стану: $u^* = f_{GSU}(x, V_{zd})$ і не вимагає апріорної інформації про задаюючі і обурюючі впливи.

Оскільки $u^* = f_{GSU.rg}(\varepsilon^*, M_{GSU.zd}, V)$, основним завданням адаптивного регулятора СУЕ є визначення на кожному k -м кроці управління близького до оптимального, коефіцієнта використання електроприводу $\varepsilon^*(k)$ з урахуванням оцінок майбутніх значень вектора критеріїв якості $\mathcal{Q}(i)$, $i = \overline{k, N}$, $N \rightarrow \infty$.

При зваженому підсумовуванні критеріїв з використанням дисконтного фактору μ , $0 < \mu < 1$, що мінімізує функціонал якості управління для лінійної згортки критеріїв оптимальності можна представити у вигляді

$$J_{SV,\mu}(k) = \sum_{j=0}^{\infty} \mu^j \cdot \sum_{i=1}^4 K_{P,i} \cdot \mathcal{Q}(k+j) \quad (3.1)$$

Дисконтний чинник враховує ступінь достовірності оцінки майбутніх значень якості.

Одним з найбільш перспективних і недосліджених підходів до реалізації адаптивного управління СУЕ є управління з використанням нейромережевого адаптивного критика (Adaptive Critic), відомий також як «Наближене динамічне програмування» (Approximated Dynamic Programming). В цьому випадку в структурній схемі САУ міститься блок – Критик, що оцінює якість роботи всієї системи управління. Даний підхід передбачає адаптацію стратегії управління СУЕ на основі концепції навчання з підкріпленням (Reinforcement Learning).

Розглянемо структуру адаптивного регулятора електросилової установки, який реалізує концепцію нейромережевого управління з нейромережевими критиком і моделлю об'єкта управління, наведену на рис. 3.2.

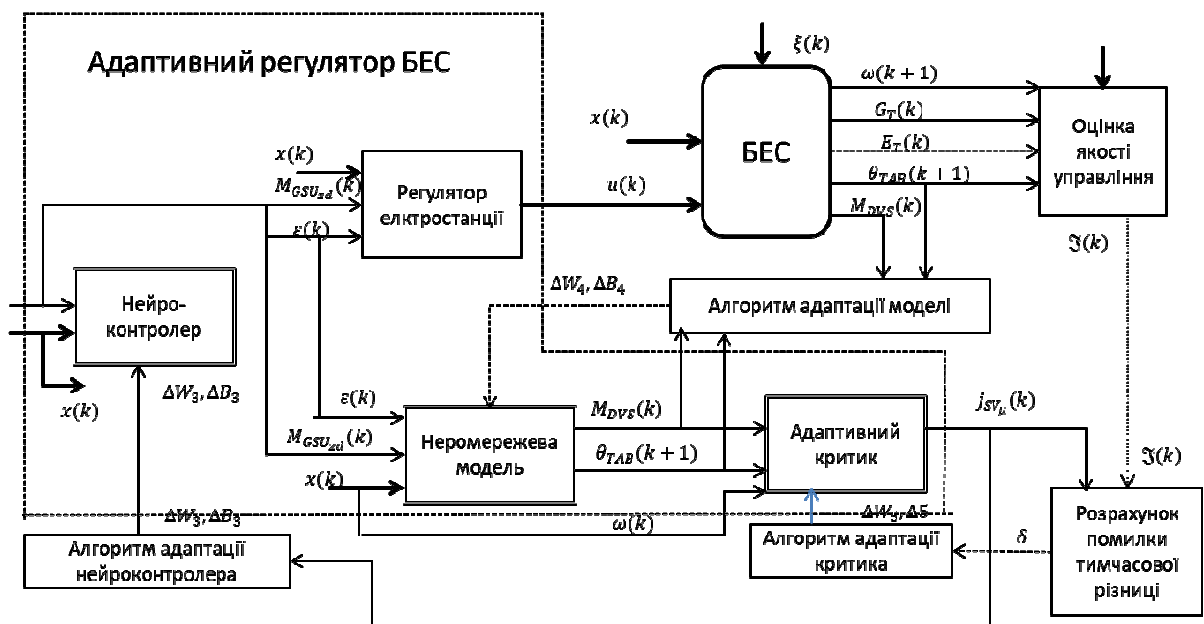


Рисунок 3.2 – Адаптивний регулятор електросилової силової установки

В процесі функціонування САУ ГСУ на k -м кроці, управління обчислення коефіцієнта використання електроприводу здійснюється нейроконтролером $\varepsilon = F_{\text{GSU.NC}}(x, M_{\text{GSU.zd}})$, який реалізований у вигляді тришарової штучна ней прямого поширення з активаційною функцією нейронів прихованих шарів у вигляді функції гіперболічного тангенса і лінійного нейрона вихідного шару.

$$\begin{bmatrix} \bar{\omega}(k) \\ \bar{\theta}_{\text{ТАБ}}(k) \\ \bar{M}_{\text{GSU.zd}}(k) \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} \omega(k) \\ \theta_{\text{ТАБ}}(k) \\ M_{\text{GSU.zd}}(k) \end{bmatrix} - \underset{k=0..N}{M} \left\{ \begin{bmatrix} \omega(k) \\ \theta_{\text{ТАБ}}(k) \\ M_{\text{GSU.zd}}(k) \end{bmatrix} \right\} : \underset{k=0..N}{std} \left\{ \begin{bmatrix} \omega(k) \\ \theta_{\text{ТАБ}}(k) \\ M_{\text{GSU.zd}}(k) \end{bmatrix} \right\} \right) \quad (3.2)$$

$$N_{31} = 2 : \left(1 + \exp \left(-2(W_{31} \cdot [\bar{\omega}(k) \ \bar{\theta}_{TAB}(k) \ \bar{M}_{GSU.zd}(k)]^T + B_{31}) \right) \right) - 1, \quad (3.3)$$

$$N_{32} = 2 : \left(1 + \exp \left(-2 \cdot (W_{32} \cdot N_{31} \cdot B_{32}) \right) \right) - 1, \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon}(k) &= W_{33} \cdot N_{32} \cdot B_{33}, \\ \varepsilon(k) &= \bar{\varepsilon}(k) \cdot \underbrace{std}_{k=0,N} \{ \varepsilon(k) \} + \underbrace{M}_{k=0,N} \{ \varepsilon(k) \}, \end{aligned} \quad (3.5)$$

де W_{31} , W_{32} , W_{33} – матриці вагових коефіцієнтів нейронів першого, другого і третього шарів ШНМ нейроконтролера відповідно;

B_{31} , B_{32} , B_{33} – вектори зсувів нейронів відповідних прошарків;

символ «:» нормується в вираженні, означає поелементний розподіл векторів.

Далі регулятор СУЕ визначає вектор управління $u=f_{GSU.rg}(\varepsilon, M_{GSU.zd}, x)$ відповідно до виражень, наведених в п.3.1. Керуючі впливи трапляються на вхід об'єкта управління.

Одночасно нейромережева модель $[\hat{M}_{DVS}, \hat{\theta}_{TAB}]^T = F_{GSU.MD}(\varepsilon, x, M_{GSU.zd})$ на підставі поточного стану СУЕ і застосовуваного управління дає оцінку параметрів стану системи на наступному кроці управління, які критичні з точки зору оцінки функціонала $J_{SV\mu}$.

Нейромережева модель реалізована у вигляді двошарової ШНМ прямого поширення з активаційною функцією нейронів прихованого шару у вигляді функції гіперболічного тангенса і лінійних нейронах вихідного шару

$$\begin{bmatrix} \bar{\varepsilon}(k) \\ \bar{\omega}(k) \\ \bar{\theta}_{TAB}(k) \\ \bar{M}_{GSU.zd}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon(k) \\ \omega(k) \\ \theta_{TAB}(k) \\ M_{GSU.zd}(k) \end{bmatrix} - \underbrace{M}_{k=0,N} \left\{ \begin{bmatrix} \varepsilon(k) \\ \omega(k) \\ \theta_{TAB}(k) \\ M_{GSU.zd}(k) \end{bmatrix} \right\} : \underbrace{std}_{k=0,N} \left\{ \begin{bmatrix} \varepsilon(k) \\ \omega(k) \\ \theta_{TAB}(k) \\ M_{GSU.zd}(k) \end{bmatrix} \right\}, \quad (3.6)$$

$$N_{41} = 2 : \left(1 + \exp \left(-2(W_{41} \cdot [\bar{\omega}(k) \ \bar{\theta}_{TAB}(k) \ \bar{M}_{GSU.zd}(k)]^T + B_{41}) \right) \right) - 1, \quad (3.7)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{M}_{DVS.zd}(k) \\ \hat{\theta}_{TAB}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{M}_{DVS.zd}(k) \\ \bar{\theta}_{TAB}(k+1) \end{bmatrix} * \underbrace{std}_{k=0,N} \left\{ \begin{bmatrix} \bar{M}_{DVS.zd}(k) \\ \bar{\theta}_{TAB}(k) \end{bmatrix} \right\} + \underbrace{M}_{k=0,N} \left\{ \begin{bmatrix} \bar{M}_{DVS.zd}(k) \\ \bar{\theta}_{TAB}(k) \end{bmatrix} \right\}, \quad (3.8)$$

де W_{41} , W_{42} – матриці вагових коефіцієнтів нейронів першого і другого прошарків ШНМ нейроконтролера відповідно;

B_{41} , B_{42} – вектори зсувів нейронів відповідних прошарків;

символ «*» при денормуванні вихідного сигналу ШНМ позначається поелементне множення векторів.

Адаптивний критик здійснює оцінку функціоналу якості управління $J_{SV\mu}(k)$ на даному етапі при обраному управлінні і поточному стані СУЕ спираючись на оцінку параметрів системи, здійсненої нейромережевою моделлю

$$\hat{J}_{SV\mu} = F_{GSU.KR}(\hat{M}_{DVS}(k), \hat{\theta}_{TAB}(k), \omega) . \quad (3.9)$$

Адаптивний критик реалізований у вигляді ШНМ з архітектурою, подібної ШНМ нейромережевої моделі

$$\begin{bmatrix} \bar{M}_{GSU.zd}(k) \\ \bar{\theta}_{TAB}(k+1) \\ \bar{\omega}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{M}_{GSU.zd}(k) \\ \hat{\theta}_{TAB}(k+1) \\ \omega(k) \end{bmatrix} - \underset{k=0,N}{M} \left\{ \begin{bmatrix} \hat{M}_{GSU.zd}(k) \\ \hat{\theta}_{TAB}(k+1) \\ \omega(k) \end{bmatrix} \right\} : \underset{k=0,N}{std} \left\{ \begin{bmatrix} \hat{M}_{GSU.zd}(k) \\ \hat{\theta}_{TAB}(k+1) \\ \omega(k) \end{bmatrix} \right\} \quad (3.10)$$

$$N_{51} = 2 : \left(1 + \exp \left(-2(W_{51} \cdot [\bar{\omega}(k) \quad \bar{\theta}_{TAB}(k) \quad \bar{M}_{GSU.zd}(k)]^T + B_{51}) \right) \right) - 1 , \quad (3.11)$$

$$\hat{J}_{SV\mu}(k) = W_{52} \cdot N_{51} \cdot B_{52} \quad (3.12)$$

де W_{51} , W_{52} – матриці вагових коефіцієнтів нейронів першого і другого прошарків ШНМ нейроконтролера відповідно;

B_{51} , B_{52} – вектори зсувів нейронів відповідних прошарків;

У ряді випадків можлива подача на входи адаптивного критика дійсних значень параметрів СУЕ $M_{DVS}(k)$ і $\theta_{TAB}(k+1)$ замість їх оцінки нейромережевою моделлю. В цьому випадку ШНМ $F_{GSU.MD}$ служить тільки для зворотного поширення помилки при налаштуванні нейроконтролера в процесі адаптації САУ СУЕ.

Блок адаптації забезпечує параметричну настройку (навчання) ШНМ нейроконтролера, моделі і адаптивного критика шляхом налаштування відповідних матриць вагових коефіцієнтів і векторів зсувів нейронів.

Метою навчання нейроконтролера є формування таких керуючих впливів СУЕ, які б сприяли зменшенню квадратичного значення оцінки функціонала якості управління

$$E_{NC} = \frac{1}{2} \cdot \hat{J}_{SV\mu}^2 \rightarrow \min . \quad (3.13)$$

Навчання проводиться методом зворотного поширення помилки через нейронні мережі адаптивного критика, моделі і, власне, нейроконтролера. Корекція параметрів ШНМ нейроконтролера здійснюється відповідно до виражень

$$W_{3i}(k+1) = W_{3i}(k) + \Delta W_{3i}(k+1) \quad (3.14)$$

$$B_{3i}(k+1) = B_{3i}(k) + \Delta B_{3i}(k), \quad i = \overline{1,3}, \quad (3.15)$$

де

$$\Delta W_{3i}(k) = v_{NC} \cdot \Delta W_{3i}(k-1) + \lambda_{NC} \cdot (1 - v_{NC}) \cdot \left. \frac{\partial E_{NC}}{\partial W_{3i}} \right|_{W_{3i} = W_{3i}(k)} \quad (3.16)$$

$$\Delta B_{3i}(k) = v_{NC} \cdot \Delta B_{3i}(k-1) + \lambda_{NC} \cdot (1 - v_{NC}) \cdot \left. \frac{\partial E_{NC}}{\partial B_{3i}} \right|_{B_{3i} = B_{3i}(k)} \quad (3.17)$$

$$\frac{\partial E_{NC}}{\partial B_{32}} = \frac{\partial E_{NC}}{\partial \bar{\theta}} = \left\{ W_{41}^T \cdot \left(W_{42}^T \cdot \left\{ W_{51}^T \cdot W_{52}^T \cdot \hat{J}_{SV\mu} * (1 - N_{51}^2) \right\}_{1,2} \right) * (1 - N_{41}^2) \right\}_1 \quad (3.18)$$

$$\frac{\partial E_{NC}}{\partial B_{32}} = W_{33}^T \cdot \frac{\partial E_{NC}}{\partial B_{32}} * (1 - N_{32}^2) \quad \frac{\partial E_{NC}}{\partial B_{31}} = W_{32}^T \cdot \frac{\partial E_{NC}}{\partial B_{32}} * (1 - N_{31}^2); \quad (3.19)$$

$$\frac{\partial E_{NC}}{\partial W_{33}} = \frac{\partial E_{NC}}{\partial B_{32}} \cdot N_{32}^T; \quad \frac{\partial E_{NC}}{\partial W_{32}} = \frac{\partial E_{NC}}{\partial B_{32}} \cdot N_{31}^T \quad (3.20)$$

$$\frac{\partial E_{NC}}{\partial W_{31}} = \frac{\partial E_{NC}}{\partial B_{31}} \cdot \left[\bar{M}_{GSU.zd}, \bar{\theta}_{TAB}(k), \bar{\omega} \right] \quad (3.21)$$

λ_{NC} – коефіцієнт швидкості навчання ШНМ контролера;

v_{NC} – коефіцієнт інерційності навчання.

У наведених виразах символ «*» позначає поелементне множення векторів, запис « $\{\cdot\}_i$ » – i -й елемент вектора, зведення вектора в квадрат передбачає поелементне виконання даної операції.

Метою навчання нейромережевої моделі є уточнення прогнозів параметрів стану системи на наступному кроці управління

$$E_{MD}(k) = \frac{1}{2} \cdot \left(\left[\begin{array}{c} \bar{M}_{DVS}(k) \\ \bar{\theta}_{TAB}(k+1) \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \bar{M}_{DVS}(k) \\ \bar{\theta}_{TAB}(k+1) \end{array} \right] \right)^2 \rightarrow \min \quad (3.22)$$

де

$$\left[\begin{array}{c} \bar{M}_{DVS}(k) \\ \bar{\theta}_{TAB}(k+1) \end{array} \right] = \left(\left[\begin{array}{c} M_{DVS}(k) \\ \theta_{TAB}(k+1) \end{array} \right] - \underset{k=0..N}{M} \left\{ \left[\begin{array}{c} M_{DVS}(k) \\ \theta_{TAB}(k) \end{array} \right] \right\} \right) : \underset{k=0..N}{std} \left\{ \left[\begin{array}{c} M_{DVS}(k) \\ \theta_{TAB}(k) \end{array} \right] \right\} \quad (3.23)$$

– дійсні параметри стану СУЕ після нормування.

Навчання ШНМ моделі проводиться методом зворотного поширення помилки. При цьому корекція параметрів ШНМ здійснюється відповідно до виражень

$$W_{4i}(k+1) = W_{4i}(k) + \Delta W_{4i}(k), \quad (3.24)$$

$$B_{4i}(k+1) = B_{4i}(k) + \Delta B_{4i}(k), \quad i = \overline{1,2}, \quad (3.25)$$

де

$$\Delta W_{4i}(k) = v_{MD} \cdot \Delta W_{4i}(k-1) + \lambda_{MD} \cdot (1 - v_{MD}) \cdot \left. \frac{\partial E_{MD}}{\partial W_{4i}} \right|_{W_{4i} = W_{4i}(k)} \quad (3.26)$$

$$\Delta B_{4i}(k) = v_{MD} \cdot \Delta B_{4i}(k-1) + \lambda_{MD} \cdot (1 - v_{MD}) \cdot \left. \frac{\partial E_{MD}}{\partial B_{4i}} \right|_{B_{4i} = B_{4i}(k)} \quad (3.27)$$

$$\left. \frac{\partial E_{MD}}{\partial B_{42}} \right|_{B_{42} = B_{42}(k)} = \left[\begin{array}{c} \bar{M}_{DVS}(k) \\ \bar{\theta}_{TAB}(k+1) \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \bar{M}_{DVS}(k) \\ \bar{\theta}_{TAB}(k+1) \end{array} \right] \quad (3.28)$$

$$\frac{\partial E_{MD}}{\partial B_{41}} = W_{42}^T \cdot \frac{\partial E_{MD}}{\partial B_{42}} * (1 - N_{41}^T) \quad (3.25)$$

$$\frac{\partial E_{MD}}{\partial W_{41}} = \frac{\partial E_{MD}}{\partial B_{42}} \cdot N_{41}^2 \quad \frac{\partial E_{MD}}{\partial W_{41}} = \frac{\partial E_{MD}}{\partial B_{42}} \cdot \left[\begin{array}{c} \bar{\varepsilon} \\ \bar{\omega} \\ \bar{\theta}_{TAB} \\ \bar{M}_{GSU,zd} \end{array} \right]^T \quad (3.26)$$

λ_{MD} і v_{MD} – коефіцієнти швидкості і інерційності навчання ШНМ контролера.

Навчання адаптивного критика полягає в тому, щоб ітеративно уточнювати оцінку функціоналу якості управління відповідно до підкріплень, що надходять.

Вираз для функціоналу якості управління на k -му кроці може бути записано у вигляді

$$J_{SV\mu}(k) = \sum_{j=0}^{\infty} \mu^j \cdot \sum_{i=1}^4 K_{P,i} \cdot \mathfrak{I}_i(k+j) = \sum_{i=1}^4 K_{P,i} \cdot \mathfrak{I}_i(k) + \mu \cdot J_{SV\mu}(k+1) \quad (3.27)$$

Будемо вважати, що функції $V_{zd} = V_{zd}(t)$ і $\alpha = \alpha(t)$, $t \in T$, які визначають тягово-швидкісний режим ЕСУ, є ергодичними. В цьому випадку помилку адаптивного критика можна представити у вигляді помилки тимчасової різниці[40].

$$\delta(k) = \hat{J}_{SV\mu}(k) - \sum_{i=1}^4 K_{P,i} \cdot \mathfrak{I}_i(k) - \mu \cdot \hat{J}_{SV\mu}(k+1) = \hat{J}_{SV\mu}(k-1) - \sum_{i=1}^4 K_{P,i} \cdot \mathfrak{I}_i(k-1) - \mu \cdot \hat{J}_{SV\mu}(k) \quad (3.28)$$

Для обчислення помилки тимчасової різниці повинні використовуватися оцінки $\hat{J}_{SV\mu}$ на двох наступних, один за одним кроках управління при одних і тих же значеннях параметрів ШНМ адаптивного критика.

Корекція параметрів ШНМ адаптивного критика здійснюється з умови мінімізації квадратичної помилки

$$E_{KR} = \frac{1}{2} \cdot \delta^2 \rightarrow \min \quad (3.29)$$

Згідно виразам

$$W_{5i}(k+1) = W_{5i}(k) + \Delta W_{5i}(k) \quad (3.30)$$

$$B_{5i}(k+1) = B_{5i}(k) + \Delta B_{5i}(k), \quad i = \overline{1,2}, \quad (3.31)$$

де

$$\Delta W_{5i}(k) = v_{KR} \cdot \Delta W_{5i}(k-1) + \lambda_{KR} \cdot (1 - v_{KR}) \cdot \left. \frac{\partial E_{KR}}{\partial W_{5i}} \right|_{W_{5i} = W_{5i}(k)} \quad (3.32)$$

$$\Delta B_{5i}(k) = v_{KR} \cdot \Delta B_{5i}(k-1) + \lambda_{KR} \cdot (1 - v_{KR}) \cdot \left. \frac{\partial E_{KR}}{\partial B_{5i}} \right|_{B_{5i} = B_{5i}(k)} \quad (3.33)$$

$$\left. \frac{\partial E_{KR}}{\partial B_{52}} \right|_{B_{52} = B_{52}(k)} = \delta(k); \quad \left. \frac{\partial E_{KR}}{\partial B_{51}} \right|_{B_{51} = B_{51}(k)} = W_{52}^T \cdot \left. \frac{\partial E_{KR}}{\partial B_{52}} \right|_{B_{52} = B_{52}(k)} * (1 - N_{51}^2); \quad (3.34)$$

$$\left. \frac{\partial E_{KR}}{\partial W_{52}} \right|_{W_{52} = W_{52}(k)} = \left. \frac{\partial E_{KR}}{\partial B_{52}} \right|_{B_{52} = B_{52}(k)} \cdot N_{51}^T \quad (3.35)$$

$$\left. \frac{\partial E_{MD}}{\partial W_{41}} \right|_{W_{51} = W_{51}(k)} = \left. \frac{\partial E_{MD}}{\partial B_{42}} \right|_{B_{51} = WB_{51}(k)} \cdot \left[\begin{array}{c} \bar{M}_{GSU.zd} \\ \bar{\theta}_{TAB}(k+1) \\ \bar{\omega}(k) \end{array} \right]^T \quad (3.36)$$

λ_{KR} і v_{KR} – коефіцієнти швидкості і інерційності навчання ШНМ адаптивного критика відповідно.

Таким чином, на кожному кроці поліпшується закон управління шляхом навчання нейроконтролера, а також підвищується здатність системи оцінювати поточну ситуацію внаслідок навчання ШНМ адаптивного критика і моделі.

Корекція параметрів нейронних мереж триває до тих пір, поки не буде досягнутий мінімум функціоналу якості управління $J_{SV\mu}$ або буде отримана прийнятна стратегія управління для заданого їздового циклу.

ШНМ нейроконтролера, моделі і адаптивного критика можуть бути ініційовані випадковими значеннями вагових коефіцієнтів і зсувів нейронів, рівномірно розподіленими в діапазоні $[-1, 1]$.

В цьому випадку допустимі управління при довільних задаючих і обурюючих впливах гарантуються урахуванням обмежень області припустимих режимів в регуляторі ЕСУ $u = f_{GSU.rg}(\varepsilon, M_{GSU.zd}, V)$.

Однак для прискорення адаптації доцільно провести попереднє «off-line» навчання нейроконтролера і нейромережевої моделі з використанням еталонної моделі управління (рис. 3.3)

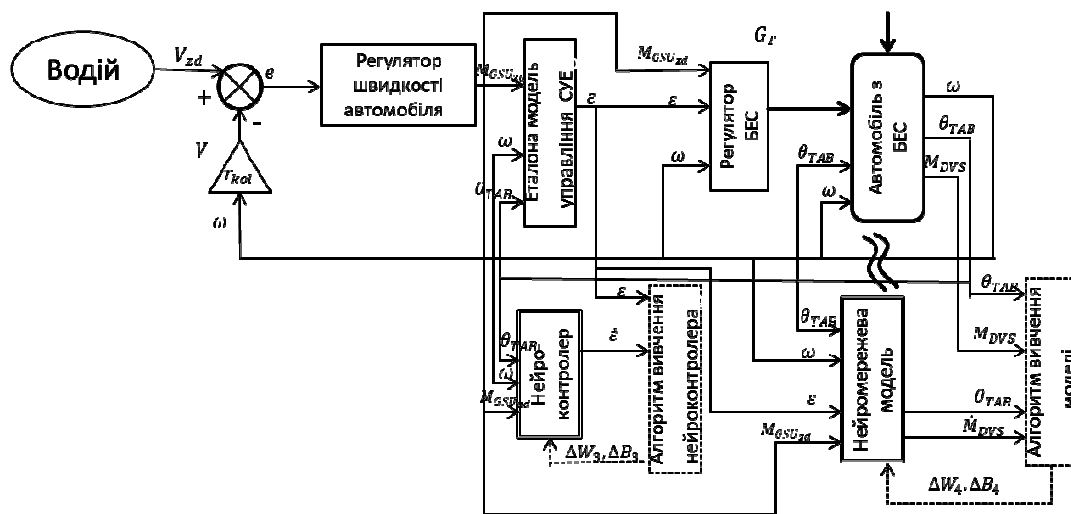


Рисунок 3.3 – Схема навчання нейроконтролера і нейромережевої моделі з використанням еталонної моделі управління

В якості еталонної моделі може виступати управління з використанням логічних правил вибору стратегії або оптимальна стратегія управління, отримана для деякого заданого їздового циклу.

В процесі моделювання руху автомобіля на деякому їздовому циклі при використанні моделі управління СУЕ отримують множину точок $\{\varepsilon_i, \omega_i, \theta_i, M_{GSU.zd,i}\}$ и $\{M_{GSU.zd,i}, \theta_{ТАВ,i}, \varepsilon_i, \omega_i, \theta_{ТАВ,i}, M_{GSU.zd,i}\}$, $i = \overline{1, N}$, де $\theta_{ТАВ,i}$ – значення ступеня зарядженості ТАБ на послідовному кроці управління. Функції нев'язки виходів нейроконтролера та нейромережевої моделі в j -й точці можуть бути визначені:

$$\begin{cases} \psi_{GSU.zd}(i, W_{3j}, B_{3j}) = (\varepsilon_i - \hat{\varepsilon}_i)^2 \\ \hat{\varepsilon}_i = F_{GSU.zd}(\omega_i, \theta_{ТАВ,i}, M_{GSU.zd,i}, W_{3j}, B_{3j}), \quad j = \overline{1, 3} \end{cases} \quad (3.37)$$

Задача навчання нейронних мереж $F_{GSU.NC}$ и $F_{GSU.MD}$ зводиться к пошуку мінімуму цільових функціоналів виду

$$J_{GSU.NC}(W_{3j}, B_{3j}) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \psi_{GSU.zd}(i, W_{3j}, B_{3j}), j = \overline{1,3} \rightarrow \min \quad (3.38)$$

$$J_{GSU.NC}(W_{4j}, B_{4j}) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \psi_{GSU.MD}(i, W_{4j}, B_{4j}), j = \overline{1,2} \rightarrow \min \quad (3.39)$$

Для вирішення даної задачі можуть бути використані відомі методи навчання нейронних мереж. Високу ефективність при навчанні неронних мереж $F_{GSU.NC}$ и $F_{GSU.MD}$ показує алгоритм SGG (Scaled Conjugate Gradient Algorithm) [39].

