

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

На правах рукопису

Дембіцький Валерій Миколайович



УДК 629.017

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ РЕКУПЕРАЦІЇ ЕНЕРГІЇ
КОЛІСНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ
З ЕЛЕКТРИЧНИМ ПРИВОДОМ**

Спеціальність: 05.22.02 – Автомобілі та трактори

Дисертація на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Науковий керівник

Сітовський Олег Пилипович

кандидат технічних наук, доцент

Ідентичність усіх примірників дисертації

ЗАСВІДЧУЮ

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради К 35.052.20



М.Ф. Боднар

Луцьк – 2015

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН ПИТАННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ АВТОМОБІЛІВ З ЕЛЕКТРИЧНИМ ПРИВОДОМ.....	11
1.1 Сучасний стан ринку транспортних засобів, обладнаних електродвигунами	11
1.2 Принципова схема системи рекуперації енергії	15
1.3 Гальмівні системи та рекуперація енергії	18
1.4 Аналіз останніх досліджень	23
1.5 Висновки з розділу.....	35
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ РЕКУПЕРАТИВНОГО ГАЛЬМУВАННЯ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ, ОБЛАДНАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ.....	36
2.1 Розклад сил під час гальмування автомобіля.....	36
2.2 Ідентифікація складників процесу рекуперативного гальмування	38
2.2.1 Гальмівний момент електродвигуна	38
2.2.2 Сила опору повітря	40
2.2.3 Сповільнення транспортного засобу.....	42
2.2.4 Поздовжній профіль дороги.....	44
2.2.5 Передатні числа трансмісії.....	47
2.3 Математична модель процесу рекуперативного гальмування транспортного засобу.....	49
2.3.1 Енергетичний баланс процесу рекуперативного гальмування	49
2.3.2 Регулювання процесу рекуперативного гальмування.....	53
2.3.2.1 Регулювання процесу рекуперативного гальмування потенціометричними давачами.....	54

	3
2.3.2.2 Регулювання широтно-імпульсною модуляцією.....	57
2.3.3 Модель регульованого процесу рекуперативного гальмування	63
2.4 Керування процесом рекуперативного гальмування	64
2.5 Висновки з розділу.....	71
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ	72
3.1 Загальні умови та методика проведення досліджень.....	72
3.1.1 Умови та завдання досліджень	72
3.1.2 Параметри, які реєструються	75
3.1.3 Випробувальне устаткування для проведення експерименту.....	76
3.1.4 Методи вимірювання.....	78
3.2 Планування експерименту	80
3.3 Опрацювання результатів експерименту.....	85
3.3.1 Службове гальмування	85
3.3.2 Оцінювання невизначеності вимірювань	89
3.3.2.1 Оцінювання невизначеності ефективності гальмування	90
3.3.2.2 Оцінювання невизначеності показників енергоефективності.....	101
3.4 Регресійні математичні моделі процесу рекуперативного гальмування	104
3.5 Висновки з розділу.....	111
РОЗДІЛ 4 РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ РЕКУПЕРАТИВНОГО ГАЛЬМУВАННЯ АВТОМОБІЛЯ З ЕЛЕКТРИЧНИМ ПРИВОДОМ	112
4.1 Оцінювання результатів теоретичних та експериментальних досліджень	112
4.2 Дослідження роботи системи рекуперації.....	114
4.2.1 Ефективність гальмування.....	114

4.2.2 Рух у міському їздовому циклі	119
4.2.3 Блокування коліс автомобіля під час рекуперативного гальмування	123
4.2.4 Рух транспортного засобу з електричним приводом на затяжних спусках.....	128
4.3 Засади функціонування системи управління рекуперацією енергії гібридного автомобіля	133
4.4 Прогнозування процесів рекуперативного гальмування та підвищення їх ефективності.....	135
4.4.1 Режим роботи накопичувачів енергії.....	135
4.4.2 Пропозиції по реалізації підвищення ефективності систем рекуперації енергії.....	146
4.4.3 Прогнозовані процеси рекуперативного гальмування під час руху транспортного засобу.....	151
4.4.4 Розрахунок системи рекуперативного гальмування	151
4.5 Показники ефективності системи рекуперативного гальмування.....	152
4.6 Висновки з розділу.....	155
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	157
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	159
ДОДАТКИ.....	180

ВСТУП

Актуальність теми. На сьогодні гостріше постає питання економічного використання світових паливних ресурсів. Шляхів вирішення цього питання декілька. Одним із них є створення гібридних та електричних автомобілів. Застосування електричного приводу із застосуванням системи рекуперації енергії дає можливість поповнювати запас енергії під час руху транспортного засобу. На даний момент застосування систем рекуперації енергії найбільшого розвитку досягло в сфері міського електричного та залізничного транспорту. Однак основною відмінністю автомобілів від вказаного виду транспорту є відсутність контактної мережі, куди можна віддавати рекуперовану під час гальмування енергію. В галузі автомобільного транспорту системи рекуперації енергії почали досить активно розвиватися. Основною проблемою на сьогоднішній день є досить обмежена можливість акумулювання рекуперованої енергії. Це пов'язано з значною вартістю накопичувачів енергії та відносно малою кількістю рекуперованої енергії. Сучасні дослідження гібридних автомобілів, в основному пов'язані з моделюванням компоновальних схем, визначенням тягово-швидкісних властивостей, запасу енергії. Питання дослідження гальмівних властивостей гібридних транспортних засобів, на яких застосовано рекуперацію енергії та системи її накопичення залишається відкритим, оскільки подібні роботи в Україні ще перебувають у стадії розвитку, певні дослідження проведені Харківськими науковцями, під керівництвом професора Бажинова О.В. Також активно працюють в цьому напрямку науковці Національного транспортного університету Тімков О.М., Іванов О.С.. Серед іноземних науковців можна відмітити роботи Блохіна А.Н., Грошева А.М., Козлова Т.А., Мухамеда Рашіда (Muhammad H. Rashid).

В цілому на сьогодні залишається багато невирішених питань щодо процесу рекуперативного гальмування транспортного засобу. В зв'язку з цим дослідження систем рекуперації транспортних засобів є актуальним.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами темами. Тема дисертаційного дослідження відповідає науковому напрямку кафедри автомобілів та транспортних технологій Луцького національного технічного університету “Покращення експлуатаційних властивостей КТЗ з гібридними силовими установками”. Робота виконана в рамках реалізації транспортної стратегії України на період до 2020 року, схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 20.10.2010 року № 2174-р.

Мета роботи полягає у підвищенні ефективності енергетичних показників колісних транспортних засобів з електричним приводом у фазі сповільнення шляхом вдосконалення системи рекуперативного гальмування. У відповідності до поставленої мети визначено **задачі дослідження:**

- розробка математичної моделі процесу рекуперативного гальмування транспортного засобу, обладнаного електроприводом із застосуванням комплексного підходу, яка дозволить за заданими конструктивними параметрами прогнозувати енергетичні та гальмівні показники транспортного засобу;
- дослідження впливу конструктивних параметрів транспортного засобу та зовнішніх чинників на процес рекуперативного гальмування;
- впровадження системи рекуперації енергії на експериментальний автомобіль ГСУ-1 та забезпечення її роботи з максимальною ефективністю;
- проведення експериментальних досліджень процесу рекуперативного гальмування з метою перевірки адекватності розробленої математичної моделі;
- розробка рекомендацій спрямованих на забезпечення акумулювання максимальної кількості рекуперованої енергії під час процесу рекуперативного гальмування транспортного засобу, обладнаного електроприводом.

Об'єктом дослідження є енергетичні показники колісного транспортного засобу з електричним приводом, обладнаного системою рекуперації енергії, у фазі сповільнення.

Предметом дослідження є система рекуперативного гальмування колісного транспортного засобу з електричним приводом.

Методи досліджень, які використовуються в роботі засновані на основних положеннях теорії автомобіля та теорії експлуатаційних властивостей автомобіля щодо визначення гальмівних, тягово-швидкісних властивостей та енергоефективності, теорії електроприводу та теорії електродвигунів під час досліджень електричної складової процесу рекуперації енергії, теорії планування експерименту, математичного аналізу, дискретної математики, лінійної алгебри щодо експериментальних досліджень, теорії невизначеності вимірювань щодо оцінювання результатів експериментальних даних. Дослідження проводяться з використанням персонального комп'ютера та сучасного програмного забезпечення.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що:

- уточнено математичні моделі руху транспортного засобу в режимі рекуперативного гальмування із застосуванням комплексного підходу;
- розв'язано проблему підвищення ефективності рекуперативного гальмування транспортних засобів з електричним приводом;
- вперше досліджено механіку процесу рекуперативного гальмування;
- розроблено оціночні критерії – показники енергоефективності системи рекуперації енергії.

Достовірність результатів досліджень забезпечується коректним застосуванням математичних методів, положень теорії автомобіля, теорії електричного приводу, застосуванням сучасного відкаліброваного випробувального обладнання та устаткування, оцінюванням невизначеності вимірювань експериментальних даних, задовільною збіжністю результатів теоретичних та експериментальних даних.

Практичну цінність отриманих результатів складають

- математичні моделі руху транспортного засобу в режимі рекуперативного гальмування, які забезпечують можливість прогнозування необхідного стану накопичувачів енергії безпосередньо перед початком гальмування та

можливість розрахунків і надання рекомендацій стосовно техніко-економічних показників та експлуатаційних властивостей транспортного засобу;

- принципова схема роботи системи управління, яка забезпечить максимальні показники енергоефективності та ефективності гальмування під час руху транспортного засобу.

Реалізація роботи. Результати дисертаційних досліджень прийняті до використання в ДП «Автоскладальний завод № 1» публічного акціонерного товариства «Автомобільна компанія «Богдан Моторс»»: в системі управління тяговим електричним приводом гібридного автобуса А70522 застосовано алгоритм керування системою рекуперації енергії, показник ефективності роботи системи рекуперації енергії – коефіцієнт рекуперації застосовується з метою наладки тягового електричного привода, під час постановки продукції на виробництво; ТОВ «Спільне українсько-німецьке підприємство «Електронтранс»: під час проектування транспортних засобів після визначення їх тягово-швидкісних характеристик, застосовується в якості перевіркової, методика розрахунку системи рекуперативного гальмування, ТзОВ «Волиньстандарт»: методика оцінювання невизначеності ефективності гальмування, а також результати дисертаційних досліджень застосовуються співробітниками кафедри автомобілів і транспортних технологій під час викладання навчальних дисциплін.

Особистий внесок здобувача. Усі основні результати роботи, які виносяться на захист опубліковані у наукових працях [1 – 17], отримані здобувачем особисто.

Роботи [1, 4, 5, 10, 12, 13] виконані самостійно. В роботах у співавторстві здобувачу належать: [2] – дослідження та аналіз доцільності застосування рекуперації енергії під час руху транспортного засобу з вимкненим зчепленням; [3] – розробка математичної моделі процесу електричного гальмування транспортного засобу з гібридною силовою установкою; [6] – аналіз показників ефективності рекуперативного гальмування

транспортного засобу; [7] - розробка математичної моделі процесу електричного гальмування транспортного засобу на дорогах з низьким коефіцієнтом зчеплення; [8] – проведення експериментальних досліджень та аналіз результатів; [9] – проведення ідентифікації складових невизначеності, формування бюджету невизначеності; [11] - розробка математичної моделі процесу електричного гальмування транспортного засобу обладнаного електроприводом.

Апробація результатів роботи. Результати роботи доповідались та обговорювались на науково-технічних семінарах і наукових конференціях Луцького національного технічного університету (2011-2015 р.р.), II міжнародній науково-технічній конференції: “Науково-прикладні аспекти автомобільної і транспортно-дорожньої галузей” у Луцькому національному технічному університеті (2012 р.), XV міжнародній науково-технічній конференції: “Автомобільний транспорт: проблеми і перспективи” у Севастопольському національному технічному університеті (2012 р.), III міжнародній конференції: “Автомобіль і електроніка. Сучасні технології” у Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті (2013 р.), III міжнародній науково-технічній конференції: “Науково-прикладні аспекти автомобільної і транспортно-дорожньої галузей” у Луцькому національному технічному університеті (2014 р.), “Стратегічне планування розвитку м. Луцьк 2015 – 2030 р.р.” (2014 р.), Всеукраїнській науково-практичній конференції "Автобусобудування та пасажирські перевезення в Україні" (м. Львів, 2015).

Публікації. Основні положення та результати дисертаційної роботи опубліковано у 17 наукових працях, в т.ч. 13 - у фахових виданнях, з яких 4 у виданнях України, які входять до міжнародних наукометричних баз [5, 6, 8, 12], 4 – матеріали та тези конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота містить вступ, основну частину, яка складається з чотирьох розділів, висновки, список використаних джерел, який складає 160 найменувань на 21 сторінці. Повний

обсяг дисертації складає 198 сторінок, з яких 129 сторінок основного тексту, 57 рисунків, включаючи графіки, 34 таблиці.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ПИТАННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ АВТОМОБІЛІВ З ЕЛЕКТРИЧНИМ ПРИВОДОМ

1.1 Сучасний стан ринку транспортних засобів, обладнаних електродвигунами

Наприкінці ХХ – початку ХХІ століття через значне забруднення навколишнього середовища більшість країн почали приймати різноманітні законодавчі акти спрямовані на зменшення викидів забруднюючих речовин, під дію яких потрапили і транспортні засоби.

Цей факт, на тлі постійного зростання вартості нафти, зменшення її запасів, а також постійного підвищення рівнів екологічних стандартів, що змушує виробників вдаватися до пошуку більш дієвих методів зменшення викидів відпрацьованих газів, став поштовхом до чергового етапу розвитку проектування та виготовлення гібридних та електричних автомобілів. Сучасні наука та новітні технології дозволяють вирішити ряд питань, які у минулому гальмували розвиток екологічно чистого виду транспорту та робили його неконкурентоспроможним. Крім того досить потужний поштовх для розвитку транспортних засобів на альтернативних видах палива, зокрема електроенергії, зумовлює підвищення рівня екологічних стандартів, зменшення запасів природних ресурсів, і, як наслідок, підвищення вартості бензинових, дизельних та газових палив. Гібридні автомобілі мають свої переваги та недоліки [18], основні з яких наведено у табл. 1.1.

На сьогодні в світі є чимало компаній та підприємств, які займаються розробкою та виробництвом гібридних транспортних засобів [19]:

легкові - Toyota Motor Corporation, Nissan Motor Co., Ltd, Honda Motor Co., Ltd. (Японія), Ford Motor Company, концерн PSA Peugeot Citroën, General Motors (США);

автобуси – New Flyer Industries (Канада), Daimler Chrysler, Optima Bus Corporation (США), First Automotive Works (FAW) (Китай), Solaris Bus & Coach (Польща), APTS (Нідерланди), Optare Group (Великобританія), Nova Bus (Канада), DesignLine International Holdings (Нова Зеландія), Beiqi Foton Bus (Китай), ЛиАЗ, ТролЗа (Росія), Volvo, Blue-City Hybrid (Hyundai Motor Company);

вантажні автомобілі - Azure Dynamics (США), Nissan спільно з ZF Friedrichshafen AG (Німеччина), Alcoa спільно з Altair Nanotechnologies (США), Odyne Corporation (США), Peterbilt 386 hybrid (США) спільно з Eaton Oshkosh Truck Corp, Volvo Cars та МАС, Hino Motors (Японія), Caterpillar Inc. (США).

Таблиця – 1.1 – Переваги та недоліки гібридних автомобілів

Переваги гібридних автомобілів	Недоліки гібридних автомобілів
висока економічність	ускладнення конструкції потребує створення спеціалізованої інфраструктури обслуговування та ремонту
екологічна чистота, порівняно зі звичайними автомобілями	збільшення вартості порівняно з звичайними автомобілями
наявність двох рушіїв	дефіцит та висока вартість акумуляторів підвищеної ємності та ресурсу, а також накопичувачів енергії
можливість накопичення енергії під час гальмування	тривала зарядка батарей при поїздках на далекі відстані
менша маса та вартість акумуляторних батарей порівняно з електромобілями	дороговизна ремонту та обслуговування, зумовлена відсутністю необхідного персоналу та запасних частин

Таблиця 1.1 – Закінчення

Переваги гібридних автомобілів	Недоліки гібридних автомобілів
більший запас ходу порівняно з електромобілями	протиріччя між ефективними потужностями в тяговому та гальмівному режимах
відсутність необхідності створення розгалуженої спеціалізованої мережі заправних станцій	-

Безумовним лідером у виробництві та реалізації гібридних автомобілів є компанія Toyota. Один з перших серійних гібридних автомобілів - Toyota Prius, випуск якого розпочався у 1997 р., і уже протягом першого року виробництва було реалізовано більше 25 000 одиниць. Всього ж станом на 2013 рік [20] реалізовано понад 4 млн. автомобілів Toyota та Lexus з гібридними двигунами. В Японії протягом 2012 р. доля гібридів становила 17 % ринку, у США – 2 %, у Європі – менше 1 % [21].

Ринок автомобілів з електричним приводом продовжує зростати і на сьогоднішній день [22]. Особливо стрімко розвивається ринок транспортних засобів з електричним приводом у Норвегії [23].

Український ринок автомобілів з електричним приводом на даний момент лише формується. Перші гібридні автомобілі на територію України були ввезені 8 – 10 років тому, попитом вони почали користуватися з 2005 року. З того часу він залишається на одному рівні – 5 % від загальної кількості реалізованих автомобілів бізнес-класу, яких в Україні продається лише біля 20 одиниць [24]. Однак український ринок також активно підтримується центральними органами виконавчої влади країни. Так у 2013 році Міністерством внутрішніх справ України, для власних потреб, було закуплено 1,2 тис. одиниць гібридних автомобілів Toyota Prius [25]. За прогнозами до кінця 2015 року кількість гібридних автомобілів, які експлуатуються на території України повинна сягнути більше 500 одиниць

[26]. Виробництво гібридних автомобілів, як і електромобілів, поступово нарощує темпи, і уже на сьогодні у Європі активно ведуться роботи щодо створення та розширення інфраструктури обслуговування та ремонту гібридних та електричних автомобілів. На сьогодні з метою стимулювання та розвитку ринку гібридних автомобілів Україна до 28.02.2014 р. звільнила гібридні автомобілі об'ємом двигуна 1000...2200 см³ від обкладання митом на імпорт [27]. Також з метою стимулювання розвитку ринку автомобілів з електродвигунами компанія Mitsubishi Motors у м. Київ почала встановлення зарядних станцій для автомобілів [28]. На даний момент встановлено вже три таких електрозаправки, які нанесені на світову мапу електричних заправок [29].

В інших країнах з метою підтримки та розвитку ринку екологічно чистих автомобілів також на законодавчому рівні впроваджуються різні пільги як для власників так і для їх виробників чи імпортерів: відсутність мита, безкоштовні парковки, зменшення податків і т.п. [30]. За останньою інформацією в Україні зареєстровано законопроект, який передбачає звільнення від оподаткування транспортних засобів, обладнаних електродвигуном [31].

На сьогоднішній час, у зв'язку з глобальним потеплінням та незворотними змінами клімату Організація Об'єднаних націй у своїй доповіді звернулася до урядів усіх країн до перегляду енергетичної політики та скорочення викидів в атмосферу вуглекислого газу. Крім того ООН закликає до суттєвого зменшення використання викопних видів палива, що має відбутися до 2100 року [32].

Тож можна з впевненістю стверджувати, що стрімко розпочинається черговий етап розвитку гібридних транспортних засобів.

1.2 Принципова схема системи рекуперації енергії

На сьогоднішній день можна виділити три основних можливих варіанти компоновальних схем гібридних автомобілів за схемою підключення трансмісії [33, 34]: паралельне підключення, послідовне та послідовно-паралельне (комбіноване). При паралельному підключенні ДВЗ та електричний рушій підключаються паралельно, і обидва двигуни передають сумарний крутний момент на ведучі колеса.

Послідовне підключення трансмісії характеризується відсутністю кінематичного зв'язку між двигуном внутрішнього згоряння та ведучими колесами. ДВЗ служить лише для забезпечення транспортного засобу електричною енергією, а електричний двигун забезпечує рух автомобіля.

Послідовно-паралельна схема підключення поєднує в собі обидві вищеописані системи для максимальної реалізації переваг обох систем.

Крім того, можна класифікувати гібридні автомобілі за: схемою підключення приводу, накопичувачами енергії, джерелами енергії і т.п. Зазначена класифікація наведена на рис. 1.1.

Оптимальним варіантом є застосування комбінованої схеми підключення трансмісії, оскільки така схема дозволяє здійснювати рух як з використанням усіх рушіїв, так і з одним, який забезпечить оптимальні режими. Послідовно-паралельна схема, крім двигунів, складається також з блоку суперконденсаторів та/або блоку акумуляторів, які слугують накопичувачами енергії. Суперконденсатор або початковий накопичувач енергії спроможний за короткий проміжок часу накопичити значний обсяг енергії, а блок акумуляторів дозволить здешевити конструкцію транспортного засобу [1].

Для можливості поповнення запасу енергії транспортний засіб обладнаний системою рекуперації енергії, тобто під час гальмування електричний двигун переходить в режим генератора та починає виробляти електричну енергію, яка подається в накопичувачі.



Рисунок 1.1 – Класифікація гібридних автомобілів

На рис. 1.2 наведено принципову схему системи рекуперації енергії гібридного автомобіля, яка складається з двигуна внутрішнього згоряння, що використовується за відсутності запасу електроенергії у накопичувачах енергії або під час руху в швидкісних режимах. При здійсненні гальмувань під час руху у блоці аккумуляторів, за рахунок рекуперації, накопичується електроенергія, яка використовується: для руху транспортного засобу за рахунок тягового електричного двигуна, для підзарядки аккумуляторів, направляється у бортову систему автомобіля для забезпечення роботи освітлювальних пристроїв, запалення та інших пристроїв, для живлення додаткових споживачів автомобіля таких як кондиціонер, аудіо пристрої і т.п. Запас енергії аккумуляторної батареї застосовується для живлення бортової системи автомобіля: системи запалювання ДВЗ, пристроїв освітлення, сигналізації тощо, тобто працездатність систем транспортного

засобу, які гарантують безпечну участь автомобіля у дорожньому русі. Таким чином дана схема забезпечує максимальний обсяг накопичуваної енергії, роботу транспортного засобу лише за рахунок енергії накопиченої у суперконденсаторах, акумуляторна батарея застосовується в даному випадку, як резервне джерело живлення, крім цього автомобіль обладнується додатковою системою гальмування.

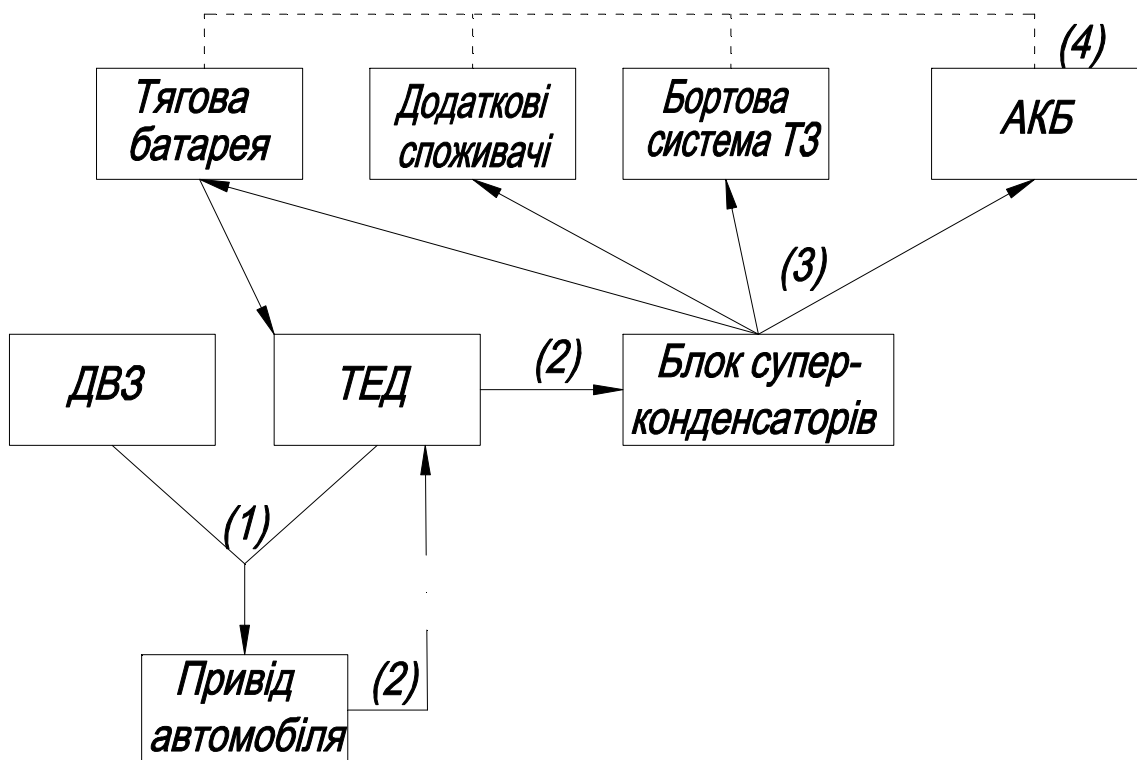


Рисунок 1.2 – Принципова схема системи рекуперації енергії гібридного автомобіля. Умовні позначення:

ДВЗ – двигун внутрішнього згоряння;

ТЕД – тяговий електричний двигун;

АКБ – акумуляторна батарея;

1 – розподілюючий пристрій, який забезпечуватиме роботу автомобіля від ДВЗ, ТЕД або обох двигунів;

2 – рекуперація електричної енергії під час гальмування;

3 – розподіл енергії для живлення систем автомобіля;

4 – використання АКБ за відсутності енергії у суперконденсаторах.

Важливим моментом даної схеми є адекватний алгоритм роботи системи управління розподілом електричної енергії та достовірний алгоритм передбачення техніко-експлуатаційних показників транспортного засобу під час здійснення наступного гальмування.

1.3 Гальмівні системи та рекуперація енергії

Процес електричного гальмування широко застосовується та досить добре вивчений на міському електричному та залізничному транспорті. Питання дослідження гальмівних властивостей гібридних транспортних засобів, на яких застосовано рекуперацію енергії та системи її накопичення залишається відкритим, оскільки подібні дослідження в Україні ще практично не проводилися, певні дослідження проведені Бажиновим О.В., Смирновим О.П., Двадненком В.Я., Серіковим С.А. [33, 35]. Інформація щодо здійснення фундаментальних досліджень зазначеного питання іноземними науковцями також відсутня, оскільки компанії, які випускають гібридні автомобілі, ще не готові до розкриття таємниць.

Використання рекуперації енергії має тісний взаємозв'язок з гальмівними властивостями транспортного засобу. Так, на електричному транспорті – тролейбусах, трамвайних вагонах, які обладнані системою рекуперації енергії, під час гальмування водії практично не використовують механічних гальм, тобто величина сповільнення, необхідного для зменшення швидкості транспортного засобу досягається лише за рахунок рекуперативного гальмування. В даному випадку електроенергія повертається у контактну мережу, а за відсутності контактної мережі необхідно створити таку систему гібридного автомобіля, щоб мінімізувати втрати енергії (механічної, електричної, теплової) та забезпечити її накопичення і подальше ефективне використання.

Для проведення досліджень системи рекуперативного гальмування, необхідно визначити її місце в гальмівній системі транспортного засобу. На рис. 1.3 наведено різні класифікації типів гальмівних систем.

Згідно наведеної схеми система електричного гальмування є одним з елементів робочої гальмівної системи та може застосовуватися в якості допоміжної системи гальмування.

Конструкція транспортного засобу із застосуванням електричного гальмування з рекуперацією енергії практичного втручання у гальмівну не потребує. Однак, фактично транспортний засіб обладнується додатковою гальмівною системою. Таким чином, процес гальмування транспортного засобу доповнюється ще одним складником – електричним гальмуванням.

Згідно Правил ЄЕК ООН № 13 [36] або Правил ЄЕК ООН № 13-Н [37], для класифікації системи рекуперативного гальмування в якості робочої або допоміжної необхідно, щоб вона забезпечувала ефективність гальмування, приписану для відповідної системи. З досвіду випробувань систем електричного гальмування міського електричного транспорту відомо, що ефективність електричного складника робочої гальмівної системи становить лише близько $1,2 \text{ м/с}^2$. Вимоги щодо допоміжної гальмівної системи для транспортних засобів категорії М1 у вказаних вище нормативних документах відсутні. Разом з тим, згідно визначення ДСТУ 2919 [38] (3.5) допоміжна гальмівна система – гальмівна система, призначена для зниження швидкості руху транспортного засобу та обмеження її на спуску.

Таким чином, можна констатувати, що у нормативних документах (ДСТУ 2919 [38] та ДСТУ 2886 [39]), які встановлюють терміни та визначення щодо гальмівних систем та властивостей у сфері автотранспортних засобів відсутні стандартизовані терміни, відносно рекуперативного гальмування та конструкції даної системи.