З метою запобігання ефекту перенавчання, множина вихідних даних може бути розділена на навчальну (training set) і контрольну (validation set) підмножину з використанням відповідних коефіцієнтів розбиття подібно тому, як це робилось в процесі ідентифікації нейромережевої моделі ДВЗ.

Попереднє навчання адаптивного критика $F_{GSU.KR}$ може бути виконано «on-line» з використанням помилки тимчасової різниці безпосередньо перед запуском процесу адаптації стратегії управління СУЕ.

Якість управління СУЕ та швидкість адаптації стратегії управління можна покращити, якщо доповнити вхідні вектора нейроконтролера та нейромережевої моделі адаптивного регулятора сигналом ідентифікації типу їздового циклу. Даний сигнал може бути отриман в результаті аналізу характеру змін функцій $\omega = \omega(t)$ та $\alpha = \alpha(t)$ или $M_{GSU.zd} = M_{GSU.zd}(t)$ в деякому ковзному тимчасовому вікні В роботах показана ефективність вирішення задачі ідентифікації типу їздового циклу за допомогою самоорганізованого шару Кохонена та ШНМ прямого поширення з елементами затримки сигналу.

3.2 Застосування нейро-нечіткого адаптивного контролера при управлінні силовою установкою електромобіля

У тому випадку, коли здійснити попереднє навчання нейроконтролера адаптивної САУ СУЕ з використанням еталонної моделі важко, для розрахунку коефіцієнту використання електроприводу може використовуватись нечітка нейронна мережа. При цьому ініціалізація такого нейро-нечіткого контролера $\varepsilon = F_{GSU.KR}(x_{FC})$ з вектором входу $x_{FC} = [\omega, \theta_{TAB}, M_{GSU.zd}]^T$ передбачає використання апріорних експертних знань якісного характеру о процесі управління СУЕ, формалізованих у вигляді правил нечітких продукцій.

Послідуюча адаптація стратегій управління СУЕ к поточному їздовому циклу здійснюється шляхом навчання нейро-нечіткого контролера подібно тому, як це здійснювалось раніше.

Нейро-нечіткий контролер $F_{GSU.KR}$ може мати структуру, запропоновану Л.Вангом и Дж.Менделем. З функціональної точки зору, мережа Ванга-Менделя є часним випадком моделі нечіткого висновку Такагі-Сугено-Канга, в якому висновок імплікацій представлені у вигляді поліномов нульового порядку, а в якості агрегатора використовується оператор алгебраїчного добутку.

З іншого боку, мережу Ванга-Менделя можна розглядати і як систему нечіткого висновку Мамдані з сингтонними функціями приналежності термів заключень бази правил при використанні дефазифікації відносно середнього центру та застосуванні алгебраїчного добутку для визначення результатів нечіткої кон'юкції при агрегуванні.

В роботах було доведено, що при відповідному підборі параметрів, система нечіткого висновку з даною структурою здібна апроксимувати будь-яку нелінійну функцію багатьох змінних з довільною точністю.

Використання системи висновку передбачає введення лінгвістичних змінних ω^L , θ^L_{TAB} , $M^L_{GSU.zd}$, відповідаючих вхідним сигналам нейро-нечіткого контролера $F_{GSU.FC}$.

Вхідні лінгвістичні змінні образують вектор.

$$x^L_{FC} = [\omega^L, \theta^L_{TAB}, M^L_{GSU.zd}]^T = \{x^L_{FC.i}\}, \quad i = \overline{1,3} \quad (3.40)$$

Дані змінні задаються на базових терм-множинах $\{T_{ji}\}$, $j = \overline{1, N_{T,i}}$, де $N_{T,i}$ – кількість термів в терм-множинах, відповідаючим i -й лінгвістичній змінній.

Кожне із значень (термів) кожної лінгвістичної змінної представляє собою окрему нечітку змінну з функцією приналежності у вигляді гаусової функції з центром c_T і варіацією σ_T :

$$\mu_{T_{ji}}(x_{FC.i}, \sigma_{T_{ji}}, c_{T_{ji}}) = \exp\left[-\frac{(x_{FC.i} - c_{T_{ji}})^2}{2\sigma_{T_{ji}}^2}\right], \quad (3.41)$$

де $x_{FC.i}$ – носії відповідних нечітких множин: $x_{FC.1} \in [0, \omega_{max}]$, $x_{FC.2} \in [0, 1]$, $x_{FC.3} \in [M_{GSU.min}, M_{GSU.max}]$.

Для формалізації апріорних експертних знань о характері процесу управління СУЕ складають базу правил нечітких продукцій, в яких умови сформульовані в термінах нечітких лінгвістичних висловлювань, а заключення представлені у вигляді деяких чітких чисел d_m , де m – номер правила, $m = \overline{1, N_p}$:

$$P_m, \text{ якщо } x^L_{FC.2} = T_{j_{m1}} \text{ і } x^L_{FC.2} = T_{j_{m2}} \text{ і } x^L_{FC.3} = T_{j_{m3}}, \text{ тоді } \varepsilon = d_m, \quad (3.42)$$

де: $j_m \in \{1, 2, \dots, N_{T,i}\}$ – номер терма i -й лінгвістичної змінної, задіяного в m -ом правилі.

Структура нечіткої нейронної мережі Ванга-Менделя, яка реалізує визначення коефіцієнту використання електроприводу на основі отриманої бази правил нечіткої продукції представлена на рис. 3.5.

В даній структурі перший шар виконує фазифікацію вхідних змінних. Передбачається, що терм-множини лінгвістичної змінної ω^L містять три терма, а змінних θ^L_{TAB} і $M^L_{GSU.zd}$ – по п'ять термів. Другий шар забезпечує агрегування передумов правил нечітких продукцій. Третій шар –

агрегування умов бази правил і генерацію нормалізуючого сигналу. Вихідний шар, що складається з одного нейрону здійснює нормалізацію вихідного сигналу, що формує значення коефіцієнту використання електроприводу ε .

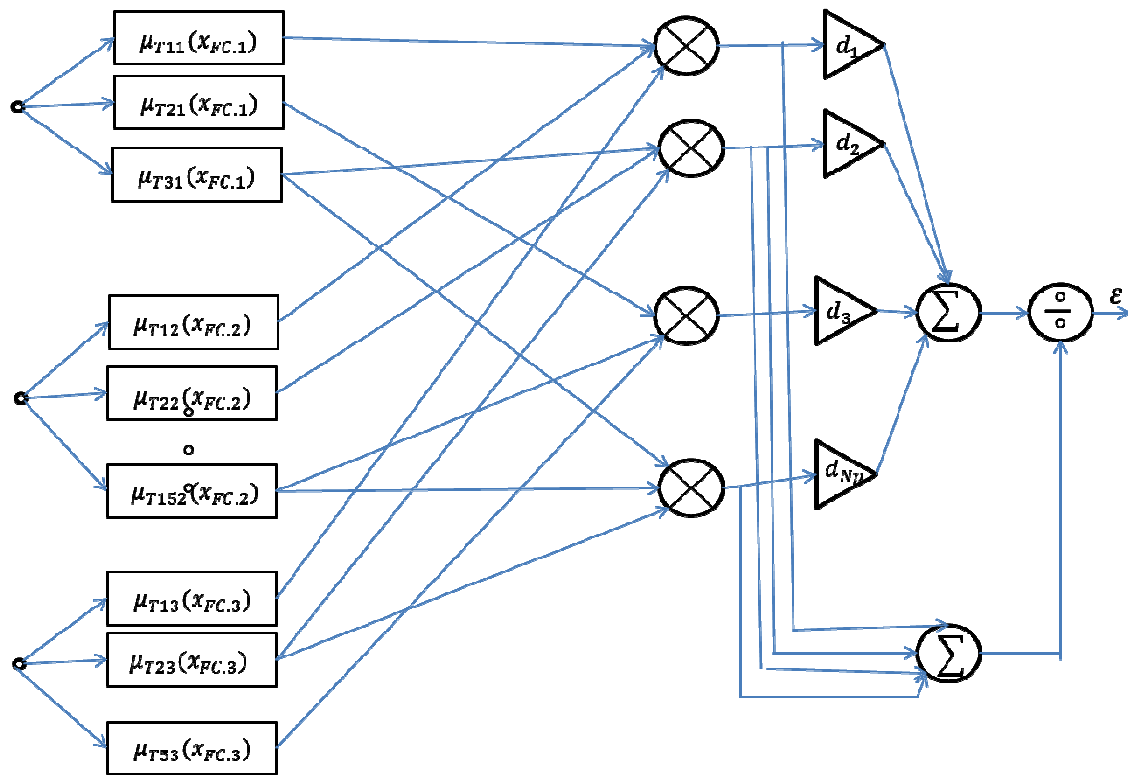


Рисунок 3.4 – Структура нечіткої нейронної мережі Ванга-Менделя

Обчислення коефіцієнту використання електроприводу на k -м кроці управління на основі алгоритму нечіткого висновку Ванга-Менделя описується виразом

$$\varepsilon(k) = \frac{1}{\sum_m (\prod_i \mu_{T_{jmi}}(x_{FC,i}(k)))} \cdot \sum_m d_m \cdot \left(\prod_i \mu_{T_{jmi}}(x_{FC,i}(k)) \right) \quad (3.43)$$

В структурі нечіткої нейронної мережі Ванга-Менделя тільки перший та другий шар є параметричними. В першому шарі підлягають настройці параметри σ_{Tji} і c_{Tji} функцій приналежності термів вхідних лінгвістичних змінних, а в третьому шарі – вагові коефіцієнти d_m , інтепретовані як центри функцій приналежності заключень правил нечітких продукцій.

Метою навчання нейро-нечіткого контролера є формування таких керуючих впливів СУЕ, які б сприяли зменшенню квадратичного значення оцінки функціоналу якості управління

$$E_{FC} = \frac{1}{2} \cdot \hat{J}_{SV\mu}^2 \rightarrow \min \quad (3.44)$$

В процесі навчання корекція параметрів мережі Ванга-Менделя здійснюється згідно виразам

$$d_m(k+1) = d_m(k) - \lambda_{FC,d} \cdot \frac{\partial E_{FC}}{\partial \varepsilon} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial d_m} \bigg|_{\varepsilon = \varepsilon(k)} d_m = d_m(k), \quad (3.45)$$

$$C_{T_{jmi}}(k+1) = C_{T_{jmi}}(k) - \lambda_{FC,c} \cdot \frac{\partial E_{FC}}{\partial \varepsilon} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial C_{T_{ji}}} \bigg|_{\varepsilon = \varepsilon(k)} C_{T_{ji}} = C_{T_{ji}}(k), \quad (3.46)$$

$$\sigma_{T_{jmi}}(k+1) = \sigma_{T_{jmi}}(k) - \lambda_{FC,\sigma} \cdot \frac{\partial E_{FC}}{\partial \varepsilon} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial \sigma_{T_{ji}}} \bigg|_{\varepsilon = \varepsilon(k)} \sigma_{T_{ji}} = \sigma_{T_{ji}}(k), \quad (3.47)$$

де

$$\frac{\partial E_{FC}}{\partial \varepsilon} = \left\{ W_{41}^T \cdot \left(W_{42}^T \cdot \left\{ W_{51}^T \cdot W_{52}^T \cdot \hat{J}_{SV\mu} * (1 - N_{51}^2) \right\}_{1,2} \right) * (1 - N_{41}^2) \right\}_1 \quad (3.48)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial d_m} = \frac{\exp \left[\frac{-(x_{FC,i} - C_{T_{jmi}})^2}{2\sigma_{T_{jmi}}^2} \right]}{\sum_m \exp \left[\frac{-(x_{FC,i} - C_{T_{jmi}})^2}{2\sigma_{T_{jmi}}^2} \right]} \quad (3.49)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial d_m} = \sum_m d_m \cdot \frac{\partial}{\partial d_m} \left(\frac{\Pi_i \mu_{T_{jmi}}}{\sum_m \Pi_i \mu_{T_{jmi}}} \right) \quad (3.50)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial d_m} = \sum_m d_m \cdot \frac{\partial}{\partial \sigma_{T_{jmi}}} \left(\frac{\Pi_i \mu_{T_{jmi}}}{\sum_m \Pi_i \mu_{T_{jmi}}} \right) \quad (3.51)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \sigma_{T_{ji}}} \left(\frac{\Pi_i \mu_{T_{jmi}}}{\sum_m \Pi_i \mu_{T_{jmi}}} \right) &= \left(\sum_m \exp \left[\frac{-(x_{FC,i} - C_{T_{jmi}})^2}{2\sigma_{T_{jmi}}^2} \right] \right)^{-2} \cdot \exp \left[\frac{-(x_{FC,i} - C_{T_{jmi}})^2}{2\sigma_{T_{jmi}}^2} \right] \times \\ &\times \left(\frac{-(x_{FC,i} - C_{T_{jmi}})^2}{2\sigma_{T_{jmi}}^2} \cdot \sum_m \exp \left[\frac{-(x_{FC,i} - C_{T_{jmi}})^2}{2\sigma_{T_{jmi}}^2} \right] - \sum_m \exp \left[\frac{-(x_{FC,i} - C_{T_{jmi}})^2}{2\sigma_{T_{jmi}}^2} \right] \cdot \frac{x_{FC,i} - C_{T_{jmi}}}{2\sigma_{T_{jmi}}^2} \right) \end{aligned} \quad (3.47)$$

$$\frac{\partial}{\partial \sigma_{T_{ji}}} \left(\frac{\Pi_i \mu_{T_{jmi}}}{\sum_m \Pi_i \mu_{T_{jmi}}} \right) = \left(\sum_m \exp \left[\frac{-(x_{FC,i} - C_{T_{jmi}})^2}{2\sigma_{T_{jmi}}^2} \right] \right)^{-2} \cdot \exp \left[\frac{-(x_{FC,i} - C_{T_{jmi}})^2}{2\sigma_{T_{jmi}}^2} \right] \times$$

$$\times \left(\frac{-(x_{FC,i} - c_{T_{jmi}})^2}{2\sigma_{T_{jmi}}^2} \cdot \sum_m \exp \left[\sum_i \frac{-(x_{FC,i} - c_{T_{jmi}})^2}{2\sigma_{T_{jmi}}^2} \right] - \sum_m \exp \left[\sum_i \frac{-(x_{FC,i} - c_{T_{jmi}})^2}{2\sigma_{T_{jmi}}^2} \right] \cdot \frac{(x_{FC,i} - c_{T_{jmi}})^2}{2\sigma_{T_{jmi}}^2} \right) \quad (3.52)$$

якщо j -й терм лінгвістичної змінної використовується в m -ом правилі;

$$\frac{\partial}{\partial c_{T_{ji}}} \left(\frac{\Pi_i \mu_{T_{jmi}}}{\sum_m \Pi_i \mu_{T_{jmi}}} \right) = \frac{\exp \left[\sum_i \frac{-(x_{FC,i} - c_{T_{jmi}})^2}{2\sigma_{T_{jmi}}^2} \right] \cdot \sum_m \exp \left[\sum_i \frac{-(x_{FC,i} - c_{T_{jmi}})^2}{2\sigma_{T_{jmi}}^2} \right] \cdot \frac{x_{FC,i} - c_{T_{jmi}}}{2\sigma_{T_{jmi}}^2}}{\left(\sum_m \exp \left[\sum_i \frac{-(x_{FC,i} - c_{T_{jmi}})^2}{2\sigma_{T_{jmi}}^2} \right] \right)^2} \quad (3.53)$$

$$\frac{\partial}{\partial \sigma_{T_{ji}}} \left(\frac{\Pi_i \mu_{T_{jmi}}}{\sum_m \Pi_i \mu_{T_{jmi}}} \right) = \frac{\exp \left[\sum_i \frac{-(x_{FC,i} - c_{T_{jmi}})^2}{2\sigma_{T_{jmi}}^2} \right] \cdot \sum_m \exp \left[\sum_i \frac{-(x_{FC,i} - c_{T_{jmi}})^2}{2\sigma_{T_{jmi}}^2} \right] \cdot \frac{x_{FC,i} - c_{T_{jmi}}}{2\sigma_{T_{jmi}}^2}}{\left(\sum_m \exp \left[\sum_i \frac{-(x_{FC,i} - c_{T_{jmi}})^2}{2\sigma_{T_{jmi}}^2} \right] \right)^2} \quad (3.54)$$

- якщо j -й терм i -й лінгвістичної змінної не використовується в m -ом правилі;

$\lambda_{FC.d}$, $\lambda_{FC.c}$, $\lambda_{FC.\sigma}$ – коефіцієнти швидкості навчання нейро-нечіткого контролеру;

m' – номери правил нечітких продукцій, в яких використовується j -й терм i -й лінгвістичної змінної;

«*» – позначається поелементне множення векторів.

Для забезпечення лінійної впорядкованості елементів в терм-множинах системи нечіткого висновку, на параметри повинні бути накладені відповідні обмеження, які не дозволяють алгоритму адаптації зробити, наприклад, нечітку множину «низький» більш нечіткої множини «високий».

Вирази, що приведені, забезпечують можливість здійснювати адаптацію стратегії управління СУЕ к поточному їздовому циклу на основі концепції навчання нейро-нечіткого контролеру з підкріпленням (Reinforcement Learning).

3.3 Висновки за третім розділом

1. Для тягово-швидкісного режиму, що визначається заданими функціями зміни швидкості автомобіля і зовнішніх умов експлуатації, оптимальна стратегія управління СУЕ може бути отримана на підставі методу динамічного програмування. Однак, даний підхід не вказує конструктивного шляху для побудови САУ в силу необхідних апріорних відомостей, задаючих і обурюючих впливах і високою обчислювальною складністю алгоритму. Отримане оптимальне управління може використовуватися при розробці логічних правил вибору стратегії управління, а також при науковому обґрунтуванні параметрів і характеристик систем і агрегатів СУЕ.

2. Застосування адаптивного управління СУЕ з використанням нейромережевого адаптивного критика дозволяє подолати недолік апріорної інформації щодо параметрів їздового циклу та зовнішніх умов експлуатації, а також низьку точність математичних моделей. Даний підхід передбачає адаптацію стратегії управління СУЕ, яка забезпечує асимптотичне наближення $J_{SV} \rightarrow J_{SV}^*$ та $u \rightarrow u^*$ при $t \rightarrow \infty$, на основі концепції навчання з підкріпленням.

3. Для прискорення адаптації стратегії управління доцільно провести попереднє «off-line» навчання нейроконтролера и нейромережевої моделі з використанням еталонної моделі управління. В якості еталонної моделі може виступати управління, засноване на логічних правилах вибору стратегії або оптимальна стратегія, яка отримана методом динамічного програмування для деякого заданого їздового циклу.

4. При неможливості попереднього навчання нейроконтролера адаптивної САУ СУЕ з використанням еталонної моделі розрахунок коефіцієнту використання електростанції може бути реалізовано на базі нейро-нечіткого контролера, реалізуючого алгоритм Менделя-Ванга для нечіткого висновку заключень.

РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СИЛОВОЇ УСТАНОВКИ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

4.1 Методика і апаратура експериментальних досліджень

Для визначення потоків енергії в силовій установці електромобіля з бортовою зарядною станцією 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 ТАБ і бортової зарядної станції в залежності від режиму роботи електромобіля.

Для дослідження потоків енергії в гібридній силовій установці автомобіля Toyota Prius був розроблений бортовий вимірювальний комплекс. Основою вимірювального комплексу (рис. 4.1) є АЦП з інтерфейсом ISA типу PCL-711. В якості програмного забезпечення був обраний пакет Advantech GeniDAQ 4.1. Крім того для вимірювання таких параметрів, як час впорскування палива, масова витрата повітря, оберти електричних машин був використаний мотортестер MODIS.

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. 4.2) на шині генератора MG1 (рис. 4.3). Тоді відповідно до першого закону Кірхгофа

$$I_{MG2} = I_{AKB} - I_{MG1} \quad (4.1)$$

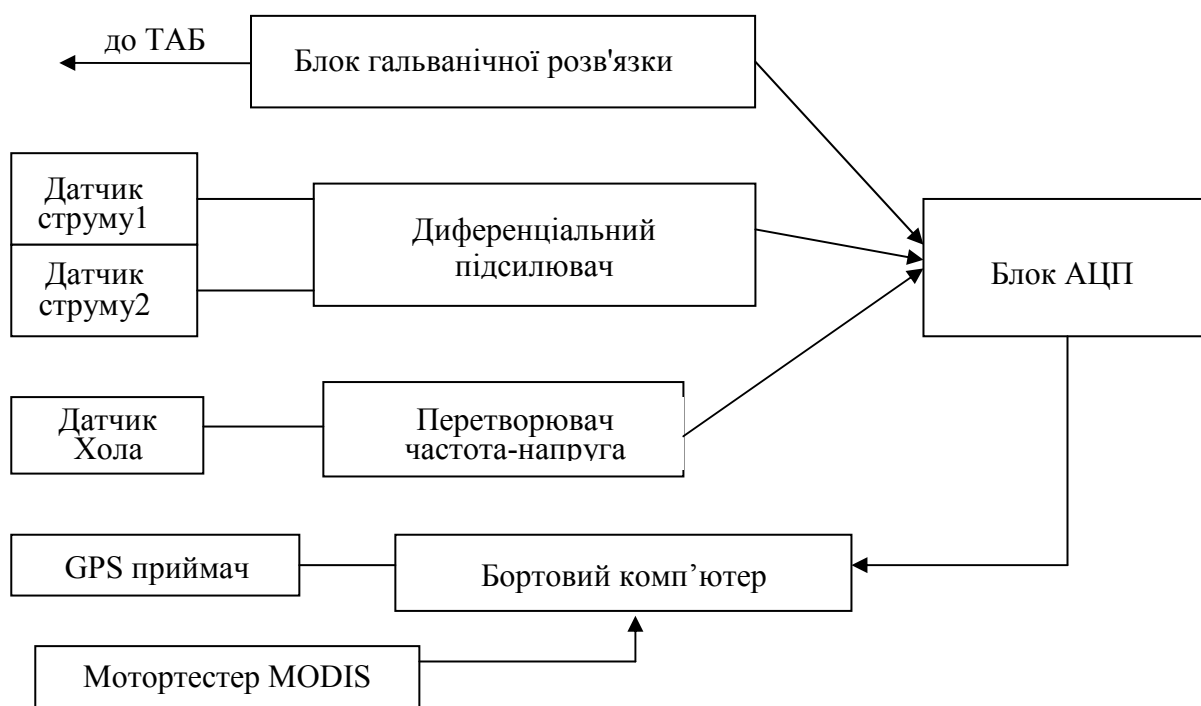


Рисунок 4.1 – Структурна схема вимірювального комплексу

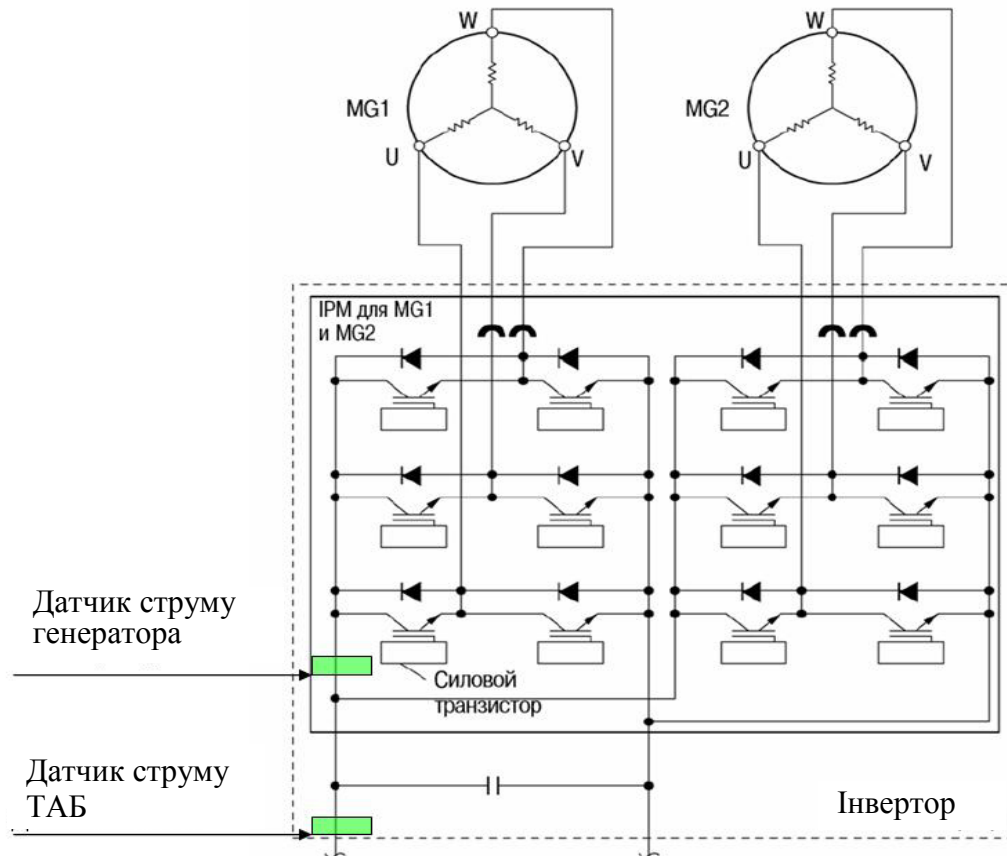


Рисунок 4.2 – Схема підключення датчиків струму

Для посилення сигналу з датчика струму генератора використовується диференційний підсилювач на основі двох операційних підсилювачів типу AD820 (рис. 4.4).

Для вимірювання струму ТАБ використовується датчик CSNA111 безконтактного типу на основі ефекту Хола (рис. 4.5, 4.6)

Для вимірювання оборотів ДВЗ використовується датчик Хола типу SS411, встановлений безпосередньо на котушці запалювання (рис. 4.7). Принципова схема тахометра наведена на рис. 4.8.



Рисунок 4.3 – Місце встановлення датчиків струму

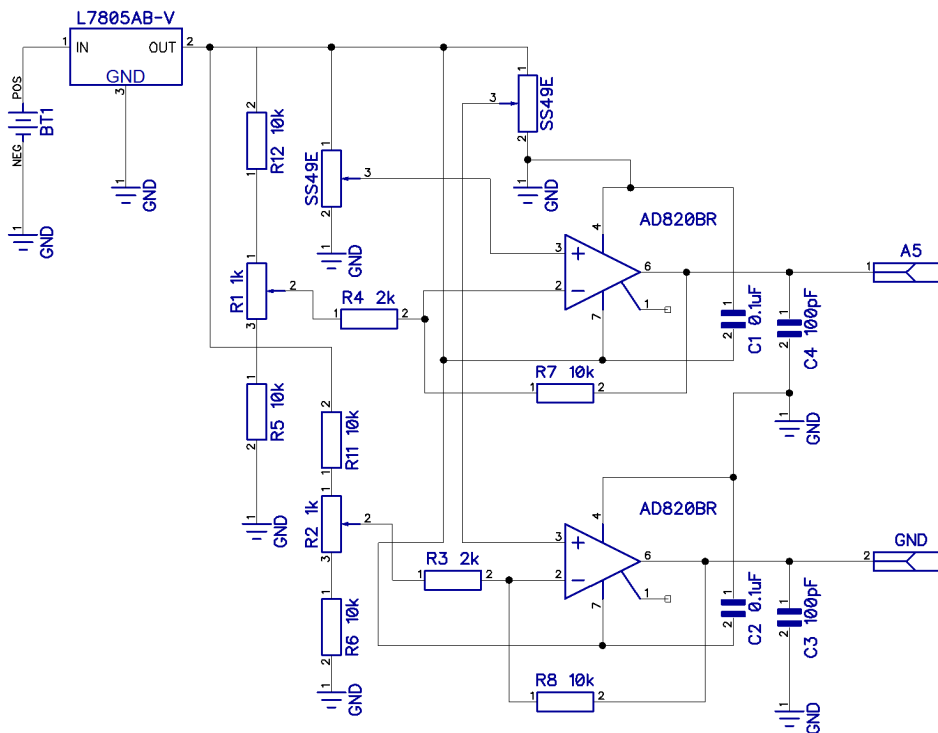


Рисунок 4.4 – Підсилювач сигналу датчиків струму генератора

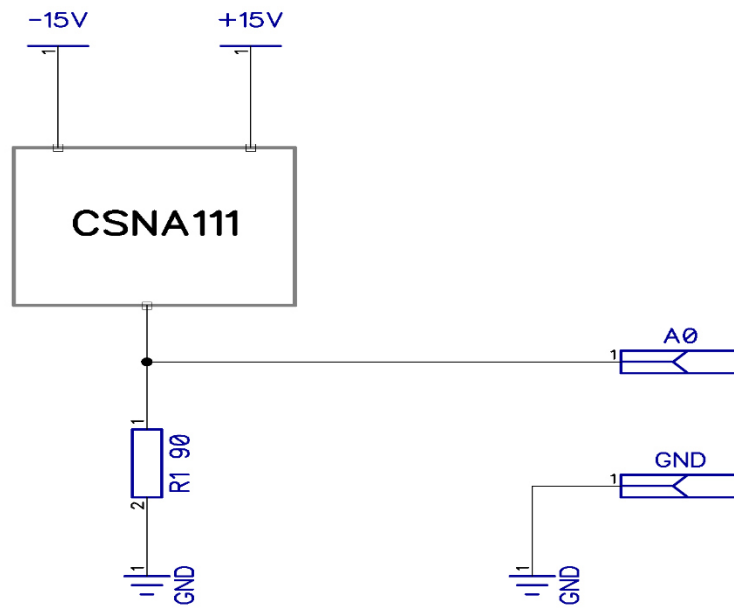


Рисунок 4.5 – Схема підключення датчика струму ТАБ

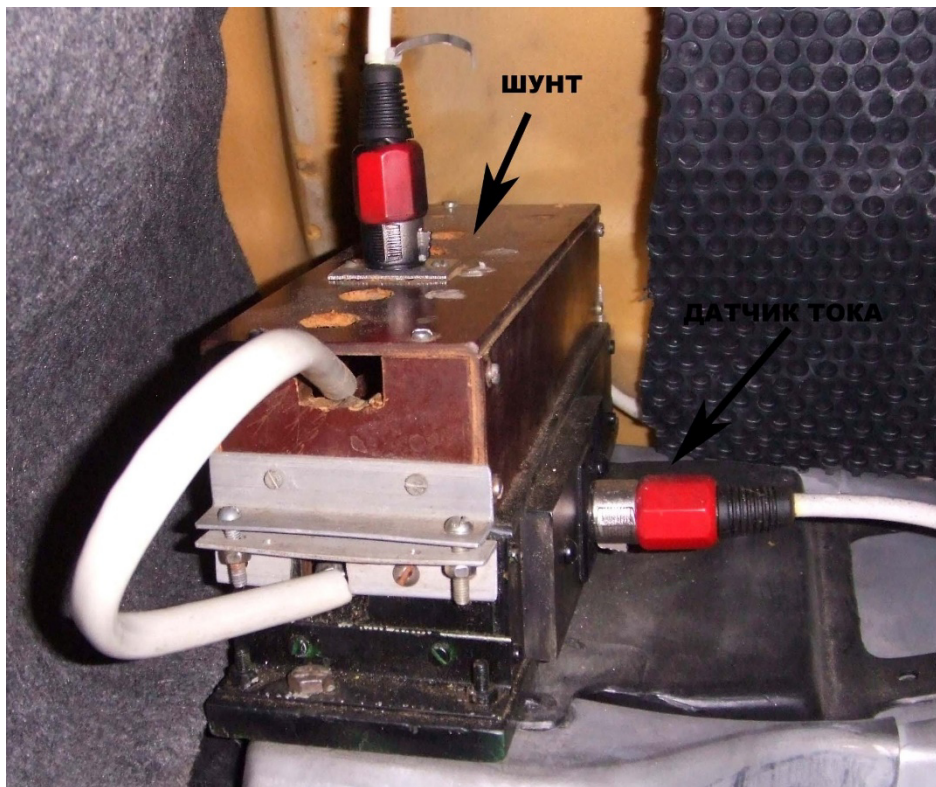


Рисунок 4.6 – Датчик струму ТАБ

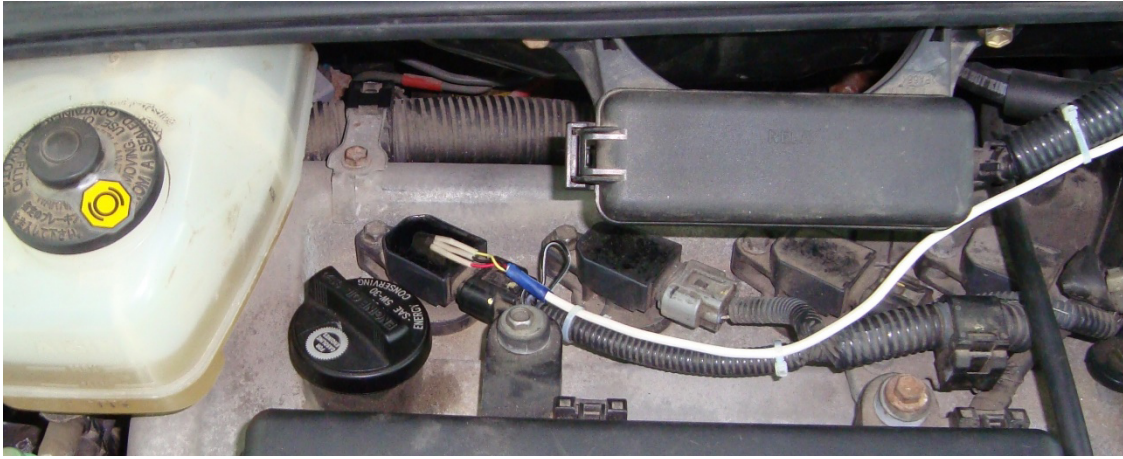


Рисунок 4.7 – Датчик тахометра ДВЗ

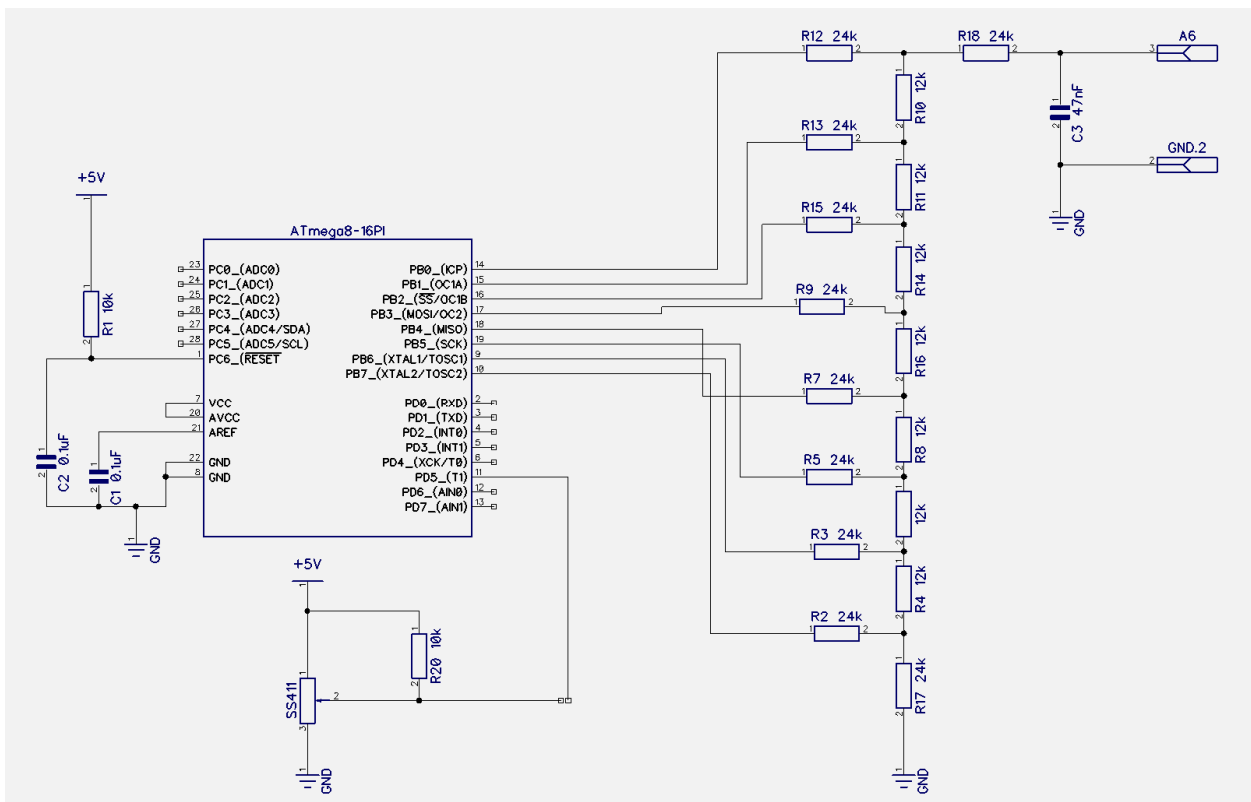


Рисунок 4.8 – Принципова схема тахометра

Вимірювання швидкості руху автомобіля проводиться за допомогою датчика швидкості колеса, що входить до складу АБС. Принципова схема каналу вимірювання швидкості наведена на рис. 4.9.

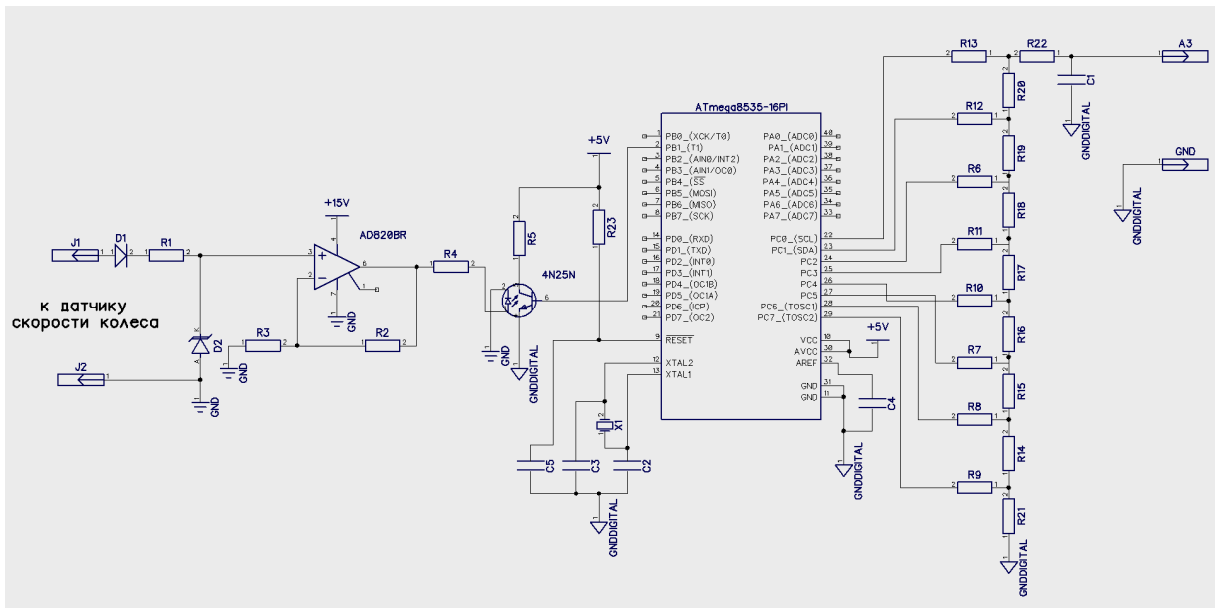


Рисунок 4.9 – Принципова схема каналу вимірювання швидкості

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

Для вимірювання напруги тягової ТАБ використовується гальванічне розв'язаний підсилювач на основі високо-лінійного оптрона HCNR200 (рис. 4.10 – 4.13).

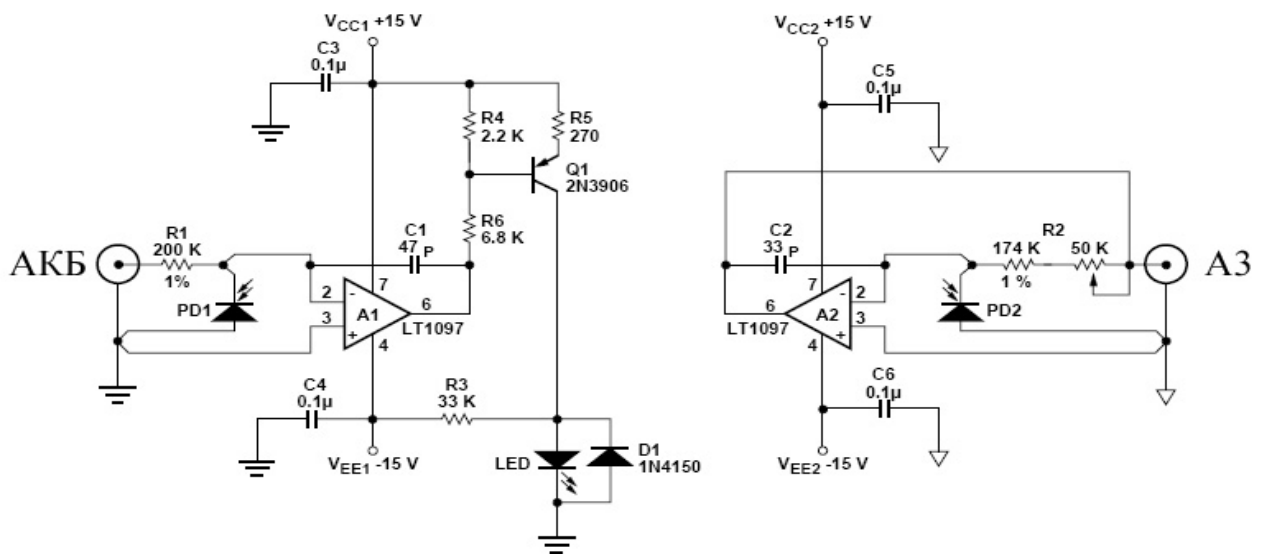


Рисунок 4.10 – Гальванічна розв'язка каналу вимірювання високої напруги

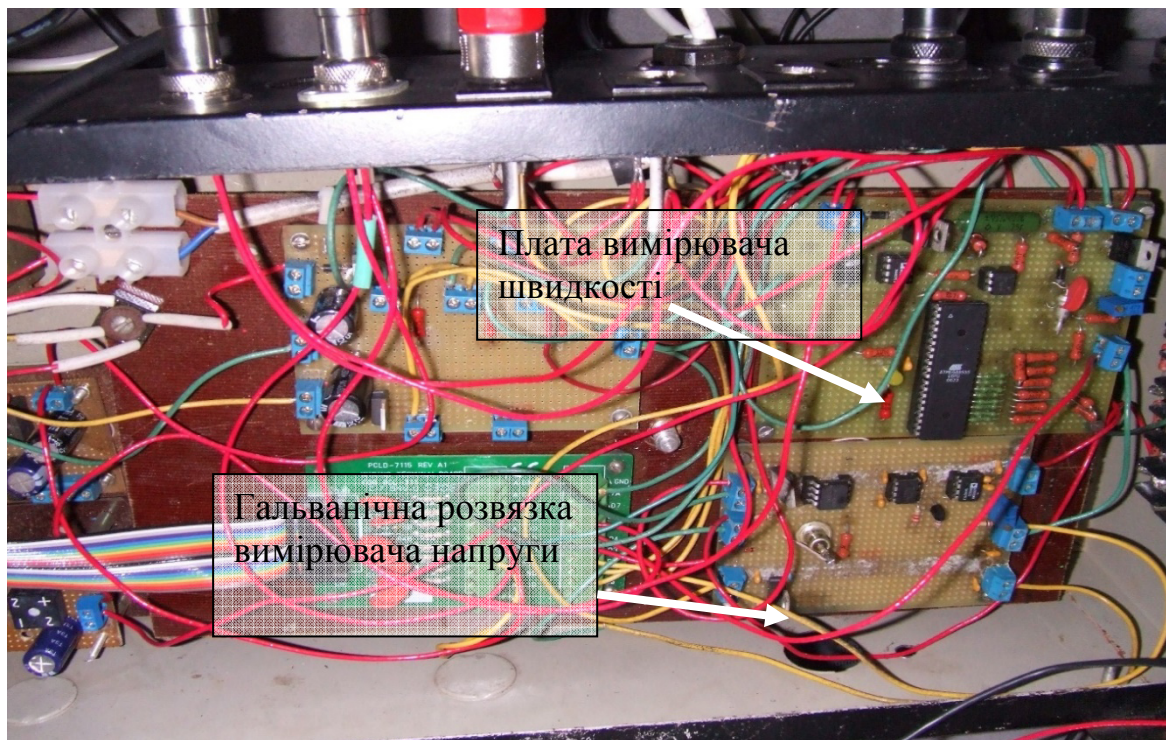


Рисунок 4.11 – Основний модуль

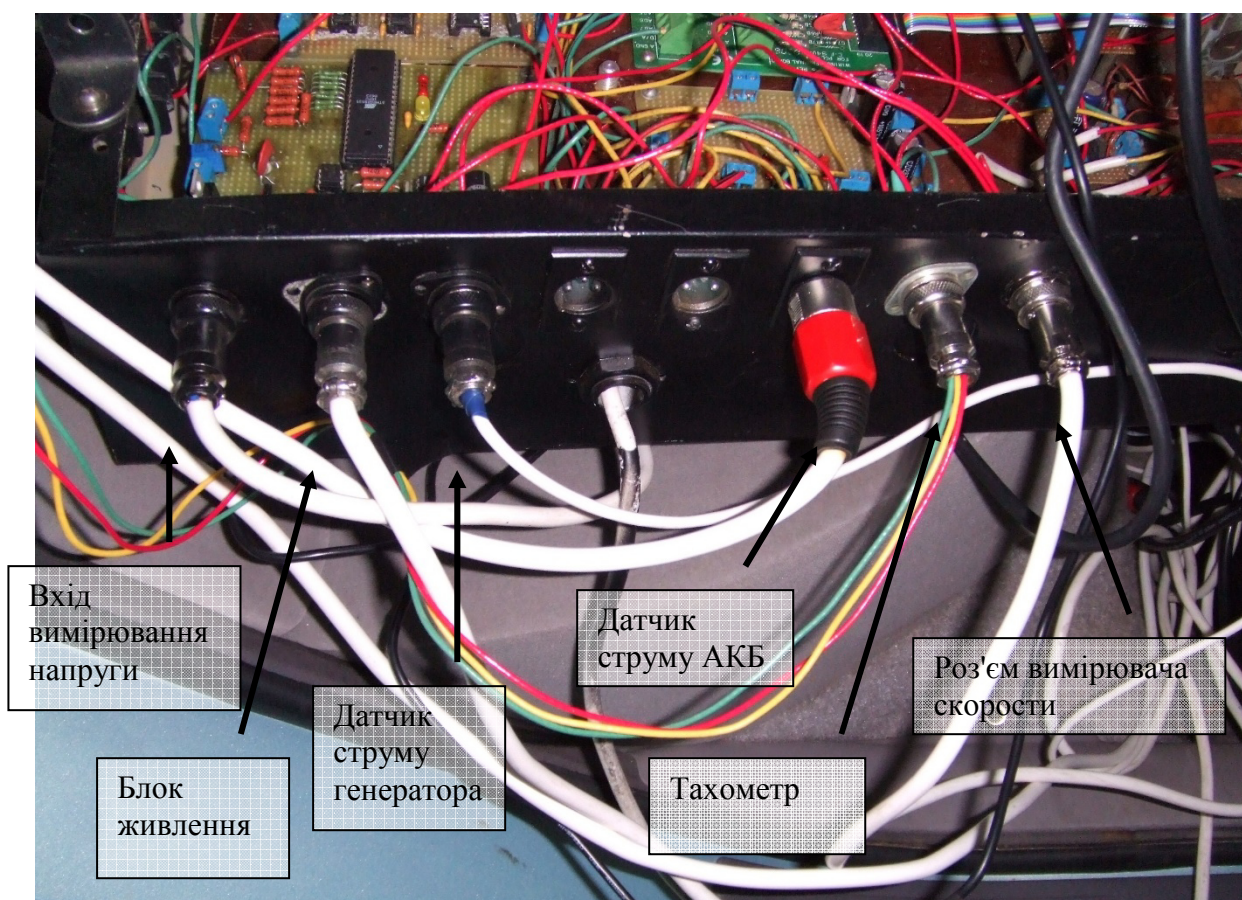


Рисунок 4.12 – Схема підключення датчиків

Сигнали з датчиків надходять в основний модуль (рис. 4.13), де відбувається їх перетворення до виду придатного для вимірювання за допомогою автоматичного центрального процесора. Вимірювальний комплекс на автомобілі та його інтерфейс наведені на рис. 4.13.



Рисунок 4.13 – Вимірювальний комплекс на автомобілі

У ході проведення експерименту на автомобілі Prius необхідно визначити 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, що є нераціональною 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.

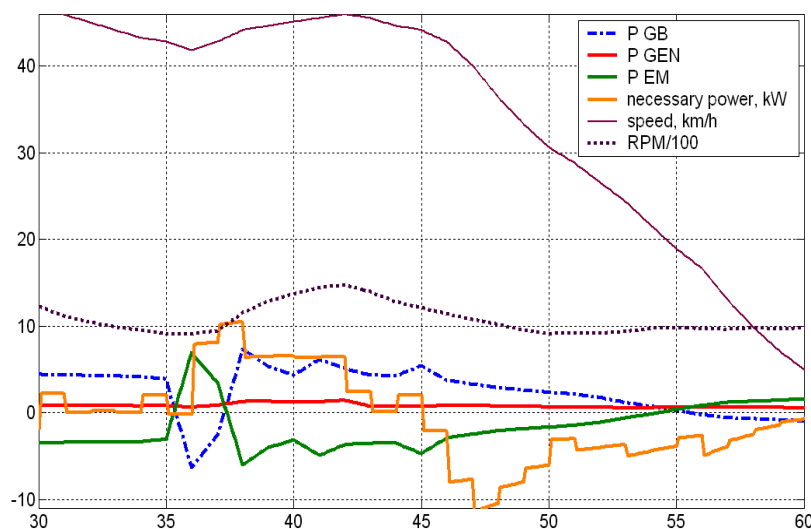
- Визначається яка величина потужності йде на заряд ТАБ, впливає на питому витрату палива.

- Спільна робота електродвигуна і ДВЗ при прискоренні відповідному європейському міському циклу (до 1 м/с^2). Визначення процентного впливу ДВЗ і електродвигуна на потужнісні показники силової установки.

- Спільна робота електродвигуна і ДВЗ при максимальному прискоренні.

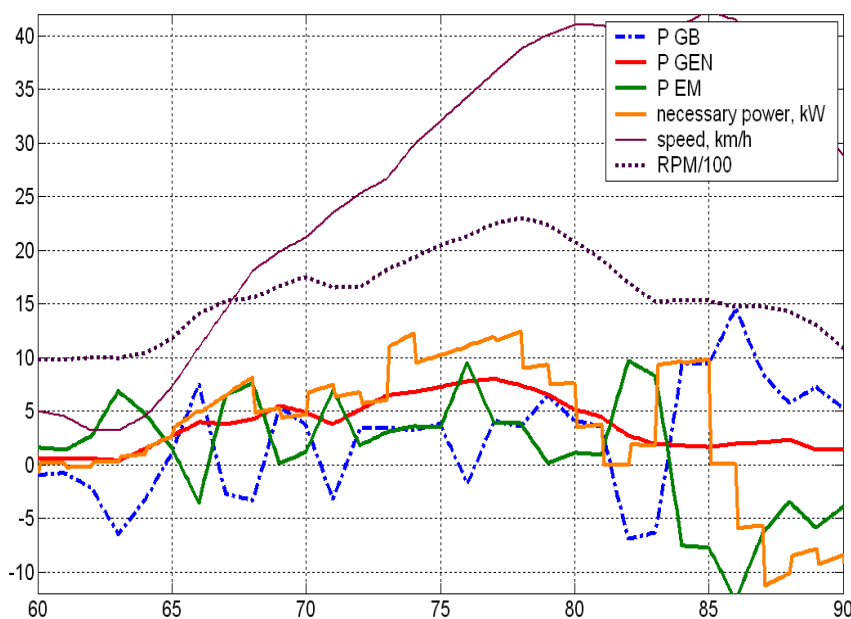
Вимірюються потужності електромашин, обороти ДВЗ і прискорення автомобіля.

Типові приклади оброблених вимірювань розподілів потоків енергії при різних режимах руху (рис. 4.14 – 4.17).