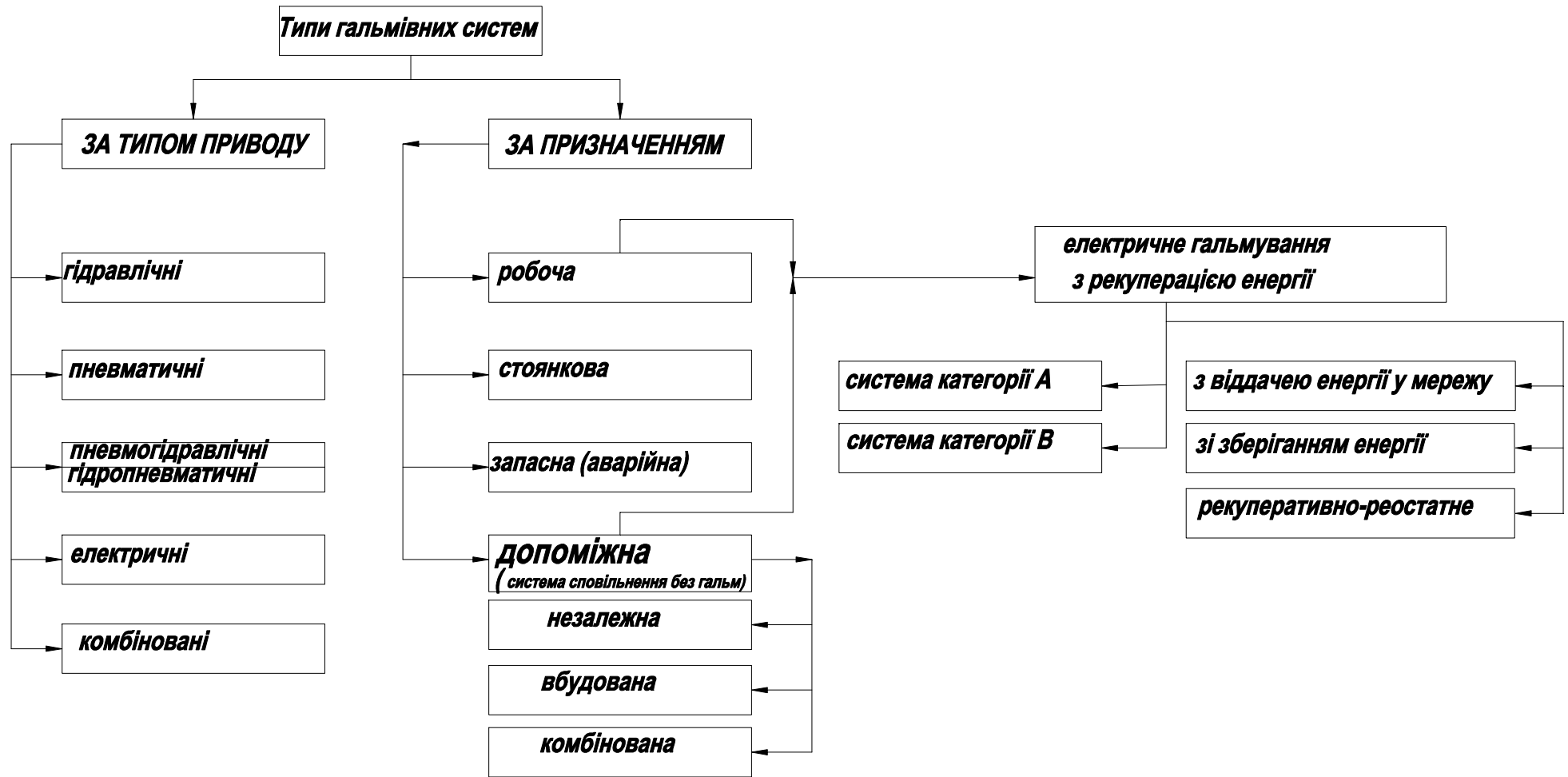


Рисунок 1.3 – Типи гальмівних систем

З метою чіткого розуміння конструкції, процесів та явищ, які відбуваються під час рекуперативного гальмування, можна сформулювати певні терміни та визначення, взявши до уваги термінологію, у галузі електротранспорту:

- додаткова гальмівна система - гальмівна система, призначена для створення додаткової гальмівної сили поза контактом колеса з опорною поверхнею та підвищення ефективності гальмування;

- електричне гальмування – процес гальмування, внаслідок якого двигун переходить з тягового режиму в режим генератора та виробляє електричну енергію;

- електричний складник гальмівної системи – система електричного гальмування, яка приводиться в дію та діє одночасно з робочою гальмівною системою. Час дії електричного складника може бути меншим, ніж відповідний час робочої гальмівної системи.

- механічний складник гальмівної системи – елемент системи робочої гальмівної системи, який діє виключно за допомогою кінематичного зв'язку гальмівного приводу та коліс транспортного засобу.

Стосовно систем рекуперативного гальмування Правила ЄЕК ООН № 13-Н [37] встановлюють вимоги щодо:

- конструкції системи (п.п. 5.2.7, 5.2.10, 5.2.18);
- ефективності та процедури випробувань системи робочого гальмування, з врахуванням рекуперативного гальмування;
- ефективності та процедури випробувань при імітації несправності системи рекуперативного гальмування;
- процедури контролювання ступеня зарядженості батарей.

Разом з тим вказані нормативні документи не регламентують вимоги щодо ефективності систем рекуперативного гальмування, а також виключають можливість застосування системи рекуперативного гальмування в якості антиблокувальної системи.

На сьогодні існує два типи або категорії систем рекуперативного гальмування, означення яких наведено у європейських нормативних документах [36, 37]:

- категорія А – електрична система рекуперативного гальмування, яка не являється частиною робочої гальмівної системи;
- категорія В - електрична система рекуперативного гальмування, яка являється частиною робочої гальмівної системи.

Основною відмінністю цих двох категорій гальмівних систем є їх спосіб приведення в дію. Якщо приведення в дію системи рекуперативного гальмування категорії А відбувається задіюванням педалі гальм, то система рекуперативного гальмування категорії В приводиться в дію шляхом виведення педалі акселератора у нульове положення або важеля перемикачів коробки передач у нейтральне положення. У випадку застосування системи рекуперації категорії В в більшості випадків електричний двигун вироблятиме електричну енергію під час руху накатом. Дана система управління має як свої переваги – дозволяє збільшити кількість рекуперованої енергії, так і певні недоліки – зменшується шлях вибігу транспортного засобу, що змушує водія більше використовувати джерела енергії. Більш детально доцільність застосування рекуперації енергії під час руху транспортного засобу розглянуто у [2].

Крім того системи рекуперації електричної енергії, за способом дії поділяються на три типи [40]:

- реостатне гальмування, при якому уся рекуперована енергія передається у гальмівні реостати, де перетворюється у теплову та віддається навколишньому середовищу;
- рекуперативне, при якому уся рекуперована енергія передається у накопичувачі або у контактну мережу (у випадку міського електричного транспорту), де накопичується та використовується під час подальшого руху;
- рекуперативно-реостатне, при якому реостати застосовуються у випадках, коли накопичувачі енергії неспроможні відбирати

рекуперовану енергію. Зазвичай така схема застосовується на міському електричному та залізничному транспорті, оскільки верхня межа напруги контактної мережі чітко регламентована стандартами різних країн.

Згідно іншої класифікації, за принципом роботи електродвигуна, розрізняють наступні генераторні режими його роботи [41, 42]:

- рекуперативне гальмування - генераторний режим роботи електродвигуна, при якому механічна енергія перетворюється в електричну та акумулюється у накопичувачах енергії.

- реверсивний – генераторний режим роботи електродвигуна, при якому він обертається у напрямку, протилежному до того, для якого ввімкнені його обмотки;

- динамічне гальмування - генераторний режим роботи електродвигуна, при якому механічна енергія перетворюється в електричну та витрачається у замкнутому контурі, електрично не пов'язаним з мережею.

1.4 Аналіз останніх досліджень

Досить стрімкий підйом та таке ж швидке згасання інтересу до гібридних та електричних транспортних засобів, за весь час розвитку цього напрямку автомобілебудування, призвело до їх досить обмеженого випуску, що в свою чергу відіграло роль у вивченні їх експлуатаційних властивостей.

Аналіз джерел свідчить про те, що основна маса досліджень останніх двох десятиліть спрямована:

- щодо теорії гальмування – на дослідження, вдосконалення, оптимізацію процесів гальмування [43 – 57], покращення конструкції гальмівних систем автомобілів [58 – 65] та підвищення безпеки транспортних засобів [66 – 69], вдосконалення методів випробувань [70];

- щодо гібридних транспортних засобів - на розробку [71 – 75], вдосконалення енергосилових установок [76], їх систем управління [77],

дослідження їх роботи, підвищення ефективності [78], а також підвищення їх економічності за рахунок застосування електричних рушіїв [79, 80].

Однак питання рекуперації енергії досить активно розглядається та вивчається у сфері міського електричного транспорту, залізничного транспорту та у різноманітних як стаціонарних так і пересувних машинах, механізмах [81, 82]. Наприклад: вантажопідіймальне обладнання, судноплавні засоби і т.п.). Найбільш вивчене питання рекуперативного гальмування у галузі міського електричного та залізничного транспорту. Характерною особливістю застосування електричного гальмування з рекуперацією енергії є принцип віддачі рекуперованої енергії у контактну мережу або, у випадку максимального значення напруги контактної мережі, у гальмівні реостати, з подальшим перетворенням її у теплову енергію.

Системи рекуперації енергії у міському електричному транспорті розглянуті з точки зору характеристик тягових електродвигунів у роботі Вешеневського С.Н. [41], разом з тим практично відсутні дослідження гальмівних характеристик транспортних засобів із системами рекуперації енергії.

Слід зазначити, що під час руху тролейбусів на маршрутах водіями у 90 % випадках застосовується режим рекуперативного гальмування, а сам процес руху характеризується режимом “розгін - вибіг”.

Під час випробувань тролейбусів виробництва ДП “Автоскладальний завод № 1” Акціонерного товариства ”Автомобільна компанія “Богдан Моторс”, Львівського автобусного заводу, Спільного українсько-німецького підприємства “Електрон”, акціонерного товариства “Бориспільський автобусний завод” було встановлено, що при русі у міському циклі, під час рекуперативного гальмування у контактну мережу може бути повернуто до 30 % електричної енергії. Цей показник зумовлений особливостями конструкції систем управління тяговими двигунами та характеристиками контактної мережі. Згідно [83] та ДСТУ 4905 [84] напруга контактної мережі не повинна перевищувати 720 В. Так під час рекуперативного гальмування тролейбусом

відбувається підвищення напруги в контактній мережі до нормативного значення, після чого уся надлишкова енергія направляється у гальмівні реостати. Таким чином значна кількість рекуперованої енергії перетворюється в теплову та втрачається, а даних щодо кількості рекуперованої енергії, яка вироблена тяговим електричним двигуном немає.

Під час випробувань тролейбуса Т 70115 на маршруті Сімферополь – Алушта – Ялта з метою визначення витрат енергії, було встановлено, що протягом поїздки транспортним засобом було повернуто у контактну мережу близько 12 % спожитої енергії. Аналогічні показники наведені російськими вченими у [85]. На рисунку 1.4 видно, що фактично транспортним засобом вироблено значно більше енергії, ніж віддано у контактну мережу. Показник рекуперації енергії є досить низьким, що обумовлюється особливостями роботи контактної мережі та системи управління тролейбуса, описаними вище.

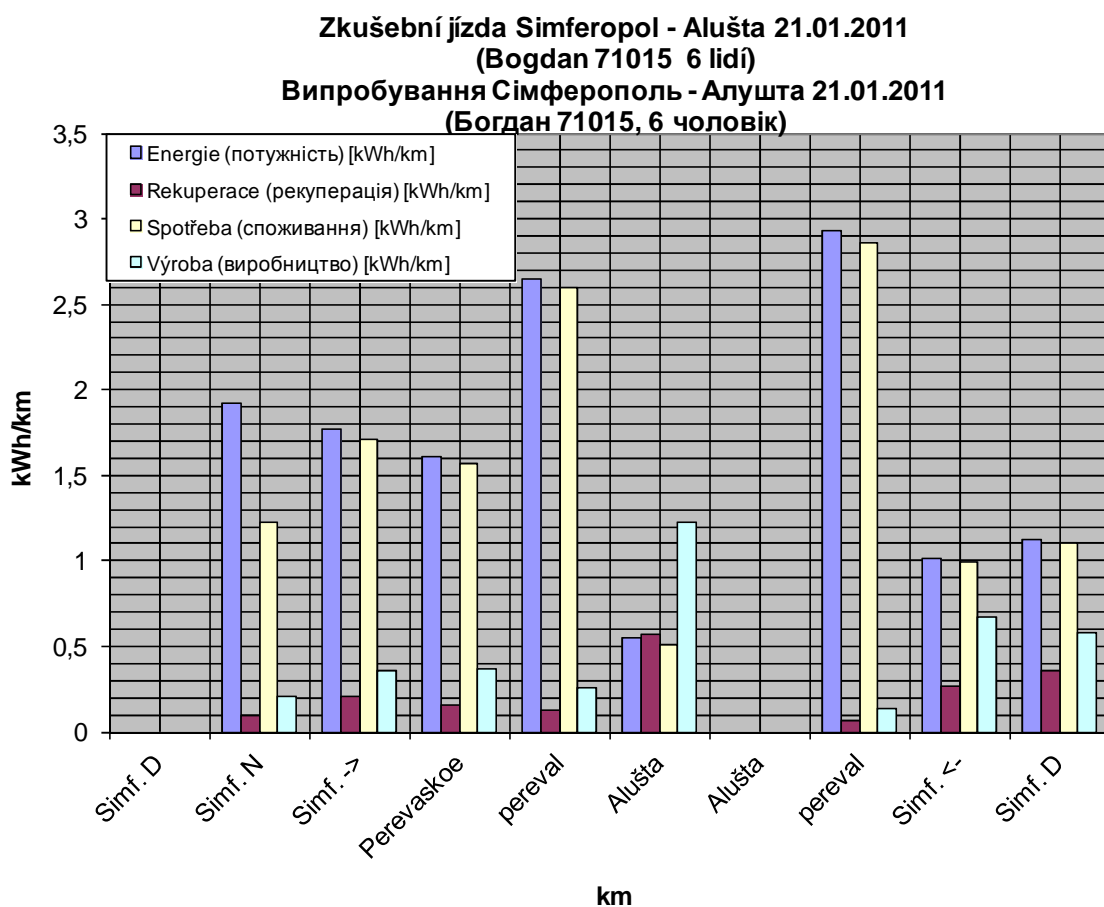


Рисунок 1.4 – Діаграма енергетичних показників тролейбуса Т 70115, під час його експлуатації на маршруті Сімферополь – Алушта – Сімферополь

Важливою відмінністю гібридного транспортного засобу від міського електричного та залізничного транспорту є відсутність контактної мережі, куди можна було б віддавати рекуперовану енергію. На сьогодні у гібридних транспортних засобах застосовуються різноманітні акумулятори або суперконденсатори для накопичення рекуперованої електричної енергії [86]. І хоча на застосування суперконденсаторів значно підвищує вартість транспортного засобу, цьому питанню також приділяється увага науковців [87, 88], адже при значному серійному виробництві вартість продукції зазвичай знижується. Досить активно ведуться роботи по розробці нових видів акумуляторів. Основна увага при цьому приділяється їх ємності та часу зарядки, який на сучасному етапі зменшений від кількох годин до кількох десятків хвилин. Цікавою є розробка американського виробника шин Goodyear, який на міжнародному автосалоні в Женеві прототип шин, які можуть заряджати акумуляторні батареї, за рахунок тепла, виробленого під час руху автомобіля [89].

Фундаментальні дослідження гібридних та електричних автомобілів проведені науковцями університету Західної Флориди [90]. У цій роботі автори досить детально розглядають систему рекуперативного гальмування як окремо так і в комплексі з механічним складником, застосування системи у різних міських їздових циклах. Основним критерієм ефективності системи рекуперативного гальмування є значення середнього сповільнення. Автори наводять залежності потужності гальмування в порівнянні зі швидкістю автомобіля для різних міських їздових циклів (див. рис. 1.5).

Крім того, проведено дослідження щодо розподілу рекуперованої енергії залежно від початкової швидкості гальмування та наведено відповідну діаграму (рис. 1.6).

Також авторами, на основі аналізу даних міського їздового циклу та вимог Правил ЄЕК ООН № 13, Правил ЄЕК ООН № 13-Н [36, 37], наводиться загальна стратегія управління електродвигуном для оптимального відновлення енергії (рис. 1.7).

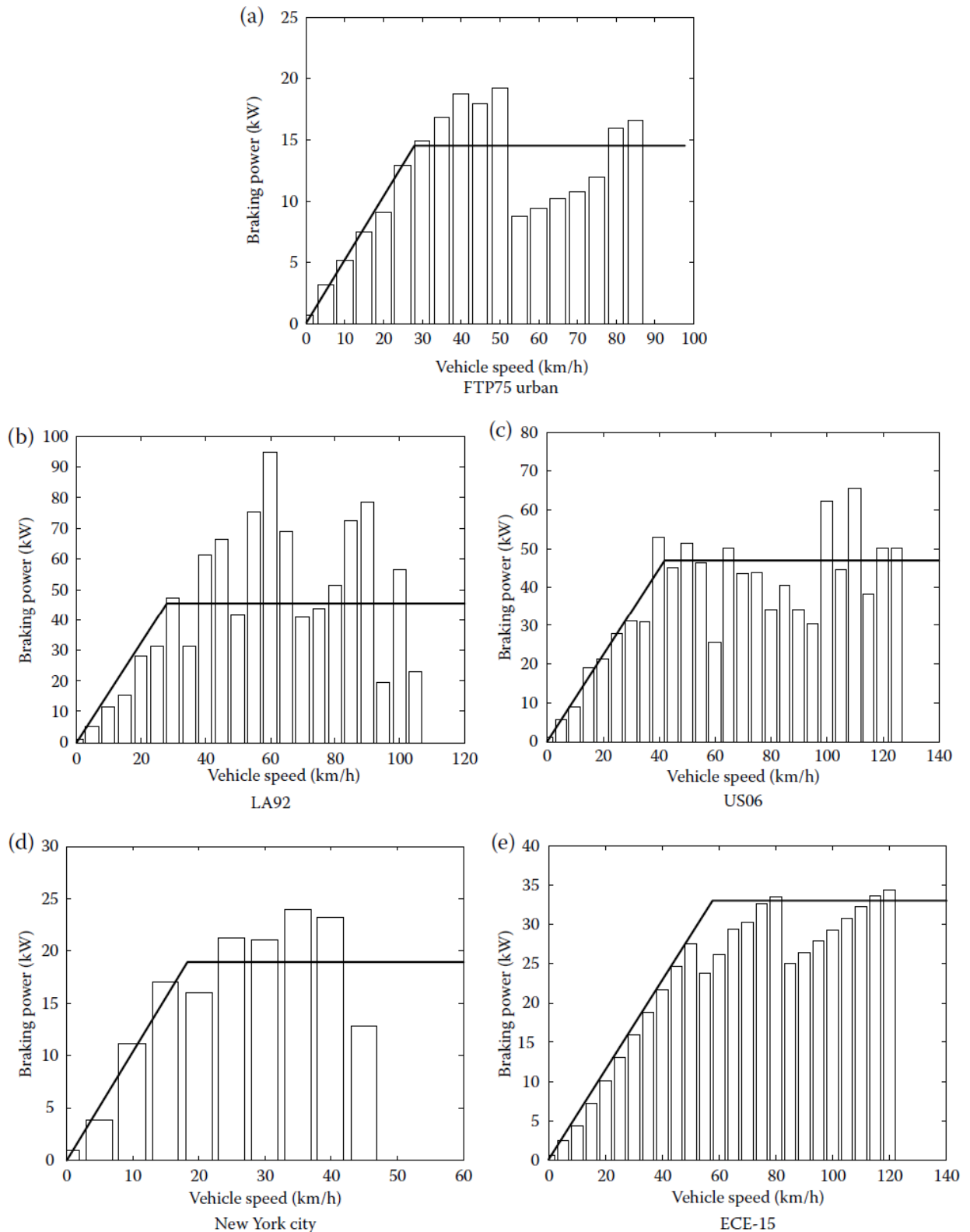


Рисунок 1.5 – Діаграми потужностей гальмування в порівнянні з швидкістю автомобіля в типових міських їздових циклах (по осі абсцис відкладено швидкість автомобіля, по осі ординат – потужність гальмування):

(а) FTP75, (б) LA92, (с) US06, (д) міста Нью-Йорк, (е) ECE-15

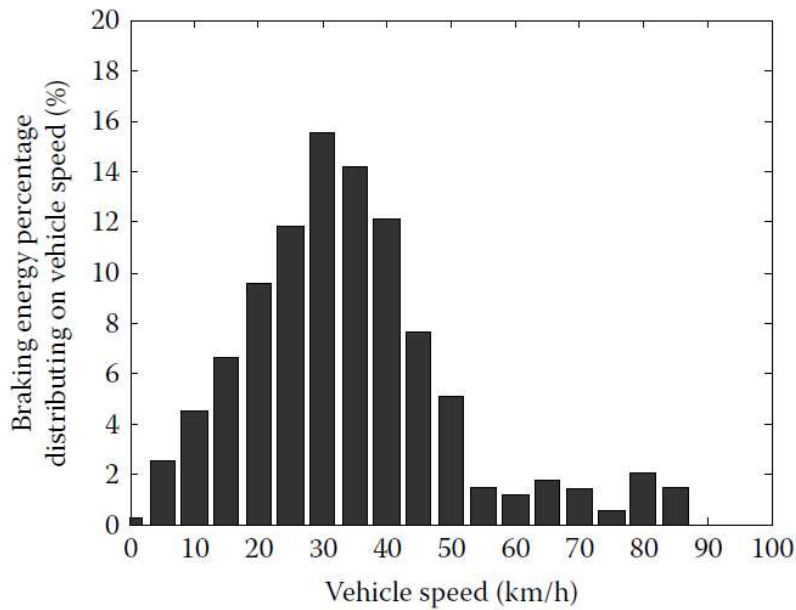


Рисунок 1.6 – Діаграма розподілу енергії, яка рекуперується електродвигуном, залежно від початкової швидкості гальмування (по осі абсцис відкладено швидкість автомобіля, по осі ординат – розподіл відсотків енергії гальмування по швидкостям)

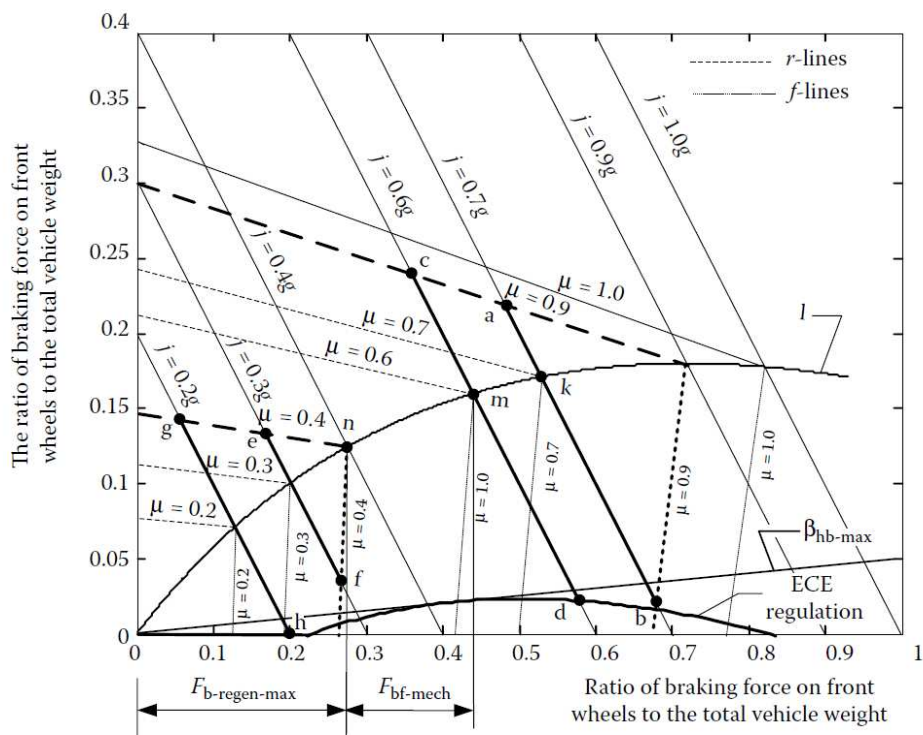


Рисунок 1.7 – Стратегії управління для оптимального відновлення енергії (відношення гальмівних сил передньої осі автомобіля до загальної маси транспортного засобу)

Згідно наведених даних, система рекуперативного гальмування може забезпечити сповільнення транспортного засобу близько $0,15g$, що становить близько $1,4 \text{ м/с}^2$.

Таким чином у цій роботі розглядаються лише основні принципи рекуперативного гальмування, до того ж рекуперативне гальмування не виокремлюється, а розглядається в комплексі з механічним складником гальмівної системи. Окрім того в роботі показники ефективності зазначаються у відносних величинах, а також відсутня модель розрахунку показників ефективності системи рекуперативного гальмування.

Необхідно також відмітити роботу російських вчених [91]. Науковцями проведена робота щодо розробки, створення та дослідження характеристик електромобіля на базі шасі “ГАЗель”. В цій роботі проведено компонування транспортного засобу, проведено тяговий розрахунок та визначено затрати енергії. Визначення затрат енергії проведено з врахуванням роботи системи рекуперації енергії. Витрата енергії визначена за наступною залежністю:

$$W = W_B - W_P = \frac{\int P_{M_тяг} dt}{\eta_{M_тяг} \cdot \eta_{B_разр}} - \eta_{B_зар} \cdot \eta_{M_ген} \cdot \int P_{M_ген} dt, \quad (1.1)$$

де W – кількість енергії;

P_M - потужність на валу електродвигуна;

η_B - степінь використання акумуляторної батареї (накопичувача енергії);

η_M - ККД електродвигуна.

Індекси *тяг* та *ген* - відповідно тяговий та генераторний режим електродвигуна.

Індекси *разр* та *зар* - відповідно режими розряду та заряду акумуляторної батареї.

При цьому визначається лише загальна витрата енергії транспортним засобом, а кількість рекуперованої енергії не виділяється як окремий показник. Кількість рекуперованої енергії є досить важливим показником з точки зору конструкції та експлуатації автомобіля. Адже цей показник необхідний при:

- розрахунку ємності накопичувачів енергії;
- розрахунку стану (ступеня зарядки) накопичувачів енергії під час експлуатації транспортного засобу;
- оцінювання адекватності математичних моделей процесу рекуперативного гальмування автомобіля з рекуперацією енергії перед їх впровадженням у систему управління електротягою транспортних засобів.

Окрім того, система рекуперації енергії не розглядається як елемент гальмівної системи транспортного засобу, а також відсутні дослідження її впливу на гальмівні властивості автомобіля.

Варто зазначити, що на сьогодні питання рекуперації енергії розглядається в досить широких аспектах. Так, наприклад, науковцями НАМІ розглядається розрахунок балансу потужності комбінованої енергоустановки гібридного автомобіля [92]. Однак в даній роботі, як і в більшості інших, система рекуперації енергії розглядається лише з точки зору акумуляції рекуперованої енергії, а вплив рекуперації енергії на гальмівні характеристики автомобіля не вивчається.

Значна робота у вивченні та дослідженні гібридних та електричних транспортних засобів також проведена українськими науковцями. Як уже зазначалося вище, вченими Харківського національного автомобільно-дорожнього університету Бажиновим О.В., Смирновим О.П., Двадненко В.Я., Серіковим С.А. проводяться роботи по вдосконаленню та оптимізації систем управління електричними двигунами, а також розробці синергетичних систем автомобілів з електричним приводом [33, 35, 93 – 99].

Також, варто відмітити вклад науковців Національного транспортного університету у розвиток електричних та гібридних автомобілів [100 – 104]. Ці

роботи також в основному спрямовані на розробку вдосконалення систем управління гібридними силовими установками. Значна увага приділяється також вибору параметрів гібридної силової установки [105].

Також Європейський союз докладає значні зусилля для вдосконалення конструкцій так званих “зелених автомобілів”. Так, наприклад: на сьогоднішній день виділяються значні кошти [106], які повинні бути спрямовані на:

- вдосконалення конструкцій гібридних та електричних автомобілів;
- оптимізацію систем управління тяговими двигунами та накопичувачами енергії;
- створення модульних блоків систем накопичення енергії;
- зменшення вартості та маси автомобілів;
- створення конструкцій суперлегких гібридних та/або електричних автомобілів, призначених для експлуатації в умовах міста.

В цих проектах важливе місце займають системи рекуперації енергії.

Система рекуперації енергії, зазвичай, розглядається лише як спосіб накопичення енергії, а керування цією системою здійснює система управління тяговим двигуном. Так у [107] проведено аналіз основних проблем, які виникають при створенні систем рекуперації енергії, обґрунтовано принципи вибору накопичувача енергії, проведено експериментальні дослідження, та встановлено необхідність застосування накопичувачів енергії з високими питомими потужностями та енергетичними показниками, а також, як варіант пропонується застосування комбінованої системи накопичення, яка складається з високо потужних конденсаторів та тягових батарей.

У роботі [108] колективу науковців Харківського національного автомобільно-дорожнього університету наведено систему рекуперативного гальмування, ефективність роботи якої забезпечується за рахунок використання повної напруги електродвигуна [109].

Однак, у вищезазначених роботах не враховується вплив системи рекуперації енергії на гальмівні властивості автомобіля.

Вченими Тегеранського університету проведено дослідження системи рекуперації енергії з точки зору властивостей гальмівної системи [110], але при цьому, не проводиться оцінка ефективності системи рекуперації за кількістю рекуперованої енергії. Розгляд системи рекуперативного гальмування, як одного з елементів гальмівної системи наводиться також у [111 – 122].

В загальному процес рекуперативного гальмування можна умовно розділити на дві частини:

- електричну, в якій процесом повністю керує система управління тяговим двигуном та коректує процеси залежно від зовнішніх факторів та конструкції транспортного засобу;
- механічну, коли процес рекуперативного гальмування здійснюється без втручання електронної системи управління і усі процеси залежать лише від зовнішніх факторів та конструкції транспортного засобу.

На перший погляд вивчення механічної частини процесу може здатися недоцільним, однак це не так. Характеристики механіки процесу рекуперативного гальмування можуть бути застосовані:

- під час програмного керування тяговим двигуном, система його управління повинна враховувати механічну складову;
- під час проектування та вдосконалення транспортних засобів (вибір тягових двигунів, передатних чисел, кількості, ємності та способу підключення накопичувачів енергії і т.п.);
- з метою встановлення експлуатаційних показників транспортних засобів, а саме витрати енергії, гальмівних властивостей.

Як доводять дослідження найбільш доцільним застосування електричних та гібридних транспортних засобів є в умовах міських режимів руху, оскільки ряд різноманітних факторів, таких як перехрестя, світлофори, дорожня обстановка і т.п., спричиняє часті розгони та гальмування автомобіля [123]. Крім того міський режим руху дозволяє досить ефективно застосовувати систему “СТАРТ-СТОП”, яка за рахунок вимкнення двигуна внутрішнього

згоряння під час зупинок забезпечує зменшення витрати палива та шкідливих викидів у атмосферу [124].

Даний факт зумовив необхідність проведення досліджень щодо режимів руху автомобіля в умовах міста. Дослідження проводилися у місті Луцьку, під час руху легковим транспортним засобом. При цьому враховувалися результати лише службових гальмувань, тобто гальмувань з контрольованим сповільненням у нормальних умовах. До уваги не приймалися випадки екстрених гальмувань, які були зумовлені необхідністю забезпечення безпеки руху.

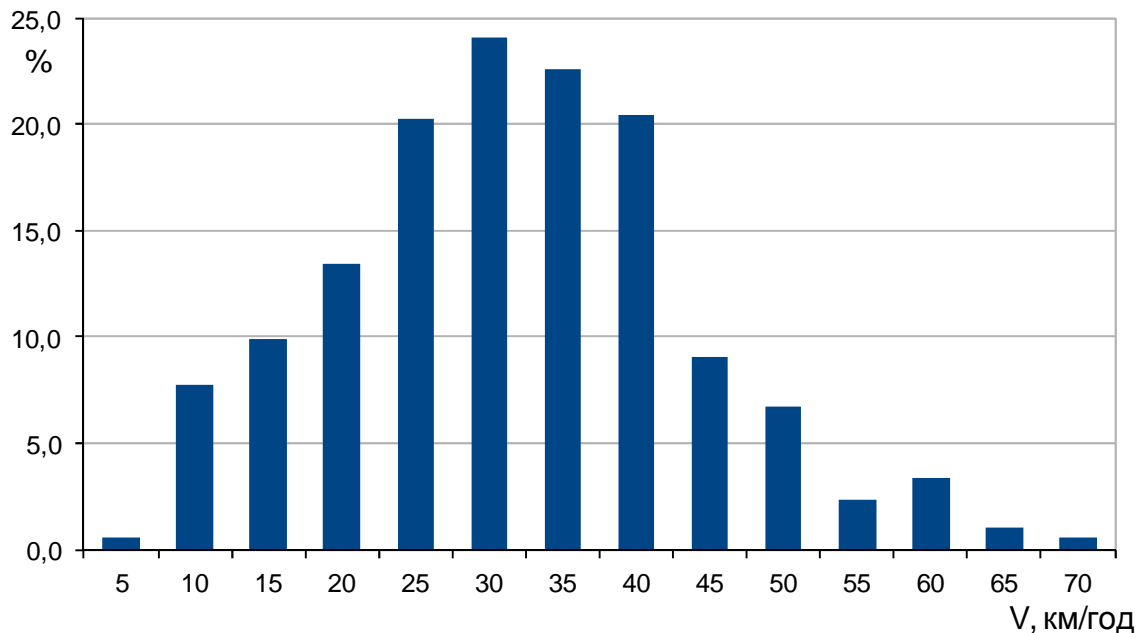


Рисунок 1.8 – Діаграма розподілу зміни швидкостей транспортного засобу під час гальмування у міському режимі руху

З наведеної на рис. 1.8 діаграми можна встановити, що у більшості випадків зміна швидкості в межах 10...40 км/год. Як свідчать розрахунки, під час зміни швидкості на 10 км/год може вивільнитися більше 2500 Дж кінетичної енергії. Під час такого руху, на 10 км шляху може здійснюватися до 15 таких гальмувань різної інтенсивності. Таким чином, можна стверджувати, що під час гальмування транспортного засобу у місті на кожних 100 км шляху втрачається близько 1 МДж кінетичної енергії. Враховуючи, що теплота

згоряння 1 кг палива становить близько 42 МДж енергії, на перший погляд втрати кінетичної енергії під час гальмування є досить мізерним показником, однак, якщо врахувати, що при цьому, рівень викидів шкідливих речовин практично рівний 0, то можна відмітити, що застосування рекуперативного гальмування на транспортних засобах призводить до зменшення шкідливих викидів відпрацьованих газів у навколишнє середовище, а накопичення енергії під час гальмування покращує показники паливної економічності та запас ходу автомобіля. Крім цього застосування рекуперативного гальмування дозволяє до 40 % зменшити навантаження на деталі гальмівної системи та, відповідно, подовжити її ресурс, що позитивно впливатиме на затрати, пов'язані з обслуговуванням та ремонтом гальмівних систем транспортних засобів.

Наведені на рис. 1.6 та 1.8 діаграми в цілому мають однаковий характер розподілу, що свідчить про збіжність результатів досліджень проведених за міським їздовим циклом FTP75 та експериментальних досліджень у м. Луцьк.

Під час проведення досліджень в умовах руху вулицями міста Луцьк, було встановлено, що у більш як 90 % випадках дорожні обставини дозволяють водієві здійснювати поступове гальмування, таким чином, щоб мінімізувати застосування механічної частини робочої гальмівної системи. Однак важливим фактором тут є стиль водіння та навички водія [14, 15].

У більшості розглянутих робіт стосовно досліджень систем рекуперації енергії можна відмітити, що зазначена система розглядається або в якості елемента гальмівної системи або як засіб поповнення запасу енергії, відсутній єдиний підхід до визначення оптимальних показників рекуперативного гальмування. Зважаючи на сучасні тенденції засновані на комплексному підході до досліджень складних систем транспортного засобу, враховуючи синергетичний ефект, який виникає під час застосування системи рекуперації енергії, постає задача комплексного вивчення системи рекуперації енергії та її властивостей.

1.5 Висновки з розділу

1. Проведено аналіз стану сучасного ринку електричних та гібридних транспортних засобів та встановлено тенденцію до постійного збільшення кількості автомобілів, обладнаних електричними тяговими двигунами та системами рекуперативного гальмування

2. Аналіз останніх досліджень у сфері електричних та гібридних транспортних засобів та гальмівних систем і властивостей автомобілів свідчить про відсутність фундаментальних досліджень системи рекуперації енергії з комплексним підходом

3. Застосування системи рекуперативного гальмування з рекуперацією енергії призводить до покращення показників паливної економічності автомобіля, гальмівних властивостей, зменшення навантаження на гальмівну систему, покращення екологічних показників, а також зменшення затрат на ремонт та обслуговування гальмівної системи транспортного засобу

4. Вирішення питання застосування рекуперативного гальмування повинно базуватися на детальному дослідженні системи рекуперації енергії, як з точки зору накопичення енергії, так і з точки зору гальмівних властивостей транспортного засобу.

РОЗДІЛ 2
РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ
РЕКУПЕРАТИВНОГО ГАЛЬМУВАННЯ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ,
ОБЛАДНАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

2.1 Розклад сил під час гальмування автомобіля

Рух автомобіля під час гальмування описується рівнянням силового балансу для випадку гальмування колісного транспортного засобу [125 – 128]:

$$P_j = P_w + P_f + P_\tau \pm P_h, \quad (2.1)$$

де P_j – сила інерції автомобіля;

P_w – сила опору повітря;

P_τ – гальмівна сила автомобіля;

P_h – сила опору підйому;

P_f – сила опору кочення.

Розклад сил, які діють на транспортний засіб під час гальмування наведена на рис. 2.1.

Оскільки розглядається процес рекуперативного гальмування, то гальмівна сила автомобіля матиме два складники: електричний та механічний:

$$P_\tau = P_{\tau m} + P_{\tau e} \quad (2.2)$$

де $P_{\tau m}$ – гальмівна сила, яка створюється при гальмуванні механічними гальмами. У випадку, якщо розглядається лише процес рекуперативного гальмування $P_{\tau m} = 0$;

$P_{\tau e}$ – гальмівна сила, яка створюється електричним двигуном, в режимі рекуперації енергії.

Гальмівна сила автомобіля, при рекуперативному гальмуванні, визначатиметься, як і у випадку автомобіля з двигуном внутрішнього згорання, через гальмівний момент, який створюється електродвигуном, що працює в режимі генератора, за залежністю [129]:

$$P_{\tau e} = \frac{M_{\tau e} \cdot u_{mpe}}{r_k \cdot \eta_{mp.e}}, \quad (2.3)$$

де, $M_{\tau e}$ – крутний момент генератора;

u_{mpe} – передатне число трансмісії електричного привода;

$\eta_{mp.e}$ – коефіцієнт корисної дії трансмісії, який має місце під час здійснення рекуперативного гальмування;

r_k – радіус кочення колеса.

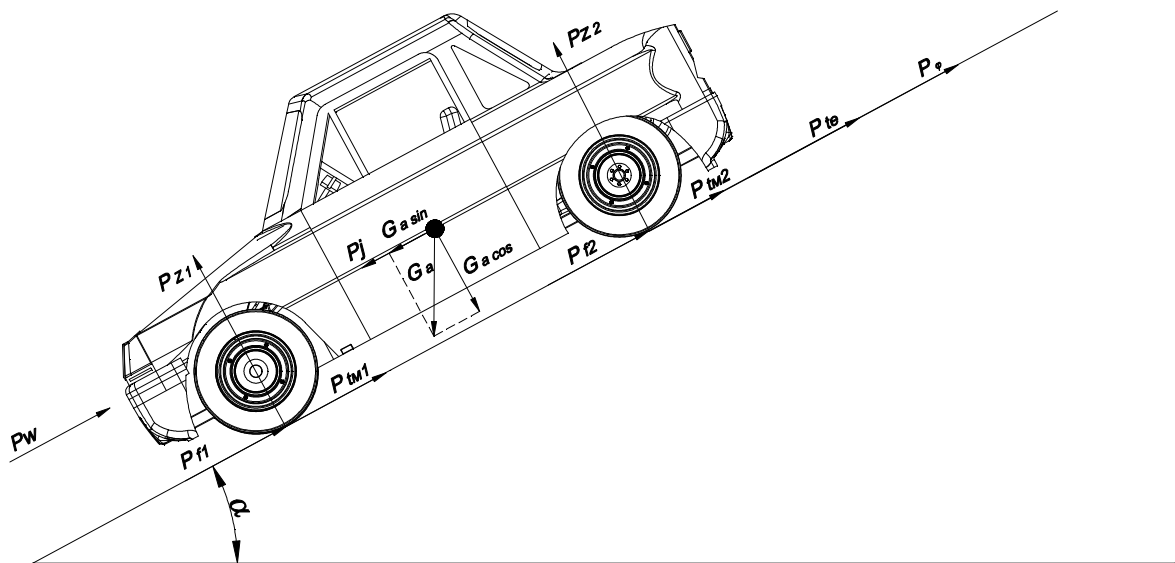


Рисунок 2.1 – Сили, які діють на транспортний засіб під час гальмування

Тоді рівняння (2.1) руху транспортного засобу, який здійснює рекуперативне гальмування, врахувавши попередні залежності (2.2) та (2.3), та прийнявши $P_{\tau m} = 0$, прийме наступний вигляд:

$$P_j = P_w + P_f \pm P_h + \frac{M_{\tau e} \cdot u_{mpe}}{r_k \cdot \eta_{mp.e}}. \quad (2.4)$$

2.2 Ідентифікація складників процесу рекуперативного гальмування

2.2.1 Гальмівний момент електродвигуна

Момент опору електродвигуна, який працює в режимі генератора, залежить від його обертів та потужності та визначається залежністю [130]:

$$M_{\tau e} = \frac{30 \cdot N_{ed}}{\pi \cdot n}, \quad (2.5)$$

де N_{ed} – потужність електродвигуна;

n – оберти електродвигуна.

Потужність електродвигуна на валу в свою чергу залежить від напруги U та сили струму I [33]:

$$N_{ed} = U \cdot I \cdot \eta_e, \quad (2.6)$$

де η_e - коефіцієнт корисної дії електродвигуна, який працює в режимі генератора

В режимі рекуперації, коли електродвигун переходить в режим роботи генератора, сила струму залежить від його обертів, тобто $I = f(n)$. Дана залежність називається струмошвидкісною характеристикою генератора. Дана залежність характеризує генераторний режим роботи електродвигуна [131]. Необхідно зазначити, що електричний двигун працюючи в режимі генератора здатний виробляти електричну енергію в певному діапазоні обертів.

На легковому автомобілі ГСУ-1 застосовується генератор Г-290. Для вказаного генератора, за допомогою експерименту, було визначено його струмошвидкісну характеристику, яка наведена на рис. 2.2. При цьому

враховуючи короткомоментність процесів рекуперативного гальмування (до 10...15 с), можна збільшити силу струму до 300 А, що не призведе до виходу з ладу генератора, виходячи з теорії електричного привода.

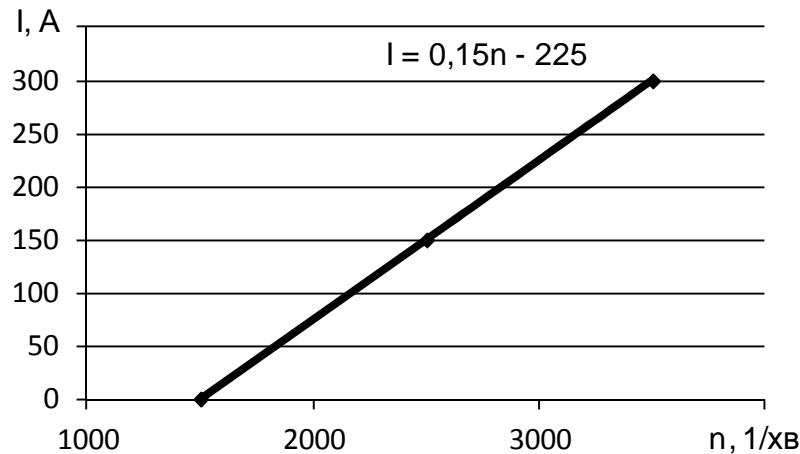


Рисунок 2.2 – Струмошвидкісна характеристика генератора Г-290

Оберти електродвигуна, який працює в режимі генератора, можна виразити через швидкість руху автомобіля, використовуючи відому залежність [33, 125 – 128]:

$$n = \frac{30 \cdot V \cdot u_{mpe}}{\pi \cdot r_k}. \quad (2.7)$$

Провівши аналіз складових частин залежності (2.7) можна констатувати, що оберти генератора залежать лише від швидкості транспортного засобу, оскільки усі інші величини будуть константами. Тоді, струмошвидкісну характеристику електричного двигуна в режимі рекуперативного гальмування можна записати:

$$I = f(n) = f\left(\frac{30 \cdot V \cdot u_{mpe}}{\pi \cdot r_k}\right) = f(V) = I(V). \quad (2.8)$$

Підставивши залежності (2.8) та (2.6), у формулу (2.5), отримано значення гальмівного моменту, приведеного до коліс автомобіля, який створюється електродвигуном:

$$M_{\tau e} = \frac{30 \cdot U \cdot \eta_e \cdot f \left(\frac{30 \cdot V \cdot u_{mpe}}{\pi \cdot r_k} \right)}{\pi \cdot n} = \frac{30 \cdot U \cdot \eta_e \cdot I(n)}{\pi \cdot n}. \quad (2.9)$$

Тоді, гальмівна сила рекуперативного гальмування, визначена у (2.3), становитиме:

$$P_{\tau e} = \frac{30 \cdot U \cdot \eta_e \cdot u_{mpe} \cdot I(n)}{\pi \cdot n \cdot r_k \cdot \eta_{mp.e}}. \quad (2.10)$$

2.2.2 Сила опору повітря

Зважаючи на той факт, що під час рекуперативного гальмування розвивається досить низьке сповільнення (до 1,0...1,5 м/с²), то варто провести дослідження впливу опору повітря на показники процесу рекуперативного гальмування.

З теорії автомобіля [125 – 128]:

$$P_w = k_w \cdot B \cdot H \cdot (V \pm V_g \cdot \cos \beta)^2, \quad (2.11)$$

де $B = const$ – колія транспортного засобу;

$H = const$ – максимальна висота транспортного засобу;

$k_w = const$ – коефіцієнт обтічності транспортного засобу;

V – швидкість руху транспортного засобу;

V_g – швидкість вітру. Знак “плюс” ставиться, при попутному вітрі, а знак “мінус” – при зустрічному;

β - кут між напрямком вітру та поздовжньою віссю автомобіля.

Якщо провести аналіз характеру зміни сили опору повітря залежно від напрямку та швидкості вітру та порівняти з електричною складовою гальмівної сили (рис. 2.3), то можна констатувати:

- зміна сили опору повітря з врахуванням напрямку, швидкості вітру змінюється в межах 10 % значення сили опору повітря;
- швидкість вітру після 5 м/с має більш значний вплив на показники, однак такі значення швидкості вітру на території України не носять постійного характеру та притаманні лише поривчастому вітру;
- вплив швидкості та напрямку вітру на показники рекуперативного гальмування внаслідок недовготривалості самого процесу гальмування, впливу ландшафту, а також враховуючи те, що найбільшу ефективність система рекуперативного гальмування має в умовах міського руху, де наявна забудова, не матиме суттєвого впливу.

Отже, підсумовуючи вищесказане, можна знехтувати складовою сили опору повітря, яка враховує його швидкість та напрям, під час досліджень процесів рекуперативного гальмування.

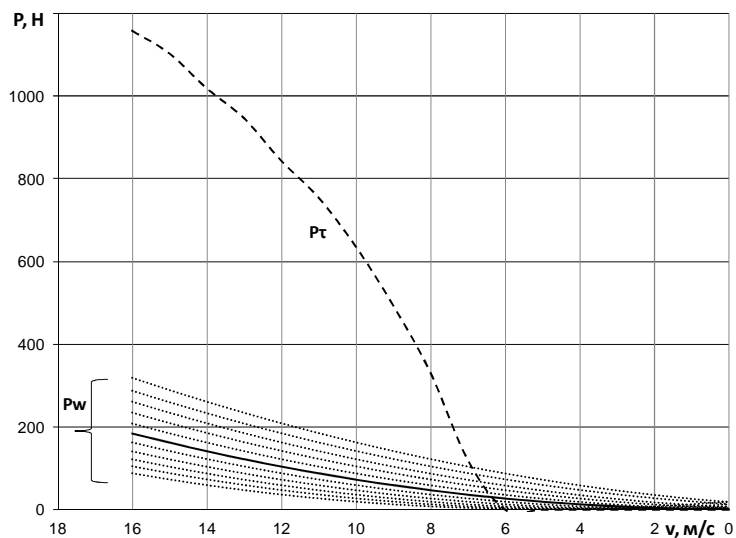


Рисунок 2.3 – Вплив швидкості та напрямку вітру на процес рекуперативного гальмування

Тоді сила опору повітря визначатиметься:

$$P_w = k_w \cdot B \cdot H \cdot V^2. \quad (2.12)$$

2.2.3 Сповільнення транспортного засобу

Сповільнення транспортного засобу визначається через гальмівний динамічний фактор автомобіля [129]:

$$j = \frac{D_{\tau e} + \psi}{\delta_{об}} g \quad (2.13)$$

де, $D_{\tau e}$ – гальмівний динамічний фактор автомобіля;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

$\delta_{об}$ - коефіцієнт врахування обертових мас автомобіля;

ψ – сумарний опір дороги.

Гальмівний динамічний фактор автомобіля, для випадку рекуперативного гальмування рівний:

$$D_{\tau e} = \frac{P_{\tau e} + P_w}{G_a}, \quad (2.14)$$

де P_w – сила опору повітря;

$P_{\tau e}$ – гальмівна сила електричного складника автомобіля.

З врахуванням рівнянь (2.10), (2.12) та (2.14) залежність (2.13) набуде вигляду:

$$j = \frac{1}{m_a \cdot \delta_{об}} \cdot \left(\frac{30 \cdot U \cdot \eta_e \cdot u_{мре} \cdot I(n)}{\pi \cdot n \cdot r_k \cdot \eta_{мр.е}} + k_w \cdot B \cdot H \cdot V^2 + m_a \cdot g \cdot \psi \right), \quad (2.15)$$

де m_a - маса транспортного засобу, кг

Залежність (2.15) дозволяє провести розрахунки лише в заданий момент часу.

Оскільки, під час рекуперативного гальмування транспортного засобу, оберти, і відповідно, струм електричного двигуна будуть падати, то значення сповільнення автомобіля теж зменшуватиметься. Для розрахунків значення сповільнення на всьому діапазоні швидкостей, рекуперативного гальмування доцільно скористатися методом ітерації. При чому, розрахунок здійснюється покроково, через певні проміжки часу Δt в наступному порядку:

- визначення початкового сповільнення (2.15);
- розрахунок швидкості руху (2.16), обертів електричного двигуна (2.7), сили струму (2.8) через Δt , с;
- визначення наступного значення сповільнення.

Зменшення швидкості руху транспортного засобу буде залежати від сповільнення, тому для розрахунків доцільно скористатися загальновідомою формулою:

$$V_{\Delta t} = V_n - j \cdot \Delta t, \quad (2.16)$$

де $V_{\Delta t}$ – швидкість транспортного засобу в даний момент часу, м/с;

V_n – попереднє значення швидкості автомобіля, м/с;

Δt – зміна часу, с.

На рис. 2.4 наведено графік зміни сповільнення під час рекуперативного гальмування, розрахований методом ітерації. З наведеного графіка видно, що

максимальне сповільнення становить близько $0,9 \text{ м/с}^2$, а рекуперація енергії припиниться при швидкості близько 8 м/с .

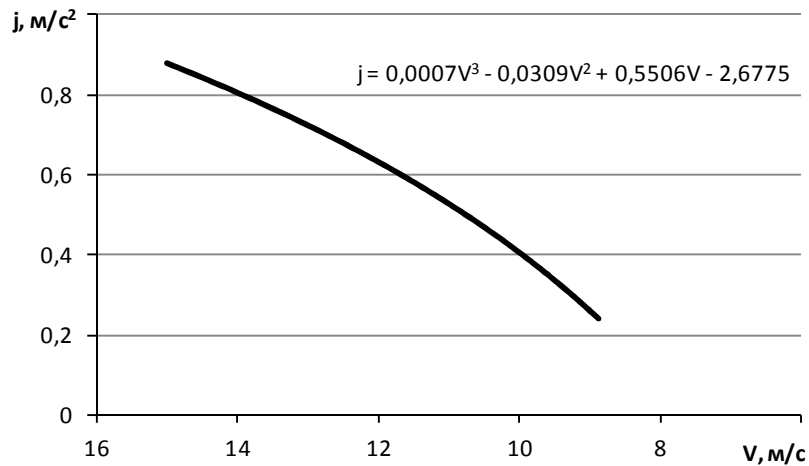


Рисунок 2.4 – Графік зміни сповільнення під час рекуперативного гальмування

Таким чином, можна відмітити, що процес рекуперативного гальмування припиняється за досить високої кінцевої швидкості. Це обумовлено характеристиками електричного двигуна, який працює в режимі генератора, зокрема, його струмошвидкісною характеристикою.

2.2.4 Поздовжній профіль дороги

Поздовжній профіль дорожнього полотна має досить великий вплив на показники рекуперативного гальмування транспортного засобу. При русі на підйом ефективність гальмування буде меншою, при русі на спуску – вищою, з огляду на кількість рекуперованої енергії. Під час проведення випробувань нормативними документами встановлюються вимоги щодо ділянки дороги для проведення випробувань [36, 37]. Для оцінки ефективності системи гальмування та оцінки витрат палива поздовжній ухил дорожнього полотна не повинен перевищувати $0,5 \%$. Зважаючи на ці досить високі вимоги можна знехтувати впливом даного показника. Однак у реальних умовах руху такі показники як ємність накопичувачів енергії, ефективність рекуперативного

гальмування та, відповідно, витрати енергії можуть змінюватися в досить широких діапазонах. Тому, необхідно враховувати вплив поздовжнього профілю дорожнього полотна на ефективність системи рекуперації енергії.

Вплив поздовжнього профілю дороги враховується через силу опору підйому/спуску, яка визначається [127, 128]:

$$P_h = G_a \cdot \sin \alpha. \quad (2.17)$$

За наведеною залежністю (2.17) побудовано графік сил опору при куті нахилу поздовжнього профілю дорожнього полотна відповідно 1 % та 10 % (рис. 2.5). Як видно з наведеного графіка, зміна величини гальмівної сили при зміні кута поздовжнього нахилу дорожнього полотна, невелика, порівняно з значеннями інших складників рівняння тягового балансу автомобіля в гальмівному режимі, тому врахування впливу поздовжнього профілю дорожнього полотна доцільно робити лише для певних типів рельєфу місцевості.

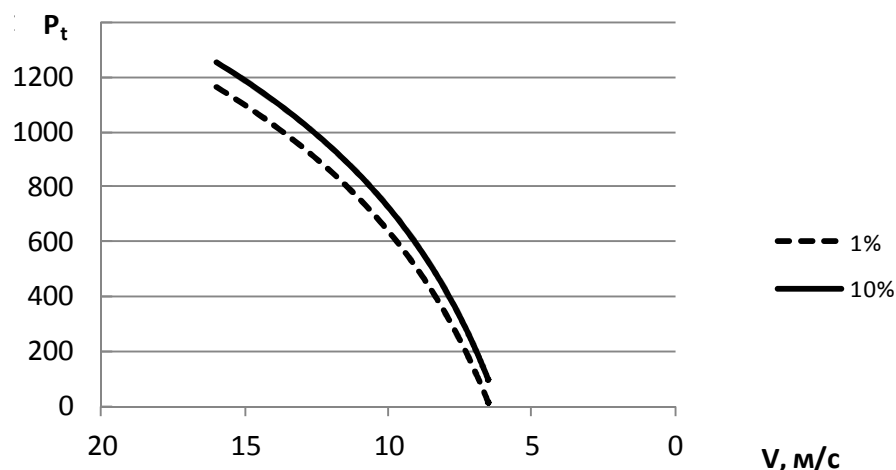


Рисунок 2.5 - Зміна гальмівних сил автомобіля, у фазі рекуперативного гальмування, при зміні кута нахилу поздовжнього профілю дорожнього полотна від 1 до 10 %

Як відомо [132] поздовжній профіль автомобільних доріг характеризується за типом рельєфу та розподіляється:

- рівнинний;
- горбистий;
- різко пересічений;
- гірський.

Провівши аналіз впливу поздовжнього ухилу дороги на процес рекуперативного гальмування (див. рис. 2.5) з врахуванням того, що при рівнинному та горбистому рельєфі місцевості спуски та підйоми, зазвичай, чергуються послідовно, а також те, що їх довжина буде досить незначною, особливо в умовах міського руху транспортного засобу, можна стверджувати, що в цих випадках впливом поздовжнього профілю дороги на процес рекуперативного гальмування можна знехтувати.

Якщо ж розглядати різко пересічену та гірську місцевості, то в цьому випадку вплив поздовжнього профілю дорожнього полотна може бути досить суттєвим, як з точки зору обсягу накопичувачів енергії так і з точки зору забезпечення необхідної ефективності системи рекуперативного гальмування.

Для врахування впливу поздовжнього профілю дороги на гальмівні властивості транспортного засобу з електричним приводом, який здійснює рекуперативне гальмування доцільно скористатися:

- на етапі проектування транспортного засобу – математичною моделлю побудови типових (по рельєфу) автомобільних доріг наведеною у [132];
- під час експлуатації автомобіля – даними супутникових систем моніторингу, які мають можливість прогнозування поздовжнього профілю дорожнього полотна в реальних умовах руху.

Процес рекуперативного гальмування транспортного засобу, обладнаного гібридною силовою установкою та системою рекуперації енергії, на затяжних спусках буде розглянуто нижче.

2.2.5 Передатні числа трансмісії

Гальмівна сила електричного складника системи рекуперативного гальмування визначається залежністю (2.10). Однак, якщо враховувати струмошвидкісну характеристику генераторного режиму електродвигуна, то буде очевидним, що процес рекуперативного гальмування припинятиметься при падінні обертів двигуна до мінімальних. Також спадатиме гальмівна сила електричного складника, та відповідно, зменшуватиметься ефективність рекуперативного гальмування.

З метою забезпечення ефективного функціонування системи рекуперативного гальмування необхідно визначити оптимальне передатне число трансмісії.

В якості електродвигуна в гібридному автомобілі ГСУ-1 використано генератор Г-290. Фазні обмотки статора генератора виконані з проводу типу ПЕВП січенням 1,95 x 4,44 мм. Це дає можливість короткостроково збільшувати силу струму генератора. Тому для підвищення гальмівної потужності під час гальмування, сила струму I може бути збільшена до 300 А, протягом 10...15 с, при обертах ротора електричного двигуна до 5500 хв^{-1} . Залежність сили струму від обертів двигуна наведено на рис. 2.6.

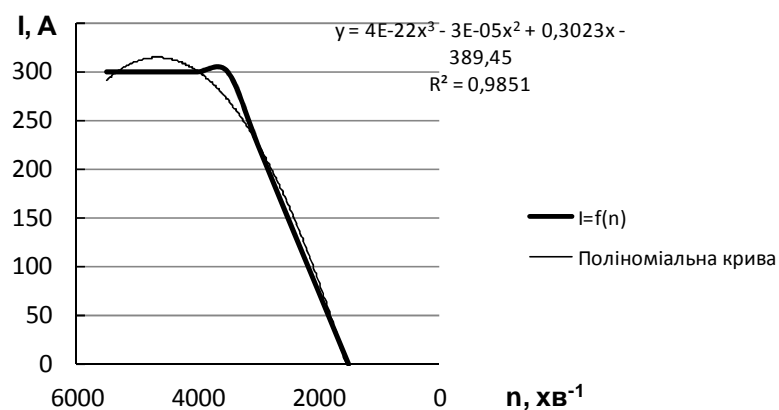


Рисунок 2.6 — Залежність сили струму від обертів електричного двигуна, який працює в режимі генератора

З урахуванням передатного числа головної передачі $u_0=3,3$ для існуючої трансмісії оберти ротора генератора $n_{ген}$ та струм будуть досить низькими для забезпечення ефективного процесу гальмування. Для підвищення сили струму з метою досягнення певної ефективності службового гальмування до швидкості 5 км/год. необхідно збільшити передатне число трансмісії до $u_0=8,164$. Залежність сили струму генератора від швидкості наведено на рис. 2.7. Крім того зроблено додаткові розрахунки для головної передачі $u_0=10,0$.

Виходячи з залежності (2.7), отримано передатне число трансмісії $u_{тр. ел.}$, яке становитиме:

$$u_{тр. ел.} = \frac{n_{\min} \cdot \pi \cdot r_{\kappa}}{30 \cdot V_{\min}}, \quad (2.18)$$

де n_{\min} - мінімальні оберти генератора, при яких припиняється рекуперація енергії;

V_{\min} - мінімальна швидкість транспортного засобу, при якій припиняється рекуперація енергії. Дана швидкість встановлюється розробником або вимогами нормативних документів.

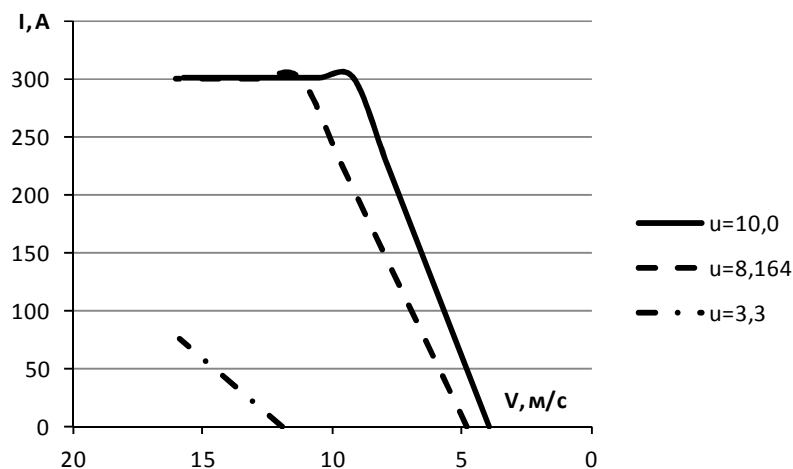


Рисунок 2.7 — Характер зміни сили струму залежно від швидкості руху транспортного засобу в режимі рекуперативного гальмування

Залежність (2.18) дозволяє на етапі проектування визначати раціональне передатне число трансмісії залежно від характеристик електричного двигуна та заданого значення швидкості, при якій припиниться процес рекуперації енергії.

З іншої сторони, із формули (2.7) отримано швидкість транспортного засобу V_{\min} , при якій буде припинятися процес рекуперативного гальмування:

$$V_{\min} = \frac{n_{\min} \cdot \pi \cdot r_k}{30 \cdot u_{mpe}}, \quad (2.19)$$

Значення швидкості транспортного засобу V_{\min} , при якій буде припинятися процес рекуперативного гальмування необхідно при дослідженнях експлуатаційних властивостей транспортного засобу з електричним приводом, а також при розрахунках, з метою перевірки параметрів автомобіля (електричний привід, передатне число трансмісії, тощо) на етапі проектування.

Слід зазначити, що крім механічних засобів, процес рекуперативного гальмування може регулюватися програмно, за допомогою системи управління тяговим двигуном та рекуперацією енергії, що більш детально описано нижче. Однак в будь-якому випадку процес рекуперативного гальмування буде засновуватися саме на механічних показниках з послідуочим їх корегуванням програмно-апаратними комплексами.

2.3 Математична модель процесу рекуперативного гальмування транспортного засобу

2.3.1 Енергетичний баланс процесу рекуперативного гальмування

Для теоретичних досліджень та розрахунків процесу рекуперативного гальмування транспортного засобу, обладнаного електроприводом та системою рекуперації енергії найбільш оптимальним буде скористатися залежностями, які описують процес гальмування транспортного засобу через виконання певної

роботи. Даний прийом досить ефективно застосовується науковцями при вивченні зазначених процесів [91].