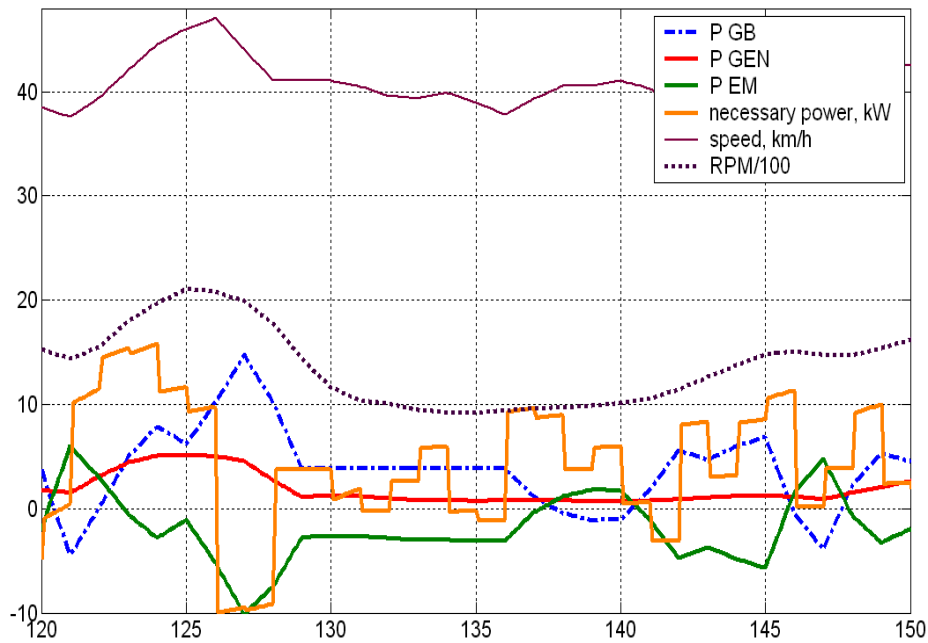
P GB – потужність ТАБ, кВт; P GEN – потужність генератора, кВт; P EM – потужність електродвигуна, кВт; necessary power -потужність, необхідна для руху або яка повертається при рекуперації, кВт; speed - швидкість, км/год.; RPM/100 – обороти ДВЗ/100

Рисунок 4.14 – Розподіл потоків енергії з 30 до 60 секунди руху



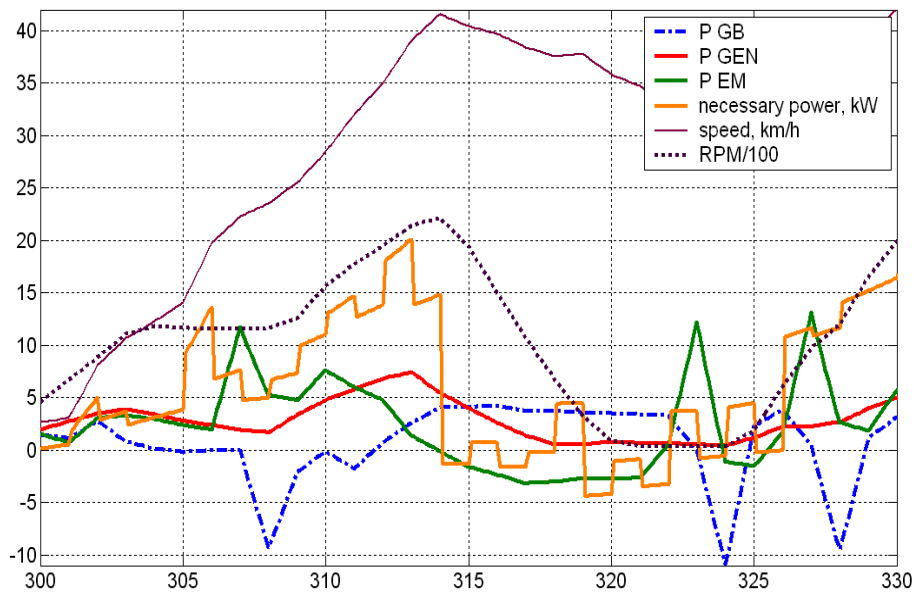
P GB – потужність ТАБ, кВт; P GEN – потужність генератора, кВт; P EM – потужність електродвигуна, кВт; necessary power -потужність, необхідна для руху або яка повертається при рекуперації, кВт; speed - швидкість, км/год.; RPM/100 – обороти ДВЗ/100

Рисунок 4.15 – Розподіл потоків енергії з 60 до 90 секунди руху



P GB – потужність ТАБ, 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/год; RPM/100 – обороти ДВЗ/100

Рисунок 4.16 – Розподіл потоків енергії зі 120 до 150 секунди руху



P GB – потужність ТАБ, 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/год; RPM/100 – обороти ДВЗ/100

Рисунок 4.17 – Розподіл потоків енергії з 300 до 330 секунди руху.

Дослідження, що 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/с^2 . Ці дані співпадають з нашими розрахунками [101].

Електричний двигун обираємо виходячи з умови забезпечення достатньої потужності для руху в режимі європейського міського циклу автомобіля масою 1100 кг (рис.4.18).

Для знаходження необхідної потужності електричного двигуна зберемо підсистему “necessary power” у пакеті Math Lab – Simulink. (рис. 4.19), в якій і визначимо необхідну потужність тягового електричного двигуна для нашого автомобіля.

Проведемо формулювання алгоритму роботи гібридної силової установки автомобіля. В кінцевій формі алгоритм представлений в якості переліку правил роботи агрегатів гібридної силової установки та переліку обмежень, які обумовлені умовами експлуатації.

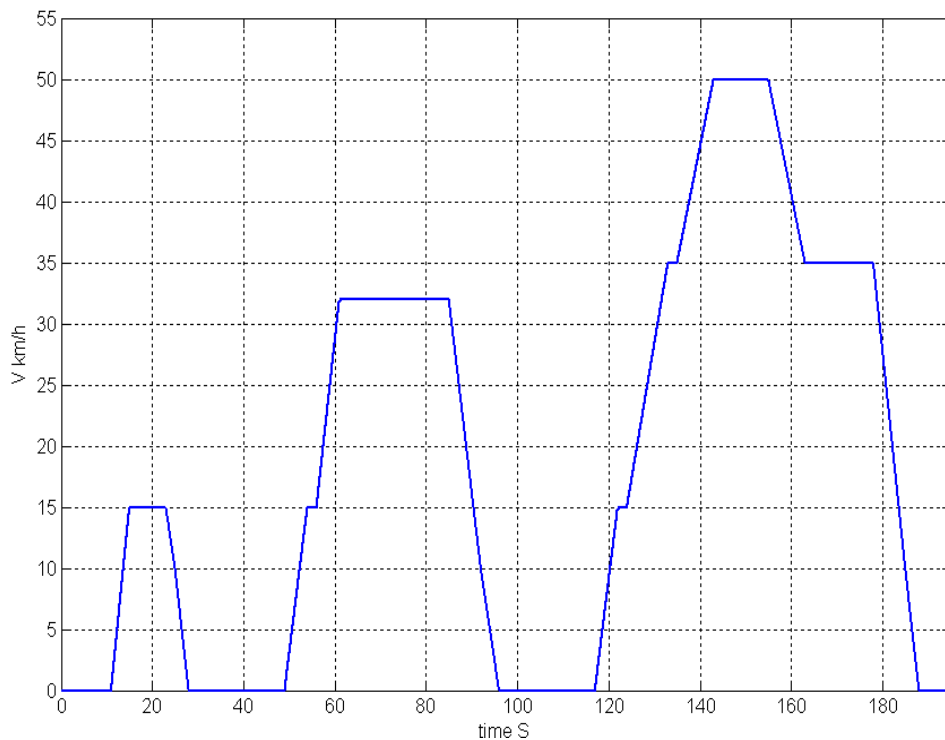


Рисунок 4.18 – Швидкість в міському циклі

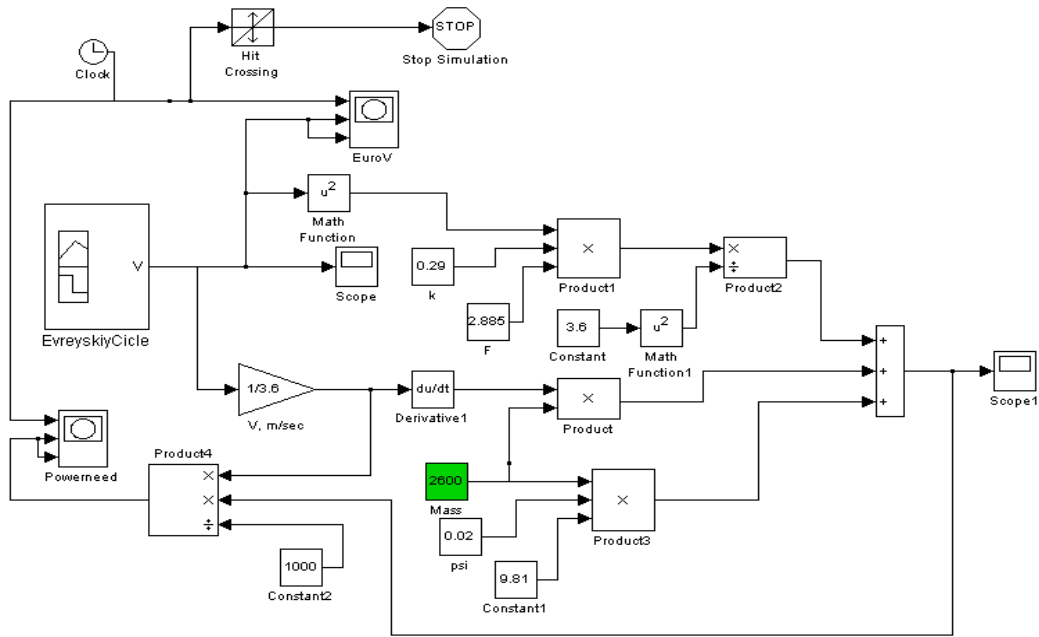


Рисунок 4.19 – Схема структурна моделі для визначення потужності електричного двигуна (підсистема “necessary power”)

Промодельовуємо та отримуємо графік мінімально необхідної потужності тягового електричного двигуна для руху автомобіля по горизонтальній поверхні з заданим прискоренням, який показаний на рис. 4.20.

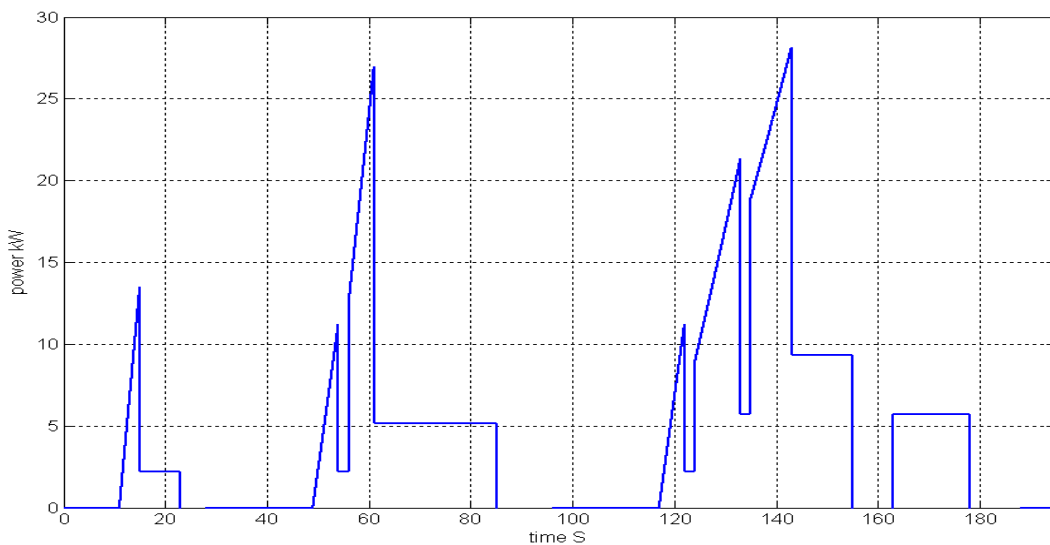


Рисунок 4.20 – Мінімум необхідна потужність для руху згідно з європейським міським циклом

В результаті розробки алгоритму роботи силової установки електромобіля з бортовою зарядною станцією проведемо формулювання правил та обмежень її роботи:

- двигун – тип-синхронний, потужність до 15 кВт, напруга живлення до 100 В. При таких характеристиках підходять синхронні генератори 28В*140А для вантажних автомобілів Белаз, Мерседес, автобусів Неоплан. Потужність цих електричних машин в якості двигунів забезпечується підвищенням обертів;

- трансмісія – одноступенева, цепна або зубчатим ременем з вала електродвигуна на подовжувач вторинного вала коробки передач. Передаточне число залежить від моменту на валу двигуна-генератора та передаточного числа головної передач;

- накопичувач енергії – літій-іонна батарея напругою до 100 В. Економічно вигідно мати батарею 48В 90А*годину, оскільки кожен елемент батареї повинен бути оснащений захисним пристроєм, то в батареї на 100 В їх буде десь 32, а в 48 В батареї тільки 16. Тому доцільно ставити низьковольтну батарею великої ємності та відповідний перетворювач напруги.

Тягова акумуляторна батарея заряджається наступними способами:

- на стоянці від стаціонарної зарядної станції мережі 220 В і струмом 16 А;

- під час рекуперативного гальмування від двигуна-генератора;

- від генератора бортової мережі автомобіля через підвищуючий трансформатор та стабілізатор напруги.

Порядок роботи силових агрегатів автомобіля:

- перед початком руху водій повинен проконтролювати по приладам заряд акумуляторної батареї, це здійснюється підключенням навантажувального резистора та вольтметра;

- якщо заряд недостатній, то треба підзарядити батарею від електромережі або почати рух з використанням ДВЗ;

- початок руху здійснюється на електротязі, потім на швидкості 30...40 км/год для подальшого розгону автомобіля водій вимикає зчеплення і вмикає другу або третю передачу в залежності від дорожнього доквілля. Далі водій вмикає зчеплення і електродвигун запускає ДВЗ, при чому педаль акселератора знаходиться в мінімальному положенні. Як тільки ДВЗ завівся, електродвигун автоматично вимикається. Інакше сумісна робота електродвигуна та ДВЗ обумовить значне прискорення автомобіля небезпечно для оточуючих. Запуск ДВЗ на першій передачі заборонений, оскільки це приведе до значного перенавантаження трансмісії та системи живлення електродвигуна;

- під час руху водій повинен частіше використовувати рекуперативне гальмування, що вмикається легким натиском на педаль гальма в області вільного ходу педалі;

- підзарядка акумулятора також здійснюється на холостих обертах ДВЗ (до 1000 об./хв). При підвищенні обертів ДВЗ вважається, що ДВЗ використовує свою енергію на рух і підзарядка припиняється.

Такий підхід діаметрально протилежний тому, що використовують в «Toyota Prius», а саме в нашій розробці ДВЗ використовують для зарядки акумулятора цілеспрямовано. Безумовно в кінці поїздки акумулятор може потребувати підзарядки, але як показали наші розрахунки та експерименти акумулятор 48В*90А*год (4,3 кДж) може забезпечити старт із 100 перехресть у міському циклі, що визнається нами достатнім. Якщо автомобіль експлуатувати у змішаному циклі, то стаціонарної підзарядки може не потребувати. Зазначений вище конструктивний підхід по нашим підрахункам, дозволяє економити до 30% бензину для ДВЗ і від 1.5 л і більше при руху в міському циклі.

На даний час для пробігу 60...70 км на електротязі електромобілю масою до 1100 кг потрібен літій-іонний акумулятор вартістю 5000\$. А в нашому випадку потрібно вдвічі меншу батарею з урахуванням витрат на перетворювач напруги. Це дозволить виготовляти електромобілі для суто міського пересування вартістю менше 200000 гривень і менш залежними від інфраструктури обслуговування стаціонарними зарядними станціями. Автомобіль буде витрачати не більше 4 л пального на 100 км.

Схема силової установки електромобіля з бортовою електростанцією, що розробляється, відповідає світовому рівню, оскільки, збільшуючи ККД енергоустановки, ми зменшуємо витрати палива і викидів в атмосферу.

4.2 Ефективність роботи бортової системи електропостачання

Вирішення питання підвищення ефективності експлуатації будь-якого транспортного засобу, в тому числі і транспортного засобу з бортовою електростанцією, багато в чому залежить від рівня технічного стану окремих вузлів і агрегатів цього засобу, який має місце в поточний момент часу. Одним з таких вузлів є ТАБ, що входить до складу бортової системи електропостачання транспортного засобу.

Добре відомо [99], що заряд автомобільної акумуляторної батареї підвищеним струмом згубно позначається на її технічному стані і, як наслідок, призводить до істотного скорочення терміну її експлуатації.

Питання обмеження величини зарядного струму ТАБ на максимальному допустимому рівні, величина якого в А, як правило, становить 10 % від ємності батареї в А*год. [99], при стаціонарних умовах зарядки вирішується досить просто за допомогою існуючих технічних засобів. При здійсненні ж зарядки (заряджання) батареї на борту автомобіля з працюючим двигуном для обмеження величини зарядного струму необхідна наявність спеціальних технічних засобів, якими повинна бути укомплектована штатна бортова система електропостачання автомобіля і яких в даний час не існує.

Величина зарядного струму акумуляторної батареї, встановленої на борту автомобіля, залежить від наступних факторів [100]:

- швидкості обертання ротора генератора;
- ефективності роботи системи стабілізації напруги в бортовій мережі автомобіля;
- сумарної споживаної потужності всіх включених бортових споживачів енергії;
- ступеня заряду ТАБ.

Враховуючи той факт, що всі перераховані вище чинники в процесі експлуатації автомобіля міняються в широких межах (за винятком, мабуть, діапазону зміни напруги в бортовій мережі, і то лише у випадку, якщо не перевищений максимум споживаної потужності від генератора), то стає зрозумілим, чому зарядний струм ТАБ, встановленої на борту автомобіля, "гуляє" в широких межах і може часом досягати значень в кілька десятків

ампер. Причому, навіть жорсткі вимоги до системи стабілізації бортової напруги практично не впливають на діапазон цього "гуляння" величини зарядного струму ТАБ.

Все сказане вище робить вельми актуальною розробку спеціальних технічних засобів обмеження зарядного струму ТАБ, включення яких до складу штатної системи електропостачання автомобіля, дозволило б істотно продовжити роботу ТАБ, що, в свою чергу, дозволило б підвищити ефективність експлуатації електромобіля.

На рис. 4.21 представлений можливий варіант структури бортового обмежувача зарядного струму ТАБ (надалі - обмежувача),

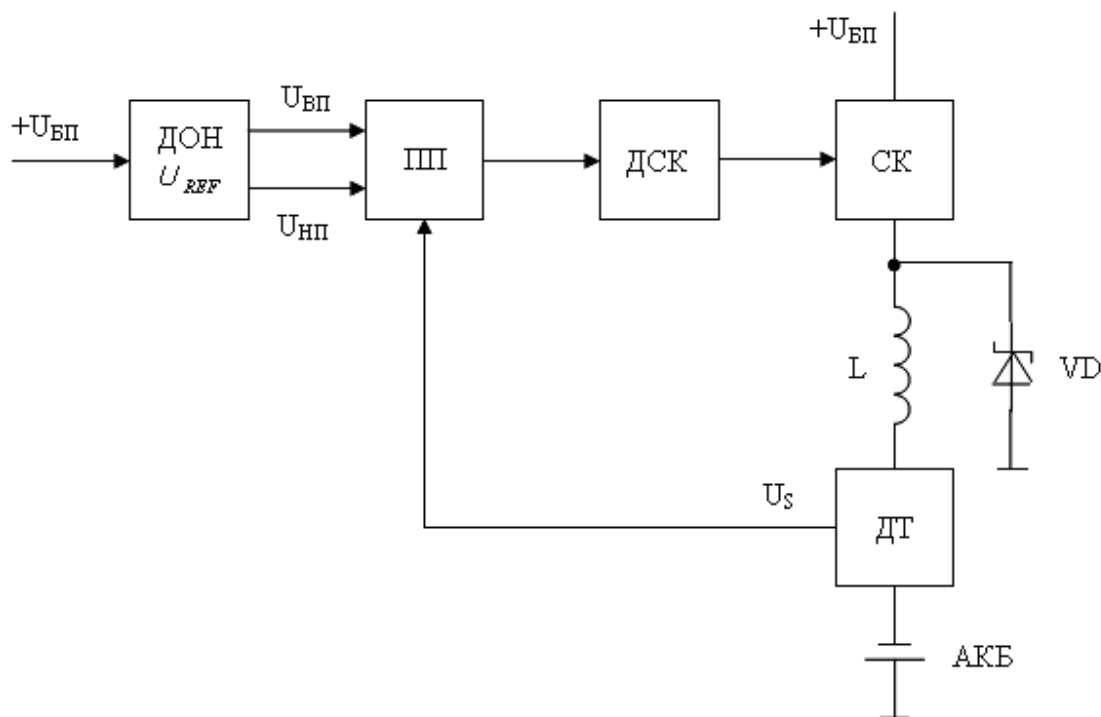


Рисунок 4.21 – Структура обмежувача зарядного струму ТАБ бортової електростанції

Цей варіант структури бортового обмежувача, розроблений на основі "buck" - перетворювача [101], до складу якої входять:

- джерело опорної напруги (ДОН);
- пристрій порівняння (ПП);
- драйвер силового ключа (ДСК);
- силовий ключ (СК);
- датчик струму (ДТ);
- індуктивний накопичувач енергії (L);
- зворотний діод (VD).

Принцип дії обмежувача базується на використанні ШІМ-модуляції величини струму $I_{зар}$, що протікає в зарядному ланцюзі пристрою. При цьому середня величина цього струму $I_{ср}$ визначається як середнє арифметичне суми верхнього $I_{ВП}$ і нижнього $I_{НП}$ порогових значень струму, а величина його

пульсацій – шириною діапазону зміни струму, величина якого визначається абсолютним значенням різниці зазначених порогових значень. Для забезпечення працездатності обмежувача, на базі вказаного принципу дії, у пристрої порівняння ПП останнього проводиться порівняння напруги U_s , яка формується на виході датчика струму ДТ і величина якого пропорційна величині протікання зарядного струму $I_{\text{ЗАР}}$ ТАБ, з величинами порогової напруги верхнього $U_{\text{ВП}}$ і нижнього $U_{\text{НП}}$ рівнів. У свою чергу, значення цієї напруги, що встановлюються на етапі регулювання, пропорційна заданим пороговим значенням зарядного струму $I_{\text{ЗАР}} - I_{\text{ВП}}$ і $I_{\text{НП}}$, відповідно.

Результат порівняння в пристрої порівняння ПП величин напруги U_s , $U_{\text{ВП}}$ і $U_{\text{НП}}$ визначає режим роботи транзистора силового ключа СК, який може знаходитися в одному з двох режимів: у режимі насичення або в режимі відсічки.

При знаходженні транзистора СК в режимі насичення (режимі максимальної провідності або режимі мінімального опору) відбувається заряд ТАБ зростаючим струмом $I_{\text{ЗАР}}$ (з обмеженням величини струму на рівні $I_{\text{ВП}}$) при одночасному накопиченні енергії в індуктивному накопичувачі L .

При знаходженні транзистора СК в режимі відсічки (режимі відсутності провідності або режимі максимального опору) відбувається витрачання накопиченої раніше енергії в індуктивному накопичувачі на заряд ТАБ у вигляді спадаючого зарядного струму $I_{\text{ЗАР}}$ (з обмеженням величини зарядного струму на рівні $I_{\text{НП}}$).

На рис. 4.22 представлена тимчасова діаграма зміни зарядного струму ТАБ при роботі обмежувача, яка складається з циклів накопичення і витрачання електричної енергії з тривалістю $\tau_{\text{нак}}$ і $\tau_{\text{рас}}$, відповідно, які чергуються у часі.

Розглянемо призначення та особливості технічної реалізації окремих вузлів пристрою.

Джерело опорної напруги (ДОН). Від характеристик цього блоку, що входить до складу структури обмежувача, залежать основні метрологічні характеристики останнього. Зокрема, від температурної стабільності формування опорної напруги U_{REF} , залежить температурна стабільність підтримки встановлених рівнів порогової напруги $U_{\text{ВП}}$ і $U_{\text{НП}}$, що подаються на входи відповідних аналогових компараторів пристрою порівняння, а значить, і стабільність відповідних порогових значень зарядного струму $I_{\text{ВП}}$ і $I_{\text{НП}}$.

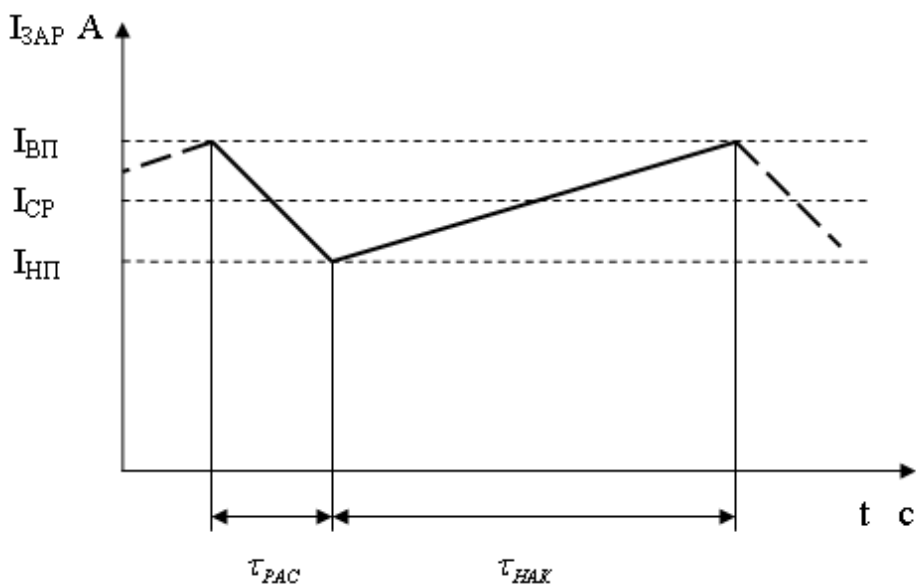


Рисунок 4.22 – Часова діаграма роботи обмежувача

З огляду на те, що діапазон робочих температур обмежувача відповідає діапазону зміни температури в моторному відсіку автомобіля, то вимоги до температурної стабільності роботи ДОН вельми жорсткі.

Крім того, на стабільність формування опорної напруги U_{REF} за допомогою ДОН істотно впливає нестабільність напруги $U_{ВП}$ бортової системи живлення автомобіля, внаслідок чого при технічній реалізації даного блоку необхідно звернути увагу на мінімізацію і цієї складової похибки формування U_{REF} .

Пристрій порівняння складається з двох аналогових компараторів, кожен з яких здійснює порівняння вихідної напруги U_s датчика струму з відповідними значеннями порогових напруги верхнього $U_{ВП}$ і нижнього $U_{НП}$ рівнів. Результат цього порівняння управляє процесом установки на виході ПП напруги, що відповідає рівню логічної "1" або логічного "0", згідно з наступним алгоритмом:

1. Якщо поточний стан виходу ПП - "одиничний", то це свідчить про те, що в даний момент часу в обмежувачі реалізується цикл накопичення енергії за рахунок зростання зарядного струму, який буде тривати до тих пір, поки не спрацює компаратор верхнього рівня. Відповідна реакція апаратних засобів обмежувача на цю подію буде складатися у наступному: стан виходу ПП зміниться на протилежний, тобто стане "нульовим", відбудеться закриття транзистора силового ключа обмежувача, що свідчить про закінчення циклу накопичення енергії та початку циклу витрачання енергії в обмежувачі.

2. Якщо поточний стан виходу СК - "нульовий", то це свідчить про те, що в даний момент часу в обмежувачі реалізується цикл витрачання раніше накопиченої енергії, що супроводжується спадом зарядного струму, який буде тривати до тих пір, поки не спрацює компаратор нижнього рівня. Відповідна реакція апаратних засобів обмежувача на цю подію буде складатися у наступному: стан виходу ПП зміниться на протилежний, тобто знову стане "одиничним", знову відбудеться відкриття транзистора силового ключа

обмежувача, що свідчить про закінчення циклу витрачання енергії і початку циклу накопичення енергії в обмежувачі.

Драйвер силового ключа (ДСК). Даний блок обмежувача призначений для здійснення інтерфейсних функцій між вихідним сигналом пристрою порівняння ПП, з одного боку, і входом управління транзистором силового ключа СК, з іншого. Схемна особливість даного драйвера полягає в тому, що його вхідна керуюча напруга формується на виході пристрою порівняння відносно мінусовій шини ("земляного" проводу) бортової мережі автомобіля, а вихідна керуюча напруга – відносно плюсової шини бортової мережі автомобіля.

Зазначена особливість формування вихідної напруги при функціонуванні ДСК обумовлена необхідністю управління ключовим транзистором, який, у свою чергу, управляє струмом заземленого навантаження, яким в цьому випадку є ТАБ.

Силовий ключ (СК). Силовий ключ може бути реалізований на базі р-канального польового транзистора або біполярного транзистора з провідністю типу р-п-р і призначений для управління процесом формування зарядного струму $I_{\text{зар}}$ акумуляторної батареї, мінусова клемма якої заземлена. При цьому параметри цього транзистора повинні відповідати таким основним вимогам:

- транзистор силового ключа повинен мати здатність пропускання максимального зарядного струму ТАБ;
- опір ключа у відкритому стані повинен бути мінімальним;
- потужність, споживана ланцюгом управління транзистора СК повинна бути мінімальна.