Під час рекуперативного гальмування системами автомобіля виконується:

- робота, яка здійснюється під час рекуперативного гальмування транспортного засобу, A_τ [126];

- робота, яка здійснюється накопичувачами енергії при поглинанні рекуперованої енергії, A_n [33];

- вивільнення кінетичної енергії автомобіля, під час рекуперативного гальмування, A_k [126];

$$A_\tau = P_j \cdot S, \quad (2.20)$$

$$A_n = U \cdot I \cdot t, \quad (2.21)$$

$$A_k = \frac{m_a \cdot V^2}{2}, \quad (2.22)$$

де P_j – сила інерції автомобіля, Н;

S – пройдений шлях, м;

U – напруга накопичувачів, В;

I – сила струму, А;

t – час, с;

m_a – маса автомобіля, кг;

V – швидкість транспортного засобу, м/с.

Сила інерції автомобіля визначається [127]:

$$P_j = m_a \cdot \delta_{об} \cdot \frac{dV}{dt} = m_a \cdot \delta_{об} \cdot j. \quad (2.23)$$

Шлях, пройдений транспортним засобом під час рекуперативного гальмування, визначається як [127]:

$$S = \int_{t_n}^{t_k} V(t) dt, \quad (2.24)$$

де, t_n – час початку рекуперативного гальмування, с;

t_k – час закінчення гальмування, с.

Враховуючи рівняння (2.23) та (2.24), рівняння роботи, яка здійснюється під час рекуперативного гальмування (2.20) представлено у наступному вигляді:

$$A_\tau = \int_{t_n}^{t_k} P_j \cdot V dt = \int_{t_n}^{t_k} m_a \cdot j \cdot \delta_{об} \cdot V dt. \quad (2.25)$$

Підставивши у (2.25) значення сповільнення, яке виникає під час рекуперативного гальмування (2.15), отримано залежність, для визначення роботи, виконаної під час рекуперативного гальмування [11]:

$$A_\tau = \frac{1}{r_k \cdot \eta_{mp.e}} \int_{t_n}^{t_k} \left(\frac{30 \cdot U \cdot \eta_e \cdot u_{mpe} \cdot I(n)}{\pi \cdot n} + B \cdot H \cdot k_w \cdot V^2 \cdot r_k \cdot \eta_{mp.e} + \psi \cdot m_a \cdot g \cdot r_k \cdot \eta_{mp.e} \right) V dt. \quad (2.26)$$

Проінтегрувавши рівняння (2.21), отримано значення роботи A_H , яка може бути здійснена накопичувачами енергії при рекуперативному гальмуванні в заданий момент часу [33]:

$$A_H = \int_{t_n}^{t_k} U \cdot I \cdot dt. \quad (2.27)$$

Як відомо, рух автомобіля характеризується наступними фазами:

- розгін;
- рух з постійною швидкістю;
- гальмування;
- стоянка.

Якщо припустити, що після режиму гальмування відбудеться режим розгону, і, враховуючи що на розгін необхідно більше енергії, ніж можливо накопичити під час рекуперативного гальмування, накопичувачі енергії віддадуть частину енергії, то можна стверджувати, що перед початком гальмування стан накопичувачів дозволить знову накопичити енергію. Тобто, в даному випадку доцільно розглядати один цикл рекуперативного гальмування.

Перед початком рекуперативного гальмування важливим буде стан накопичувачів енергії, тобто рівень їх заряду.

Кінетична енергія автомобіля A_k , яка вивільняється під час рекуперативного гальмування, [126]:

$$A_k = \frac{m_a \cdot (V_n^2 - V_k^2)}{2}, \quad (2.28)$$

де, V_n – початкова швидкість рекуперативного гальмування, м/с;

V_k – швидкість при якій припиняється процес рекуперативного гальмування, м/с.

Під час передачі електричної енергії від двигуна до накопичувачів і у зворотному напрямку відбудуться її втрати, тому

$$A_k = \eta_{тре} \cdot A_n, \quad (2.29)$$

або, прийнявши в залежності (2.21) $I \cdot t = C$ - ємність накопичувача енергії ($A \cdot c$),

$$U \cdot C \cdot \eta_{mpe} = \frac{m_a \cdot (V_n^2 - V_k^2)}{2}, \quad (2.31)$$

звідси, необхідна ємність накопичувачів енергії становитиме:

$$C = \frac{m_a \cdot (V_n^2 - V_k^2)}{2 \cdot U \cdot \eta_{mpe}}. \quad (2.32)$$

Двигун постійного струму з незалежним збудженням характеризується тим, що струм обмотки збудження не залежить від струму якоря [41], а в свою чергу струм якоря рівний струму навантаження.

Зважаючи на те, що рекуперація енергії відбуватиметься до моменту, коли напруга генератора не стане меншою напруги накопичувачів енергії. Тобто до моменту досягнення двигуном обертів, при яких перестане вироблятися електрична енергія [3]. На рис. 2.8 графічно зображено умову припинення рекуперативного гальмування.

Під час здійснення рекуперативного гальмування по мірі збільшення кількості рекуперованої енергії зростатиме напруга накопичувачів енергії. При вирівнюванні напруги накопичувачів енергії та генератора, на швидкості близько 8 м/с (див. рис. 2.8), процес рекуперативного гальмування буде припинений.

2.3.2 Регулювання процесу рекуперативного гальмування

Як показує аналіз літератури [41, 133 – 136] регулювання процесу рекуперативного гальмування та транспортних засобах можна здійснювати кількома методами:

- застосуванням реостату на гальмівній педалі (регулювання за допомогою потенціометрів);
- застосуванням широтно-імпульсної модуляції (ШІМ-регулювання).

Сучасний етап розвитку техніки та технології дозволяє досить ефективно застосовувати ШІМ-регулювання, інтегрувавши цю підсистему управління у систему управління тяговим електродвигуном та загальну систему управління транспортним засобом.

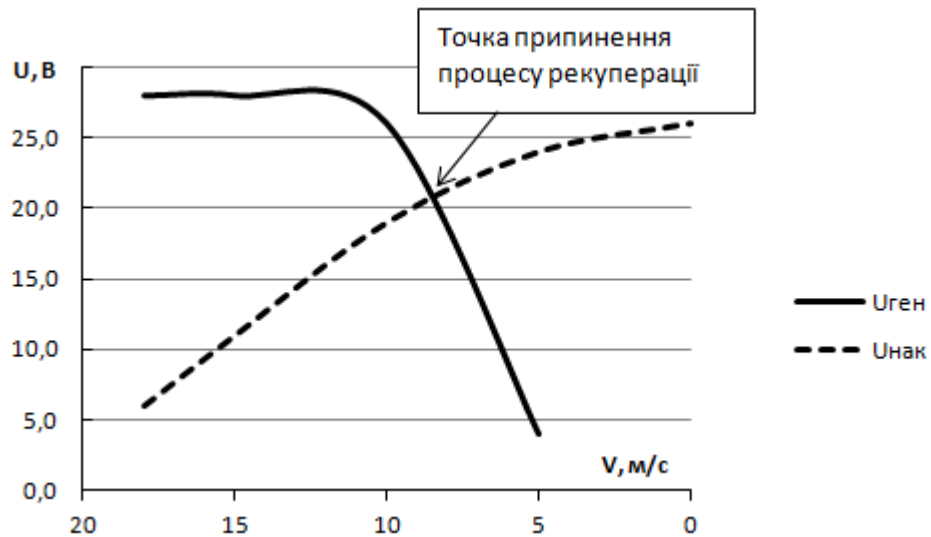


Рисунок 2.8 — Умова припинення рекуперації енергії

2.3.2.1 Регулювання процесу рекуперативного гальмування потенціометричними давачами

Регулюванням сили струму на обмотці збудження можна знизити швидкість при якій припиняється процес рекуперативного гальмування, оскільки, гальмівний момент електродвигуна рівний [41]:

$$M_{ел} = k \cdot \Phi \cdot I_{ген}, \quad (2.33)$$

де k - коефіцієнт, який враховує конструктивні особливості генератора;

Φ - магнітний потік генератора, Вб;

$I_{ген}$ - струм генератора, А.

Оскільки при рекуперативному гальмуванні струм генератора буде зменшуватися, збільшити гальмівний момент можна лише збільшивши магнітний потік, який можна регулювати змінюючи струм обмотки збудження.

Струм обмотки збудження рівний [41]:

$$I_o = \frac{U}{R_z + R_p}, \quad (2.34)$$

де R_z та R_p - опори відповідно генератора та реостату, Ом.

Опір обмотки збудження є постійним, а зміна опору потенціометра дозволить проводити коректування струму обмотки збудження.

При зменшенні напруги генератора, необхідно зменшити опір потенціометра (кут повороту або переміщення педалі гальм) таким, чином, щоб напруга була більшою за напругу накопичувачів.

Кут повороту або переміщення педалі пов'язується з опором потенціометра лінійною залежністю типу $y = f(x) = kx + v$.

Таким чином, визначено залежність напруги генератора від кута повороту педалі гальм γ , для загального випадку потенціометричного регулювання процесу рекуперативного гальмування:

$$U = I_o(R_z + R_p) = I_o(R_z + f(\gamma)) = I_o(R_z + R_p(\gamma)) \quad (2.35)$$

Підставивши значення напруги (2.35) у (2.26), отримано рівняння для визначення роботи, яка виконується під час рекуперативного гальмування:

$$A_r = \frac{1}{r_k \cdot \eta_{mp.e}} \int_{t_n}^{t_k} \left(\frac{30 \cdot \eta_e \cdot u_{mpe} \cdot I(n) \cdot I_o(R_z + R_p(\gamma))}{\pi \cdot n} + \right. \\ \left. + B \cdot H \cdot k_w \cdot V^2 \cdot r_k \cdot \eta_{mp.e} + \psi \cdot G_a \cdot r_k \cdot \eta_{mp.e} \right) V dt. \quad (2.36)$$

Залежність (2.36) визначає кількість енергії, яка вивільняється під час рекуперативного гальмування. Для того, щоб уся вивільнена енергія була поглинута, необхідна вільна ємність накопичувачів енергії (2.32), окрім того, необхідно проводити розрахунки в будь-який момент часу. На основі цього, записано систему рівнянь, з врахуванням потенціометричного регулювання параметрів генератора:

$$\left\{ \begin{array}{l} A_{\tau} = \frac{1}{r_{\kappa} \cdot \eta_{mp.e}} \int_{t_n}^{t_{\kappa}} \left(\frac{30 \cdot \eta_e \cdot u_{mp.e} \cdot I(n) \cdot I_o (R_z + R_p(\gamma))}{\pi \cdot n} + \right. \\ \left. + B \cdot H \cdot k_w \cdot V^2 \cdot r_{\kappa} \cdot \eta_{mp.e} + \psi \cdot G_a \cdot r_{\kappa} \cdot \eta_{mp.e} \right) V dt \\ C = \frac{m_a \cdot (V_n^2 - V_{\kappa}^2)}{2 \cdot U_{\max} \cdot \eta_{mp.e}} \\ A_{\tau} \leq C \cdot U_{\max} \\ V = f(t) \end{array} \right. , \quad (2.37)$$

де U_{\max} – максимально-допустима напруга генератора транспортного засобу.

Залежності (2.37) дозволяють описати рух транспортного засобу під час рекуперативного гальмування, без врахування поздовжнього ухилу дорожнього полотна.

При наявності спуску (ухилу), залежність (2.37) прийме вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 A_{\tau} = \frac{1}{r_{\kappa} \cdot \eta_{mp.e}} \int_{t_n}^{t_{\kappa}} \left(\frac{30 \cdot \eta_e \cdot u_{mpe} \cdot I(n) \cdot I_o(R_z + R_p(\gamma))}{\pi \cdot n} + \right. \\
 \left. + B \cdot H \cdot k_w \cdot V^2 \cdot r_{\kappa} \cdot \eta_{mp.e} + \psi \cdot G_a \cdot r_{\kappa} \cdot \eta_{mp.e} \pm G_a \cdot r_{\kappa} \cdot \eta_{mp.e} \cdot \sin \alpha \right) V dt \\
 C = \frac{m_a \cdot (V_n^2 - V_{\kappa}^2)}{2 \cdot U_{\max} \cdot \eta_{mpe}} + G_a \cdot \sin \alpha \cdot S_c \\
 A_{\tau} \leq C \cdot U_{\max} \\
 V = f(t)
 \end{array} \right. ,$$

(2.38)

де S_c – довжина ухилу, м.

2.3.2.2 Регулювання широтно-імпульсною модуляцією

Вирішенням проблеми управління та регулювання характеристиками електричного приводу займаються провідні українські та зарубіжні науковці [135, 136]. Провівши аналіз сучасних досліджень та розробок можна відмітити, що найбільш перспективним методом управління та регулювання електричних двигунів є векторне управління вентильним двигуном [135, 137]. Однак переважна більшість розробок та досліджень спрямована на управління електричним двигуном, і досить незначна увага приділяється процесу рекуперативного гальмування. Відмінність режимів роботи електричного двигуна під час розгону або постійного руху та рекуперативного гальмування полягає у необхідності початкового зменшення електричного гальмівного моменту з метою уникнення перевантаження електродвигуна в режимі генератора з послідуочим його збільшенням для підвищення ефективності рекуперативного гальмування. Оскільки під час режиму розгону струми та оберти генератора є контрольованими зі сторони системи управління електричним двигуном, а під час гальмування, особливо при великих швидкостях, струми можуть багатократно перевищувати максимально допустимі значення, що призведе до виходу з ладу електродвигуна.

З теорії електричного привода [41] відома залежність електричного гальмівного моменту (M_e) на валу двигуна від його характеристик (2.33). З іншої сторони струм генератора визначається за залежністю:

$$I_{ген} = \frac{E - U_n}{R}, \quad (2.39)$$

де U_n – напруга генератора, В;

E – електрорушійна сила, В;

R – внутрішній опір генератора, Ом.

Провівши аналіз залежностей (2.33) та (2.39) можна виділити три способи управління електродвигуном незалежного збудження в режимі генератора [139]:

- зміною величини магнітного потоку збудження;
- зміною величини опору ланцюга;
- зміною величини напруги генератора.

Найбільш оптимальним варіантом управління електричним двигуном, який працює в режимі генератора є його регулювання зміною величини магнітного потоку збудження.

За результатами аналізу сучасних конструкцій генераторів та електродвигунів встановлено, що сучасні електричні машини мають досить малу величину внутрішнього опору, значення якого становлять менше 0,1 Ом. [139].

Для моделювання процесу управління доцільно скористатися даними наведеними у [139]. З цією метою необхідно перейти від абсолютних до відносних змінних величин (2.40) [139]. При цьому постійні величини рівні 1:

$$\begin{aligned}
 \mu &= \frac{M_3}{M_n}, \\
 i &= \frac{I_3}{I_n}, \\
 v &= \frac{w_3}{w_n}, \\
 f &= \frac{\phi_3}{\phi_n},
 \end{aligned}
 \tag{2.40}$$

де w – частота обертання генератора;

індекси n та 3 відповідно номінальні та задані величини.

Тоді залежності (2.33) та (2.39) можна записати у відносних величинах [139]:

$$\begin{aligned}
 \mu &= f \cdot i, \\
 i &= \frac{f-1}{R}.
 \end{aligned}
 \tag{2.41}$$

Як відомо, рекуперативне гальмування виникає при $E > U_n$, або при $f > 1$ у відносних величинах. Якщо прийняти максимальний магнітний потік 2, виходячи з умови здійснення рекуперативного гальмування, то при мінімальному значенні магнітного потоку, $f = 1$ електричний гальмівний момент буде рівний 0, тобто гальмування припиниться. Ослаблення магнітного потоку на 5 % (при $R=0,1$) від максимального призведе до зменшення різниці чисельника, і відповідно буде зменшено струм на 5 %, а гальмівний момент електродвигуна на 8 %. Цей прийом доцільно застосовувати при значних початкових швидкостях гальмування для уникнення значного перевантаження генератора.

Залежність значення струму збудження від магнітного потоку у відносних величинах наведена у [41].

У [139] наведено залежність характеристики регулювання моменту генератора при $v = \text{const}$ та $\phi = \text{var}$:

$$\mu = f \cdot (1 - v \cdot f). \quad (2.42)$$

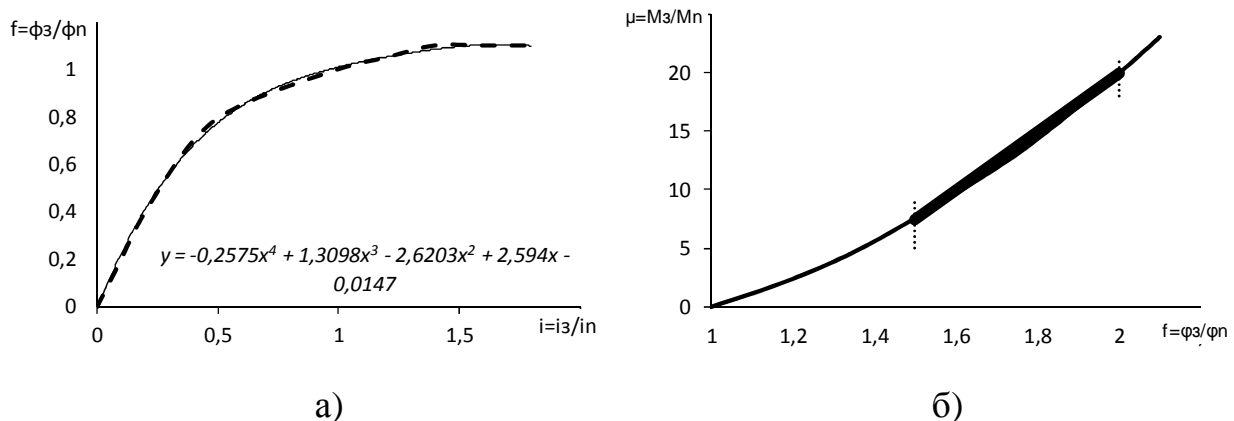
При цьому діапазон регулювання становить [139]:

$$\begin{aligned} \mu &\in [0; \frac{1}{4v}], \\ f &\in [0; \frac{1}{2v}]. \end{aligned} \quad (2.43)$$

Якщо врахувати, що під час рекуперативного гальмування швидкість змінюється досить повільно, порівняно зі змінами величин моменту та магнітного потоку, та прийняти $v=1$, то діапазон зміни моменту та магнітного потоку набуде більш конкретних значень [139]:

$$\begin{aligned} \mu &\in [0; 0,25], \\ f &\in [0; 0,5]. \end{aligned} \quad (2.44)$$

Регульовальні характеристики генератора у відносних величинах, згідно залежностей (2.40) графічно відображено на рис. 2.9.



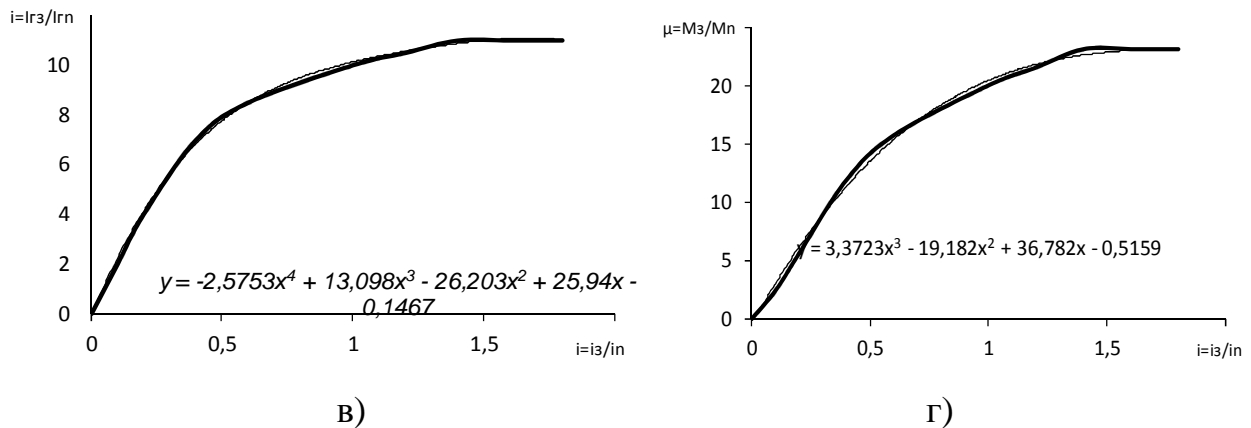


Рисунок 2.9 – Регулювальні характеристики електродвигуна (у відносних величинах): а – залежність магнітного потоку від струму збудження; б – залежність гальмівного моменту електродвигуна від магнітного потоку (жирним виділено регулювальний діапазон); в – залежність струму генератора від струму збудження; г – залежність гальмівного моменту електродвигуна від струму збудження

Таким чином графічно-аналітичним методом встановлено характер зміни величини гальмівного моменту електродвигуна та струму генератора $I_{ген}$ від зміни струму обмотки збудження $I_{зб}$, це дозволить ефективно застосовувати математичні моделі наведені у [139] з метою дослідження та розрахунків руху транспортного засобу з електричним приводом в режимі рекуперативного гальмування з рекуперацією енергії. Наведені залежності не відображають в повній мірі характеристики електричного приводу, так, наприклад вони не враховують час наростання та спадання струмів збудження і т.п. Однак для проведення досліджень експлуатаційних властивостей їх точності достатньо. При цьому слід зазначити, що з огляду на те, що електромагнітні процеси в схемі протікають значно швидше, ніж механічні процеси в системі приводу машини, стрибкоподібні зміни струмів збудження, час їх наростання та спадання не матимуть значного впливу на загальну характеристику процесу рекуперативного гальмування.

В результаті проведеної роботи, графічно-розрахунковим методом, отримано формулу для врахування залежності значення струму генератора від струму збудження:

$$I_{ген} = -2,5753 \cdot I_{зб}^4 + 13,098 \cdot I_{зб}^3 - 26,203 \cdot I_{зб}^2 + 25,94 \cdot I_{зб} - 0,1467 = f(I_{зб}) = I_{ген}(I_{зб}). \quad (2.45)$$

Важливим є той факт, що застосування вищеприписаної моделі регулювання процесу рекуперативного гальмування дозволить збільшити передатні числа головної передачі, що матиме позитивний вплив на експлуатаційні властивості автомобіля, а в першу чергу дозволить зменшити швидкість транспортного засобу, при якій припиняється режим рекуперативного гальмування. З метою визначення впливу передатних чисел трансмісії на процес рекуперативного гальмування проведено розрахунки за (2.10), з врахуванням (2.8) та побудовано графіки залежності гальмівної сили від швидкості транспортного засобу. На рис. 2.10 наведено криві, які характеризують процес рекуперативного гальмування при різних передатних числах головної передачі.

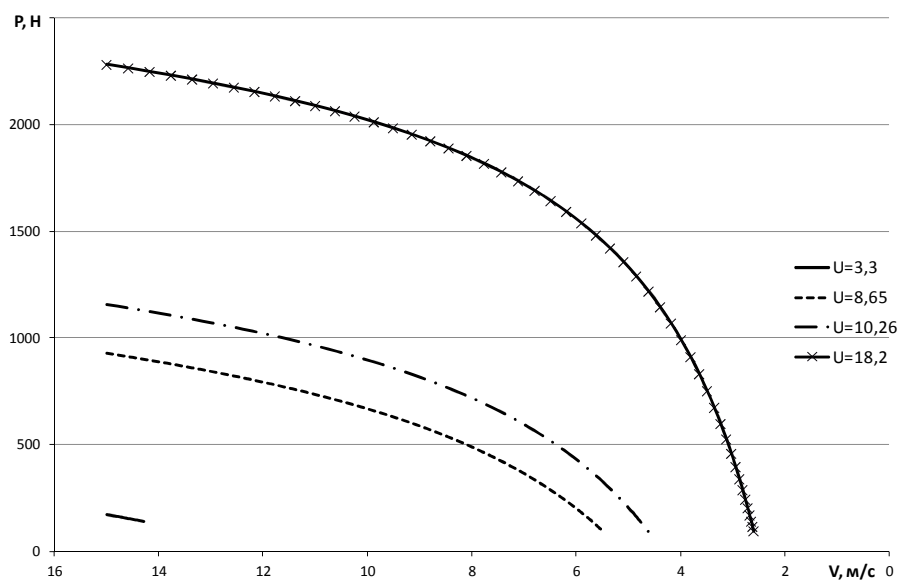


Рисунок 2.10 – Процес рекуперативного гальмування автомобіля з різними передатними числами головної передачі

Як видно з наведеного графіка збільшуючи передатне число трансмісії, можна суттєво зменшити кінцеву швидкість при якій припиняється рекуперація енергії. При цьому дану швидкість можна зменшити практично до 0, однак передатне число буде значним. Як показує досвід, знижувати кінцеву швидкість рекуперативного гальмування нижче 5...4 м/с є недоцільним.

2.3.3 Модель регульованого процесу рекуперативного гальмування

Залежність (2.36) визначає кількість енергії, яка вивільняється під час рекуперативного гальмування. Для того, щоб уся вивільнена енергія була поглинута, необхідна вільна ємність накопичувачів енергії (2.32), окрім того, необхідно проводити розрахунки в будь-який момент часу. На основі цього, записано систему рівнянь, з врахуванням ШІМ-регулювання параметрів генератора (2.45) [17]:

$$\left\{ \begin{array}{l} A_t = \frac{1}{r_k \cdot \eta_{mp.e}} \int_{t_n}^{t_k} \left(\frac{30 \cdot \eta_e \cdot u_{mpe} \cdot I_{ген}(n) \cdot I_{ген}(I_{зб})}{\pi \cdot n} + \right. \\ \left. + B \cdot H \cdot k_w \cdot V^2 \cdot r_k \cdot \eta_{mp.e} + \psi \cdot G_a \cdot r_k \cdot \eta_{mp.e} \right) V dt \\ C = \frac{m_a \cdot (V_n^2 - V_k^2)}{2 \cdot U_{max} \cdot \eta_{mpe}} \\ A_t \leq C \cdot U_{max} \\ V = f(t) \\ I_{ген} = f(I_{зб}) \end{array} \right. \quad (2.46)$$

Залежності (2.46) дозволяють описати рух транспортного засобу під час рекуперативного гальмування, у випадку застосування ШІМ-регулювання параметрів генератора.

При наявності спуску (ухилу), залежність (2.46) прийме вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} A_{\tau} = \frac{1}{r_{\kappa} \cdot \eta_{mp.e}} \int_{t_n}^{t_{\kappa}} \left(\frac{30 \cdot \eta_e \cdot u_{mpe} \cdot I_{ген}(n) \cdot I_{ген}(I_{зб})}{\pi \cdot n} + \right. \\ \left. + B \cdot H \cdot k_w \cdot V^2 \cdot r_{\kappa} \cdot \eta_{mp.e} + \psi \cdot G_a \cdot r_{\kappa} \cdot \eta_{mp.e} \pm G_a \cdot r_{\kappa} \cdot \eta_{mp.e} \cdot \sin \alpha \right) V dt \\ C = \frac{m_a \cdot (V_n^2 - V_{\kappa}^2)}{2 \cdot U_{max} \cdot \eta_{mpe}} + G_a \cdot \sin \alpha \cdot S_c \\ A_{\tau} \leq C \cdot U_{max} \\ V = f(t) \\ I_{ген} = f(I_{зб}) \end{array} \right. \quad (2.47)$$

Залежності (2.47) дозволяють описати рух транспортного засобу під час рекуперативного гальмування та руху по спуску, у випадку застосування ШІМ-регулювання параметрів генератора.

2.4 Керування процесом рекуперативного гальмування

Рекуперативне гальмування зазвичай забезпечується реостатом інтенсивності дії, призначеного для управління процесом електричного гальмування. Робоча система гальмування приводиться в дію виконавчими механізмами системи керування. Приведення в дію гальмівної системи здійснюється за допомогою педалі.

При натисканні на педаль спочатку спрацьовує система електричного гальма, а при подальшому натисканні спрацьовує також робоча гальмівна система. Таким чином здійснюється поетапне гальмування. Для забезпечення ефективної роботи основної гальмівної системи необхідно передбачити достатній хід (s) органу керування – педалі, з тим, щоб забезпечити:

- нормативну ефективність гальмування;
- регульоване гальмівне зусилля;
- нормативне зусилля натиску на орган керування.

Разом з тим, досить важливим є забезпечення процесу електричного гальмування, при необхідності зниження швидкості руху, без залучення

основної гальмівної системи, тобто робочий хід гальмівної педалі повинен становити (мм):

$$s_{\Sigma} = s_e + s_p - \Delta s, \quad (2.48)$$

де s_{Σ} - сумарний хід гальмівної педалі;

s_e – хід гальмівної педалі, де забезпечується рекуперативне гальмування;

s_p – хід гальмівної педалі, де забезпечується робота основної системи гальмування;

Δs – хід гальмівної педалі, при якому відбувається одночасна дія електричного та механічного складників гальмівної системи.

Застосування системи електричного гальмування з рекуперацією енергії дозволяє виключити величину вільного ходу педалі, оскільки зазори у гальмівних механізмів виберуться за рахунок ходу рекуперативного гальмування.

Складова Δs має досить важливе значення оскільки вона дозволяє забезпечити більший діапазон регулювання і, відповідно, плавність наростання гальмівної сили обох складників електричного та механічного, більшу тривалість електричного складника з постійним наростанням сповільнення та накопиченням енергії.

Очевидною буде залежність:

$$P_{\tau e} = f(s_{\Sigma}, V) \quad (2.49)$$

або

$$P_{\tau e} = f(s_{\Sigma}, n), \quad (2.50)$$

де V – швидкість транспортного засобу, м/с;

n – оберти ротора електродвигуна, хв.⁻¹.

Раціональною схемою керування буде такий характер залежності, який забезпечить:

- 1) відповідність транспортного засобу нормативним вимогам щодо ефективності гальмування;
- 2) рекуперативного гальмування з максимальним накопиченням енергії;
- 3) регульоване гальмування обома складниками електричним та механічним.

Зважаючи на те, що досліджується лише електрична складова гальмівного процесу, то можна вважати, що робоча гальмівна система відповідає усім встановленим нормативним вимогам і величина ходу, ефективність та конструкція механічного складника гальмівної системи повністю відповідають вимогам нормативних документів.

Для рекуперативного гальмування контролер повинен забезпечити плавне наростання гальмівного моменту на ділянці s_e від мінімального до максимального, при цьому достатньо буде прийняти лінійну залежність ходу гальмівної педалі від гальмівної сили.

У [3] встановлено діапазон зміни сповільнення під час електричного гальмування з рекуперацією енергії, який знаходиться у межах від 1,0 до 0,15 м/с². Регульоване рекуперативного гальмування буде здійснюватися на проміжку ходу педалі:

$$s_e = s_{en} + \Delta s, \quad (2.51)$$

де s_{en} - хід гальмівної педалі, де забезпечується лише рекуперативне гальмування.

Виходячи з графіка зміни гальмівної сили або сповільнення по часу [128], зображеного на рис. 2.11, встановлено, що оптимальним варіантом буде початок рекуперативного гальмування відразу після приведення в дію

гальмівного приводу та поступове зменшення його ефективності до нуля по мірі наростання значення встановленого сповільнення механічного складника гальмівної системи (рис. 2.12).

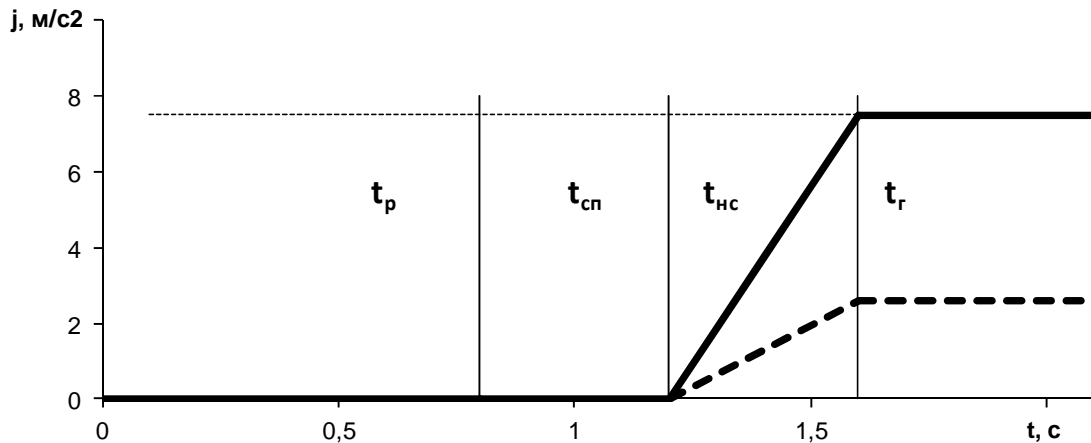


Рисунок 2.11 – Графік зміни сповільнення в процесі гальмування транспортного засобу гідравлічною гальмівною системою. Умовні позначення:
 _____ - гальмування транспортного засобу з максимальним сповільненням;
 - - - - - - - гальмування транспортного засобу в штатних режимах руху;
 t_p – час реакції водія;
 $t_{сп}$ – час спрацювання гальмівного приводу від моменту натиснення на гальмівну педаль до появи сповільнення;
 $t_{нс}$ – час наростання сповільнення від нуля до максимального значення або значення заданого водієм;
 t_r – час гальмування транспортного засобу з встановленим значенням сповільнення.

Гальмівна діаграма процесу рекуперативного гальмування наведена на рис. 2.12.

З наведених графіків видно переваги застосування рекуперативного гальмування, що дозволяє фактично виключити час, необхідний на спрацювання механічного приводу, який, в залежності від стану гальмівної системи, може становити до 1 с. Якщо прийняти швидкість руху автомобіля близько 60 км/год, за цей час автомобіль може подолати відстань до 15 м, а

застосування системи рекуперативного гальмування дозволить, протягом цього часу, ефективно зменшити швидкість руху транспортного засобу та попередити або мінімізувати наслідки ДТП, що є важливим елементом активної безпеки.

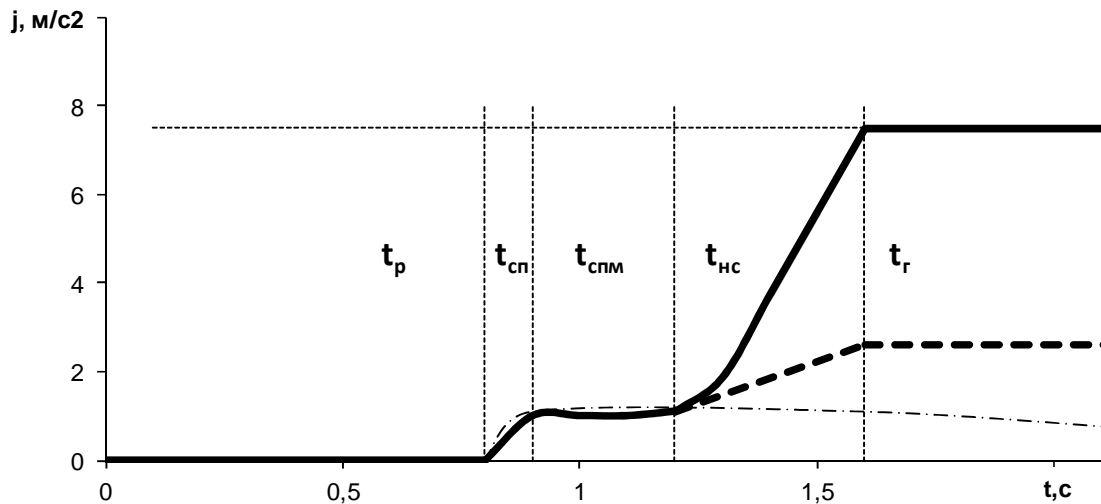


Рисунок 2.12 – Графік зміни сповільнення в процесі гальмування транспортного засобу гідравлічною гальмівною системою з застосуванням рекуперативного гальмування. Умовні позначення:

_____ - гальмування транспортного засобу з максимальним сповільненням;

- - - - - гальмування транспортного засобу в штатних режимах руху;

-.-.-.-.-. гальмування транспортного засобу з рекуперацією енергії;

t_p – час реакції водія;

$t_{сп}$ – час спрацювання гальмівного приводу рекуперативного гальмування від моменту натиснення на гальмівну педаль до появи сповільнення. На графіку, для наочності, прийнято значення 0,1 с. Залежно від прийнятої схеми управління може бути зведений практично до 0;

$t_{спм}$ – час спрацювання механічного складника гальмівного приводу від моменту натиснення на гальмівну педаль до появи сповільнення, дія рекуперативного гальмування з максимальною ефективністю;

$t_{нс}$ – час наростання сповільнення механічного складника гальмівної системи від нуля до максимального значення або значення заданого водієм;

t_r – час гальмування транспортного засобу з встановленим значенням сповільнення.

З метою реалізації процесів гальмування застосовується гальмівна педаль з системою управління рекуперативного гальмуванням, схема якої наведена на рис. 2.13.

Під час натиснення на гальмівну педаль в діапазоні ходу S_e вмонтований реостат змінює силу струму в обмотці збудження електродвигуна автомобіля і при цьому забезпечується плавне зниження швидкості транспортного засобу. При подальшому натисканні на педаль в діапазоні Δs відбувається одночасна дія електричного та механічного складників гальмівної системи, при цьому відбувається поступове зростання ефективності робочої гальмівної системи та досягнення її максимального значення. В наступному діапазоні ходу гальмівної педалі відбувається відключення електричного складника гальмівної системи, оскільки напруга суперконденсаторів і генератора вирівнюється і двигун вийде з режиму генератора [3], гальмування здійснюватиметься лише за рахунок робочої гальмівної системи. Подібні схеми керування досить широко застосовуються на міському електричному та залізничному транспорті.

Перевагою даної схеми є можливість застосування регульованого електричного гальмування, а у випадках службового гальмування (наприклад: пригальмовування на світлофорах і т.п.) виключити використання робочої гальмівної системи.

В даних дослідженнях прийнято, що об'єм накопичувачів енергії необмежений, однак, необхідно пам'ятати, що контролер забезпечуватиме заданий режим рекуперативного гальмування до того часу доки накопичувачі енергії зможуть приймати акумульовану електроенергію або доки виконуватиметься умова рекуперації енергії (див. рис. 2.8).

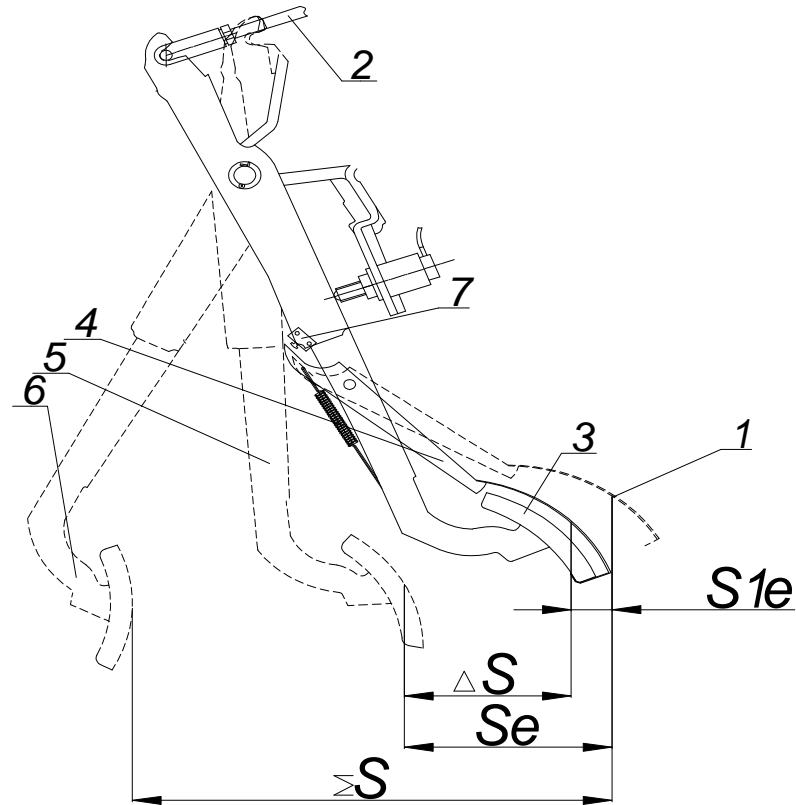


Рисунок 2.13 – Схема гальмівної педалі для управління механічним та електричним складниками гальмівної системи:

1 – привід системи рекуперативного гальмування, 2 - шток приводу системи механічного гальмування, 3 – привід механічного складника у вільному (не натиснутому) стані, 4, 5 – положення гальмівної педалі під час дії відповідно електричного, електричного та механічного, 6 – положення гальмівної педалі під час дії електричного та максимальної дії механічного складників гальмівної системи, 7 – датчик приводу електричного складника гальмівної системи, S_{1e} – хід гальмівного приводу, де відбувається дія лише електричного складника гальмівної системи, S_e – повний хід гальмівного приводу, де відбувається дія електричного складника гальмівної системи, ΔS – хід гальмівного приводу, де відбувається одночасна дія електричного та механічного складників гальмівної системи, ΣS – повний хід гальмівної педалі.

У випадку, коли накопичувачі енергії будуть повністю заряджені, рекуперация енергії припиниться та, відповідно рекуперативне гальмування

припиниться, тому прогнозування об'ємів накопичувачів необхідно приймати з врахуванням режимів руху транспортних засобів.

2.5 Висновки з розділу

1. Проведено ідентифікацію та здійснено аналіз впливу складників процесу рекуперативного гальмування
2. Побудовано математичні моделі регульованого процесу рекуперативного гальмування в якій застосовано комплексний підхід та враховано електричні і механічні впливи на ефективність даного процесу
3. Проведено аналіз впливу експлуатаційних та конструктивних параметрів на процес рекуперативного гальмування транспортного засобу
4. Визначено принцип керування роботою системи рекуперативного гальмування.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Загальні умови та методика проведення досліджень

3.1.1 Умови та завдання досліджень

Експериментальні дослідження процесу рекуперативного гальмування проводяться за стандартним міським їздовим циклом, описаним у [140 – 143].

Експериментальні дослідження спрямовані на визначення енергетичного балансу процесу електродинамічного гальмування. За результатами теоретичних та експериментальних досліджень проводиться оцінювання адекватності математичної моделі.

Випробування проводилися на злітно-посадковій смузі Луцького авіапідприємства.

Випробування проводилися на гібридному легковому автомобілі ГСУ-1, технічні характеристики якого наведено у таблиці 3.1.

Для підвищення ефективності рекуперативного гальмування на автомобілі встановлювалися зірки, які забезпечували передатні числа головної передачі $u_{mpe}=5,5$ та $u_{mpe}=11,87$.

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики гібридного автомобіля ГСУ-1

Параметр транспортного засобу	Значення параметру
Споряджена маса, кг	385
Навантаження на передню/задню осі, кг	240/320
Тиск повітря в шинах коліс, передніх/задніх, МПа	2,0/2,0
Висота рисунка протектора шин, мм	3,7
Маса випробувального устаткування, кг	20,0
Маса оператора та водія, кг	145
Повна маса автомобіля, кг	525
Напруга акумуляторної батареї, В	24
Ємність акумуляторної батареї, А*год	30 (2 блока по 15)
Зовнішній зарядний пристрій	Електрична мережа



Рисунок 3.1 – Об'єкт випробувань – Легковий автомобіль з гібридною силовою установкою ГСУ-1

Колісний транспортний засіб, на якому проводилися випробування обладнаний гібридною силовою установкою з паралельною схемою підключення (див. рис. 3.2 [33], рис. 3.3).

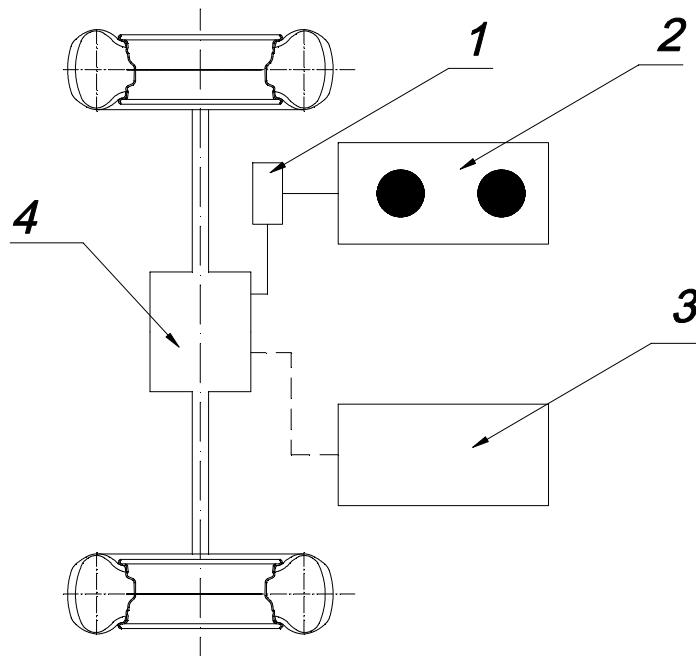


Рисунок 3.2 – Принципова схема паралельного підключення гібридної силової установки. Умовні позначення: 1 – коробка передач, 2 – двигун внутрішнього згорання, 3 – електричний двигун, 4 – головна передача;
 ————— - механічна енергія, - електрична енергія.

Метеорологічні умови, під час яких проводилися випробування наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Метеорологічні умови проведення випробувань

Найменування параметру	№ експерименту		
	1	2	3
Температура навколишнього середовища, °С	+15	+17	+14
Атмосферний тиск, кПа	99,6	98,9	99,4
Швидкість вітру, м/с	1,5	2,0	2,0
Відносна вологість повітря, %	70	65	68
Напруга зовнішньої мережі під час зарядки автомобіля	215	210	223

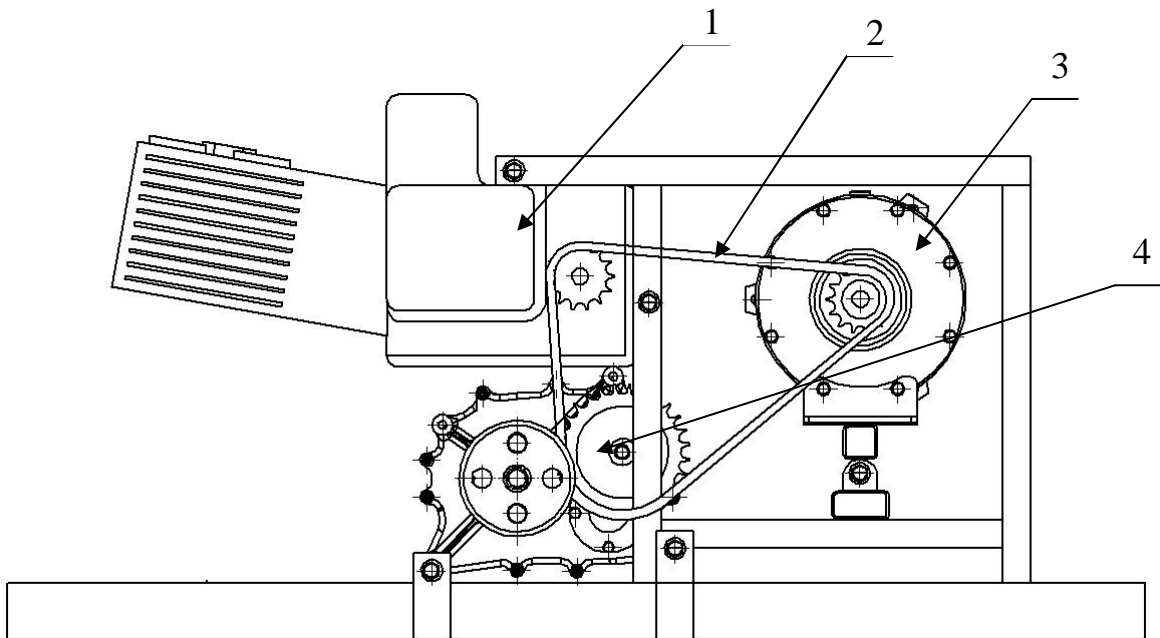


Рисунок 3.3 – Схема паралельного підключення гібридної силової установки автомобіля ГСУ-1. Умовні позначення: 1 – двигун внутрішнього згоряння, 2 – ланцюгова передача, 3 – електричний двигун, 4 – головна передача

З метою виключення з зареєстрованих даних експерименту моментів спрацювання механічного складника гальмівної системи на приводі робочої гальмівної системи встановлювався педометр, сигнал з якого дозволив на графіку чітко визначити момент спрацювання механічного складника робочої гальмівної системи.

3.1.2 Параметри, які реєструються

За результатами аналізу математичної моделі та результатів теоретичних досліджень встановлено, що найбільш доцільними критеріями оцінки роботи та ефективності процесу електродинамічного гальмування є роботи, виконуються системами транспортного засобу.

Тому, під час експериментальних досліджень повинні реєструватися наступні показники:

- швидкість руху транспортного засобу;
- час;

- прискорення або сповільнення;
- кількість енергії, яка надходить у накопичувачі;
- кількість енергії, яка виробляється електродвигуном.

3.1.3 Випробувальне устаткування для проведення експерименту

Проведення експерименту здійснено із використання випробувального устаткування, засобів вимірювальної техніки та допоміжного устаткування, зазначеного в таблиці 3.3 та зображеного на рис. 3.4.

Випробувальне устаткування, яке має суттєвий вплив на результати експерименту було відкаліброване, відповідно до вимог ДСТУ ISO/IEC 17025.

Таблиця 3.3 – Засоби вимірювальної техніки та допоміжні засоби

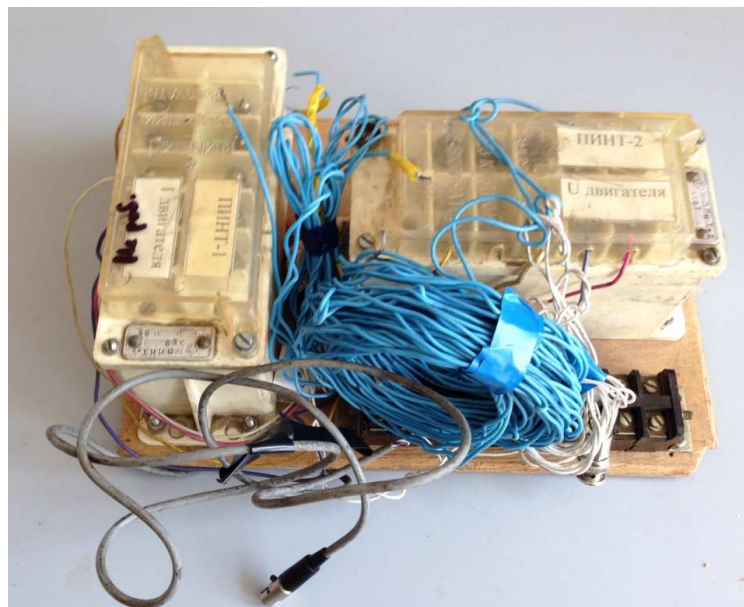
Назва устаткування	Призначення	Діапазон вимірювання	Похибка вимірювання	Невизначеність вимірювання
Програмно-апаратний комплекс на базі Autoscope II (далі USB - осцилограф) та ПК типу Notebook	Реєстрація миттєвих значення вимірюваних параметрів	Діапазон вимірювань: напряга 80...1000 В час 0...3600 с. Частота дискретизації 2500 ... 50000 Гц	Похибки реєстрації: - напруги $\delta = \pm 0,4 \%$; - часу $\delta = \pm 0,2 \%$.	-
Перетворювач вимірювальний напруги (датчик ПИИТ-2)	Вимірювання струму та напруги	від 0 мВ до 75 мВ від 0 В до 150 В від 0 В до 1000 В від 0 В до 1500 В	не більше $\pm 1 \%$	$U_1=0,26$ $U_{10}=0,00168$ $U_{25}=0,00061$ $U_{50}=0,00064$ $U_{75}=0,00072$ $U_{100}=0,00011$ $U_{250}=0,00011$
Шунти 500 А/ 75 мВ,	Вимірювання струму	від 0 А до 500 А	кл. точності 0,5	$U=0,013$ А
Прилад "шлях швидкість час" VBOX III	Вимірювання швидкості, прискорення/сповільнення, шляху, висоти над рівнем моря	0,1-1600 км/год $0 \dots \pm 20g$	дискретність індикації 0,01	Шлях $U=5,0 \%$ швидкість $U=1,5$ км/год сповільнення $U=4,0 \%$
Педаметр електроконтактний	Відмітчик подій	-	-	-
Водяний рівень	Визначення параметрів випробувальної ділянки	-	-	-
Манометр МТИ	Визначення тиску повітря в шинах	$0 \dots 25$ кгс/см ²	$0,2$ кгс/см ²	$0,056$ кгс/см ²

Таблиця 3.3 – Закінчення

Назва устаткування	Призначення	Діапазон вимірювання	Похибка вимірювання	Невизначеність вимірювання
Штангенциркуль ЩЦ-П	Визначення висоти протектора шин	0...250 мм	0,05 мм	U=0,03 мм – плоскі губки; U=0,18 мм кромочні
Ваги платформні, 20ВП4-2	Визначення маси транспортного засобу	100... 10000 кг	10 кг	-



а)



б)

Рисунок 3.4 – Випробувальне устаткування: а) супутниковий прилад V-box, для визначення шляху, часу, прискорення/сповільнення та швидкості автомобіля; б) ПИНТ-2, для реєстрації струму та напруги електричного двигуна автомобіля

3.1.4 Методи вимірювання

Вимірювання кількості електроенергії, яка рекуперується електродвигуном, $E_{\tau e}$, здійснюється непрямим методом за результатами обчислення:

$$E_{\tau e} = \Delta t_n \sum_{n=1}^n U_{\tau en} \cdot I_{\tau en} \quad (3.1)$$

де, $U_{\tau en}$ – миттєве значення напруги на виході з двигуна транспортного засобу, В;

$I_{\tau en}$ – миттєве значення струму, повернутого (рекуперованого) в накопичувачі енергії, А;

Δt_n – крок між двома вимірюваннями миттєвих значень струму та напруги, с;

n – кількість точок вимірювання.

Вимірювання струму $I_{\tau en}$, здійснюється непрямим методом, шляхом вимірювання напруги на шунті, який встановлено в електричне коло транспортного засобу, за схемою, наведеною на рисунку 3.5.



Рисунок 3.5 – Схема вимірювання струму електричного кола

Рекуперований струм $I_{\tau en}$ (А), визначається за формулою:

$$I_{\tau en} = 100U_b, \quad (3.2)$$

де U_b - напруга на виході перетворювача ПИИТ-2, В.

Вимірювання напруги $U_{тен}$ здійснюється непрямим методом вимірювання напруги на виході датчика ПИИТ-2, який встановлено в електричне коло, так, щоб вимірювалася напруга на двигуні транспортного засобу, за схемою, наведеною на рисунку 3.6.

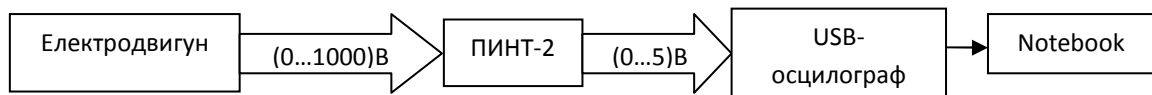


Рисунок 3.6 – Схема вимірювання напруги електричного кола

Напруга в електричному колі $U_{тен}$, (В), визначається за формулою:

$$U_{тен} = 200U_a, \quad (3.3)$$

де U_a - напруга на виході перетворювача ПИИТ -2, В.

Швидкість руху, сповільнення, шлях та висота над рівнем моря транспортного засобу фіксується за допомогою супутникового вимірювального комплексу V-box.

Висота транспортного засобу над рівнем моря фіксується з метою врахування впливу поздовжнього профілю дороги на процес електродинамічного гальмування. Для розрахунку ухилу дорожнього полотна у поздовжньому напрямку необхідно визначити різницю висот над рівнем моря в момент початку та закінчення процесу електродинамічного гальмування. Ухил дорожнього полотна у поздовжньому напрямку визначається за залежністю:

$$i = \frac{h_1 - h_2}{l} \cdot 100\% \quad (3.4)$$

або

$$\alpha = \arctan\left(\frac{h_1 - h_2}{l}\right), \quad (3.5)$$

де i – кут поздовжнього ухилу дороги, %

h_1 – висота дороги над рівнем моря на початку ухилу, м

h_2 – висота дороги над рівнем моря в кінці ухилу, м

l – довжина ділянки дороги

α – кут поздовжнього ухилу дороги, °

3.2 Планування експерименту

Планування експерименту здійснюється з метою побудови та аналізу математичної моделі процесу електродинамічного гальмування, з тим, щоб з максимальною повнотою врахувати вхідні та вихідні характеристики процесу [144, 145]. При цьому доцільно використати представлення у вигляді “чорного ящика” [144, 145]. На даному етапі досліджень достатнім буде проведення двох факторного експерименту. Двохфакторний експеримент характеризується наявністю двох вхідних величин. Вхідними величинами вибрано початкову швидкість гальмування транспортного засобу та величину струму збудження. Ці параметри мають ключове значення при роботі системи електродинамічного гальмування та є одними з найбільш важливих. Функціями відклику приймаються значення сповільнення та кількість рекуперованої енергії, оскільки ці два показники повинні бути прогнозовані для забезпечення роботи системи управління електродинамічним гальмуванням. Таким чином завданням полягає у отриманні залежностей:

$$\begin{aligned} j &= f(V, I_{3\sigma}), \\ E_M &= f(V, I_{3\sigma}). \end{aligned} \quad (3.6)$$

Вхідні параметри є незалежними один від одного, сумісними, тобто усі комбінації факторів є здійсненними, ними можна керувати, вони діють на об'єкт дослідження, не є корельованими, тобто кожен фактор незалежно від іншого можна бути встановлений на будь-який рівень у відповідності до [144].

Натуральні величини факторів під час експерименту будуть варіюватися в певному інтервалі від максимального до мінімального значення. Тому прийнято три рівні варіювання факторів: максимальний, мінімальний та середнє значення.

Таким чином для експерименту доцільно використати матрицю 2^3 нелінійного повного двофакторного експерименту, яку описано у [144].

З метою переносу початку координат в центр експерименту, необхідно провести кодування натуральних величин, таким чином, щоб у кодованому вигляді максимальне значення фактора відповідало $+1$, мінімальне -1 , а середнє -0 [144].

Для кодування натуральних величин X_i факторів варто скористатися наступною залежністю [144]:

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_{i0}}, \quad (3.7)$$

де x_i - кодоване значення фактору;

X_{i0} - натуральне значення основного (нульового) рівня;

ΔX_{i0} - натуральне значення інтервалу варіювання.

$$\begin{aligned} X_{i0} &= \frac{X_{i\max} + X_{i\min}}{2}, \\ \Delta X_{i0} &= \frac{X_{i\max} - X_{i\min}}{2}. \end{aligned} \quad (3.8)$$

У таблиці 3.4 наведено фактори експерименту та їх інтервали варіювання.

Таблиця 3.4 – Рівні варіювання факторів

Фактори			Основний рівень (X_{i0})	Інтервал варіювання (ΔX_{i0})	Верхній рівень ($x_i = +I$)	Нижній рівень ($x_i = -I$)	Зіркова точка + α ($x_i = +1$)	Зіркова точка + α ($x_i = -1$)
Початкова швидкість гальмування	V	м/с	35	25	+1	-1	60	10
Струм збудження	$I_{зб}$	А	2,75	2,75	+1	-1	5	0,5

На основі попередніх досліджень встановлено, що залежності $j = f(V, I_{зб}), E_M = f(V, I_{зб})$ є не лінійними, тому застосовується нелінійну модель другого порядку.

Модель другого порядку, в загальному випадку, має вигляд [144, 145]:

$$\eta = \beta_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} \beta_i x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq k} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{1 \leq i \leq k} \beta_{ii} x_i^2. \quad (3.9)$$

де η - істинна величина функції відгуку;

$\beta_0, \beta_i, \beta_{ij}, \beta_{ii}$ - істинні значення коефіцієнтів;

k - кількість факторів.

У даному випадку, згідно залежності (3.9), наведеної вище, математична модель матиме наступний вигляд:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_V + \beta_2 x_{I_{зб}} + \beta_3 x_V x_{I_{зб}} + \beta_4 x_V^2 + \beta_5 x_{I_{зб}}^2. \quad (3.10)$$

Кількість членів математичної моделі рівне:

$$C = \frac{(k+1)(k+2)}{2}. \quad (3.11)$$

Кількість дослідів повинно бути не менше кількості членів математичної моделі. В даному випадку, при $k=2$, кількість членів математичної моделі становитиме 6.

Загальну кількість дослідів можна визначити за залежністю, запропованою [145]:

$$N = N_1 + 2k + n_0, \quad (3.12)$$

де N_1 - кількість дослідів в ядрі плану ($N_1 = 2^k, k = 2$);

$n_0 = 1$ - кількість дослідів в центрі плану;

$2k$ - кількість зіркових точок.

Провівши обрахунки встановлено, що під час експерименту необхідно провести 9 дослідів, що є більшим числа членів математичної моделі.

Для забезпечення можливості оцінювати коефіцієнти регресії незалежно один від одного необхідно, щоб план експерименту був ортогональним [145]. З цією метою необхідно проводити досліди на відстані зоряного плеча α , яке визначається за залежністю [145]:

$$\alpha^2 = \frac{\sqrt{(N_1 + 2k + n_0)N_1} - N_1}{2}. \quad (3.13)$$

Крім того, для забезпечення ортогональності, необхідно, щоб інформаційна матриця була діагональною. Це можна забезпечити застосувавши прийом, описаний у [145], з тим, щоб рівняння (3.10) набуло вигляду:

$$y = (\beta_0 + \lambda_2 \cdot (\beta_4 + \beta_5)) + \beta_1 x_v + \beta_2 x_{I_{36}} + \beta_3 x_v x_{I_{36}} + \beta_4 (x_v^2 - \lambda_2) + \beta_5 (x_{I_{36}}^2 - \lambda_2), \quad (3.14)$$

де $\lambda_2 = N^{-1} \sum_{u=1}^N x_{i_u}^2$ - середній квадрат значень будь-якого фактора.