Наведеним вище вимогам у максимальному ступені відповідають MOSFET- або IGBT-транзистори.

Датчик струму (ДТ). Датчик струму призначений для формування напруги U_s , величина якої пропорційна струму, який протікає через нього, тобто пропорційна зарядному струму $I_{\text{зар}}$ ТАБ. Дана напруга використовується в якості сигналу зворотного зв'язку в контурі автоматичного обмеження величини зарядного струму ТАБ.

Основні вимоги до будь-якого токового датчика – мінімальне значення вхідного опору і лінійність вихідної напруги в залежності від протікання через нього струму. Цим вимогам найбільшою мірою відповідають сучасні датчики, що базуються на використанні ефекту Холла.

Призначення індуктивного накопичувача електричної енергії L не вимагає додаткових пояснень. Що ж до зворотнього діода VD, то для максимізації значення ККД обмежувача необхідно використовувати, в якості останнього, діода Шотки, для якого характерні малі динамічні втрати при роботі на високій частоті, а також істотно менше, в порівнянні з кремнієвим діодом, значення падіння напруги при знаходженні діода в провідному стані.

Розробимо методику інженерного розрахунку параметрів обмежувача. Вихідними даними для розрахунку є:

- верхнє порогове (максимальне) значення зарядного струму $I_{\text{вп}}$ ТАБ, А;
- нижнє порогове (мінімальне) значення зарядного струму $I_{\text{нп}}$ ТАБ, А;

- середнє значення зарядного струму I_{CP} ТАБ, А;
- тривалість циклу витрачання енергії τ_{PAC} , с.

Мета розрахунку – визначення величини індуктивності L накопичувача енергії та значення тривалості циклу накопичення енергії τ_{HAK} .

Для циклу витрачання енергії, при якому відбувається заряд ТАБ за рахунок енергії, накопиченої в індуктивному накопичувачі L під час циклу накопичення, характерно наступне співвідношення

$$W_{PAC} = \frac{L(I_{ВП} - I_{НП})^2}{2} = (U_{АКБ} + U_{VD}) \cdot I_{CP} \cdot \tau_{PAC}, \quad (4.1)$$

де L – індуктивність накопичувача енергії, Гн;

$I_{ВП}$ – верхня межа (поріг) значення зарядного струму ТАБ, А;

$I_{НП}$ – нижня межа (поріг) значення зарядного струму ТАБ, А;

$U_{АКБ}$ – напруга на клеммах ТАБ, В;

U_{VD} – падіння напруги на діоді VD в провідному стані, В;

I_{CP} – середнє значення зарядного струму ТАБ, яке може бути обчислено на підставі співвідношення $I_{CP} = (I_{ВП} + I_{НП})/2$, А;

τ_{PAC} – тривалість циклу витрачання енергії, с.

Після перетворення співвідношення (4.1) до виду

$$L = 2 \frac{(U_{АКБ} + U_{VD}) \cdot I_{CP} \cdot \tau_{PAC}}{(I_{ВП} - I_{НП})^2} = 2 \frac{(U_{АКБ} + U_{VD}) \cdot I_{CP} \cdot \tau_{PAC}}{(I_{ВП} + I_{НП}) \cdot (I_{ВП} - I_{НП})} \quad (4.2)$$

є можливість, задаючись значенням часу циклу витрачання енергії τ_{PAC} , визначити відповідну величину індуктивності накопичувача L .

Протягом часу циклу накопичення енергії τ_{HAK} відбувається заряд ТАБ з одночасним накопиченням енергії в індуктивному накопичувачі L за рахунок витрачання енергії джерела бортового живлення транспортного засобу, тобто для даного циклу характерно співвідношення

$$W_{БП} = W_{VT} + W_{HAK} + W_{PAC}, \quad (4.3)$$

звідки випливає, що

$$W_{HAK} = W_{БП} - W_{VT} - W_{PAC}, \quad (4.4)$$

де $W_{БП} = U_{БП} \cdot I_{CP} \cdot \tau_{HAK}$ – енергія, що віддається джерелом бортового живлення в циклі накопичення;

$W_{VT} = R_{VT} \cdot I_{CP}^2 \cdot \tau_{HAK}$ – енергія, що витрачається на нагрів транзистора VT силового ключа в циклі накопичення, який знаходиться при цьому в режимі

насичення;

$W_{\text{НАК}} = L(I_{\text{БП}} - I_{\text{НП}})^2 / 2$ – енергія, що накопичується в індуктивному накопичувачі L в циклі накопичення;

$W_{\text{ЗАР}} = U_{\text{АКБ}} \cdot I_{\text{СП}} \cdot \tau_{\text{НАК}}$ – енергія, яка витрачається на заряд ТАБ у циклі накопичення.

Після підстановки наведених вище співвідношень у вираз (4.3) і проведення відповідних перетворень, отримаємо:

$$W_{\text{НАК}} = (U_{\text{БП}} - R_{\text{VT}} \cdot I_{\text{СП}} - U_{\text{АКБ}}) \cdot I_{\text{СП}} \tau_{\text{НАК}}. \quad (4.5)$$

І нарешті, використовуючи співвідношення (4.1) і (4.5), а також враховуючи той факт, що величина енергії $W_{\text{НАК}}$, яка запасена на індуктивному накопичувачі L протягом циклу накопичення $\tau_{\text{НАК}}$, дорівнює величині енергії $W_{\text{РАС}}$, яка використовується на заряд АКБ протягом часу циклу витрачання $\tau_{\text{РАС}}$, можна записати:

$$(U_{\text{АКБ}} + U_{\text{VD}}) \cdot I_{\text{СП}} \cdot \tau_{\text{РАС}} = (U_{\text{БП}} - R_{\text{VT}} \cdot I_{\text{СП}} - U_{\text{АКБ}}) \cdot I_{\text{СП}} \cdot \tau_{\text{НАК}}. \quad (4.6)$$

Після проведення перетворень у співвідношенні (4.5) відносно параметра $\tau_{\text{НАК}}$, отримаємо:

$$\tau_{\text{НАК}} = \frac{(U_{\text{АКБ}} + U_{\text{VD}}) \cdot \tau_{\text{РАС}}}{U_{\text{БП}} - R_{\text{VT}} \cdot I_{\text{СП}} - U_{\text{АКБ}}}. \quad (4.7)$$

Вираз (4.7) дозволяє обчислити значення тривалості циклу накопичення $\tau_{\text{НАК}}$ при заданому значенні індуктивності накопичувача L .

4.3 Методологія практичного використання результатів дослідження

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 різноманітних технічних засобів підтримки інформаційних технологій і т.ін. 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 об'єктів, явищ, процесів – 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 досліджуваних об'єктів.

Під інформаційно керуючою системою будемо розуміти певну сукупність програмно-апаратного комплексу засобів, методів, алгоритмів автоматизації інформаційних процесів моніторингу та реалізації керуючих впливів різними об'єктами.

Виділимо наступні основні компоненти інформаційно-керуючої системи: – людський фактор (аналітики, розробники, програмісти, користувачі, консультанти, інженери, лаборанти, техніки); – інструментальні засоби розробки програмного забезпечення; – системне і прикладне програмне забезпечення; – математичне і методологічне забезпечення; – апаратне забезпечення; – інформаційні технології. Основним етапом розробки ІКС є створення програмного забезпечення.

Як правило, пред'являють жорсткі вимоги до розробки систем управління, які включають здатність забезпечити підтримку розподілених інформаційних ресурсів і функціонування в реальному масштабі часу в розподіленому мережевому середовищі, а також можливість забезпечення багатозадачних і часто використовуваних режимів, при невеликій вартості. При проектуванні ІКС останнім часом істотно зростають темпи робіт, уніфікація технічних і програмних засобів збільшується, зростає кількість SCADA-пакетів, підвищується роль стандартизації проектування, відбувається постійна зміна поколінь програмнотехнічних комплексів, зростає число впроваджуваних систем управління в автомобілях. Зауважимо, що система управління процесами в енергоємних галузях має низку характерних особливостей, що вимагають організації і проведення досліджень з метою забезпечення можливості застосування готових програмних продуктів SCADA-систем і CALS технологій.

Відомі SCADA-системи здатні вирішувати питання автоматизації процесу створення програмного забезпечення для розроблюваних систем управління. Однак, в технічній документації до цих систем немає відомостей про методи та алгоритми, що дозволяють в реальному масштабі часу синтезувати енерго- і ресурсозберігаючі управління.

Створювані інформаційні системи управління синергетичним автомобілем якраз повинні мати здатність до управління за різними критеріями, що забезпечує енерго- і ресурсозбереження, а також високу продуктивність транспортних машин без зниження їх якості. 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 ІКС енергоємними об'єктами по комплексним критеріям є своєчасною і актуальною задачею.

Автомобілі можуть споживати різні види енергії. Від режиму роботи автомобіля, від виду енергоносія залежить вид мінімізуемого функціоналу. Якщо використовується електроенергія, то в якості функціоналу розглядається мінімум витрат енергії

$$J_3 = \int_{t_0}^{t_k} u^2(t) dt \quad (4.8)$$

Якщо в якості теплоагенту використовується водяна пара, спирт, бензин, дизельне паливо і т.д., то в якості функціоналу береться «витрата палива»

$$J_T = \int_{t_0}^{t_k} |u(t)| dt \quad (4.9)$$

де $u(t)$ – керуючий вплив;

t_0, t_k – початкове і кінцеве значення тимчасового інтервалу.

При моделюванні процесів, коли точний аналітичний розв'язок диференціального рівняння в приватних похідних неможливо, або, принаймні, важко, використовують так звані евристичні методи – різні методи побудови штучних нейронних мереж. Гідність моделей, побудованих на нейронних мережах, полягає в можливості отримання прийнятної точності опису досліджуваного процесу і застосування у вирішенні завдань управління.

В 1974 р. Мамдані показав можливість застосування ідей нечіткої логіки для побудови системи управління об'єктом. Нечітке управління використовується при недостатньому знанні об'єкта управління, але при наявності досвіду управління ним, а також в нелінійних системах, ідентифікація яких занадто трудомістка і в випадках, коли за умовами задачі необхідно використовувати знання експерта.

При управлінні складними об'єктами зазвичай доводиться оперувати неповними знаннями про їх істинності. У зв'язку з цим застосовують поняття лінгвістичної змінної, яка задається набором словесних (вербальних) характеристик, які є значеннями цієї змінної.

Для створення динамічних моделей енергоємних об'єктів часто припускають нормальне функціонування системи при вирішенні задач ідентифікації. В даний час широко застосовуються в задачах аналізу і синтезу багатовимірних динамічних об'єктів математичні моделі, що описуються з урахуванням множини станів функціонування. Ці моделі дають можливість врахувати як різні режими роботи об'єкта управління, так і впливу зовнішнього середовища, а також інших діючих на об'єкт факторів різної природи. У зв'язку з цим пропонується описувати процеси, що відбуваються в синергетичному автомобілі, моделями з урахуванням безлічі станів функціонування.

Модель M на МСФ будується як розширення моделі M динамічної системи, яка визначається п'ятіркою (Z, Y, ζ) , де Z означає множину значень вектору фазових координат, під цим розуміється множина значень вектора виходу; множина траєкторій $X(\cdot) = (X(t), t \in [t_0, t_k])$, вектор входу x при зміні на часовому інтервалі $[t_0, t_k]$; оператори ψ, ζ – перехідна функція і вихідна відображення, тобто $\psi: T \times T \times Z \times X(\cdot) \rightarrow Z, \zeta: T \times Z \rightarrow Y; T$ – множина моментів часу t . Модель M не враховує зміни операторів ψ, ζ в процесі функціонування системи.

В транспортному засобі виділяють два роди процесів. Процеси першого роду, пов'язані з потоками енергії, продукції, інформації; стан системи щодо цих процесів визначається вектором z .

Процеси другого роду відображають зміни станів працездатності (відмови, ремонти), навмисних і ненавмисних дій, що впливають на структуру об'єкта і оператори ψ, ζ . Стан системи щодо процесів другого роду визначається значенням змінної h . При зміні h в загальному випадку можуть змінюватися розмірності векторів x, y, z і клас системи; наприклад, в одних станах h - система лінійна детермінована, в інших - нелінійна стохастична.

В моделі M додатково використовується змінна h стану функціонування та оператори T, γ . Значення h змінюється, наприклад, при порушеннях працездатності складових частин системи, що викликають зміну її структури, а отже, і операторів ψ, ζ . Множина H можливих значень змінної $h \in \text{МСФ}$. Зміна h відбувається в випадкові моменти часу і задається оператором $\gamma: T \times H \rightarrow H$. Кожному значенню $h \in H$ відображенням η ставиться у відповідність пара операторів $(\psi_h; \zeta_h)$ $\psi_h \in \Phi; \zeta_h \in v$, тобто $\eta: T \times H \rightarrow (\Phi, v)$. Таким чином, модель на МСФ визначається $(Z, X(\cdot), Y, H, \gamma, \eta, \Phi, v)$. Залежно від можливості зміни і ідентифікації змінної h на даному часовому інтервалі управління $[t_0, t_k]=T$; виділяють чотири основні класи систем і їх моделей на МСФ. Якщо для кожного інтервалу часу T значення змінної h стану функціонування відомо і незмінно, то об'єкт належить до першого класу. На інтервалі T об'єкт першого класу задається упорядкованим парою операторів $(\psi_h; \zeta_h)$. Для всіх інтервалів часу модель автомобіля першого класу задається множиною впорядкованих пар $\{(\psi_h; \zeta_h), h \in H\}$. Отже, $M_{h \in \zeta_1}$ при

$$h(t) = \dot{h} = \text{const}, \quad (4.10)$$

Більшість простих систем, вузли, що складають силову установку, яка експлуатується в різних умовах роботи відносяться до першого класу. Зміни h в цих вузлах відбуваються поза тимчасового інтервалу управління $[t_0; t_k]$. Для об'єктів другого класу ζ_2 , як і для першого, значення змінної h стану функціонування на інтервалі T також незмінно, але при цьому воно невідомо, а відомі лише ймовірності $P(h/T)$, $h \in H$. Модель другого класу позначимо M_H . Вектор $z(t)$, $[t_0; t_k]$ в моделі M_H має своїми значеннями випадкові величини з розподілом

$$P(H/T) = \{p(h/T), h \in H\}. \quad (4.11)$$

Прикладом моделей $M_H \in$ стохастичні системи, моделі M_H схожі з диференціальними включеннями.

В системах третього класу змінна h стану функціонування змінюється на часовому інтервалі $t \in [t_0; t_k]$, причому її значення в кожен момент $t \in T$ відомо (ідентифікується). Модель об'єкту третього класу $M_{h(t)}$ описується кусково-постійною траєкторією зміни значень впорядкованої пари операторів (ψ_h, ζ_h) ; при чому перемикання відбуваються у випадкові моменти $t_i \in T, i=1, l$, число яких дорівнює l ; ці моменти відповідають змінам значень змінної h . Таким чином,

$$M_{h(\cdot)} \in \zeta_h : \forall T \in T \times T \quad (4.12)$$

$$\forall \epsilon [t_0, t_k]$$

$$h(s) = \hat{h}(s)$$

Прикладами моделей $M_{h(\cdot)}$ є моделі, що описуються рівняннями Каратеодорі, диференціальним рівнянням з розривною правою частиною, зокрема, з прогамованими моментами перемикання $t_i \in T$, $i=1, l$. До об'єктів третього класу відносяться багато об'єктів, до яких завдання управління вирішуються при великих різницях між кінцевими і початковими значеннями вектору фазових координат або при тривалих тимчасових інтервалах $[t_0; t_k]$.

$$\Delta z_i = z_i(t_k) - z_i(t_0), \quad (4.13)$$

$$i = \overline{1, n}$$

Для об'єктів четвертого класу значення змінної $h(t)$, задає стан функціонування для всіх $t \in T$ невідомі. На інтервалі T при моделюванні об'єктів четвертого класу слід розглядати безліч траєкторій $h(\cdot)$ з початком в точці $h(t_0) = h_0$, відповідних оператору ψ . Значення оператора γ можуть бути представлені графом G змін станів функціонування. Будемо позначати модель об'єкта четвертого класу через M_G . Використовуючи модель M_G , отримують воронку всіх траєкторій $z(\cdot) = (z(t); t \in T)$. В цьому випадку значення фазового вектору $z(t)$, $t > t_0$, як і в моделі другого класу, є випадковими величинами. Відповідно до класифікації систем МСФ силового агрегату електромобіля в залежності від розв'язуваної задачі управління найчастіше ставляться до третього або четвертого класу. Першим етапом інформаційно-керуючої системи силової установки електромобіля є аналіз предметної області, на якому:

- досліджується склад силової установки, що входить в електромобіль;
- визначаються режими роботи силової установки та описуються в моделі управління силовою установкою на багатьох станів функціонування.
- На підставі отриманої інформації визначаються функціональні особливості, структура та тип інформаційної керуючої системи і формується мета її функціонування. Формалізуються завдання, що визначають функціональні можливості і особливості інформаційної системи електромобіля з бортовою зарядною станцією, і при наявності погано формалізованих задач приймаються рішення про застосування та вибору методів штучного інтелекту.

4.4 Висновки за четвертим розділом

1. Розроблений електромобіль з бортовою зарядною станцією має високу ефективність в міському режимі руху при великій щільності транспортного потоку та руху в заторах. Паливна економічність та екологічна безпека електромобіля з бортовою зарядною станцією приблизно в три рази перевищує аналогічні характеристики базового автомобіля.

2. Інформаційно-вимірювальний комплекс досліджень робочих процесів силової установки електромобіля розроблено для вивчення особливостей функціонування зарядної станції на базі експериментального гібридного автомобіля та її системи управління. Даний комплекс забезпечує реєстрацію, первинну обробку та збереження в пам'яті комп'ютера діагностичних параметрів, які розраховуються з САУ силової установки.

3. Для дослідження параметрів силової установки електромобіля з бортовою зарядною станцією та її системи управління, які важко піддаються прямому або опосередкованому вимірюванню, можливо використання моделювання руху на базі гібридного автомобіля з використанням математичного забезпечення. Точність моделювання значного ступеня визначається якістю параметричної ідентифікації математичних моделей автомобіля та агрегатів СУЕ, а також точністю представлення закону управління.

4. Одним із підходів підвищення ефективності функціонування електромобіля є розробка і впровадження в рамках модернізації силової установки інтелектуальної інформаційно-керуючої системи інваріантної різним автомобілям, що дозволяє оперативно виробляти керуючий вплив, який мінімізує енерго- або ресурсоспоживання в динамічних режимах і мінімізує втрати якості і продуктивності в заданих умовах експлуатації.

ВИСНОВКИ

В монографії розглянуті методи підвищення ефективності пробігу електромобіля з бортовою зарядною станцією, що дозволяє збільшити запас ходу і зменшити витрати енергії. Приведені в монографії дослідження дозволили зробити наступні висновки:

1. Вирішена задача підвищення економічності та екологічної безпеки транспортних засобів на підставі нової концепції моделювання і оптимізації управління силовою установкою електромобіля, забезпечуючи єдиний підхід к дослідженням поточних процесів в залежності від схеми будови і конструктивних особливостей силової установки електромобіля (СУЕ), яка використовує нейромережеву апроксимацію характеристик бортової електростанції і опис динаміки заряду-розряду ТАБ при русі електромобіля при використанні узагальнених координат та швидкостей.

2. Ефективність електромобіля значно залежить від обраної стратегії управління СУЕ – відповідно її режиму роботи та управління розподілом потоків енергії між бортовою електростанцією, акумуляторною батареєю і СУЕ на тягово-швидкісному режимі руху. метод управління СУЕ, що широко використовується в теперішній час на підставі логічних правил не дозволяє в повній мірі реалізовувати переваги електромобілів. Це визначає необхідність розробки нових методів моделювання та оптимізації управління СУЕ на підставі сучасних досягнень інформаційних технологій.

3. Визначена формальна постановка оптимізаційної задачі управління СУЕ з векторним функціоналом якості управління, включно критерії точності управління за швидкістю, якості використання енергії ТАБ, економічності бортової електростанції та ступеня токсичності відпрацьованих газів. Надано використання принципу гарантованого результату (мінімаксу) та лінійного згортання векторного критерія в суперкритерій для визначення оптимального управління СУЕ на множині парето-оптимальних управлінь при нерівних критеріях оптимальності.

4. Розроблено теоретичні основи структурної та параметричної ідентифікації математичних моделей тягового електродвигуна та бортової електростанції. Отримано нейромережеву модель ДВЗ бортової електростанції, яка визначає залежність ефективного крутного моменту, витрати палива від швидкості обертання колінвалу та сигналу управління потужністю, динамічна та статистична моделі бортової електростанції на основі ВЕД при оптимальному управлінні струмом статора; математична модель накопичувача енергії.

5. Доказано ефективність розроблених методів математичного моделювання та оптимізації управління силовою установкою електромобіля з бортовою електростанцією, прийнятих способів ідіалізації математичних моделей шляхом проведення експериментальних досліджень. Математичне очікування похибки моделювання параметрів силової установки електромобіля з бортовою зарядною станцією складає понад 4%.

6. Експериментально підтверджено ефективність використання математичних моделей конструктивних рішень електромобілів з бортовою зарядною станцією та науково обґрунтованих базових параметрів та характеристик силової установки і бортової зарядної станції на підставі розрахункового експерименту.

7. Оптимізація стратегії управління електромобілем з бортовою зарядною станцією методом динамічного програмування не наводить на конструктивний шлях для будови САУ. Дані показники слід розглядати як теоретичний максимум ефективності електромобіля з бортовою зарядною станцією при заданих зовнішніх умовах. Отримане оптимальне управління може використовуватися при розробці логічних правил вибору стратегії управління, а також при дослідженні впливу основних параметрів електромобіля на показники витрати енергії.

8. Економічність та екологічна безпека транспортних засобів на підставі нової концепції моделювання і оптимізації управління силовою установкою електромобіля, забезпечуючи єдиний підхід к дослідженням поточних процесів в незалежності від схеми будови і конструктивних особливостей силової установки електромобіля (СУЕ), яка використовує нейромережеву апроксимацію характеристик бортової електростанції і опис динаміки заряду-розряду ТАБ при русі електромобіля при використанні узагальнених координат та швидкостей.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Бажинова Т.А., Кучерявая М.А. Выбор электрохимической системы для тягового привода электромобиля. Автомобильный транспорт. 2013. Вип. 33. С. 36–39.
2. Bazhinova T.O., Nechytailo J.A., Vesela M.A. The energy estimation of transportation vehicles. Науковий вісник «Національного гірничого університету». 2016. №6 (156). С. 84–88..
3. Бажинов А.В., Веселая М.А. Управление силовой установкой электромобиля с использованием адаптивного критика. Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті, 2016. №1 (5). С. 22-25.
4. Бажинов О.В., Весела М.А. Керування силовою установкою електромобіля. Вісник ХНАДУ. 2016. №75. С. 95-99.
5. Бажинов О.В., Весела М.А. Інтелектуальні інформаційні системи для електромобіля. Автомобіль і електроніка. Сучасні технології. 2016. №9. С. 54-57. http://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P_SIS/AE16_1/3.1.pdf.
6. Smirnov O.P., Bazhinova T.O., Veselaya M.A. Substantiation of Rational Technical & Economic Parameters of Hybrid Car. Automation, Software Development & Engineering. Vol. 1 URL: <http://seo4u.link /10.2415/ mmse. 59. 12.214>.
7. Бажинова Т.А., Нечитайло Ю.А., Веселая М.А. К вопросу оценки технического состояния транспортных средств. Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми та перспективи розвитку технічних засобів транспорту та систем автоматизації» 1–3 жовтня 2014 р., м. Харків. С. 13–14.
8. Бажинов О.В., Кучерява М.А. Обмежування зарядного струму акумуляторної батареї. Міжнародна науково-практична конференція «Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві – освіта, наука, практика» 2016 р., м. Херсон. С. 213-217.
9. Бажинов О.В., Весела М.А. Схемотехнічні рішення керування вентильною машиною електромобіля. II Міжнародна науково-практична конференція « Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві – освіта, наука, практика» 2015 р., м. Херсон. С.252-254.
10. Весела М.А., Капський Д.В. Проблема безопасности электромобилей. IV міжнародна науково-технічна інтернет-конференція «Автомобіль і електроніка. Сучасні технології» 2015 р., м. Харків. С.38-39.
11. Весела М.А. Математична модель тягової акумуляторної батареї електромобіля. V науково-технічна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених ДВНЗ «НГУ». Наукова весна 2016 р. (Електронний збірник URL: <http://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/Наукова%20весна%202016.pdf>).
12. Бажинов О.В., Весела М.А. Забезпечення безпеки електромобілів. III Міжнародна науково-практична конференція « Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві – освіта, наука, практика» 2016 р., м. Херсон. С.46-49.