Прийнявши позначення нових змінних та вільного члена [145]:

$$\begin{aligned} x_i^2 - \lambda_2 &= x_i', \\ (\beta_0 + \lambda_2 \cdot (\beta_4 + \beta_5)) &= \beta_0' \end{aligned} \quad (3.15)$$

рівняння (3.14) набуде вигляду:

$$y = \beta_0' + \beta_1 x_v + \beta_2 x_s + \beta_3 x_v x_s + \beta_4 x_v^2 + \beta_5 x_s^2. \quad (3.16)$$

Оскільки план експерименту є ортогональним, то коефіцієнти математичної моделі визначаються незалежно один від одного за залежностями, з урахуванням дублювання експерименту [145, залежність 3.32].

Дисперсії оцінок коефіцієнтів розраховуються за залежностями [145, залежність 3.34].

Розраховане значення G -критерію порівнюється з табличним [144] залежно від рівня значимості α , числа степенів вільності $f = (n - 1)$ та кількості дослідів N . Якщо $G_{роз} < G_{табл}$ ряд вважається однорідним.

Дисперсія експерименту визначається за залежністю:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^N S_{\beta_i}^2}{N}. \quad (3.17)$$

Число степенів вільності:

$$f_1 = N \cdot (n - 1). \quad (3.18)$$

Гіпотеза щодо адекватності математичної моделі перевіряється за допомогою F -критерія Фішера:

$$F_{f_1; f_2}^{роз} = \frac{S_{неад}^2}{S_y^2}, \quad (3.19)$$

де $S_{неад}^2$ - дисперсія неадекватності, яка при рівномірному дублюванні дослідів, визначається за формулою:

$$S_{неад}^2 = n \cdot \sum_{u=1}^N (y_{up} - y_{иср.e})^2, \quad (3.20)$$

де $y_{up}, y_{иср.e}$ - функції відгуку в u досліді, відповідно розраховані по рівнянню регресії та визначені експериментально.

Гіпотеза щодо адекватності математичної моделі приймається у випадку, коли

$$F_{f_1; f_2}^{роз} \leq F^{табл}. \quad (3.21)$$

3.3 Опрацювання результатів експерименту

3.3.1 Службове гальмування

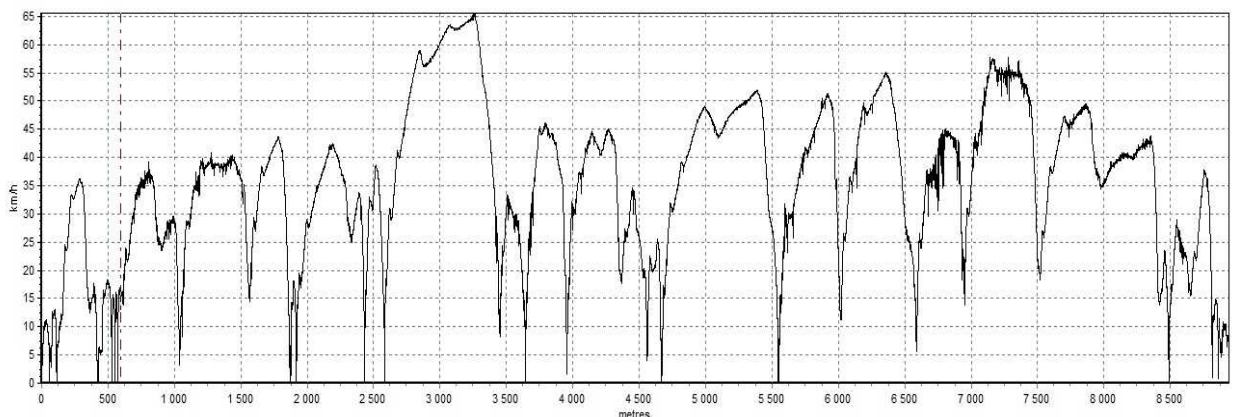
З метою оцінки ефективності системи рекуперативного гальмування проведено випробування, під час яких визначено значення сповільнення.

Випробування проводилися на злітно-посадковій смузі Луцького авіапідприємства, зі швидкостей 60, 35 та 10 км/год. При цьому були дотримані умови зазначені у III розділі дисертації. Результати реєструвалися в умовах реального часу показники зазначені в п. 3.1.2.

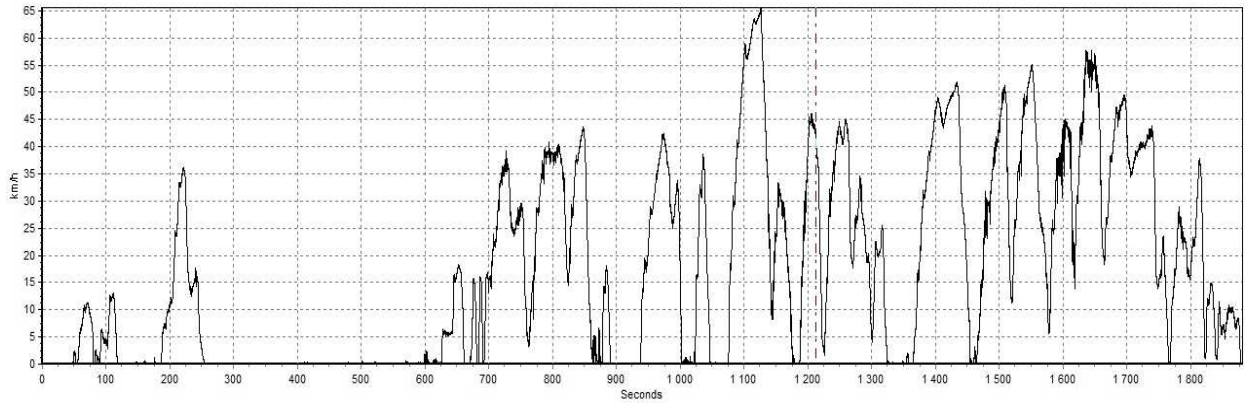
Для кожної швидкості було проведено по три заїзди.

Випробування проводилися наступним чином. Перед початком заїзду накопичувачі приводилися у початковий стан. Транспортний засіб розганявся до швидкості більшої на 5...10 км/год від нормативної. Після цього автомобіль переводився в режим вибігу. При досягненні нормативної швидкості початку гальмування, водій натискав педаль гальм, задіюючи лише електричну складову гальмівної системи. Гальмування автомобіля здійснювалося до повної зупинки. Коли закінчувалася дія електричного складника гальмівної системи, педаль гальм натискалася до кінця, таким чином повна зупинка транспортного засобу забезпечувалася механічним складником гальмівної системи.

В результаті випробувань отримано показники, які зведено у таблицях 3.5, 3.6 та 3.7. Окрім того на рис. 3.7 та 3.8 зображено фрагменти осцилограм, отримані в результаті випробувань.



а)



б)

Рисунок 3.7 — Фрагменти осцилограми, отриманої під час здійснення експерименту: а — зміна швидкості руху на відрізку шляху; б — зміна швидкості руху по часу

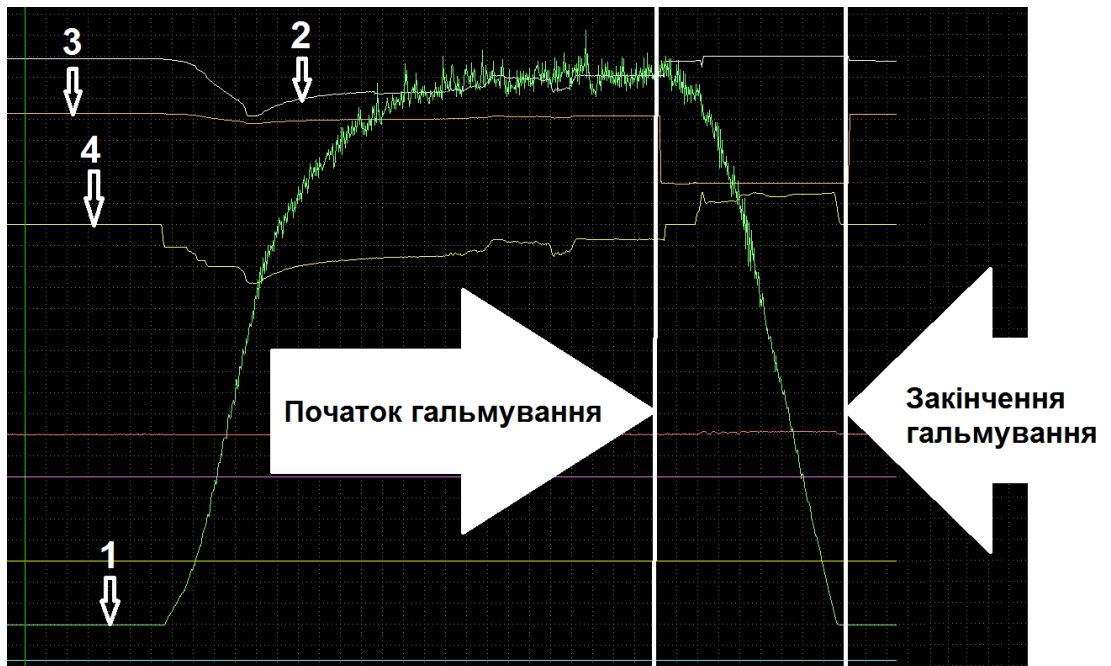


Рисунок 3.8 – Фрагменти осцилограми, отриманої під час здійснення експерименту – реєстрація струму, напруги та швидкості. Умовні позначення: 1 – швидкість, км/год; 2 – напруга, В; 3 – відмітник подій; 4 – струм, А

Таблиця 3.5 – Результати експериментальних даних по ефективності системи рекуперативного гальмування, при передатному числі трансмісії

$$u_{mpe}=5,5$$

№ з/п	V, км/ГОД	$I_{зб}, A$	$j_1, м/с^2$	$j_2, м/с^2$	$j_3, м/с^2$	$j_{cp}, м/с^2$
1	60	5	1	0,9	1,03	0,977
2	60	0,5	0,6	0,8	0,7	0,7
3	10	5	0,8	0,7	0,72	0,74
4	10	0,5	0,35	0,27	0,31	0,31
5	60	2,75	0,85	0,79	0,81	0,817
6	10	2,75	0,41	0,43	0,39	0,41
7	35	5	0,74	0,71	0,73	0,727
8	35	0,5	0,45	0,52	0,41	0,46
9	35	2,75	0,6	0,68	0,69	0,657

Таблиця 3.6 – Результати експериментальних даних по ефективності системи рекуперативного гальмування, при забезпеченні регульованого

процесу, при передатному числі трансмісії $u_{mpe}=11,87$

№ з/п	V, км/ГОД	$I_{зб}, A$	$j_1, м/с^2$	$j_2, м/с^2$	$j_3, м/с^2$	$j_{cp}, м/с^2$
1	60	5	2	2,02	1,98	2
2	60	0,5	1,7	1,6	1,55	1,617
3	10	5	0,84	0,82	0,86	0,84
4	10	0,5	0,52	0,51	0,48	0,503
5	60	2,75	1,8	1,7	1,75	1,75
6	10	2,75	0,61	0,63	0,69	0,643
7	35	5	1,71	1,72	1,60	1,68
8	35	0,5	1,21	1,24	1,33	1,26
9	35	2,75	1,3	1,28	1,32	1,3

Таблиця 3.7 – Результати експериментальних даних по енергоефективності системи рекуперативного гальмування, при забезпеченні регульованого процесу, при передатному числі трансмісії $u_{mpe}=11,87$

№ з/п	V, км/год	$I_{зб}$, А	E_{m1} , кДж	E_{m2} , кДж	E_{m3} , кДж	$E_{m.cp}$, кДж
1	60	5	39,5	38,9	40,2	39,53
2	60	0,5	24,3	22,7	23,9	23,63
3	10	5	10,2	10,3	10,8	10,43
4	10	0,5	3,4	4,1	3,7	3,733
5	60	2,75	32,9	34,1	33,1	33,37
6	10	2,75	5,9	7,1	6,8	6,6
7	35	5	28,2	30,1	29,5	29,27
8	35	0,5	17,9	18,8	19,3	18,67
9	35	2,75	25,4	23,9	24,7	24,67

3.3.2 Оцінювання невизначеності вимірювань

Сучасні вимоги щодо встановлення достовірності результатів випробувань ґрунтуються на концепції “оцінювання невизначеності вимірювань”, яка є більш точною та дозволяє врахувати практично усі можливі впливи на результати випробувань, порівняно з концепцією “оцінювання похибки”, яка довгий час застосовувалася країнами СНД, а в певних видах робіт використовується і до цього часу.

На сьогоднішній день розроблено досить чіткі методології оцінювання невизначеності вимірювань, як загальні [146 – 148], так і для конкретних видів вимірювань або випробувань [149 – 151]. Однак ці методології, зазвичай є загальними та не враховують усі можливі складові невизначеності, крім того процедура оцінювання невизначеності повинна коректуватися, залежно від застосовуваного випробувального устаткування. Тому для більш точного оцінювання невизначеності вимірювань та підготовки адекватної процедури, необхідно враховувати:

- метод проведення вимірювань або випробувань;
- застосовуване випробувань устаткування;

- складові елементи, які мають вплив на отримані результати.

Виходячи з вищевикладеного виникає потреба у конкретизації методик оцінювання невизначеності, які повинні уточнюватися при конкретних умовах проведення робіт. В рамках цієї роботи необхідно розробити методики оцінювання невизначеності для показників ефективності гальмування – значення усталеного сповільнення та показників енергоефективності – значення рекуперованої енергії.

3.3.2.1 Оцінювання невизначеності ефективності гальмування

Критерієм оцінювання ефективності системи електродинамічного гальмування, що нормується нормативними документами [36, 37, 152] є сповільнення, яке створюється під час гальмування транспортного засобу. Для побудови моделі оцінювання невизначеності вимірювань доцільно застосувати методику контролювання ефективності допоміжної гальмівної системи, описану у [152].

Ідентифікація складових невизначеності перед проведенням оцінювання дозволить забезпечити охоплення та врахування усіх можливих впливів на кінцевий результат. Враховуючи методику випробувань [152] найбільший вплив на кінцевий результат випробувань матимуть елементи, зазначені у таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 – Ідентифікація складових невизначеності вимірювань

Назва складника невизначеності	Елемент складника	Умовне позначення
Випробувальне устаткування для визначення сповільнення гальмування	Невизначеність устаткування	Δj_y
Тиск повітря в шинах	Невизначеність устаткування	$\Delta j_{ми}$
Висота рисунка протектора шин	Невизначеність устаткування	$\Delta j_{ер}$

Таблиця 3.8 – Закінчення

Назва складника невизначеності	Елемент складника	Умовне позначення
Швидкість та напрям вітру	Невизначеність устаткування, для вимірювання сили вітру, який діє вздовж поздовжньої осі автомобіля	Δj_g
Стан дорожнього покриття	Коефіцієнт зчеплення коліс з дорогою	Δj_{on}
Стан елементів приводу гальмівної системи	Час затримки приведення в дію гальмівної системи	Δj_{in}
Кваліфікація водія	Час затримки приведення в дію гальмівної системи	Δj_{ie}
Вплив випробувального устаткування	Час затримки ввімкнення вимірювальних приладів	Δj_{ty}
Характеристики випробувальної ділянки	Поздовжній ухил	Δj_{x0}

У таблиці 3.8 ідентифіковано лише основні, найбільш значущі складники невизначеності, в залежності від поставлених задач даний перелік можна як розширювати так і скорочувати, висуваючи певні припущення.

Під час гальмівних випробувань, з метою визначення сповільнення транспортного засобу застосовується випробувальне устаткування, наведене у таблиці 3.9.

Для приладу VBOX III наявне значення невизначеності вимірювань для сповільнення, яке враховує усі елементи від безпосередньо замірів до відображення, тому подальші розрахунки є недоцільними. Крім того у відповідності з п. 7.4.4.1.1 ДСТУ 3649 [152] діапазон швидкостей під час випробувань становить 25...35 км/год, при чому, швидкість початку гальмування допускається контролювати за штатним спідометром автомобіля, оцінювання невизначеності швидкості початку гальмування буде неефективним, а її вплив на загальний результат випробувань буде незначний, враховуючи досить незначну зміну ефективності гальмування в заданому діапазоні швидкостей.

Таблиця 3.9 – Характеристики випробувального устаткування

Назва, марка	Вимірювані величини	Діапазон вимірів	Значення невизначеності вимірювання, згідно свідоцтв про калібрування
Прилад "шлях швидкість час" VBOX III	Визначення сповільнення, часу, швидкості, шляху гальмування	швидкість руху 0...999,9 км/год	Шлях $U=5,0$ % швидкість $U=1,5$ км/год сповільнення $U=4,0$ %
		Шлях 0...9999 м	
		прискорення/сповільнення ± 2 g;	
Штангенциркуль ЩЦ-II	Визначення висоти рисунка протектора шин	0...250 мм	$U=0,03$ мм – плоскі губки; $U=0,18$ мм кромочні губки
Рівень з лазером LEVEL PRO-3	Визначення поздовжнього ухилу випробувального майданчика	Горизонтальний рівень 0° . Вертикальний рівень 90° . Похибка відхилення від горизонтального та вертикального рівнів $\delta=\pm 1$ %	Горизонтальна площина $U=3,5^\circ$
Лазерний дальномір DLE40	Визначення поздовжнього ухилу випробувального майданчика	Діапазон вимірювань: 50...40000 мм Похибка $\Delta = \pm 1,5$ мм	$U=1,9$ мм
Манометр технічний	Визначення тиску повітря в шинах	Діапазон вимірювань 0...25 кг/см ² Похибка $\delta=\pm 5\%$	$U=0,07$ кг/см ²
Педаметр електроконтактний	Відмітки початку та завершення вимірювань	-	-
Анемометр TMA 10	Швидкість вітру	0,4...25 м/с, ціна поділки 0,01 м/с, похибка $\delta= \pm 2\%$	$U=0,2$ м/с

З метою оцінювання невизначеності вимірювань складників, зазначених у таблиці 3.8, необхідно інтегрувати їх до величини сповільнення, а потім провести відповідні розрахунки.

Тиск повітря в шинах впливає як на значення швидкості так і на коефіцієнт зчеплення коліс з дорогою. Відповідно до вищенаведених аргументів, впливом швидкості початку гальмування можна знехтувати. Враховуючи, що тиск в

шинах визначається за допомогою манометра, для якого встановлено межі невизначеності вимірювань, необхідно ці показники врахувати.

У відповідності з [153] нормативне значення тиску в шинах встановлюється при максимальному значенні коефіцієнта зчеплення коліс з дорогою для даної шини. Крім того з теорії автомобіля [127] відомо, що сповільнення автомобіля становить:

$$\Delta j_{\text{тш}} = g \cdot \Delta \varphi_{\text{тш}}, \quad (3.22)$$

де $\Delta j_{\text{тш}}$ – складова невизначеності, яка враховує вплив тиску повітря в шинах на результати випробувань, м/с²;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

$\Delta \varphi_{\text{тш}}$ – зміна коефіцієнта зчеплення коліс з дорогою при зміні тиску повітря в шинах.

Звідси, вважаючи, що коефіцієнт зчеплення для сухого асфальто- або цементобетонного покриття становить 0,7...0,8, тобто змінюється в діапазоні 0,1, та припускаючи, що невизначеність вимірювання тиску, згідно характеристик приладу (табл. 3.9), призведе до зміни коефіцієнту зчеплення коліс з дорогою в межах 5 % , вплив даного параметру на результат визначення сповільнення становитиме 0,049 м/с².

Висота рисунка протектора шин також має досить суттєвий вплив на коефіцієнт зчеплення. Згідно [153] коефіцієнт зчеплення коліс з дорогою для повністю зношених шин зменшується на 20...25 % порівняно з новими. Мінімальне значення висоти рисунка протектора шин, згідно [152] становить 1,6 мм для легкових автомобілів. Тому можна припустити, що зменшення висоти рисунка протектора шини на кожен 1 мм призведе до зменшення коефіцієнту зчеплення коліс з дорогою на 4 %, від середнього значення 0,75. Враховуючи залежність (3.22), вплив висоти рисунка протектора шин на значення сповільнення визначатиметься за залежністю:

$$\Delta j_{ep} = \frac{0.04 \cdot \Delta h \cdot \varphi \cdot g}{100}, \quad (3.23)$$

де Δj_{ep} – складова невизначеності, яка враховує вплив висоти рисунка протектора шин на результати випробувань, м/с²;

φ — середнє значення коефіцієнта зчеплення коліс з дорогою;

Δh – зміна висоти рисунка протектора шини, порівняно з новою, %.

Швидкість та напрям вітру. Напря́м вітру матиме суттєвий вплив на результати випробувань лише у тому випадку, якщо від буде діяти лише вздовж поздовжньої осі транспортного засобу. Розрахунок впливу швидкості вітру здійснюється виходячи з умов проведення випробувань (п. 1.2.5 Правил ЄЕК ООН №13 [36]), тобто приймається максимальна швидкість вітру, при якій допускається проводити випробування 5 м/с. З рівняння балансу сил при гальмуванні транспортного засобу [126], складова невизначеності щодо впливу швидкості на напря́му вітру матиме вигляд:

$$\Delta j_{\epsilon} = \frac{k \cdot F \cdot V_{\epsilon}^2 \cdot \cos \alpha_{\epsilon}}{m_a}, \quad (3.24)$$

де Δj_{ϵ} – складова невизначеності, яка враховує вплив швидкості та напря́му вітру на результати випробувань, м/с²;

k — коефіцієнт обтічності транспортного засобу;

F — площа лобового опору автомобіля, м²;

V_{ϵ} — швидкість вітру, м/с;

m_a — маса транспортного засобу, кг;

α_{ϵ} — кут між напрямком вітру та поздовжньою віссю транспортного засобу.

Врахування коефіцієнту зчеплення коліс з дорогою залежно від стану дорожнього покриття є досить трудомістким та складним процесом, тому доцільно скористатися припущенням, що невизначеність, обумовлена станом дорожнього полотна буде характеризуватися рівномірним розподілом в межах зміни значень коефіцієнту зчеплення для сухого асфальто- або цементобетонного покриття, тобто в межах 0,05, та визначатиметься, для імовірності 95 %, за формулою:

$$\Delta j_{\text{он}} = \frac{g \cdot \Delta \varphi}{34,64}, \quad (3.25)$$

де $\Delta j_{\text{он}}$ – складова невизначеності, яка враховує стан дорожнього покриття на результати випробувань, м/с².

Стан елементів приводу гальмівної системи характеризується часом затримки, тобто часом від моменту приведення в дію елементів приводу до моменту виникнення гальмівного зусилля. Для гідравлічної гальмівної системи даний час приймається в межах 0,03...0,05 с. Для випадків електродинамічного гальмування вплив цього складника враховувати недоцільно, оскільки час приведення в дію електричних систем досить малий.

Крім того можливий також час затримки, пов'язаний з реакцією водія, тобто час затримки приведення в дію органу керування після отримання команди, також потрібно враховувати час затримки пов'язаний із задіюванням вимірювальної апаратури, якщо це пов'язане з ручним ввімкненням або стартом.

Характеристики приладу VBOX III дозволяють проводити заміри сповільнення у певному діапазоні наростання сповільнення. Під час випробувань для нівелювання впливів стану гальмівної системи, реакції водія, затримки ввімкнення приладів, а також у відповідності з вимогам Правила 13 [36], встановлюється діапазон замірів сповільнення в межах 10...90 %. Тобто в

результати випробувань включаються лише дані, отримані в заданому діапазоні миттєвих сповільнень. Якщо ж необхідно врахувати вищеописані складники невизначеності можна застосувати наступну залежність, припускаючи нормальний розподіл величин та враховуючи значення вимірюваної величини:

$$\Delta j_t = \Delta j \frac{t_i}{2\sqrt{3}}, \quad (3.26)$$

де Δj_t – складова невизначеності, яка враховує t_n, t_e, t_y - вплив часу затримки на результати випробувань, м/с²;

Δj — різниця між максимальним та мінімальним заліковим значенням сповільнення, зареєстрованим під час гальмівних випробувань конкретного транспортного засобу, м/с²;

t_n — час затримки спрацювання гальмівного приводу, с;

t_e — час затримки реакції водія, с;

t_y — час затримки ввімкнення вимірювальної апаратури, с;

Згідно статистичних даних, час затримки ввімкнення вимірювальної апаратури співрозмірний з часом реакції водія та перебуває в межах 0,6...0,8 с.

За результатами аналізування характеристик випробувального майданчика найбільший вплив на результати гальмівних випробувань матиме поздовжній ухил. Згідно нормативних документів поздовжній ухил під час гальмівних випробувань не повинен перевищувати 1,5 % або $\approx 1^\circ$.

З рівняння балансу сил при гальмуванні транспортного засобу [126], складова невизначеності щодо впливу поздовжнього ухилу матиме вигляд:

$$\Delta j_{x\delta} = 0,1 \cdot g \cdot \sin \alpha_{yn}, \quad (3.27)$$

де $\Delta j_{x\delta}$ – складова невизначеності, яка враховує вплив поздовжнього ухилу випробувального майданчика на результати випробувань, м/с²;

α_{yn} — кут поздовжнього ухилу випробувального майданчика, °.

Таким чином у відповідності до таблиці 3.8, ідентифіковано та визначено основні важливі складові невизначеності, які можуть мати вплив під час визначенні ефективності електродинамічного гальмування транспортного засобу. Аналогічним чином, можна визначити і інші складові невизначеності, однак в даному випадку, вони не матимуть досить суттєвого впливу на кінцевий результат, тому ними можна знехтувати.

Алгоритм оцінювання невизначеності визначений згідно [146]. Стандартна сумарна невизначеність вимірювання сповільнення:

$$u(j)_c = \sqrt{j_A^2 + j_y^2 + j_{mu}^2 + j_{ep}^2 \pm j_6^2 + j_{dn}^2 + j_m^2 + j_{16}^2 + j_{1y}^2 \pm j_{x0}^2}, \quad (3.28)$$

де $u(j)_c$ – стандартна сумарна невизначеність вимірювання сповільнення, м/с²;

j_A — невизначеність вимірювань за типом А, м/с²;

j_y — невизначеність вимірювань випробувального устаткування, значення, зазвичай, вказується у експлуатаційних документах на прилад або у свідоцтві калібрування, м/с².

У виразі (3.28), з метою підвищення точності розрахунків, необхідно звертати увагу на наступні моменти:

1. складова невизначеності, яка враховує напрям та швидкість вітру підставляється зі знаком “мінус”, якщо усі заїзди проводяться у напрямку, попутному напрямку вітру. Однак зазвичай під час випробувань заїзди здійснюються у двох взаємопротилежних напрямках, тому у залежності (3.28) ставиться знак “плюс”;

2. складова невизначеності, яка враховує ухил випробувального майданчика підставляється зі знаком “мінус”, якщо усі заїзди проводяться у напрямку, ухилу. Однак зазвичай під час випробувань заїзди здійснюються у

двох взаємопротилежних напрямках, тому у залежності (3.28) ставиться знак “плюс”;

Невизначеність вимірювань за типом А визначається за формулою (3.29) [146]:

$$j_A = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \sum_{i=1}^n (j_i - \bar{j})^2}, \quad (3.29)$$

де j_i — значення сповільнення i -го заїзду, м/с²;

\bar{j} - середнє значення сповільнення, м/с²;

n — кількість замірів (заїздів).

Розширена невизначеність буде визначатися з виразу [146]:

$$u(j) = k \cdot u(j)_c, \quad (3.30)$$

де k — коефіцієнт покриття [146], який визначається як коефіцієнт Стьюдента для рівня ймовірності $p=0,95$ залежно від кількості степенів вільності ν_{eff} . Кількість степенів вільності розраховується за формулою Велча-Саттерсвейта [146]:

$$\nu_{eff} = (n-1) \cdot \left(\frac{u(j)_c}{j_A} \right)^4. \quad (3.31)$$

Розрахунок невизначеності та представлення результатів. За результатами побудови моделі оцінювання невизначеності вимірювань під час визначення ефективності системи електродинамічного гальмування транспортних засобів з гібридною або електричною силовою установкою, проведено оцінювання невизначеності вимірювань за вищеописаною схемою. Оцінювання невизначеності вимірювань проведено лише для рекуперативного гальмування,

при забезпеченні регульованого процесу, зі збільшеним передатним відношенням трансмісії ($u_{mpe}=11,87$), оскільки лише в цьому випадку забезпечуються максимальні показники ефективності.

За результатами визначення величини сповільнення, яке розвивається транспортним засобом під час електродинамічного гальмування, отримано результати, наведені у таблиці 3.10. Дослідження проводилися на ділянці дороги, яка за своїми характеристиками відповідає вимогам Правил ЄЕК ООН № 13 [36]. Швидкість вітру не перевищувала 5 м/с. Напрямок вітру паралельно поздовжній осі транспортного засобу. Заїзди проводилися у обох взаємопротилежних напрямках. Висота рисунка протектора шин становила 3,7 мм. Тиск в шинах, за результатами замірів, відповідав значенню, встановленому підприємством-виробником транспортного засобу. Габаритна висота транспортного засобу — 1300 мм. Колія передньої осі — 1200 мм. Маса транспортного засобу — 550 кг.

Результати оцінювання невизначеності вимірювань наведені у таблиці 3.11, відповідно до рекомендацій [146].

Таблиця 3.10 – Складові та бюджет невизначеності вимірювань сповільнення транспортного засобу

Вхідна величина	Оцінки вхідних величин та ідентифікація складових невизначеності	
	Залежність	Значення
Невизначеність випробувального устаткування	З характеристик устаткування (табл. 3.9)	4,0 %
Тиск повітря в шинах	(3.22), м/с^2	0,049 м/с^2
Висота рисунка протектора шин	(3.23), м/с^2	0,045 м/с^2
Напрямок та швидкість вітру	(3.24), м/с^2	0,00184 м/с^2
Стан дорожнього покриття	(3.25), м/с^2	0,0144 м/с^2
Час затримки ввімкнення вимірювальної апаратури	(3.26), м/с^2	0,0909 м/с^2
Випробувальний майданчик	(3.27), м/с^2	0,00855 м/с^2

Таблиця 3.11 – Результати оцінювання невизначеності вимірювань сповільнення транспортного засобу

№ з/п	V, км/ГОД	j_{cp} , м/с ²	j_y , м/с ²	j_A , м/с ²	$u(j_c)$, м/с ²	k	v_{eff}	$u(j_c)$, м/с ²
1	60	2,000	0,0800	0,0115	0,1397	1,96	42804	0,2737
2	60	1,617	0,0647	0,0441	0,1382	1,96	193	0,2709
3	10	0,840	0,0336	0,0115	0,1193	1,96	22796	0,2338
4	10	0,503	0,0201	0,0120	0,1163	1,96	17514	0,2279
5	60	1,750	0,0700	0,0289	0,1368	1,96	1008	0,2681
6	10	0,643	0,0257	0,0240	0,1192	1,96	1210	0,2337
7	35	1,680	0,0671	0,0384	0,1377	1,96	329	0,2698
8	35	1,260	0,0504	0,0361	0,1297	1,96	335	0,2541
9	35	1,300	0,0520	0,0115	0,1257	1,96	28120	0,2464

За результатами розрахунків та оцінювання невизначеності вимірювань ефективності електродинамічного гальмування можна констатувати, що з імовірністю $p=0,95$ фактичне значення сповільнення перебуває в межах $j=(j_{cp} \pm u(j_c))$ м/с². Разом з тим необхідно зауважити, що довірчий інтервал може змінюватися в досить широкому діапазоні, залежно від зміни значень оцінюваних величин. Наприклад, якщо за кермом перебуває досвідчений водій-випробувач час затримки ввімкнення випробувальної апаратури зменшиться вдвічі, тоді довірчий інтервал, при усіх інших ідентичних показниках, буде вужчий. Тобто довірчий інтервал буде зменшуватися по мірі зменшення внесків у невизначеність вимірювань складових частин, описаних вище.

Визначення довірчого інтервалу за методом оцінювання похибки є неефективним, оскільки з цього інтервалу випадає частина фактичних значень, крім того цей метод не враховує ряд показників, які мають вплив на кінцеві результати. Довірчий інтервал, визначений за методом оцінювання невизначеності охоплює усю область отриманих значень, крім того він враховує вплив основних параметрів, наведених у таблиці 3.8. Отож на основі наведених розрахунків можна констатувати, що концепція оцінювання невизначеності вимірювань більш точно відображає фактичні результати

випробувань та дозволяє стверджувати, що з певною імовірністю визначений параметр перебуває у межах довірчого інтервалу.

3.3.2.2 Оцінювання невизначеності показників енергоефективності

Для оцінювання невизначеності показників енергоефективності за основу використано методику розроблену Харківським національним університетом радіоелектроніки та Державним підприємством „Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут міського господарства” [154].

Вимірювання кількості рекуперованої енергії здійснюють непрямим методом через визначення миттєвих значень напруги на клеммах електродвигуна та струму, виробленого електричним двигуном під час здійснення гальмування. Непрямі вимірювання напруги та струму електричного кола здійснюють за схемою, яку зображено на рис. 3.5 та 3.6.

Вимірювання струму здійснюють шляхом вимірювання напруги на шунті з δ_u відносною похибкою 0,5 % та невизначеністю $u_u = 0.328024$. Перетворення напруги (0 – 1000В) до напруги (0 – 5В) здійснюється за допомогою перетворювача ПИНТ-2. Відносна похибка перетворення δ_n не більше 1,0 %. Невизначеність під час перетворення становить $u_n = 0.274787$. Реєстрація миттєвих значень напруги та струму здійснюється програмно-апаратним комплексом на базі двоканального USB-осцилографу та ПК типу Notebook, відносна похибка вимірювання якого δ_p не перевищує 0,4 %. Невизначеність під час реєстрації параметрів врахована у відповідних невизначеностях струму та напруги. Похибка кроку між двома вимірюваннями миттєвих значень струму та напруги δ_{Δ} складає 0,01 %, невизначеність становить $u_{\Delta} = 0.057735$.

За результатами вимірювання значень напруги і струму визначається кількість рекуперованої енергії під час руху транспортного засобу на заданому їздовому циклі.

Модельне рівняння визначення кількості рекуперованої енергії буде мати вигляд [154]:

$$E_M = \Delta t_n \cdot \sum_{i=1}^n U_i \cdot I_i, \quad (3.32)$$

де U_i – миттєве значення напруги електродвигуна, В; I_i – миттєве значення спожитого струму, А; Δt_n – крок між двома вимірюваннями миттєвих значень струму та напруги, год; n – кількість точок вимірювання;

За наведеними модельним рівнянням (3.32) визначається m значень E_M .

В якості оцінки результату вимірювання приймається середнє арифметичне m окремих значень E_{Mj} , розрахованих за формулою (3.32) [154]:

$$E'_M = \bar{E}_M = \frac{1}{m} \cdot \sum_{j=1}^m E_{Mj}. \quad (3.33)$$

Модельному рівнянню (3.32) відповідає наступний вираз для сумарної стандартної невизначеності вимірювання витрат електроенергії $u_C(E_M)$, згідно ДСТУ-Н РМГ 43:2006 [146]:

$$u_C(E_M) = \sqrt{u_A^2(\bar{E}_M) + u_B^2(E_M)}, \quad (3.34)$$

де $u_A(\bar{E}_M)$ – стандартна невизначеність за типом А вимірювання витрат електроенергії, яка визначається за залежністю [154]:

$$u_A(\bar{E}_M) = \sqrt{\frac{1}{m \cdot (m-1)} \cdot \sum_{j=1}^m (E_{Mj} - \bar{E}_M)^2} \quad (3.35)$$

$u_B(E_M)$ – сумарна стандартна невизначеність за типом В, яка розраховується за наведеною нижче формулою [154]:

$$u_B(E_M) = \sqrt{(u_{\Delta} \cdot \bar{E}_M)^2 + u_{u_i}^2 \cdot u_n^2 \cdot \Delta t^2}. \quad (3.36)$$

Розширена невизначеність визначається з виразу [154]:

$$U(E_M) = k \cdot u_C(E_M), \quad (3.37)$$

де k – коефіцієнт покриття [154], який визначається як коефіцієнт Стьюдента для рівня ймовірності 0,95 залежно від кількості степенів вільності ν_{eff} . Кількість степенів вільності розраховується за формулою Велча-Саттерсвейта:

$$\nu_{eff} = (m-1) \cdot \left(\frac{u_C(E_M)}{u_A(\bar{E}_M)} \right)^4. \quad (3.38)$$

Бюджет невизначеності вимірювань рекуперованої електроенергії згідно з модельним рівнянням (3.32), за результатами проведених розрахунків наведено в табл. 3.12.

За результатами розрахунків та оцінювання невизначеності вимірювань ефективності електродинамічного гальмування можна констатувати, що з рівнем довіри $p=0,95$ фактичне значення сповільнення перебуває в межах $E_M = (E_{Mcp} \pm U(E_M))$, кДж.

Таблиця 3.12 – Бюджет невизначеності вимірювань кількості рекуперованої електричної енергії

№ з/п	V , км/ГОД	E_{Mcp} , кДж	$u_A(E_M)$, кДж	$u_B(E_M)$, кДж	$u_C(E_M)$, кДж	k	v_{eff}	$U(E_M)$, кДж
1	60	39,53	0,920	2,282	2,461	1,96	102	4,823
2	60	23,63	1,006	1,364	1,695	2,12	16	3,594
3	10	10,43	0,403	0,602	0,725	2,08	21	1,508
4	10	3,733	0,393	0,216	0,448	3,18	3	1,425
5	60	33,37	0,802	1,927	2,087	1,96	92	4,090
6	10	6,6	0,610	0,381	0,719	2,78	4	1,999
7	35	29,27	0,966	1,690	1,946	1,96	33	3,815
8	35	18,67	0,716	1,078	1,294	2,08	21	2,692
9	35	24,67	0,826	1,424	1,647	2,04	32	3,359

3.4 Регресійні математичні моделі процесу рекуперативного гальмування

Результати експериментальних досліджень по визначенню питомої рекуперованої енергії наведено у таблицях 3.13 та 3.14.

Таблиця 3.13 – Питома енергія, рекуперована двигуном, під час гальмування, при $u_{mpe}=5,5$

№ дослідю	V , км/ГОД		$I_{зб}$, А		E_m , кДж (y')			
	x_1	X_1	x_2	X_2	y'_1	y'_2	y'_3	y'_{cp}
1	1	60	1	5	10	9	9	9,333
2	1	60	-1	0,5	2	3	2	2,333
3	-1	10	1	5	3	2	3	2,667
4	-1	10	-1	0,5	1	0,5	1	0,833
5	1	60	0	2,75	7	7	6	6,667
6	-1	10	0	2,75	4	3	4	3,667
7	0	35	1	5	5	6	5	5,333
8	0	35	-1	0,5	3	2	2	2,333
9	0	35	0	2,75	5	5	6	5,333

Таблиця 3.14 – Питома енергія, рекуперована двигуном, під час гальмування, із збільшеним передатним відношенням трансмісії ($u_{mpe}=11,87$) та застосуванням регулювання характеристик електричного приводу

№ досліджу	V, км/год		$I_{зб}$, А		E_m , кДж (y')			
	x_1	X_1	x_2	X_2	y'_1	y'_2	y'_3	y'_{cp}
1	1	60	1	5	39,5	38,9	40,2	39,53
2	1	60	-1	0,5	24,3	22,7	23,9	23,63
3	-1	10	1	5	10,2	10,3	10,8	10,43
4	-1	10	-1	0,5	3,4	4,1	3,7	3,733
5	1	60	0	2,75	32,9	34,1	33,1	33,37
6	-1	10	0	2,75	5,9	7,1	6,8	6,6
7	0	35	1	5	28,2	30,1	29,5	29,27
8	0	35	-1	0,5	17,9	18,8	19,3	18,67
9	0	35	0	2,75	25,4	23,9	24,7	24,67

За отриманими результатами експерименту побудовано залежності кількості рекуперованої енергії від швидкості за різної ефективності гальмування (див. рис. 3.9 та 3.10).

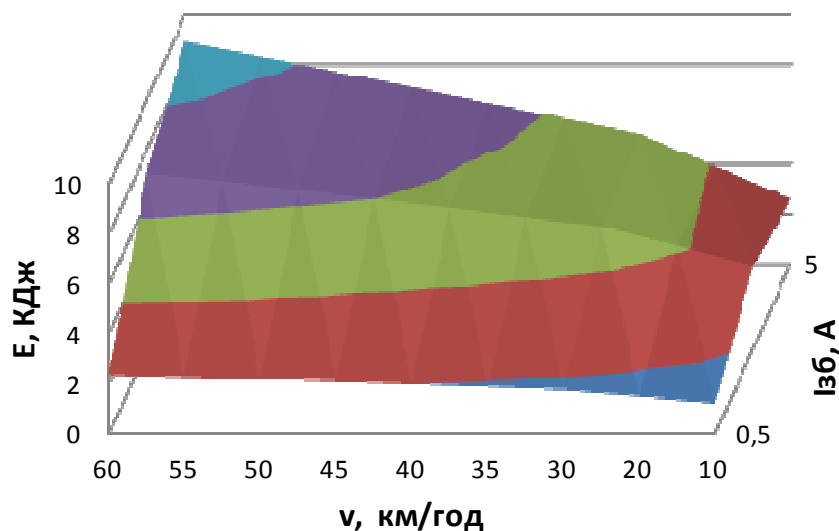


Рисунок 3.9 – Питома енергія, рекуперована двигуном, під час гальмування, при $u_{mpe}=5,5$

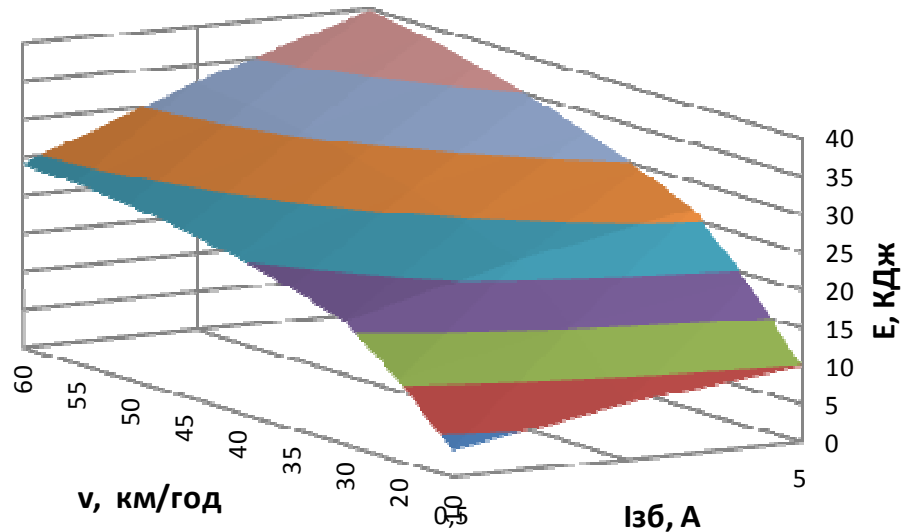


Рисунок 3.10 – Питома енергія, рекуперована двигуном, під час гальмування, із збільшеним передатним відношенням трансмісії ($u_{mpe}=11,87$) та застосування регулювання характеристик електричного приводу

Оскільки, як видно з наведених графіків та отриманих результатів експерименту, застосування регульованого процесу рекуперативного гальмування, при збільшеному передатному числі трансмісії є значно ефективнішим, то в подальшому побудова математичної моделі здійснювалася лише для цього випадку.

Результати розрахунку коефіцієнтів математичної моделі та значення їх дисперсії, наведені у таблицях 3.15 та 3.16.

Враховуючи розраховані коефіцієнти, рівняння регресії матиме вигляд:

$$E = 84,268 + 78,83 \cdot I_{зб} + 34,54 \cdot V + 11,72 \cdot I_{зб} \cdot V - 16,76 \cdot I_{зб}^2 - 2,4 \cdot V^2. \quad (3.39)$$

Розрахункове значення критерію Фішера $F_p = 4,0642$ є меншим табличного при 1 % рівні значимості $F_{m(0,01; 3; 18)} = 4,9$. Гіпотеза щодо адекватності математичної моделі підтверджується.

Таблиця 3.15 – Результати розрахунку коефіцієнтів регресії математичної моделі та їх дисперсії

Значення коефіцієнтів для кодovаних значень параметрів	b'_0	b_1	b_2	b_{12}	b_{11}	b_{22}	b_0
	21,1	12,63	5,533	2,3	-4,65	-0,667	24,644
Оцінка дисперсії коефіцієнтів регресії	$S^2_{b'0}$	S^2_{b1}	S^2_{b2}	S^2_{b12}	S^2_{b11}	S^2_{b22}	S^2_{b0}
	0,017106	0,025658	0,025658	0,038488	0,076975	0,076975	0,085528
Значення коефіцієнтів для натуральних величин	t'_0	t_1	t_2	t_{12}	t_{11}	t_{22}	t_0
	161,3	78,83	34,54	11,724	16,76	2,4029	84,268
Значущість коефіцієнтів	Значущий	Значущий	Значущий	Значущий	Значущий	Незначущий	Значущий

Таблиця 3.16 – Перевірка адекватності математичної моделі для визначення питомої енергії

Показник	Значення показника
Число степенів свободи, f_1	18
Дисперсія адекватності, $S_{ад}^2$	1,877
Рівень значимості, $\alpha_{0,01}$	2,88
Розрахункове значення критерію Фішера, F_p	4,0642
Табличне значення критерію Фішера, F_m	4,9

Результати експериментальних досліджень по визначенню сповільнення, яке виникає під час рекуперативного гальмування наведено у таблицях 3.17 та 3.18.

За отриманими результатами експерименту побудовано залежності кількості рекуперованої енергії від швидкості за різної ефективності гальмування (див. рис. 3.11 та 3.12).

Таблиця 3.17 – Значення сповільнення, яке виникає під час, під час рекуперативного гальмування, без застосування регулювання ($u_{mpe}=5,5$)

№ дослідю	V, км/ГОД		$I_{зб}$, А		j, м/с (y')			
	x_1	X_1	x_2	X_2	y'_1	y'_2	y'_3	y'_{cp}
1	1	60	1	5	1,00	0,90	1,03	0,977
2	1	60	-1	0,5	0,60	0,80	0,70	0,700
3	-1	10	1	5	0,80	0,70	0,72	0,740
4	-1	10	-1	0,5	0,35	0,27	0,31	0,310
5	1	60	0	2,75	0,85	0,79	0,81	0,817
6	-1	10	0	2,75	0,41	0,43	0,39	0,410
7	0	35	1	5	0,74	0,71	0,73	0,727
8	0	35	-1	0,5	0,45	0,52	0,41	0,460
9	0	35	0	2,75	0,60	0,68	0,69	0,657

Таблиця 3.18 – Значення сповільнення, яке виникає під час, під час рекуперативного гальмування, під час гальмування транспортного засобу із збільшеним передатним відношенням трансмісії ($u_{mpe}=11,87$)

№ дослідю	V, км/ГОД		$I_{зб}$, А		j, м/с (y')			
	x_1	X_1	x_2	X_2	y'_1	y'_2	y'_3	y'_{cp}
1	1	60	1	5	2,02	2,00	1,98	2,00
2	1	60	-1	0,5	1,70	1,60	1,55	1,70
3	-1	10	1	5	0,84	0,82	0,86	0,84
4	-1	10	-1	0,5	0,52	0,51	0,48	0,52
5	1	60	0	2,75	1,80	1,70	1,75	1,80
6	-1	10	0	2,75	0,61	0,63	0,69	0,61
7	0	35	1	5	1,71	1,72	1,60	1,71
8	0	35	-1	0,5	1,21	1,24	1,33	1,21
9	0	35	0	2,75	1,3	1,28	1,32	1,30

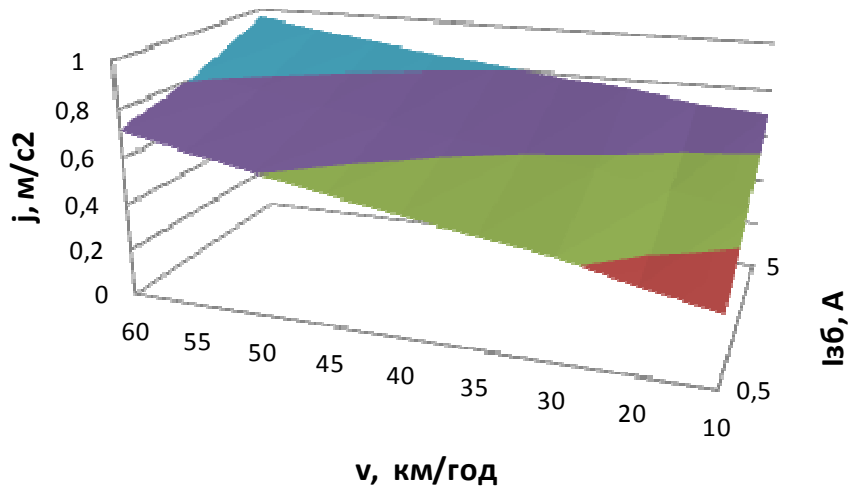


Рисунок 3.11 – Сповільнення, яке виникає під час рекуперативного гальмування, при $u_{\text{тре}}=5,5$

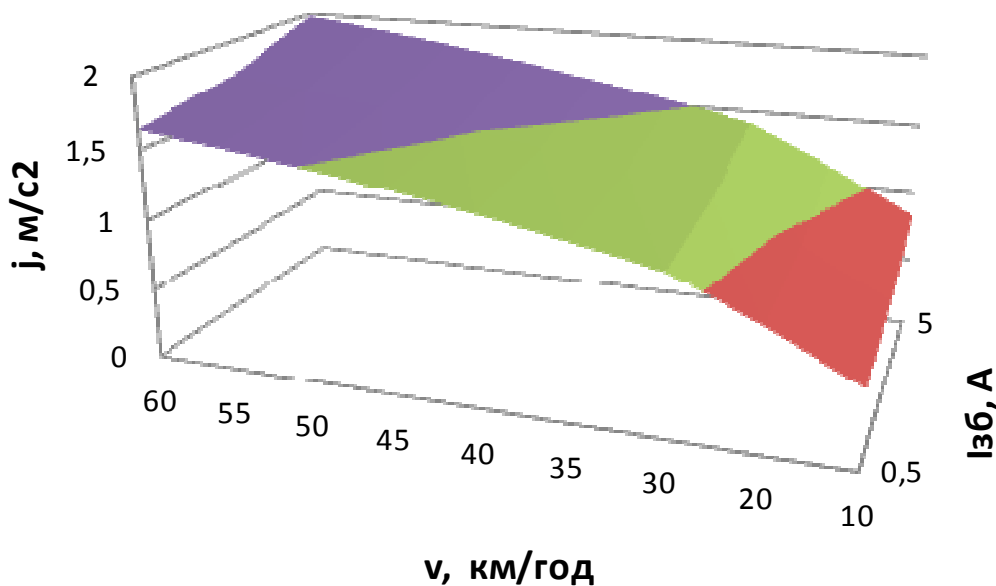


Рисунок 3.12 – Сповільнення, яке виникає під час рекуперативного гальмування транспортного засобу, із збільшеним передатним відношенням трансмісії ($u_{\text{тре}}=11,87$)

З наведених на рис. 3.11 та рис. 3.12 залежностей видно, що застосування ШІМ-регулювання під час рекуперативного гальмування підвищує ефективність гальмівної системи і, водночас, забезпечує максимальне

накопичення енергії, тому в подальшому розглядатиметься процес електродинамічного гальмування з рекуперацією енергії із застосуванням широтно-імпульсного регулювання.

Результати розрахунку коефіцієнтів математичної моделі та значення їх дисперсії наведені у таблицях 3.19 та 3.20.

Таблиця 3.19 – Результати розрахунку коефіцієнтів регресії математичної моделі та їх дисперсії

Значення коефіцієнтів для кодованих значень параметрів	b'_0	b_1	b_2	b_{12}	b_{11}	b_{22}	b_0
	1,288	0,563	0,189	0,0117	-0,187	0,085	1,356
Оцінка дисперсії коефіцієнтів регресії	$S^2_{b'0}$	S^2_{b1}	S^2_{b2}	S^2_{b12}	S^2_{b11}	S^2_{b22}	S^2_{b0}
	0,000082	0,000124	0,000124	0,000185	0,000371	0,000371	0,000412
Значення коефіцієнтів для натуральних величин	t'_0	t_1	t_2	t_{12}	t_{11}	t_{22}	t_0
	141,8	50,66	17,04	0,8566	9,6914	4,4131	66,767
Значущість коефіцієнтів	Значущий	Значущий	Значущий	Незначущий	Значущий	Значущий	Значущий

Таблиця 3.20 – Перевірка адекватності математичної моделі для визначення питомої енергії

Показник	Значення показника
Число степенів свободи, f_1	18
Дисперсія адекватності, S_{ad}^2	1,0671
Рівень значимості, $\alpha_{0,01}$	2,88
Розрахункове значення критерію Фішера, F_p	3,4924
Табличне значення критерію Фішера, F_m	4,9

Враховуючи розраховані коефіцієнти, рівняння регресії матиме вигляд:

$$j = 66,767 + 50,66 \cdot I_{зб} + 17,04 \cdot V - 0,8566 \cdot I_{зб} \cdot V - 9,6414 \cdot V^2 + 4,4131 \cdot I_{зб}^2. \quad (3.40)$$

Розрахункове значення критерію Фішера $F_p=3,4924$ є меншим табличного при 1 % рівні значимості $F_{m(0,01; 3; 18)}= 4,9$. Гіпотеза щодо адекватності математичної моделі підтверджується.

3.5 Висновки з розділу

1. Розроблено методику проведення експерименту досліджень, яка базується на використанні методів двофакторного нелінійного планування експерименту з отриманням регресійних моделей нелінійного взаємоз'язку вихідних параметрів дослідження – сповільнення j та рекуперованої енергії E_p , з вхідними факторами – початкової швидкості гальмування V та струмом збудження $I_{зб}$

2. Проведено експериментальні дослідження системи рекуперативного гальмування на гібридному автомобілі ГСУ-1, за отриманими експериментальними даними побудовано рівняння регресії для визначення сповільнення та кількості питомої рекуперованої енергії

3. Побудовані математичні моделі можна вважати адекватними за критерієм Фішера, крім того на основі проведеного оцінювання невизначеності з імовірністю 95 % зазначені математичні моделі можна вважати адекватними.

РОЗДІЛ 4

РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ РЕКУПЕРАТИВНОГО ГАЛЬМУВАННЯ АВТОМОБІЛЯ З ЕЛЕКТРИЧНИМ ПРИВОДОМ

4.1 Оцінювання результатів теоретичних та експериментальних досліджень

Теоретичні дані, отримані теоретичними розрахунками та експериментальними дослідженнями потребують взаємного оцінювання, з метою встановлення адекватності даних.

Оцінювання вихідних даних, отриманих теоретичним та експериментальним шляхами проведено графічно-чисельним методом. Під час оцінювання теоретичних та експериментальних даних побудовано криві, які характеризують зміну значень сповільнення (див. рис. 4.1) та питомої енергії (див. рис. 4.2) під час здійснення рекуперативного гальмування транспортного засобу.

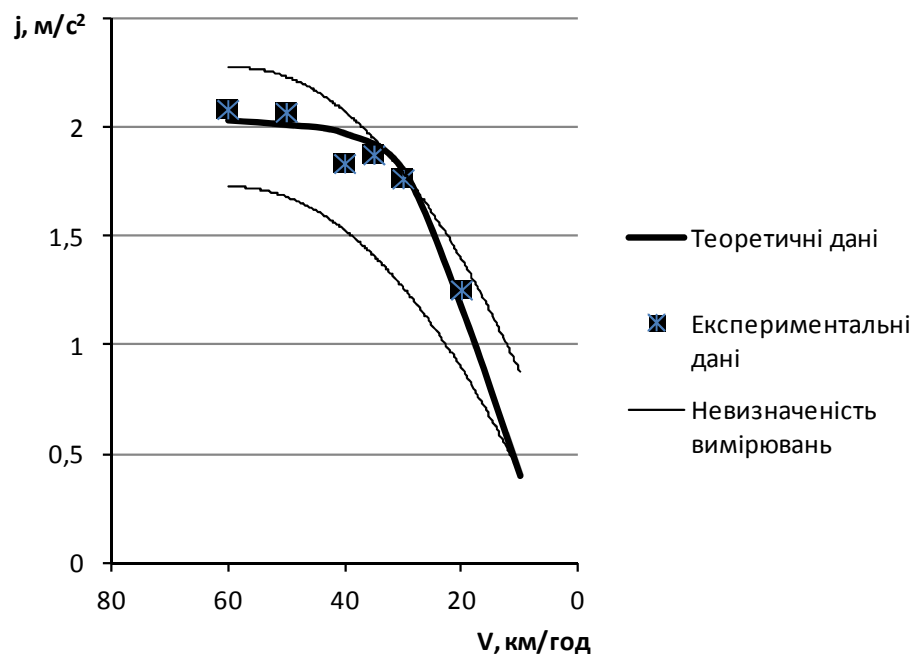


Рисунок 4.1 – Порівняння результатів теоретичних та експериментальних досліджень за ефективністю рекуперативного гальмування

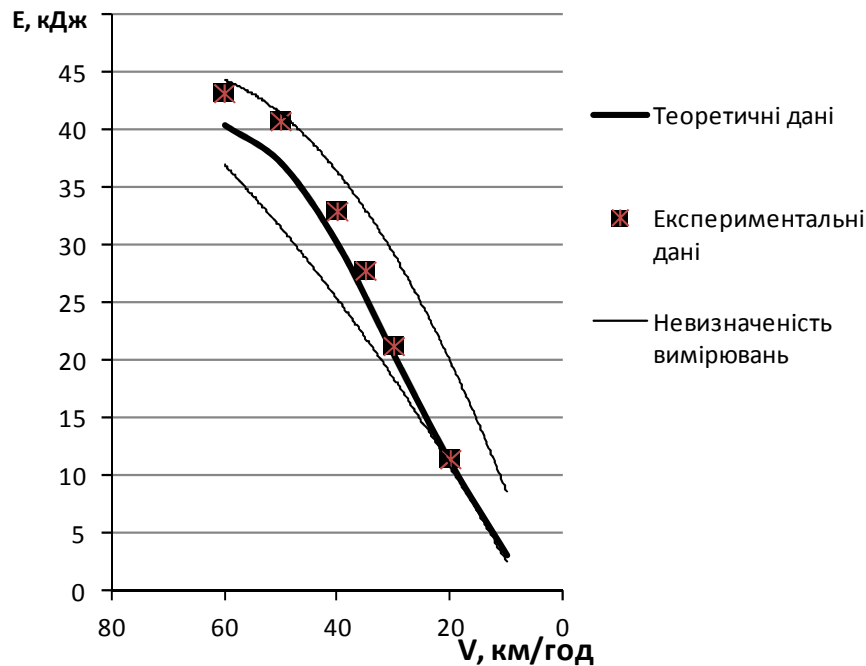


Рисунок 4.2 – Порівняння результатів теоретичних та експериментальних досліджень за кількістю рекуперованої енергії

Похибка результатів теоретичних та експериментальних досліджень по значенню сповільненню становить до 8 %.

Похибка результатів теоретичних та експериментальних досліджень по значенню питомої енергії становить до 11 %.

За відомими залежностями наведеними у [145, залежності (2.80), (2.95) – (2.98)] проведені розрахунки, з метою перевірки адекватності математичних моделей, отриманих теоретичними розрахунками та експериментальним шляхом з метою перевірки їх адекватності. У таблиці 4.1 наведено результати розрахунків за значеннями сповільнення та рекуперованої енергії для діапазону швидкостей 60...20 км/год.

На приведених графіках (див. рис. 4.1 та 4.2) також наведено криві невизначеності вимірювань, які визначають довірчий інтервал для отриманих значень сповільнення та питомої енергії. Тобто можна стверджувати, що при рівні довіри 0,95 експериментальні значення знаходяться між зазначеними

кривими. Окрім того з графіків видно, що результати отримані теоретичними розрахунками практично в усьому діапазоні також перебувають в межах довірчого інтервалу. Певні невідповідності спостерігаються наприкінці процесу, це обумовлено нестабільністю показників на малих швидкостях, в момент припинення рекуперативного гальмування.

Таблиця 4.1 – Результати порівняння вихідних даних теоретичних та експериментальних досліджень

Показник	Значення показника	
	сповільнення	питома енергія
Дисперсія експерименту, $S_{екс}^2$	0,006624	2,23216
Дисперсія адекватності, $S_{ад}^2$	0,0018	0,4619
Розрахункове значення критерію Фішера, F_p	3,68	4,83
Табличне значення критерію Фішера, F_m	4,9	4,9
Похибка результатів	до 8 %	до 11 %

За наведеними даними можна стверджувати про достовірність побудованих теоретичних та експериментальних моделей з імовірністю 0,95.

4.2 Дослідження роботи системи рекуперації

4.2.1 Ефективність гальмування

Основним показником ефективності гальмування є значення сповільнення.

За залежностями (2.15) та (2.46), наведеними у розділі 2 проведено розрахунки ефективності системи рекуперативного гальмування та побудовано відповідні графіки (рис. 4.3 – 4.8). Окрім того, проведено розрахунки кількості рекуперованої енергії та ефективності гальмування для автомобіля з електричним приводом, при передатному числі трансмісії $u_{mpe}=5,5$.