13. Bazhynov A.V., Vesela M.A. Intellectual Drive With Electric Engines On a Stock Car. *Mechanics, Materials Science @ Engineering*, 2016 – ISSN 2412-5954, 8 pages.
14. Smilyk Liliia, Taran Igor, Vesela Marija. On-board battery charging current limiter of electric vehicles. *IV Krakowska ogolnopolska konferencja naukowa transport*. 2017 r., Krakow, kwiecien. С. 190-197.
15. Бажинов О.В., Весела М.А. Гібридний автомобіль багатофункціонального призначення. Науково-практична конференція «Службово-бойова діяльність Національної гвардії України: сучасний стан, проблеми та перспективи», 29 березня 2018 р., м. Харків. С. 6-8.
16. Гібридні автомобілі/ Бажинов О.В., Смирнов О.П., Серіков С.А. та ін. – Х.: ХНАДУ, 2008. – 327с.
17. Конверсія легкового автомобіля в гібридний/ Бажинов О.В., Двадненко В.Я., Хакім М. – Харків: ХНАДУ, 2014.- 160с.
18. Синергетичний автомобіль. Теорія і практика/ Бажинов О.В., Смирнов О.П., Серіков С.А., Двадненко В.Я. – Харків: ХНАДУ, 2011. – 236с.
19. Борисенко А.О., Бажинова Т.О. Експлуатаційні властивості гібридних автомобілів/ Харків: ФОП Бровін О.В., 2016. -104с.
20. Элатин П.А., Кемеров В.А., Ксенович И.П. Электромобили и гибридные автомобили. – М.: Агроконсалт. – 2004. – 416с.
21. Электромобиль. Где взять энергию. М.: Двигатель. – 2005. №37, с. 17-21.
22. Ефремов И.С., Пролыгин А.П. Теория и расчет тягового привода электромобилей. Высшая школа, 1984.- 383с.
23. Кузьмин Н.А. Процессы и закономерности изменения технического состояния автомобилей в эксплуатации. Учебное пособие. Изд. Нижегородского Государственного университета, 2001. – 178с.
24. Шенфельд Р., Хабигер Э. Автоматизированные электроприводы. Пер. с нем./ Под ред. Ю.А. Борцова.- Энергоатомиздат, 1985.- 464с.
25. Скундин А.М. Литий-ионные аккумуляторы: последние достижения и проблемы. Материалы VIII Международной конференции «Фундаментальные проблемы преобразования энергии в литиевых электрохимических системах». Екатеринбург. 2004, Изд. Дом. «Зебра». С. 58-60.
26. Орлов С.Б. Элементы питания – ХИТЫ. Электронные компоненты, №4, 2000. – 176с.
27. Гулиа Н., Юрков С. Новая концепция электромобиля. М: Наука и Техника, 2000. – 136 с.
28. Кедринский, В. Г. Яковлев. Li ионные аккумуляторы // Красноярск. ИПК «Платина» 2002. – 266 с.
29. Джуржа В.В.. Исследование работоспособности электродов для литий-ионных аккумуляторов // Санкт-Петербург. 2005. 8 с
30. Matsui L. Metal-graphite composition as the materials for electrodes of lithium-ion batteries //NATO-CARWC. New Carbon Based Materials for Electrochemical Energy Storage Systems. 2003. P.58

31. Электромобили состояние и перспективы //Машиностроитель 2000. №10. – с7 – 10.
32. Электромобиль настоящее и будущее // Грузовик, 2000, №4. – с19 – 20.
33. Комбинированные энергетические системы электромобилей: выбор параметров// Грузовик2000 №5 -с13 15.
34. Смирнов О.П. Оцінка економічності електромобілів / О.П. Смирнов // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2012. – №9 (180) Частина 1 – С. 30-34.
35. Бажинов А.В. Система контроля заряда и разряда литий-ионных аккумуляторных батарей гибридных автомобилей и электромобилей. / Двадненко В.Я., Дробинин А.М., Мауш Х. / Вісник СевНТУ збірник наукових праць. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. – 2012. – № 134. – Севастополь. – С. 52-55.
36. Smirnova A.O. Problems of electric cars / Smirnova A.O., Pervashova O.V // Збірник матеріалів міжнародної науково-практичної конференції студентів і молодих вчених іноземними мовами "Транспортні системи, автомобільне дорожнє будівництво: іновачії та їх впровадження" – Х.: ХНАДУ, 2012. – С. 207-210.
37. Коровин Н.В. Электрохимическая энергетика. М.: Энергоатомиздат,- 1991.- 263с.
38. Мосалов О.П. Самообучающиеся агенты на основе нейросетевых адаптивных критиков./ О.П. Мосалов, Д.В. Прохоров, В.Г. Редько // Искусственный интеллект. – 2004.-Т3.- С.550-560.
39. Редько В.Г. Нейросетевые адаптивные критики / В.Г. Редько, Д.В. Прохоров // Научная сессия МИФИ – 2004. Ч.2. Нейроинформатика – 2004.- С. 77-84.
40. Чернодуб А.Н. Обзор методов нейроруправления/ А.Н. Чернодуб, Д.А. Дзюба // Проблемы программирования.- 2011.- №2.- С. 79-94.
41. Редько В.Г. Модели адаптивного поведения и проблема происхождения интеллекта / В.Г. Редько // Математическая биология и биоинформатика. – 2007.- Том 2. - №1.- С. 160-180.
42. Ganesh K. Venayagamoorthy. Comparison of Heuristic Dynamic Programming and Dual Heuristic Programming Adaptive Critics for Neurocontrol of a Turbogenerator/ Ganesh K. Venayagamoorthy, Ronald G. Harley, and Donald C. Wunsch // IEEE Transactions on Neural Networks. – 2002. – Vol. 13, No 3.- P. 764-773.
43. Prokhorov D. Adaptive Critic Designs / D. Prokhorov, D. Wunsch// Transactions on Neural Networks, September, 1997. – P, 997-1007.
44. Raghavendra V. Kulkarni, Ganesh Kumar Venayagamoorthy. Adaptive critics for dynamic optimization // Neural Networks. – 2010.- №23.- P/ 587-591.
45. Fei-Yue Wang, Huaguang Zhang, Derong Liu. Adaptive Dynamic Programming: An Introduction // IEEE Computational Intelligence Magazine, May, 2009.- P. 39-47.

46. Robert F. Stengel, S. Ferrari. Model-based Adaptive Critic Designs // Learning and Approximate Dynamic Programming, New York, 2004. - P. 64-94.
47. Shalabh Bhatnagar, Richard S. Sutton, Mohammad Ghavamzadeh, Mark Lee. Natural actor-critic algorithms // Automatica (Journal of IFAC), Volume 45 Issue 11, November, 2009. – P. 2471-2482.
48. Ganesh Kumar Venayagamoorthy, Ronald G. Harley, Donald C. Wunsch. Implementation of Adaptive Critic-Based Neurocontrollers for Turbogenerators in a Multimachine Power System // IEEE Transactions on Neural Networks. – 2003, Sept. – Vol. 14, No 5. – P. 1047-1064.
49. James Larminie, John Lowry. Electric vehicle technology explained. – John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England, - 2003. - 296 p.
50. Dhameja, Sandeep. Electric vehicle battery systems/ Sandeep Dhameja. Sandeep Dhameja. Newnes, 2002. - 230 p.
51. K.J. Kelli, M. Mihalic, M. Zolot. Battery usage and thermal performance of the Toyota Prius and Honda Insight for various chassis dynamometer test procedures. Preprint. NREL/CP- 540-31306, November, 2001. [электронный ресурс] / Электронные данные. - Режим доступа: <http://www.osti.gov/bridge>, свободный. – Загл. с экрана.
52. Loic Boulon, Daniel Hissel, Marie-Cecile Pera. Multi physics model of a nickel based battery suitable for hybrid electric vehicle simulation // Journal of Asian Electric Vehicle, Vol. 6, No. 2, December 2008. – P. 1175-1179.
53. Nickel-metal hydride. Application Manual. 2001 [электронный ресурс] / Электронные данные. – Режим доступа: http://data.energizer.PDFs/nickelmetalhydride_appman.pdf, свободный. – Загл. с экрана.
54. A H₂ PEM Fuel Cell and High Energy Dense Battery Hybrid Energy Source for an Urban Electric Vehicle. N. T. Yap, C. N. Bingham. [электронный ресурс] / Электронные данные. – Режим доступа: <http://bioage.typepad.com/greencarcongress/docs/IEMDC%20Hybrid%20EnergySources Final.pdf>, свободный. – Загл. с экрана.
55. Carlos Martinez, Yossi Drori and Joe Ciancio. Smart Battery Primer. Intersil Application Note. AN 126.0 July 11, 2005. [электронный ресурс] / Электронные данные. – Режим доступа: <http://www.intersil.com/data/an/an126.pdf>, свободный. – Загл. с экрана.
56. Osvaldo Barbarisi, Roberto Canaletti, Luigi Glielmo, Michele Gosso, Francesco Vasca. State of charge estimator for NiMH batteries // Proceedings of the 41-st IEEE conference on decision and control. – Las Vegas, Nevada USA, December, 2002. – P. 1739-1744.
57. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: учебное пособие / С.Г. Герман-Галкин. – СПб.: КОРОНА принт, 2001. – 320 с.
58. 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 p.

59. Гусевский Ю.И. Управление синхронными двигателями с постоянными магнитами в области скоростей выше номинальной / Ю. И. Гусевский, Ф. О. Демченко, Г.И. Загарий, Р.В. Семчук, А.К. Дука, И. В. Гусев // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2006. - №4. – С. 74-79.

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

61. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс./ С. Хайкин; пер. с англ. – 2-е изд. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.

62. Минаев Ю.Н. Методы и алгоритмы решения задач идентификации и прогнозирования в условиях неопределенности в нейросетевом логическом базисе / Ю.Н. Минаев, О.Ю. Филимонова, Бенамеур Лиес.- М.: Горячая линия – Телеком, 2003. – 205 с.

63. Методы классической и современной теории автоматического управления: учебник в 5 т. Т. 5. Методы современной теории автоматического управления/ Под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова.- 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 784 с.

64. Руденко О.Г. Искусственные нейронные сети: учебное пособие / О.Г. Руденко, Е.В. Бодянский. – Харьков: ООО «Компания Смит», 2005. – 408 с.

65. Yuanjun Huang, Chengliang Yin, Jianwu Zhang. Modeling and Development of the Real-time Control Strategy For Parallel Hybrid Electric Urban Buses / WSEAS TRANSACTIONS on INFORMATION SCIENCE & APPLICATIONS. Issue 7, Volume 5, July 2008. – P. 1113-1126.

66. Xi Wei. Modelling and control of a hybrid electric drivetrain for optimum fuel economy, performance and driveability. Dissertation. Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Doctor of Philosophy in the Graduate of The Ohio State University.- 2004.- 175 p.

67. Сериков С.А. Нейросетевая модель двигателя внутреннего сгорания / С.А. Сериков // Кибернетика и системный анализ. – 2010.-№6.- С. 155-165.

68. S.A. Serikov. Neural network model of internal combustion engine.// Cybernetics and Systems Analysis.- 2010.- Volume 46, Issue 6.- P. 998-1007. DOI: 10.1007/s10559-010-9281-3 [электронный ресурс]/ Электронные данные.- Режим доступа: <http://www.springerlink.com/openurl.asp?genre=article&id=doi:10.1007/s10559-010-9281-3>, свободный. – Загл. с экрана.

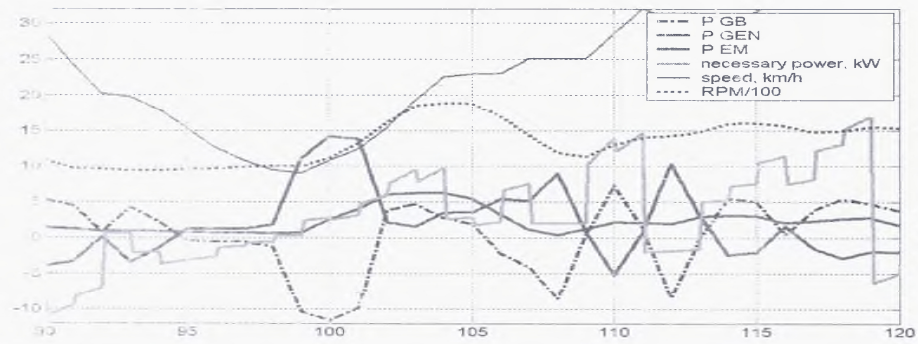
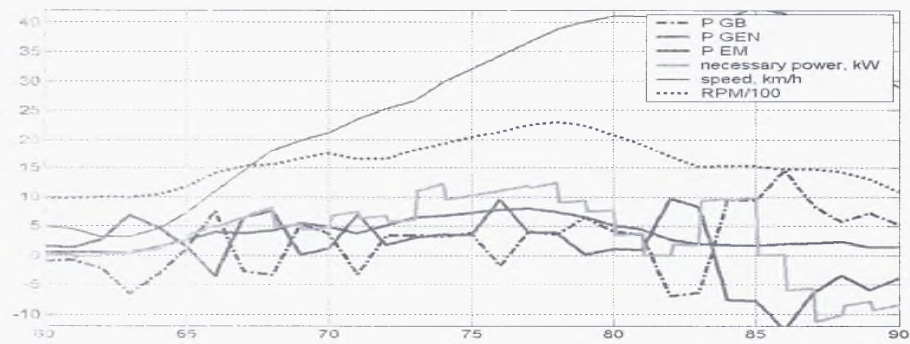
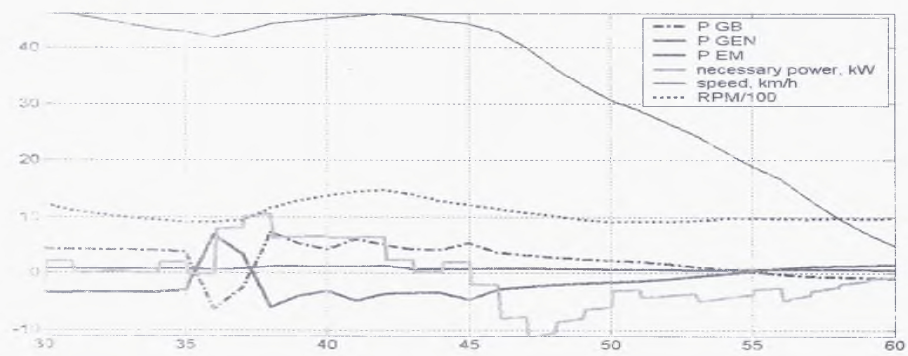
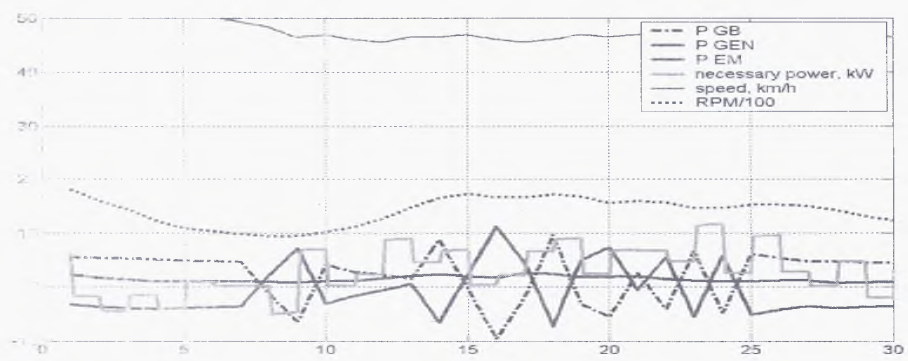
69. Комарцова Л.Г. Нейрокомпьютеры: учеб. Пособие для вузов/ Л.Г. Комарцова, А.В. Максимов.- М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2002.- 320с.

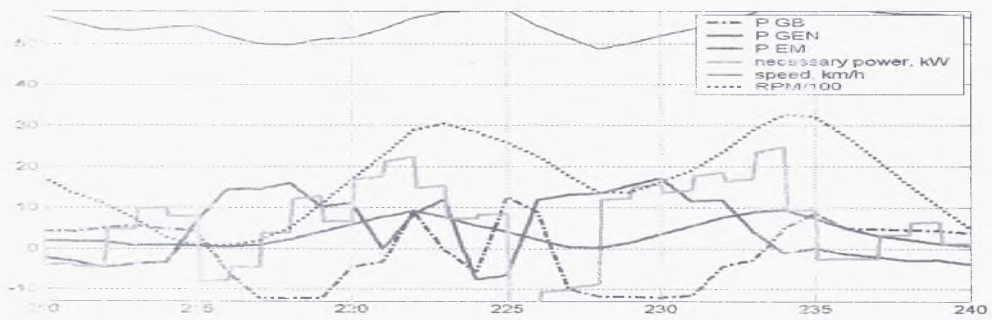
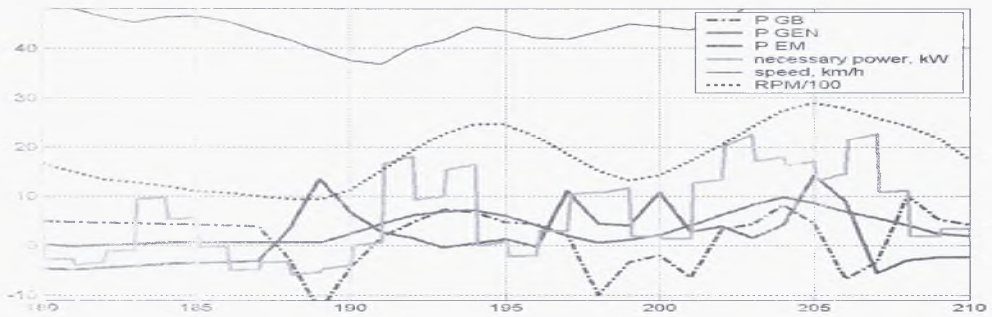
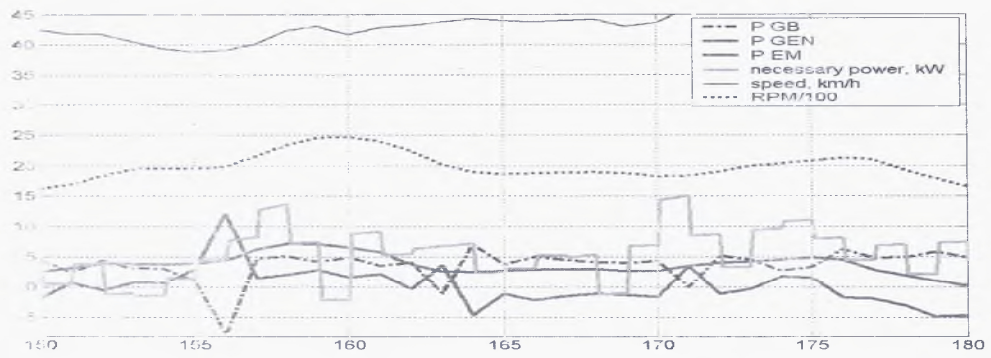
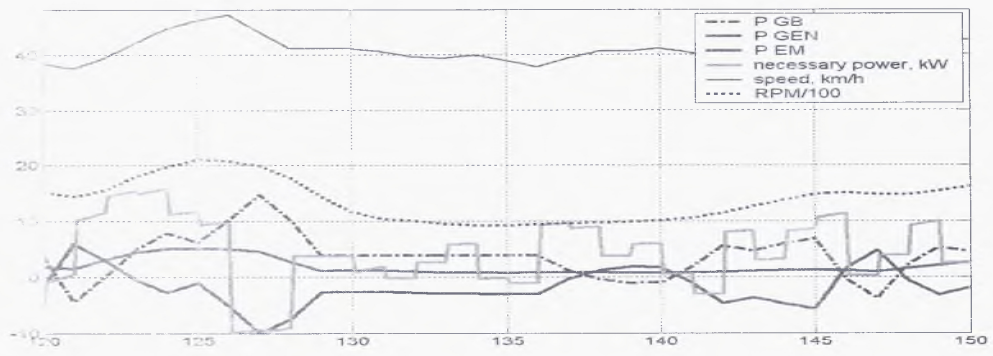
70. Медведев В.С. Нейронные сети. MATLAB 6/ В.С. Медведев, В.Г. Потемкин; под общ. ред. В.Г. Потемкина.- М.: Диалог – МИФИ, 2002.-496с.

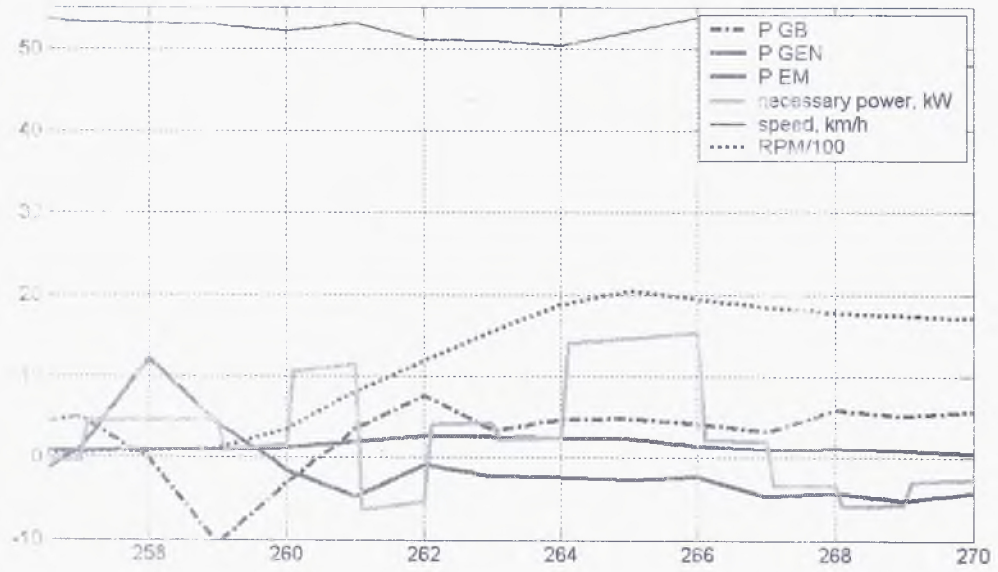
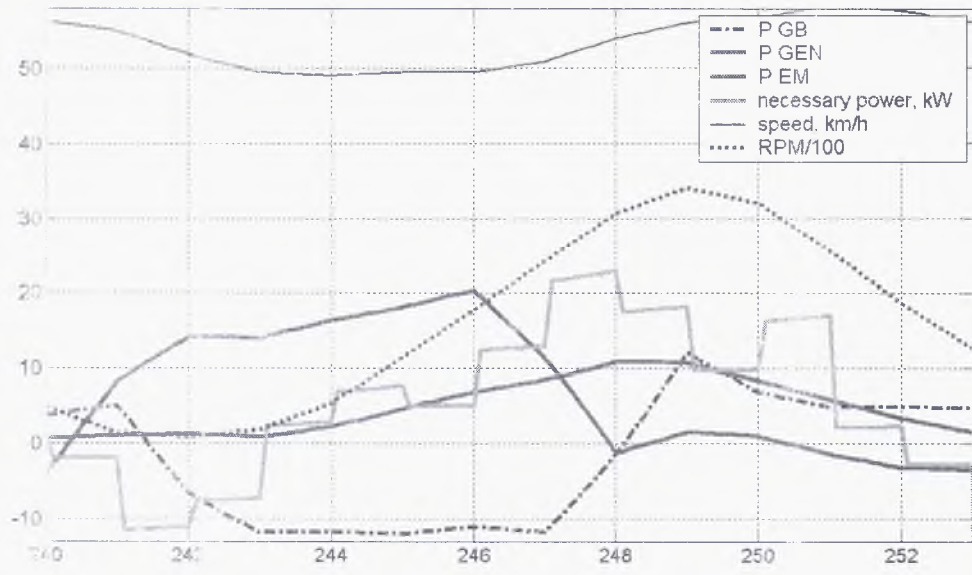
71. Червяков Н.И. Сравнение алгоритмов обучения нейросетевой модели управления динамическими системами/ Н.И. Червяков, Т.А. Рудакова, С.Ю. Щербина // Нейрокомпьютеры: разработка, применение.- 2008.- №1-2. С. 57-63.
72. Moller M.F. A scaled conjugate gradient algorithm for fast supervised learning// Neural Networks, Vol. 6, 1993.- P. 525-533.
73. Hagan M.T., Menhaj M. Training feedforward networks with the Marquardt algorithm// IEEE Transactions on Neural Networks. 1994. Vol.5.- P. 989-993.
74. Сериков С.А. Модель тягового электропривода автомобиля на основе вентильного двигателя/ С.А. Сериков // Управляющие системы и машины. – 2010.-№5.- С. 27-33.
75. Крутиков А. Ультраконденсаторы улучшают КПД электромобилей и гибридных автомобилей. [электронный ресурс]/ Электронные данные. – Режим доступа:http://www.power-e.ru/pdf/2006_01_18.pdf, свободный. – Загл. с экрана.
76. Беляков А.И. Электрохимические суперконденсаторы: текущее состояние и проблемы развития/ А.И. Беляков // Электрохимическая энергетика. – 2006.- Т.6.- №3.- С. 146-149.
77. Коршунов Ю.М. Математические основы кибернетики: учеб. пособие для вузов/ Ю.М. Коршунов.- 2-е изд., перераб. и доп.- М.: Энергия, 1980. – 424 с.
78. Сараев П.В. Многошаговое оптимальное нейросетевое управление / П.В. Сараев // Проблемы управления. – 2008.- №5.- С. 14-18.
79. Рассел Стюарт. Искусственный интеллект. Современный подход / Стюарт Рассел, Питер Норвиг; пер. с англ. – 2-е изд. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006.- 1408 с.
80. Сериков С.А. Нейросетевое управление гибридной силовой установкой на основе метода адаптивной критики / С.А. Сериков // Автомобильный транспорт. – 2012.- Вып. 30.-С. 65-74.
81. Сигеру Омату. Нейроуправление и его приложения. Кн.2 (Нейрокомпьютеры и их применение) / Сигеру Омату, Марзуки Халид, Рубия Юсуф; пер. с англ. Н.В. Батина; под ред. А.И. Галушкина, В.А. Птичкина. – М.: ИПРЖР, 2000.- 272 с.
82. Jouffe L. Actor-critic learning based on fuzzy inference system// Systems, Man, and Cybernetics, 1996/- Volume: 1/- pp.: 339-344. Digital Object Identifier: 10.1109/ICSMC. 1996.569792.
83. Salman Mohagheghi, Ganesh Kumar Venayagamoorthy, Ronald G. Harley. Adaptive Critic Based Neuro-Fuzzy Controller for a Static Compensator in a Multimachine Power System // IEEE Trans. Power Syst., vol.21, no. 4, Nov. 2006. – P. 1744-1754.
84. Кораблев Н.М. Синтезнейросетевого нечеткого регулятора адаптивной системы управления динамическим объектом / Н.М. Кораблев, А.Э. Макогон, О.Г. Лебедев // Системи управління, навігації та зв'язку, 2010.- Випуск 4 (16). – С. 119-123.
85. Гостев В.И. Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления / В.И. Гостев.- К.: «Радіоаматор», 2008.- 972 с.

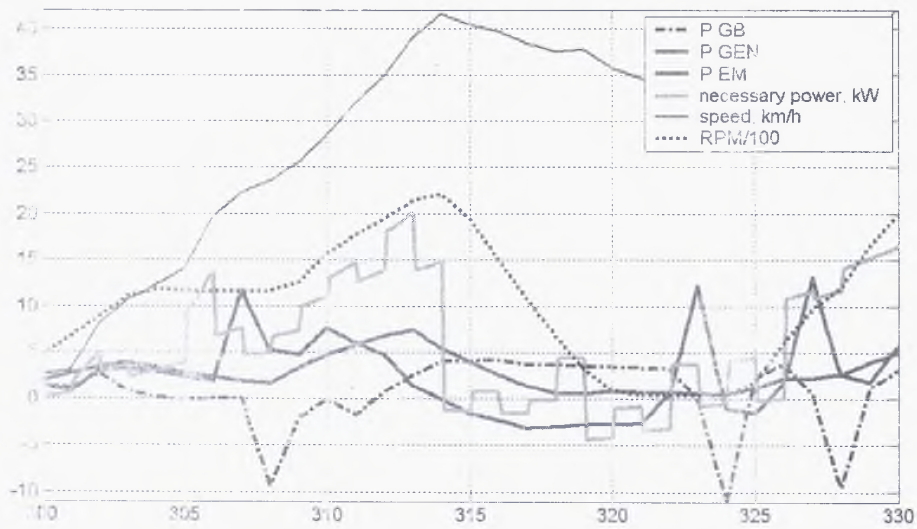
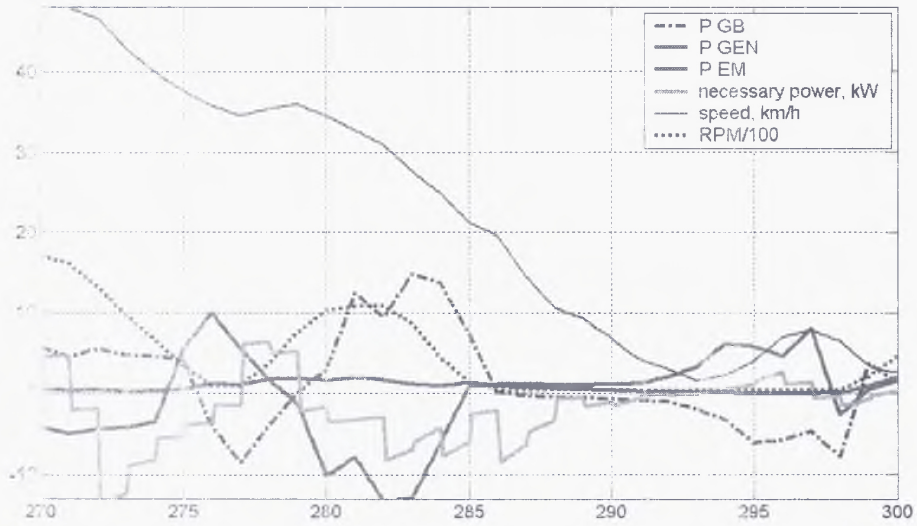
86. Дилигенский Н.В. Нечеткое моделирование и многокритериальная оптимизация производственных систем в условиях неопределенности: технология, экономика, экология./ Н.В. Дилигенский, Л.Г. Дымова, П.В. Севастьянов. – М.: «Издательство Машиностроение – 1», 2004.- 397 с.
87. Штовба С.Д. Идентификация нелинейных зависимостей с помощью нечеткого логического вывода в системе MATLAB / С.Д. Штовба // Математика в приложениях, 2003.- №2 (2).- С. 9-14.
88. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzy TESH / А.В. Леоненков. – СПб. : БХВ- Петербург, 2003. – 736 с.
89. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С.Д. Штовба.- М.: «Горячая линия – Телеком», 2007.- 288 с.
90. Сериков С.А. Система автоматического управления силовой установкой гибридного автомобиля / С.А. Сериков, Ю.Н. Бороденко, А.А. Дзюбенко // Автоматика 2006: X111 міжнародна конференція з автоматичного управління, 25-26 вересня 2006р. : тези доповідей.- Вінниця : УНІВЕРСУМ, 2006.- С. 105.
91. Verbruggen H.V. Constructing fuzzy models by product space clustering / H. V. Verbruggen, R. Babusra, Eds. H. Hellendorn, D. Driankov // Fuzzy model identification.- Berlin: Springer, 1998. – P. 53-90.
92. Xue Q. Analysis of hidden units of back propagation model by SVD / Xue Q., Hu Y., Tompkins W. // Proc. IJCNN, 1990, Washington. – P. 739-742.
93. Евсеев П.П. Работа, производительность и КПД автомобиля с позиции физики, стандартизации и метрологии. Автомобильная промышленность, 2003, №4, с. 7-10.
94. Токарев А.А. Еще раз о КПД автомобиля. Автомобильная промышленность, 1997, №9, с. 18-21.
95. Говорущенко Н.Я., Туренко А.Н. Системотехника транспорта.- Харьков; ХГАДТУ, 1998.- 468 с.
96. Техническая кибернетика транспорта/ Говорущенко Н.Я., Варфоломеев В.Н. – Харьков; ХГАДТУ, 2011. – 236 с.
97. Электромобиль: техника и экономика / В.А. Щетина, Ю.Я. Морговский, Б.И. Центер, В.А. Богомазов; под общ. Ред. В.А. Щетины – Л.; Машиностроение. Ленингр. отд., 1987. – 253 с.
98. Овчинников И.Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (малая и средняя мощность) / И.Е. Овчинников : Курс лекций. – СПб.: КОРОНА – Вск, 2007. – 336с.
99. Капустин А.А. Гибридные автомобили: учебное пособие / А.А. Капустин, В.А. Раков; М-во образ. и науки РФ, Вологод. гос. ун-т. – Вологда: ВоГУ, 2016. – 96с.
100. Раков В.А. Исследование автопарка гибридных автомобилей // Транспорт на альтернативном топливе. – 2013. - №1 (31). - С. 18-23.
101. Петров Р.Л. Насколько реальны заявленные показатели расхода топлива и эмиссии СО для гибридных автомобилей / Р.Л. Петров // Журнал автомобильных инженеров. – 2015. - №2 (31). – С.45-50.

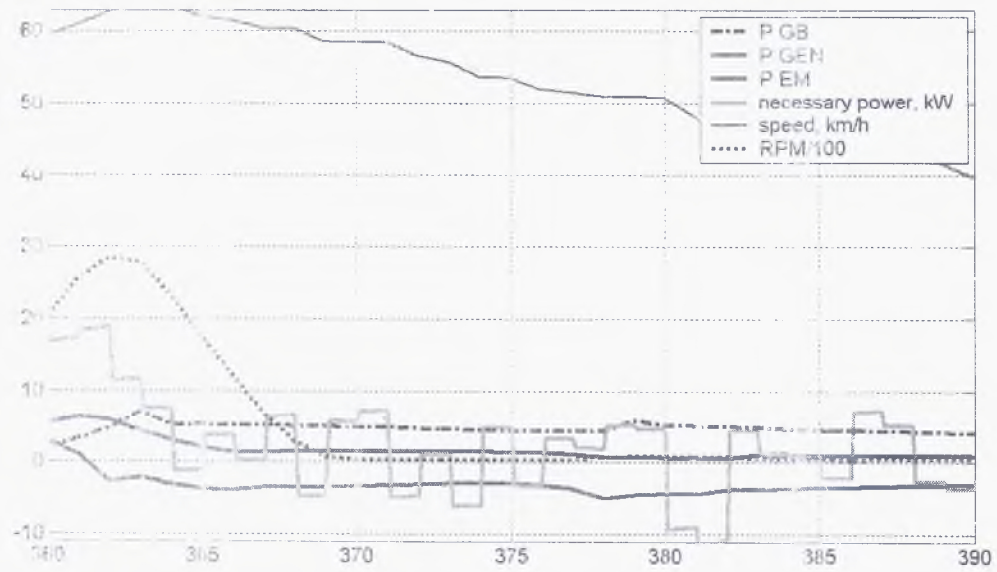
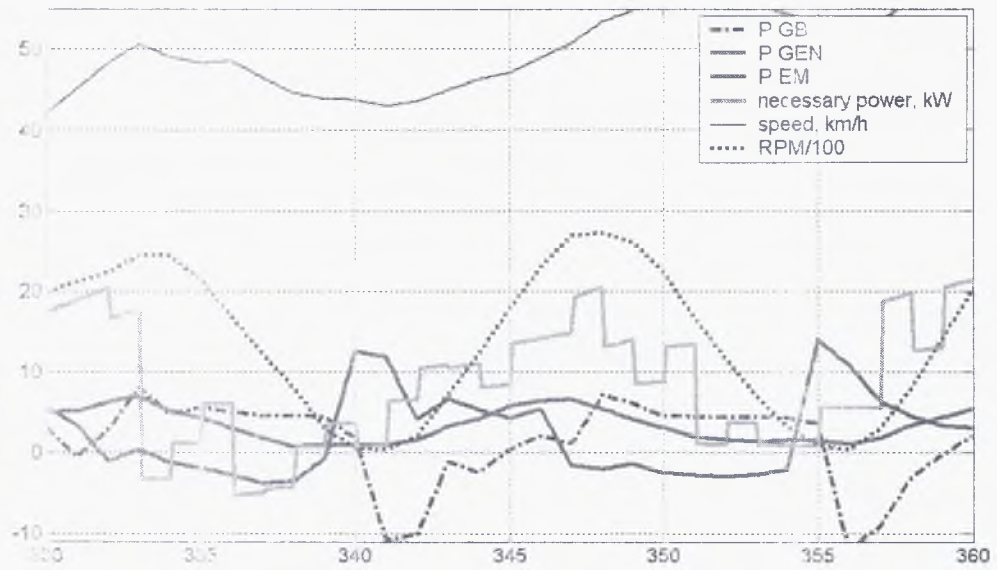
ДОДАТОК А
Режими роботи силової установки електромобіля

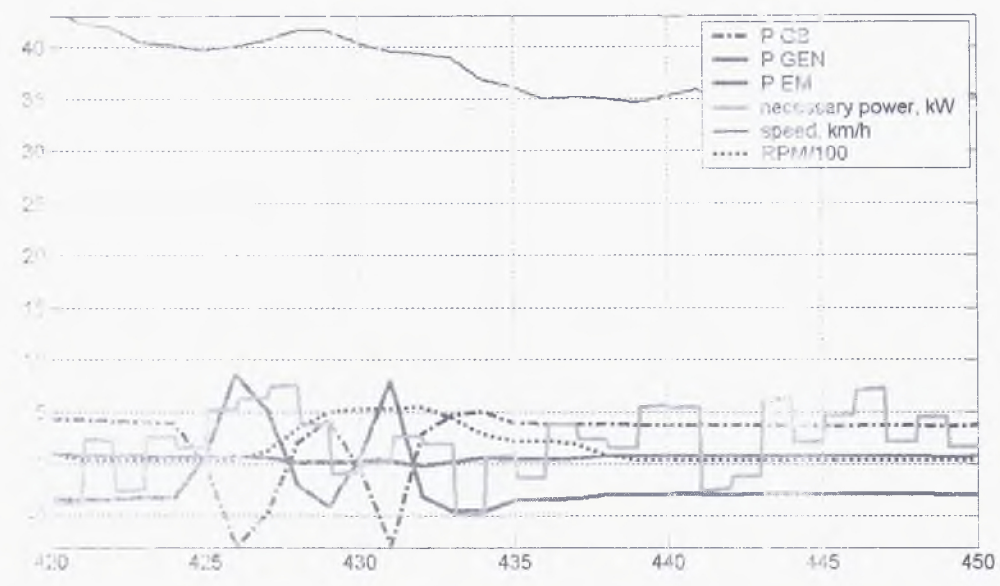
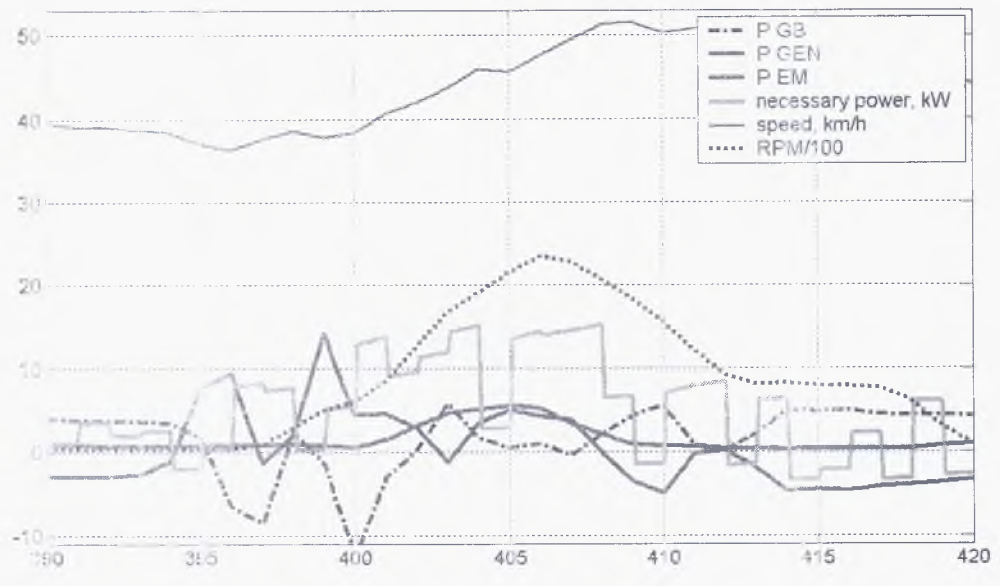


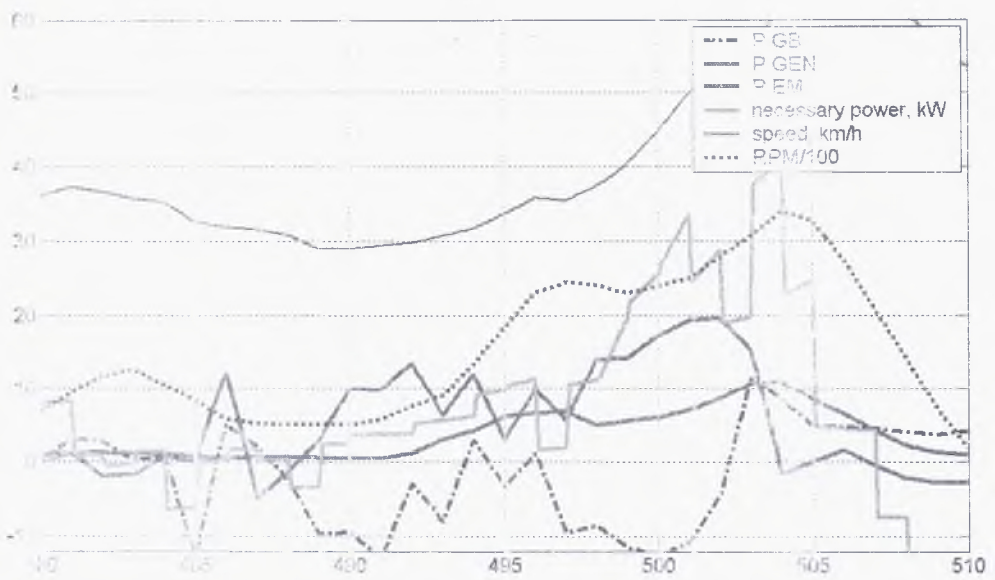
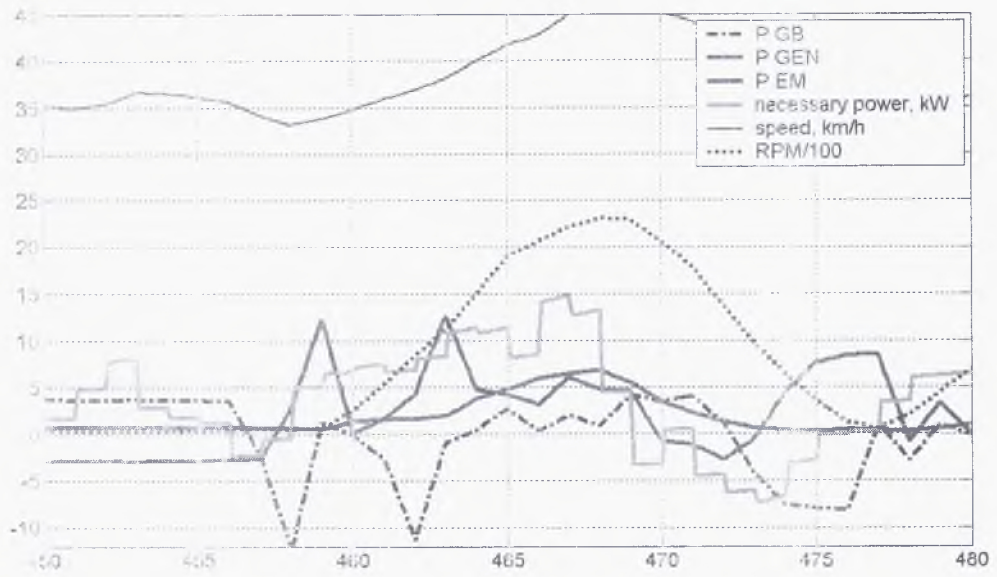


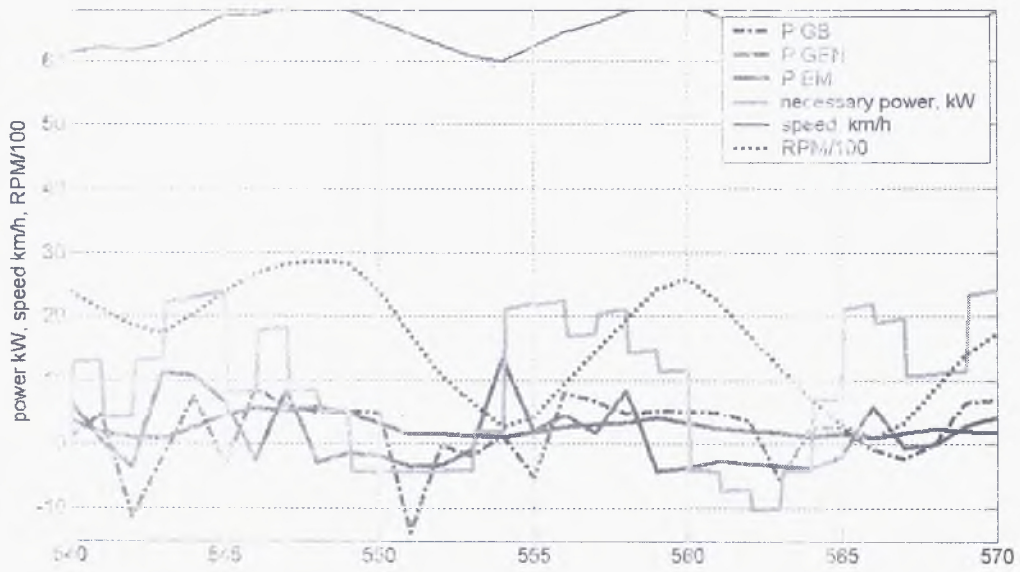
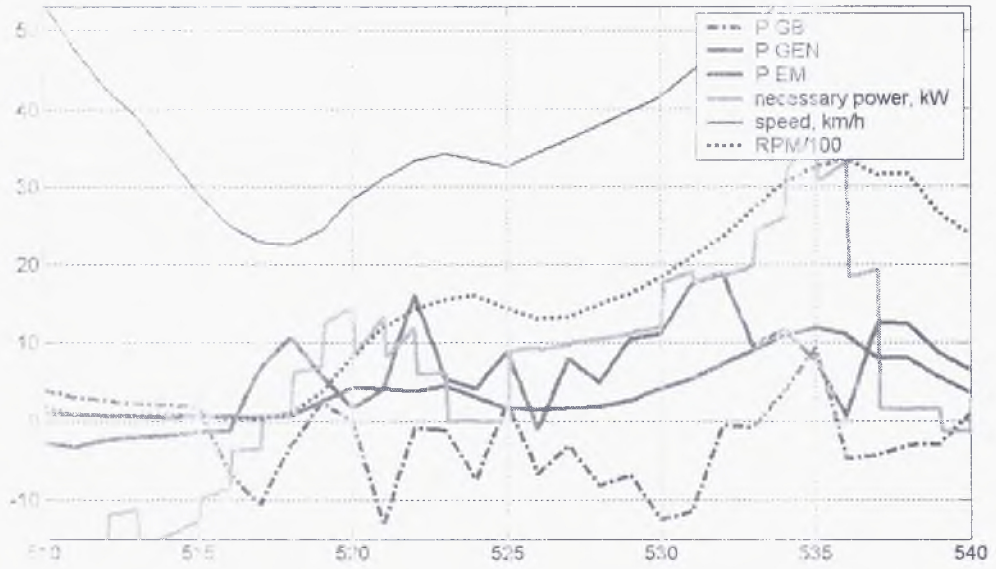


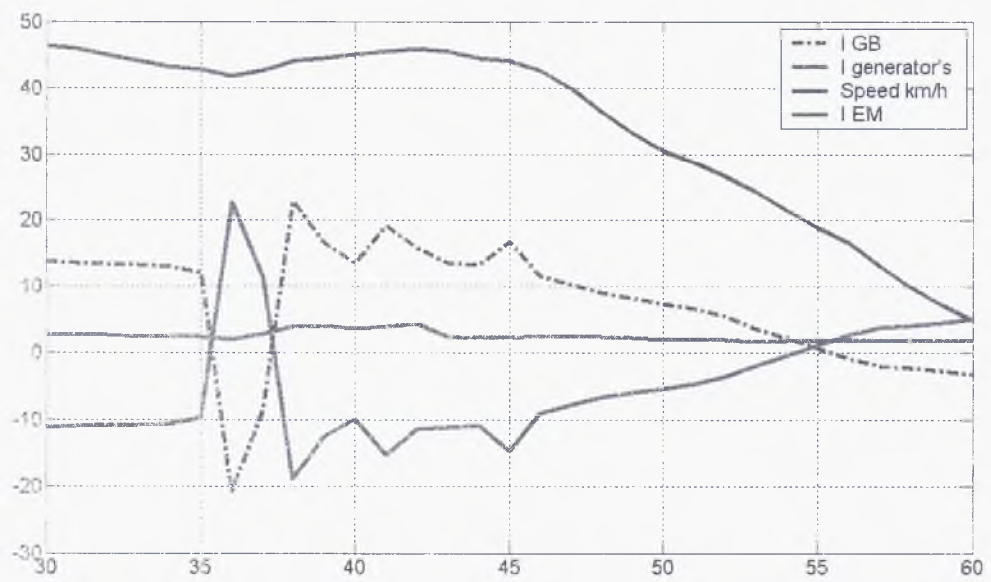
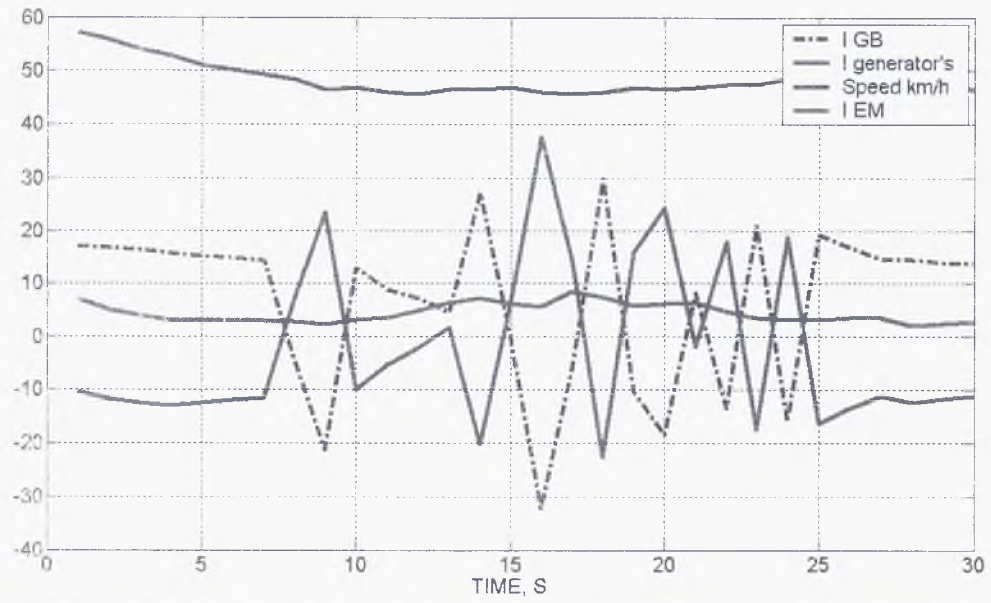


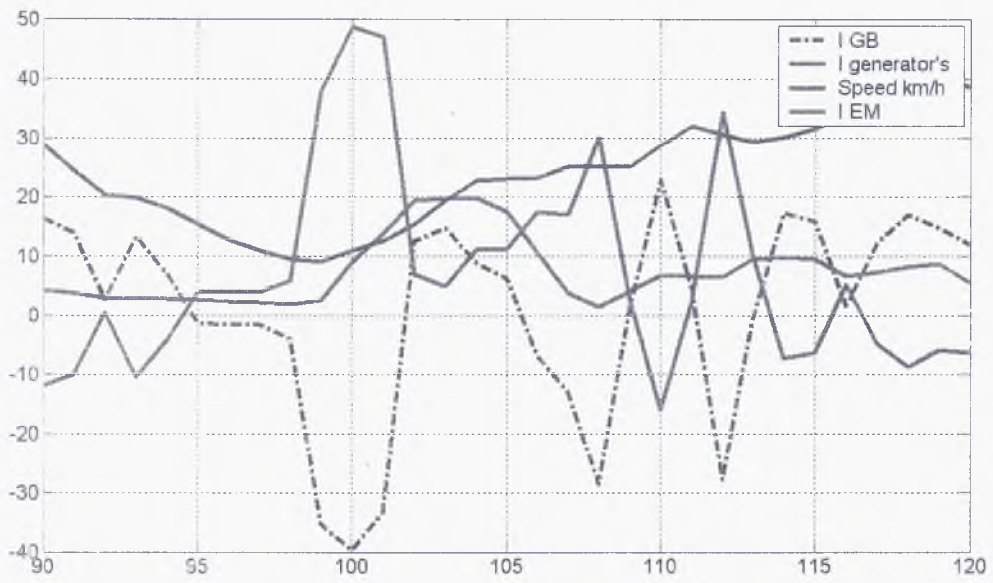
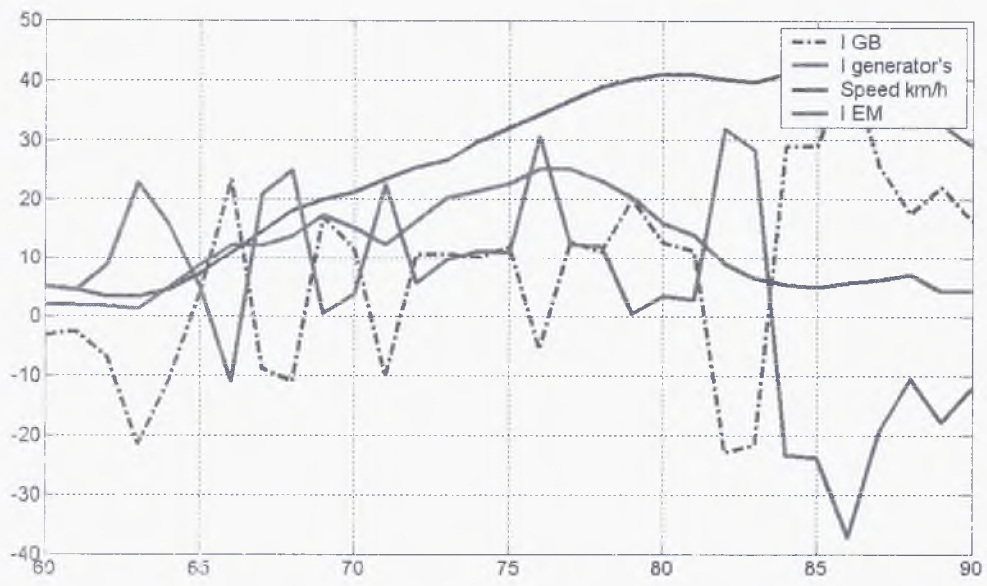


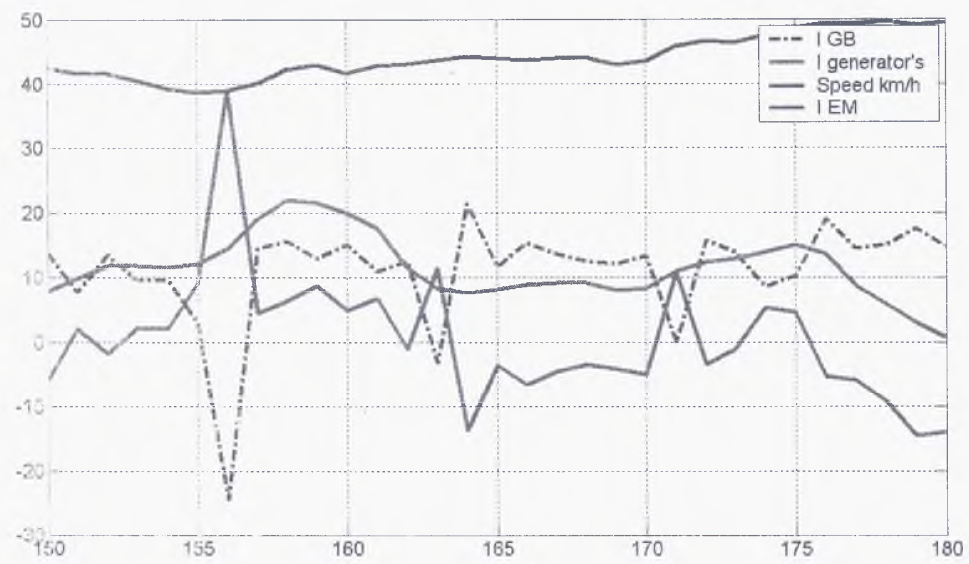
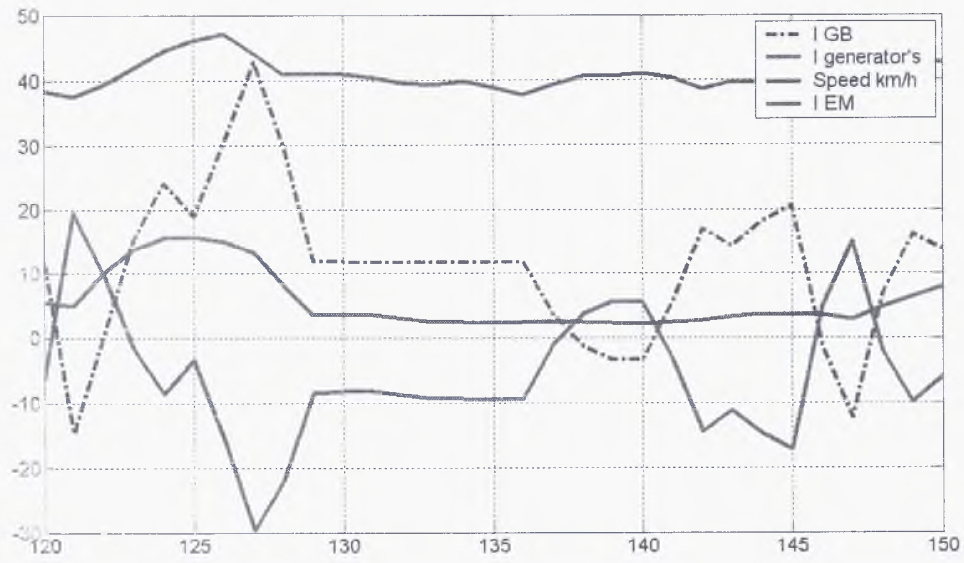


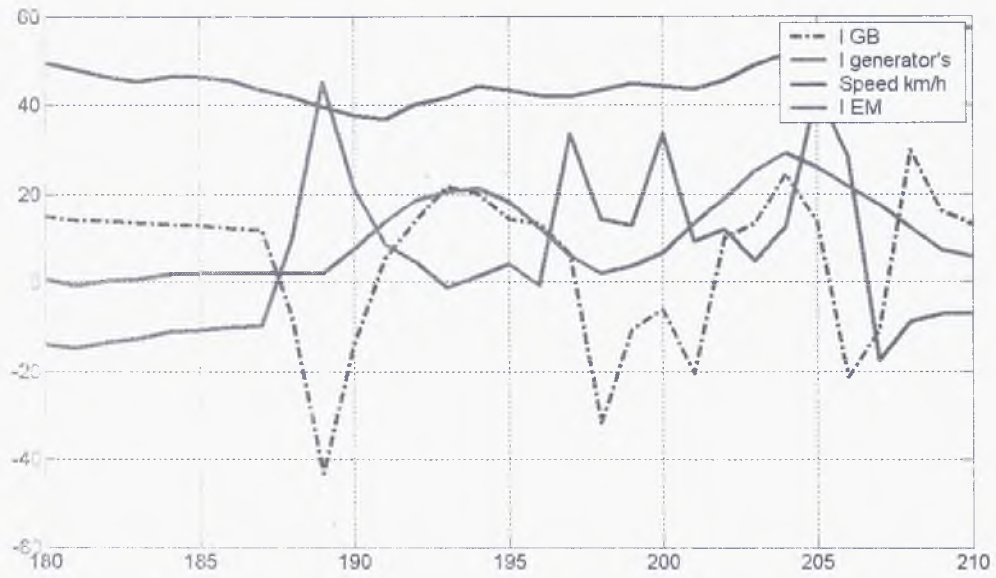
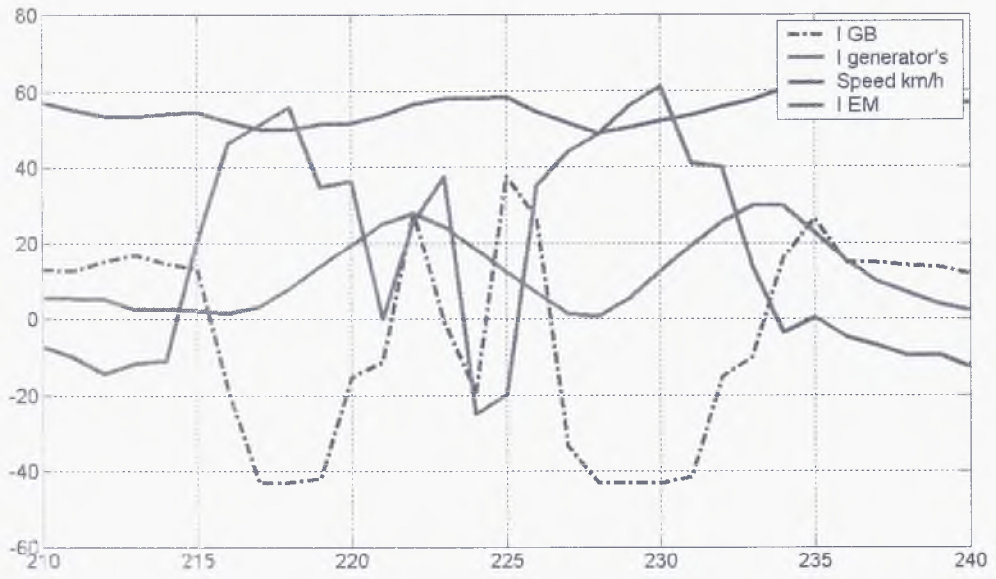


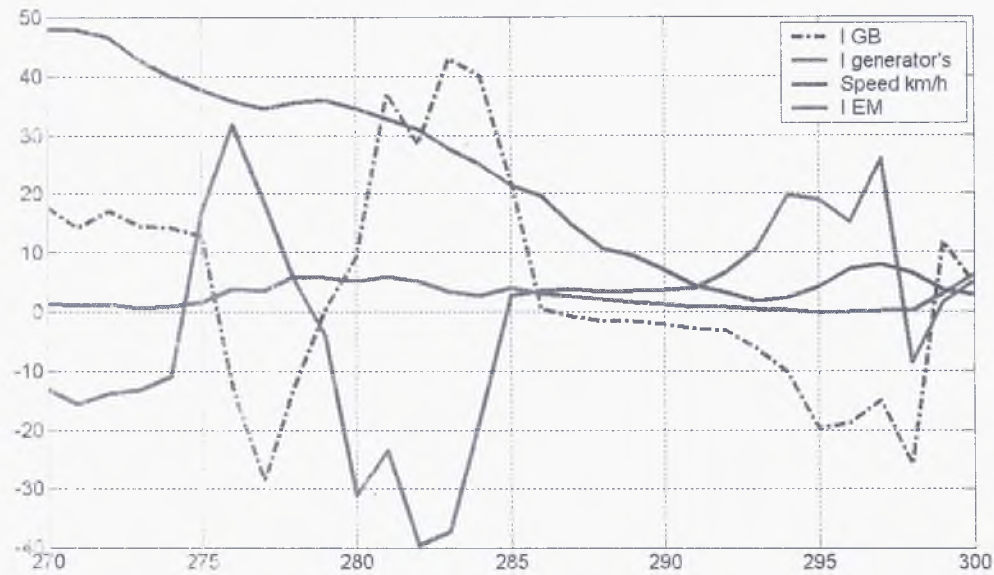
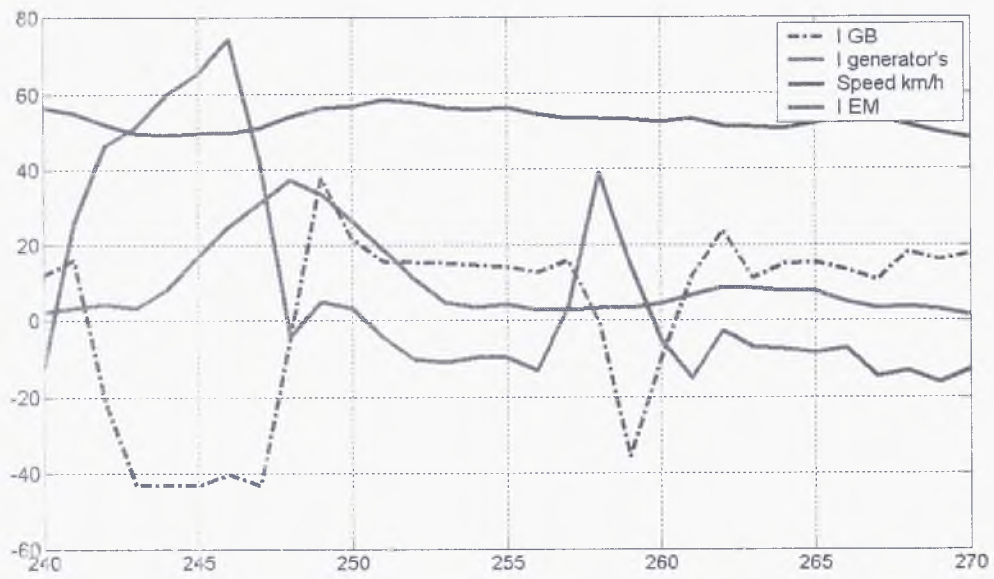


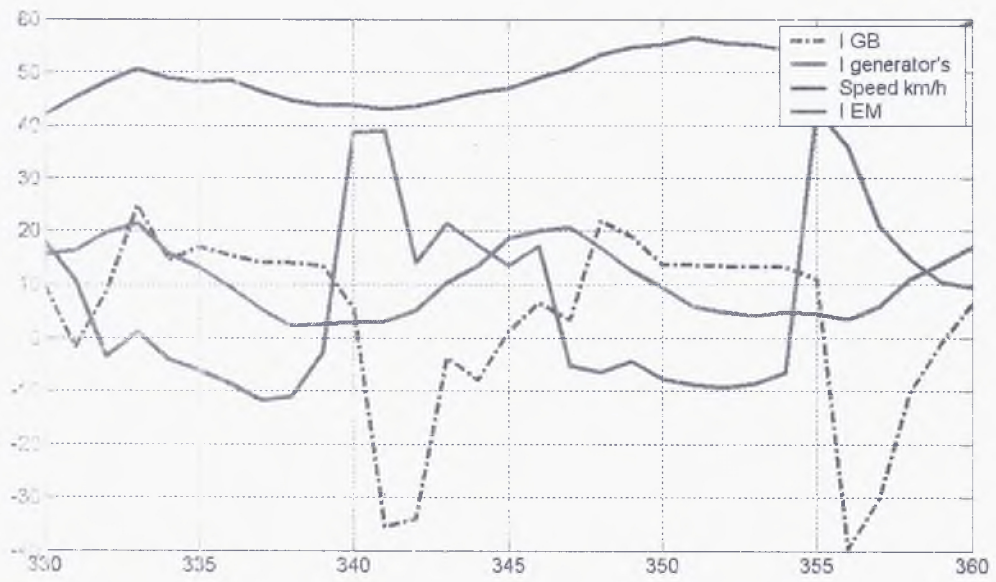
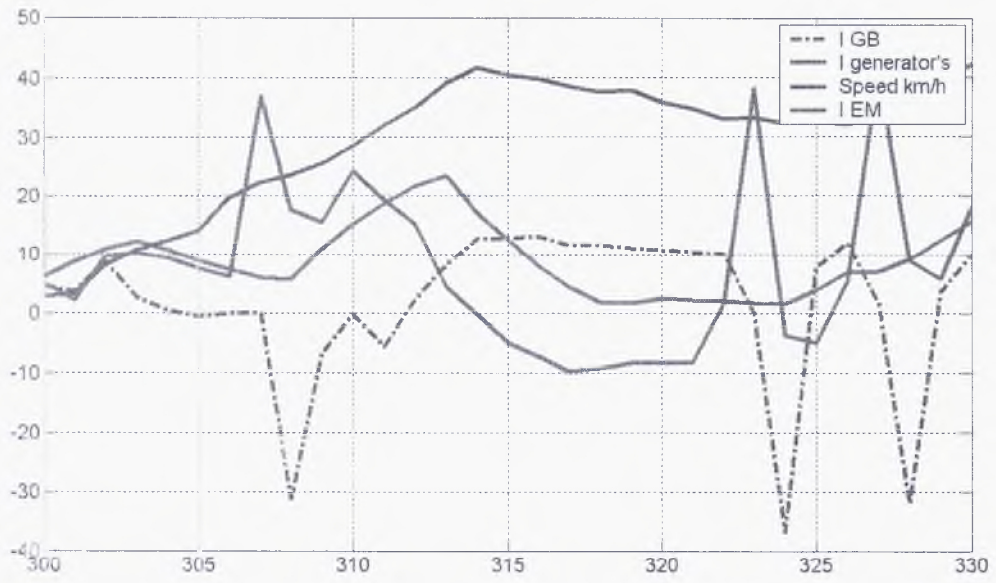


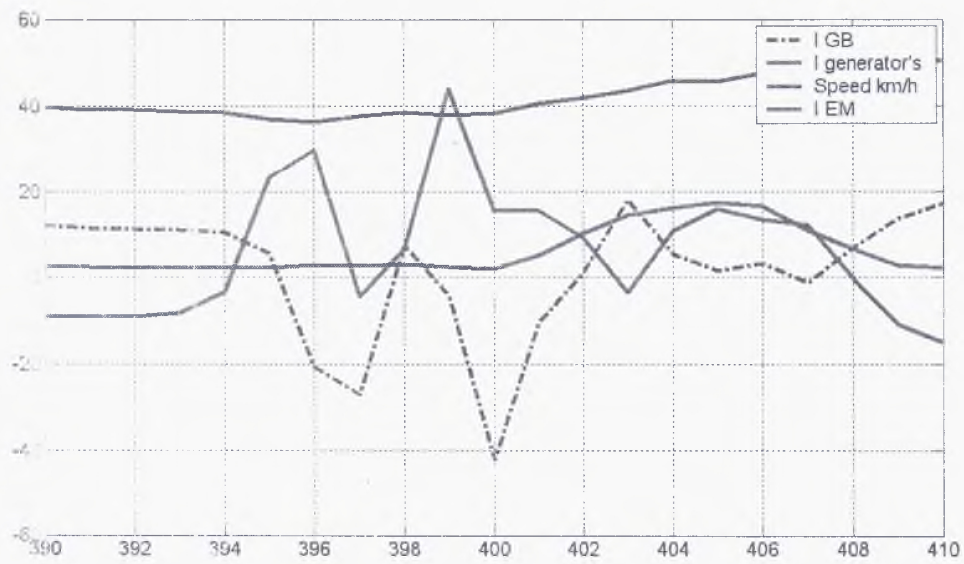
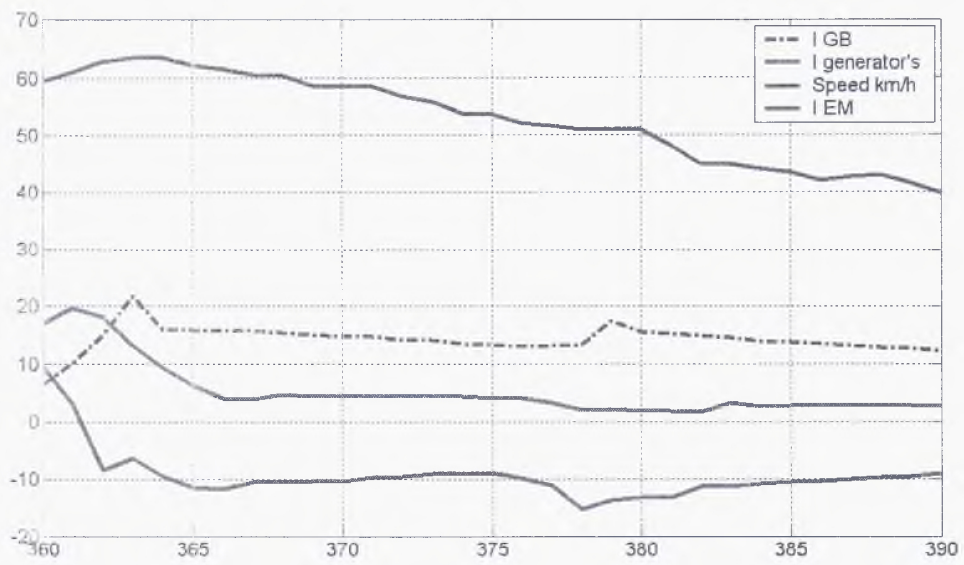


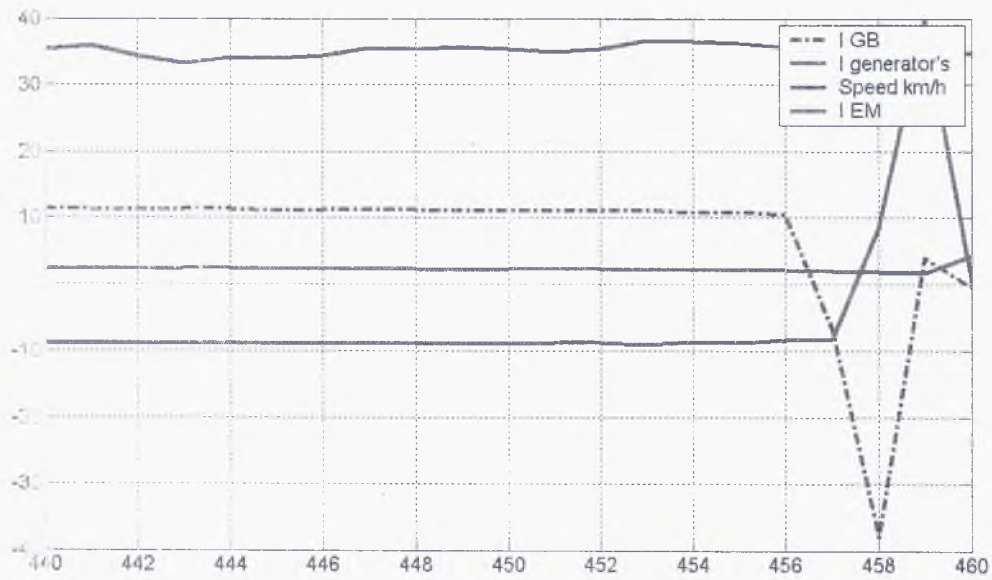
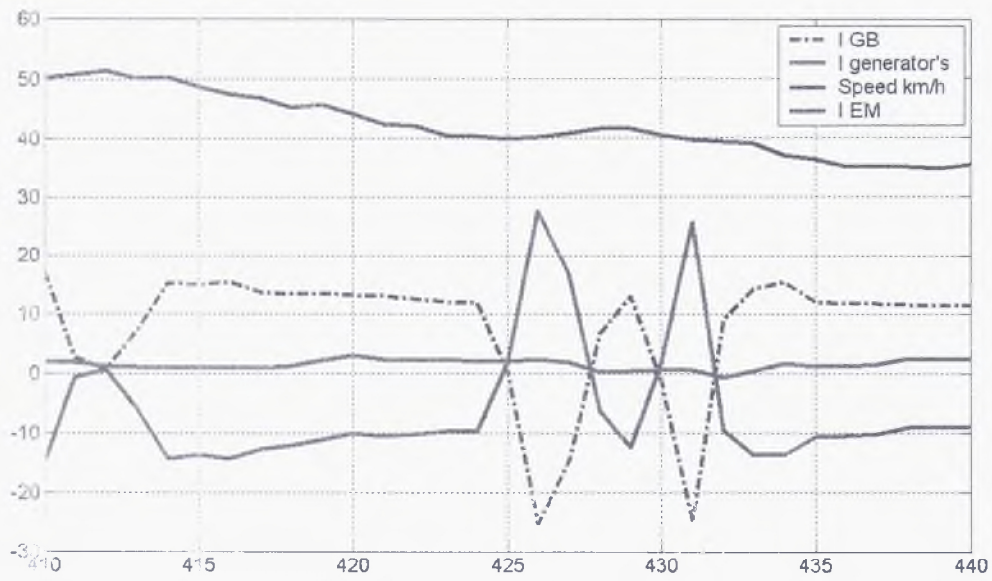


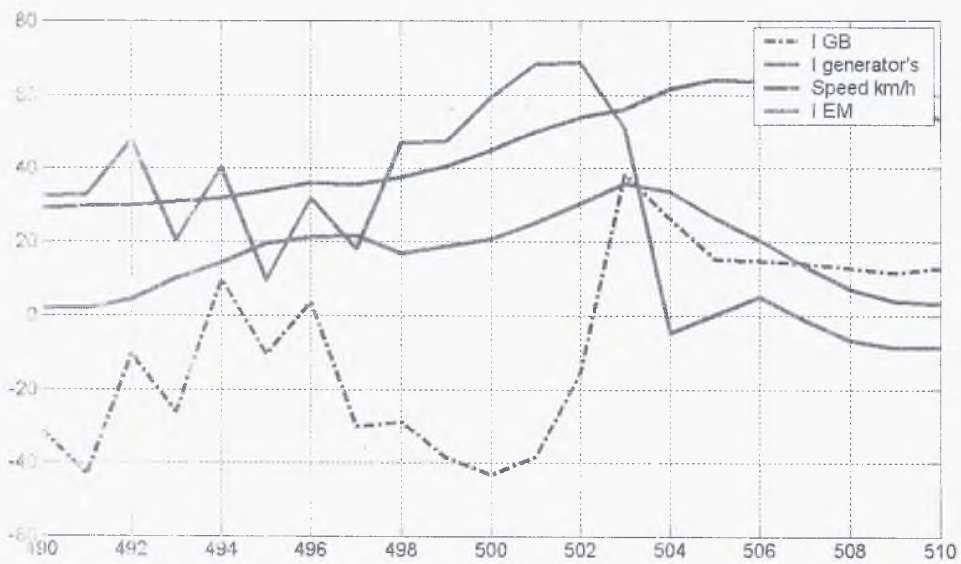
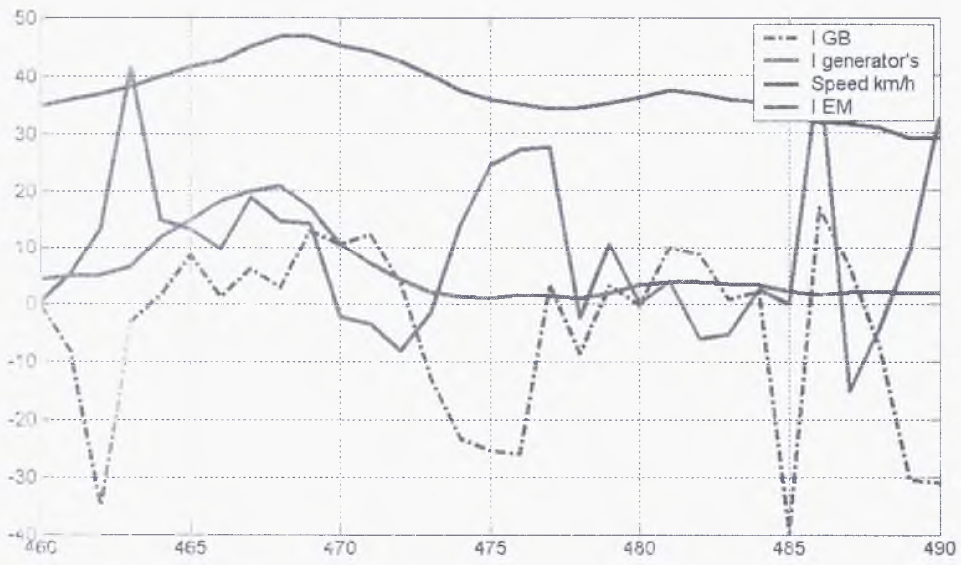


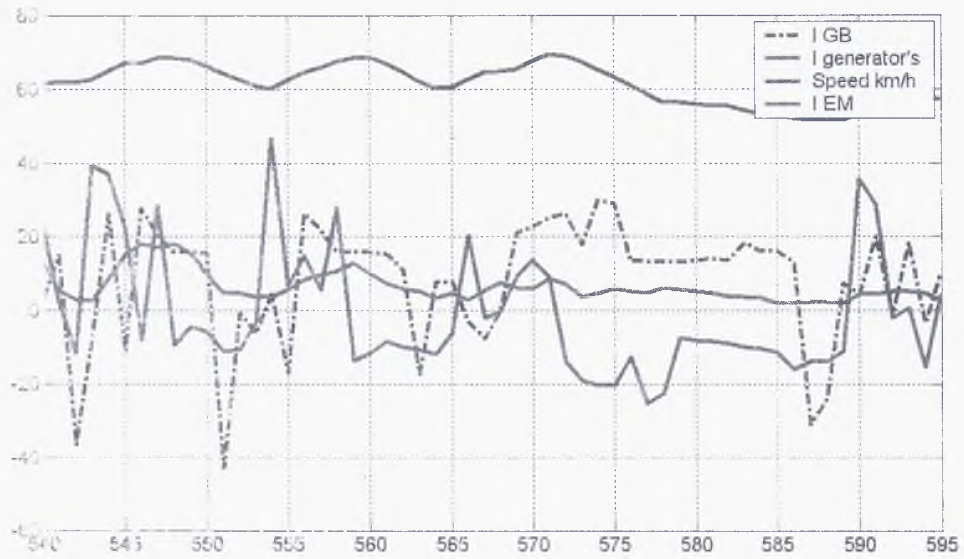
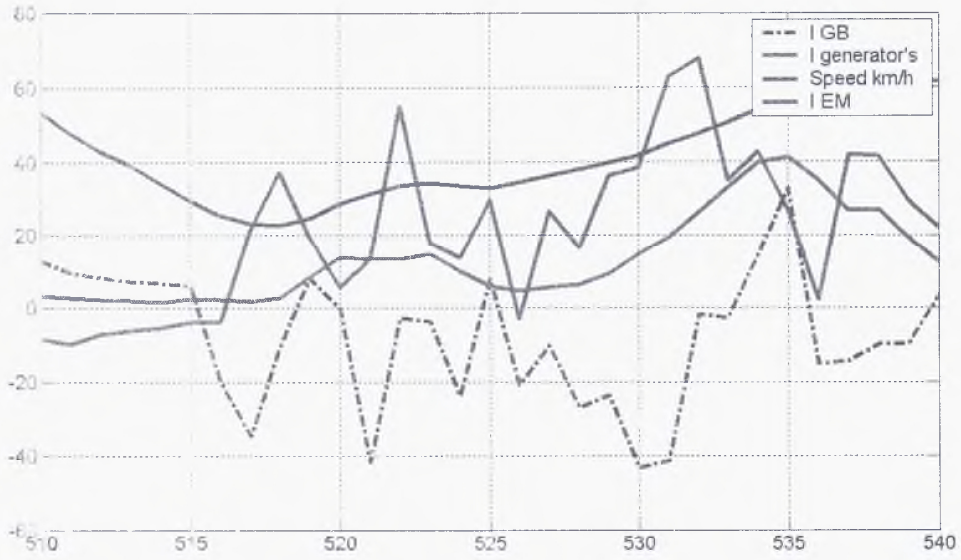












Наукове видання

Весела Марія Анатоліївна
Бажинова Тетяна Олексіївна

**МЕТОДИ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ СИЛОВОЮ
УСТАНОВКОЮ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ**

Монографія

Видано в редакції авторів

Підписано до друку 16.12.2021. Формат 30×42/4.
Папір офсетний. Ризографія. Ум. друк. арк. 6,8.
Обл.-вид. арк. 6,8. Тираж 10 пр. Зам. №

Підготовлено до друку та видруковано
у Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка»
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 1842 від 11.06.2004.

49005, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19