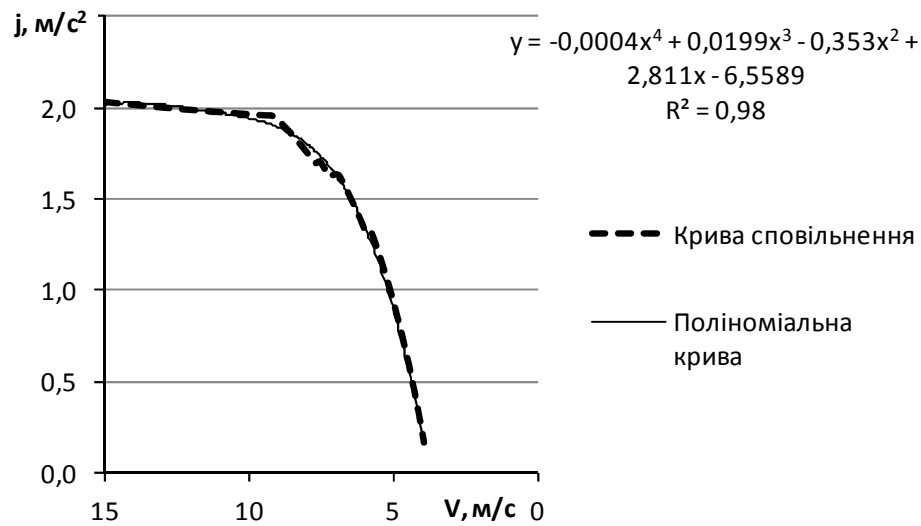


Рисунок 4.3 – Характер зміни сповільнення під час рекуперативного гальмування транспортного засобу, при передатному числі трансмісії $u_{mpe}=11,87$

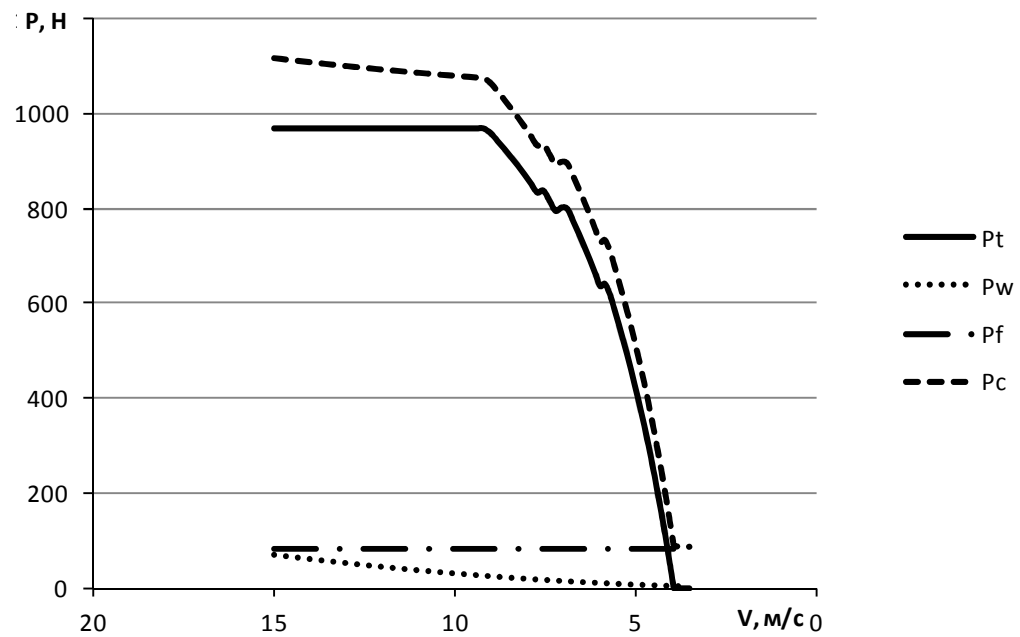


Рисунок 4.4 – Сили, які діють на автомобіль, під час рекуперативного гальмування, при передатному числі трансмісії $u_{mpe}=11,87$

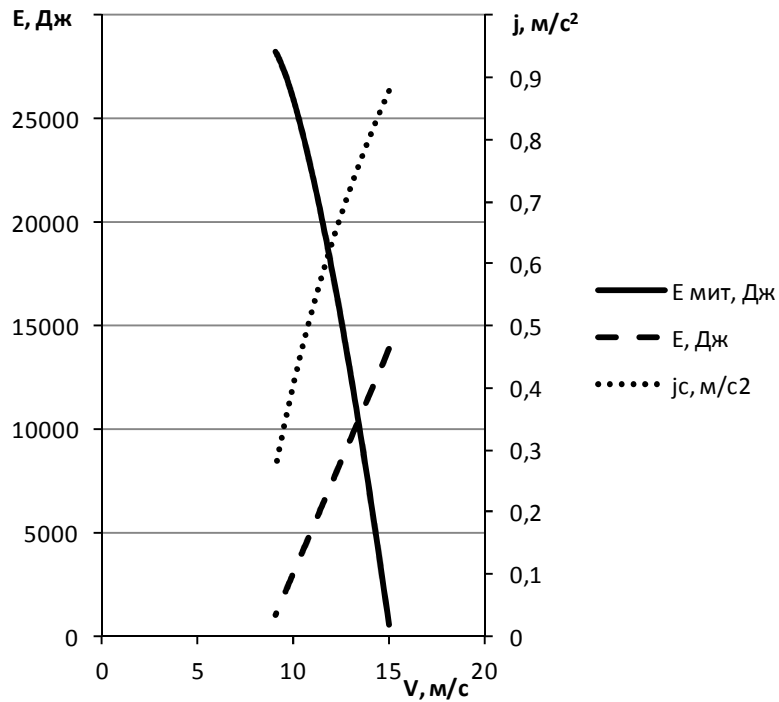


Рисунок 4.5 – Енергетичні показники та гальмівні властивості автомобіля з електричним приводом, при передатному числі трансмісії $u_{mpe}=5,5$

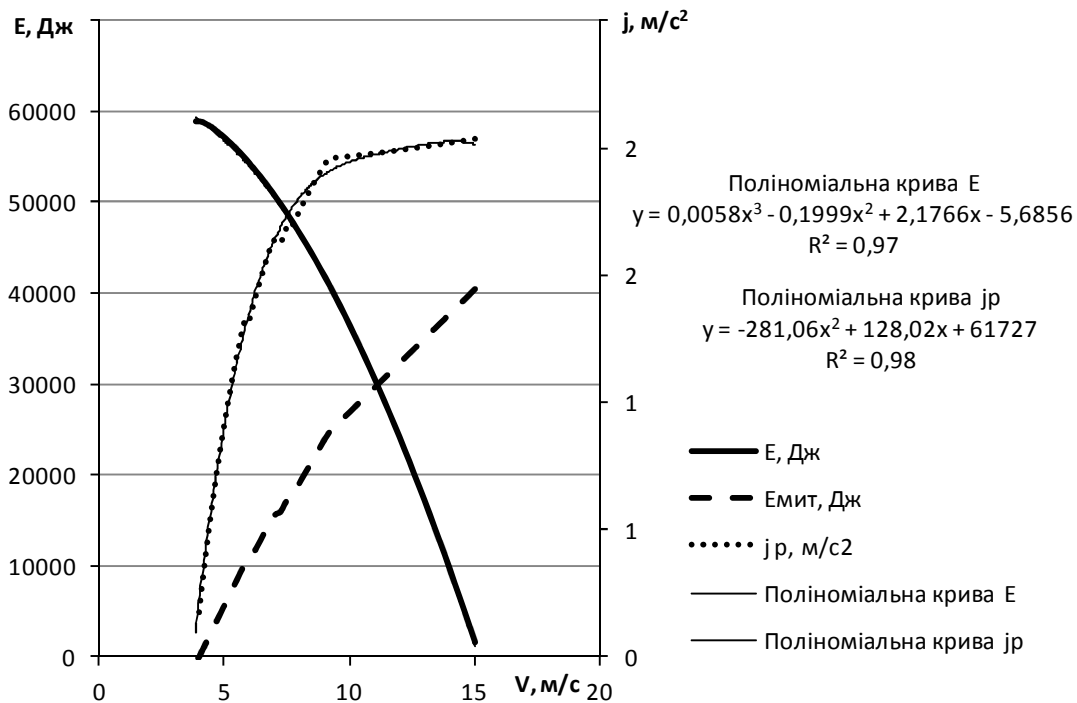


Рисунок 4.6 – Енергетичні показники та гальмівні властивості автомобіля з електричним приводом, при передатному числі трансмісії $u_{mpe}=11,87$

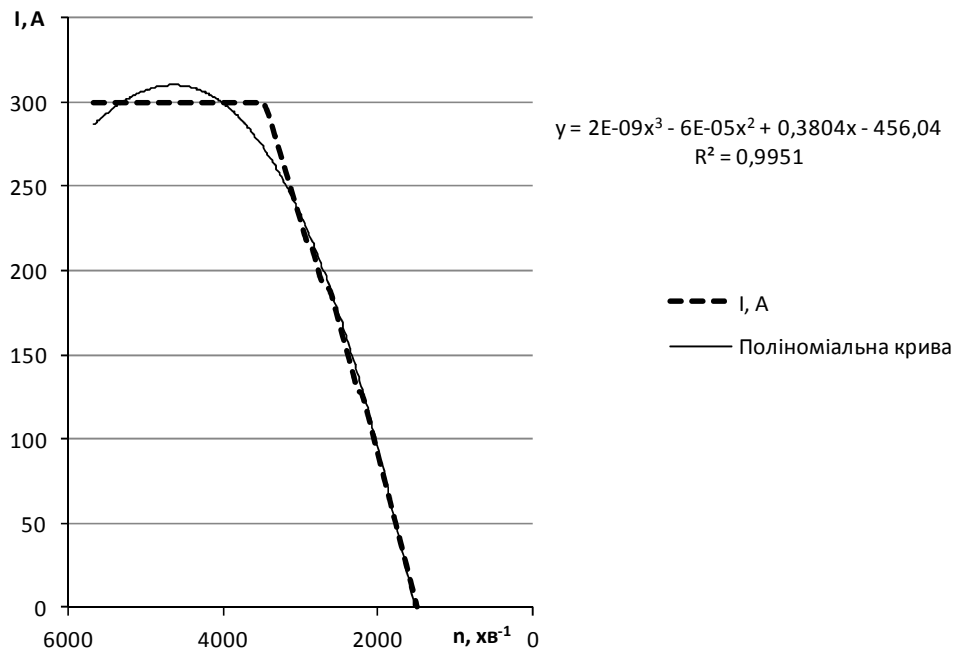


Рисунок 4.7 – Зміна значення струму від обертів ротора електричного двигуна автомобіля, при передатному числі трансмісії $u_{mpe}=11,87$

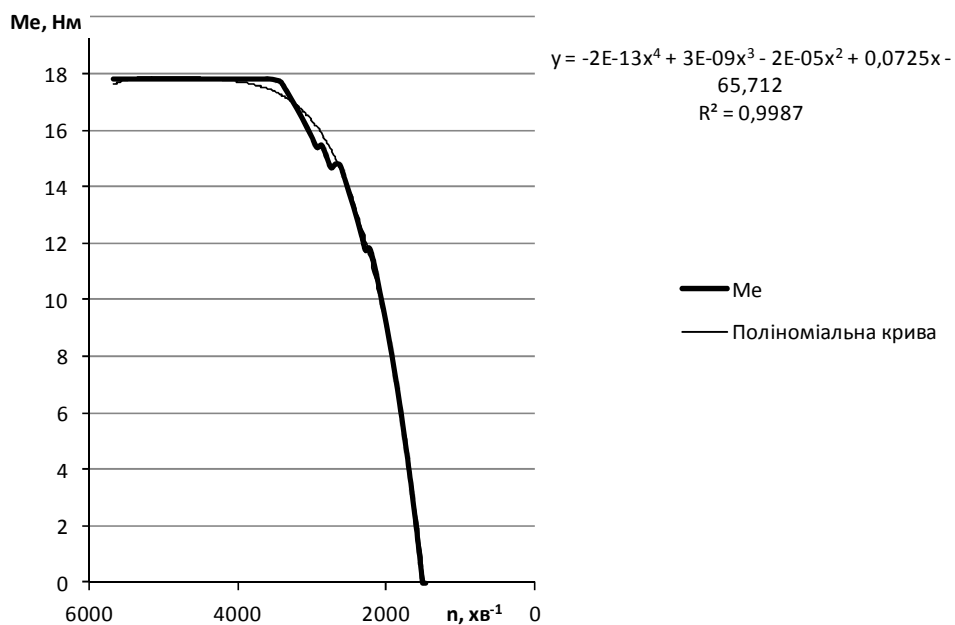


Рисунок 4.8 – Зміна гальмівного моменту та обертів ротора електричного двигуна автомобіля, при передатному числі трансмісії $u_{mpe}=11,87$

Під час здійснення рекуперативного гальмування, автомобілем обладнаним електричним приводом, з передатним числом $u_{mpe}=5,5$,

спостерігається його припинення на досить високих швидкостях, які становлять близько 30 км/год. Окрім цього максимальне значення сповільнення знаходиться в межах $0,9...1,0 \text{ м/с}^2$. Для можливості розгляду системи рекуперації енергії в якості допоміжної системи гальмування цього показника достатньо, однак залишкова швидкість є досить значною, що призведе до необхідності гасіння кінетичної та потенціальної енергії механічним складником гальмівної системи. Дану проблему можна вирішити встановленням електричного двигуна більшої потужності, однак його вартість та масово-габаритні показники знівелюють ефект рекуперативного гальмування.

Попередні дослідження показали, що підвищити передатне число електричного двигуна, і тим самим покращити енергетичні та гальмівні показники транспортного засобу можна застосуванням регульованого гальмування [12, 13].

В результаті теоретичних досліджень процесу рекуперативного гальмування транспортного засобу з гібридною силовою установкою зі збільшеним передатним числом трансмісії ($u_{mpe}=11,87$) встановлено підвищення ефективності рекуперативного гальмування. На рис. 4.6 наведено енергетичні показники та гальмівні властивості автомобіля з електричним приводом, при передатному числі трансмісії $u_{mpe}=11,87$. В цьому випадку спостерігається зростання значення сповільнення та його вихід на максимальне значення по мірі наближення характеристик електричного двигуна до номінальних [41]. Також, згідно [41] допускається 2-кратне збільшення обертів електричного двигуна, у випадку, якщо здійснюється регулювання його моменту. Максимальне значення сповільнення становить близько 2 м/с^2 .

Характеристика гальмівного моменту (рис. 4.8) в даному випадку відповідає характеристиці сповільнення (рис. 4.6) та гальмівної сили (рис. 4.4).

Таким чином залежності, наведені на рис. 4.4 та на рис. 4.6 – 4.8 в повній мірі відображають процес рекуперативного гальмування і характеризують його як зі сторони гальмівних властивостей так і зі сторони енергетичних

характеристик автомобіля. Зазначені залежності разом зі струмошвидкісною характеристикою електричного двигуна, який працює в режимі генератора можна назвати енергоефективними характеристиками автомобіля.

4.2.2 Рух у міському їздовому циклі

Оскільки, згідно з попередніми дослідженнями [123], найбільш ефективною визнана робота системи рекуперації енергії у міському циклі, внаслідок частих гальмувань та пришвидшень, проведено дослідження роботи системи рекупративного гальмування у міському їздовому циклі [140 – 143].

З метою встановлення режимів руху транспортних засобів доцільно використати дані стандартів, які встановлюють методи визначення витрати енергії електричними транспортними засобами EN 1986 – 1:2001 [141].

Режими руху автомобілів, з електричним або гібридним приводом у міському їздовому циклі, наведені у таблицях 4.2 та 4.3.

Таблиця 4.2 – Міський їздовий цикл, згідно вимог EN 1986 – 1:2001

№ з/п	Вимоги EN 1986 – 1:2001				
	Режим руху	Швидкість руху або її зміна, км/год	Прискорення, сповільнення, м/с ²	Тривалість режиму, с	Загальний час, с
1	Зупинка	0	0	11	11
	Прискорення	0...15	1,04	4	15
2	Постійна швидкість	15	0	8	23
	Сповільнення	15...0	- 0,83	5	28
4	Зупинка	0	0	21	49
	Прискорення	0...15	0,69	6	55
6	Зміна швидкості, прискорення	15...32	0,79	6	61
	Постійна швидкість	32	0	24	85
8	Сповільнення	32...0	- 0,81	11	96
	Зупинка	0	0	21	117
10	Прискорення	0...15	0,69	6	123

Таблиця 4.2 – Закінчення

№ з/п	Вимоги EN 1986 – 1:2001				
	Режим руху	Швидкість руху або її зміна, км/год	Прискорення, сповільнення, м/с ²	Тривалість режиму, с	Загальний час, с
11	Зміна швидкості, прискорення	15...35	0,51	11	134
12	Зміна швидкості, прискорення	35...50	0,46	9	143
13	Постійна швидкість	50	0	12	155
14	Сповільнення	50...35	- 0,52	8	163
15	Постійна швидкість	35	0	15	178
16	Сповільнення	35...0	- 0,97	10	188
17	Зупинка	0	0	7	195

Таблиця 4.3 – Загальна характеристика циклу

Режим руху	Затрачений час		Затрачений час без врахування стоянки	
	с	%	с	%
Зупинка	60	30,76	-	-
Рух з прискоренням	42	21,54	42	31,11
Рух з постійною швидкістю	59	30,26	59	43,70
Рух зі сповільненням	34	17,44	34	25,18
Загалом	195	100,00	135	100

Враховуючи вищезазначене, застосовуючи залежності 2.46, наведені у розділі 2, визначено енергетичні показники автомобіля, обладнаного системою рекуперації енергії з передатним числом трансмісії $u_{mpe}=11,87$, у міському їздовому циклі (див. рис 4.10). На рис. 4.11 для порівняння наведено енергетичні показники гібридного автомобіля, для міського їздового циклу, з передатним числом трансмісії $u_{mpe}=5,5$.

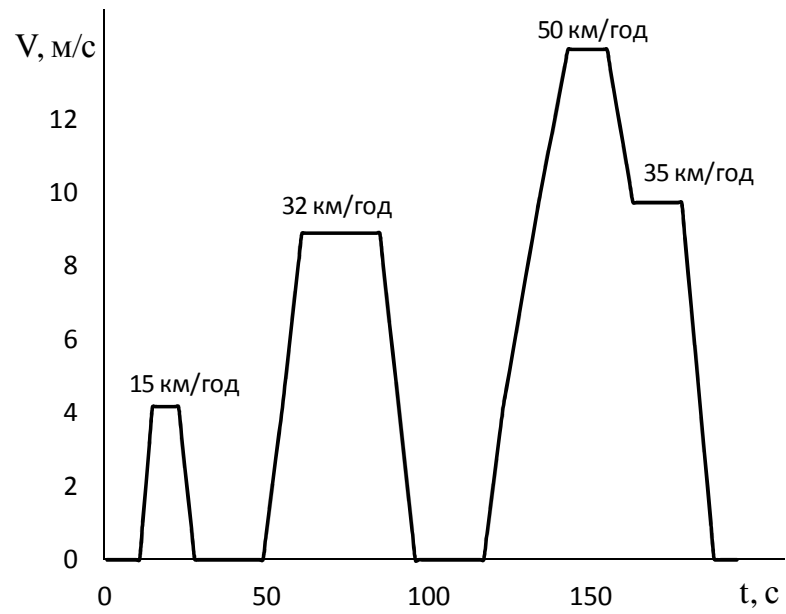
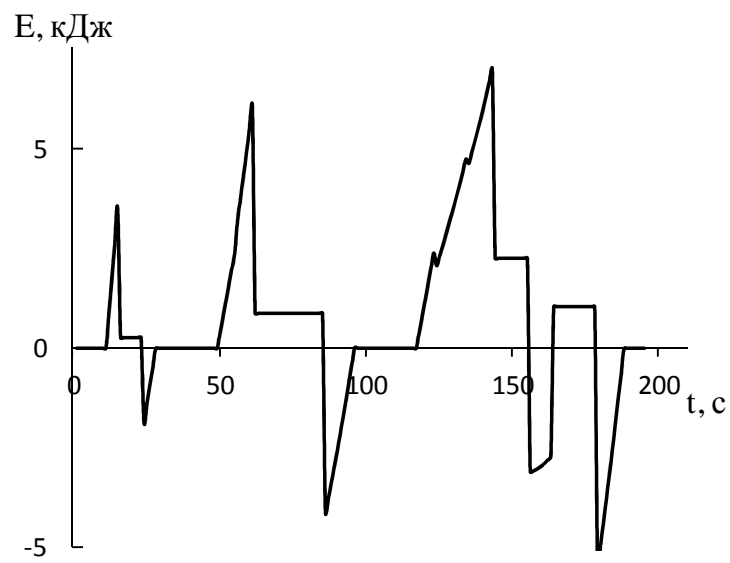
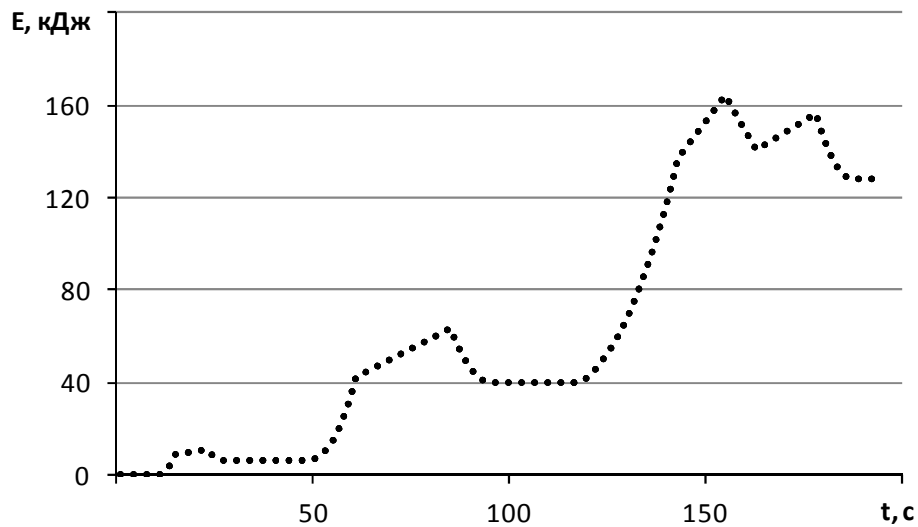


Рисунок 4.9 – Міський їздовий цикл, згідно [141]



а) питомі енергетичні показники



б) сумарні показники

Рисунок 4.10 – Енергетичні показники гібридного автомобіля у міському їздовому циклі, при застосуванні рекуперативного гальмування ($u_{mpe}=11,87$)

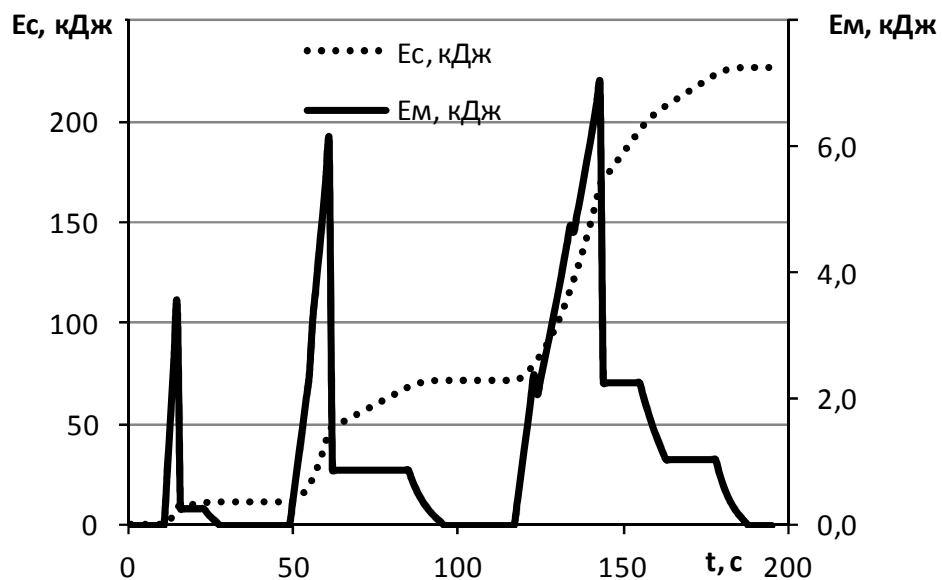


Рисунок 4.11 – Енергетичні показники гібридного автомобіля у міському їздовому циклі, без застосування рекуперативного гальмування (E_m – питома енергія, кДж; E_s – сумарна енергія, кДж)

Якщо провести аналіз залежностей, наведених на рис 4.10 та 4.11, можна констатувати, значне зменшення сумарних витрат електричної енергії при застосуванні рекуперативного гальмування. Окрім того, сповільнення, регламентоване вимогами [36, 37] можливо забезпечити лише за рахунок рекуперативного гальмування із подальшим догальмовуванням механічним складником гальмівної системи автомобіля.

4.2.3 Блокування коліс автомобіля під час рекуперативного гальмування

Усі сучасні автомобілі обладнуються антиблокувальними системами, які під час гальмування, контролюючи процес, запобігають блокуванню коліс та юзу автомобіля. Антиблокувальні системи пов'язані з гальмівною системою та приводяться в дію лише під час гальмування механічними гальмами. Крім того автомобілі також обладнуються системами безпеки, такими як система курсової стійкості, протипробуксовувальна система і т.п. Однак, під час рекуперативного гальмування робоча гальмівна система транспортного засобу не задіюється, тому виникає питання імовірності виникнення юзу автомобіля під час рекуперативного гальмування без застосування механічної гальмівної системи.

У таблиці 4.4 наведено значення коефіцієнтів зчеплення для різних дорожніх покриттів та метеорологічних умов.

Таблиця 4.4 — Значення коефіцієнтів зчеплення коліс з дорогою [125]

Покриття дороги	Коефіцієнт зчеплення	Покриття дороги	Коефіцієнт зчеплення
Асфальтобетон, цементобетон сухий	0,7...0,8	Асфальтобенон, цементобетон обледенілий	0,09...0,10
Асфальтобетон, цементобетон мокрий	0,35...0,45	Пісок сухий	0,2...0,3
Щебінь сухий	0,6...0,7	Пісок вологий	0,4...0,5
Щебінь мокрий	0,3...0,4	Бруківка, камінь мокрі	0,4...0,5

Таблиця 4.4 – Закінчення

Покриття дороги	Коефіцієнт зчеплення	Покриття дороги	Коефіцієнт зчеплення
Грунтова дорога суха	0,5...0,6	Вкатаний сніг	0,1...0,2
Грунтова дорога мокра	0,2...0,4	Лід	0,08...0,15
Бруківка, камінь сухі	0,6...0,7	Вкатаний сніг з піском	0,2...0,3

Як видно з таблиці 4.4, досить частими є випадки, зважаючи на сучасний стан дорожніх покриттів, тенденцію до укладання бруківок у центральних частинах міст, коли коефіцієнт зчеплення з тих чи інших причин буде невисоким, що різко збільшує імовірність виникнення блокування коліс на гібридних та електричних автомобілях, які обладнані системою рекуперації енергії. Тому питання дослідження властивостей систем рекуперативного гальмування на дорогах з низьким коефіцієнтом зчеплення є досить актуальним.

З теорії автомобільних властивостей [125 – 129] відомо, що блокування коліс транспортного засобу відбувається за умови, коли гальмівна сила P_τ перевищує силу зчеплення коліс з дорогою P_φ , тобто

$$P_\tau > P_\varphi. \quad (4.1)$$

Зважаючи на те, що в даному випадку розглядається лише процес рекуперативного гальмування, гальмівна сила буде визначатися із залежності (2.10).

Сила зчеплення коліс з дорогою визначається [125 – 129]:

$$P_\varphi = \varphi \cdot R_z, \quad (4.2)$$

де φ – коефіцієнт зчеплення;

R_z – нормальна реакція дороги на колесо, Н.

Для автомобіля, який перебуває у нерухомому стані на горизонтальній опорній поверхні, нормальні реакції дороги на колесо рівні частині маси транспортного засобу, яка припадає на це колесо [125]. Однак, у випадку динамічного стану автомобіля відбувається перерозподіл мас і тоді значення нормальної реакції дороги на колесо розраховується з врахуванням коефіцієнта зміни реакцій m_z [125]:

$$P_\varphi = \varphi \cdot G_i \cdot m_z, \quad (4.3)$$

де G_i – вага автомобіля, яка передається опорній поверхні через i -те колесо або вісь.

Під час гальмування транспортного засобу значення коефіцієнтів зміни нормальних реакцій дороги на колесо перебувають у межах [125]: для передньої осі $m_{z1} = 1,2 \dots 1,35$; для задньої осі $m_{z2} = 0,65 \dots 0,70$. Зважаючи на те, що процес гальмування відбувається з сповільненням $1,0 \dots 1,5 \text{ м/с}^2$ на дорогах з низьким коефіцієнтом зчеплення, коефіцієнти зміни нормальних реакцій дороги перебуватимуть в межах: для передньої осі $m_{z1} = 1,03 \dots 1,08$; для задньої осі $m_{z2} = 0,93 \dots 0,98$.

Таким чином на основі вищевказаного, враховуючи, що рекуперативне гальмування забезпечує лише задня вісь транспортного засобу, нехтуючи силою опору підйому та вважаючи, що транспортний засіб перебуває на горизонтальній ділянці дороги, нерівність (4.1) прийме вигляд:

$$\frac{M_{ke} \cdot u_{\text{тре}}}{r_k \cdot \eta_{\text{тр}}} > 0,5 \cdot \varphi \cdot G_a \cdot m_{z2}. \quad (4.4)$$

Під час службового гальмування з рекуперацією енергії передбачається, що потужність, яка виробляється генератором N_e дорівнює потужності, яка затрачається при гальмуванні N_τ :

$$N_e \cdot \eta_e = N_\tau \cdot \eta_{mp}, \quad (4.5)$$

$$\text{де } N_e = U_{ген} \cdot I_{ген}, \quad (4.6)$$

$$N_\tau = P_{\tau e} \cdot V, \quad (4.7)$$

$U_{ген}$ – напруга генератора, В;

$I_{ген}$ — сила струму генератора, А;

$P_{\tau e}$ — гальмівна сила, при службовому гальмуванні, Н;

η_e - електричний коефіцієнт корисної дії генератора;

η_{mp} - коефіцієнт корисної дії трансмісії.

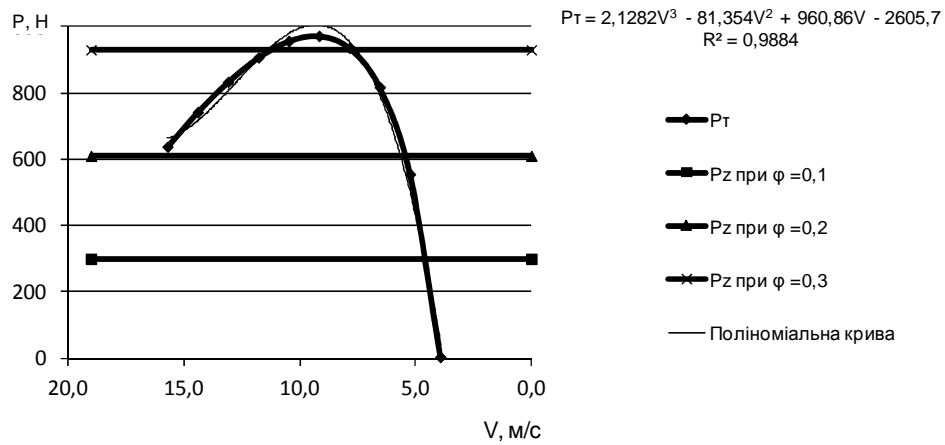
З урахуванням викладених залежностей (4.5) – (4.7) гальмівна сила $P_{\tau e}$ при службовому гальмуванні з рекуперацією енергії дорівнює:

$$P_\tau = \frac{U_{ген} \cdot I_{ген}}{V \cdot \eta_e \cdot \eta_{mp}}. \quad (4.8)$$

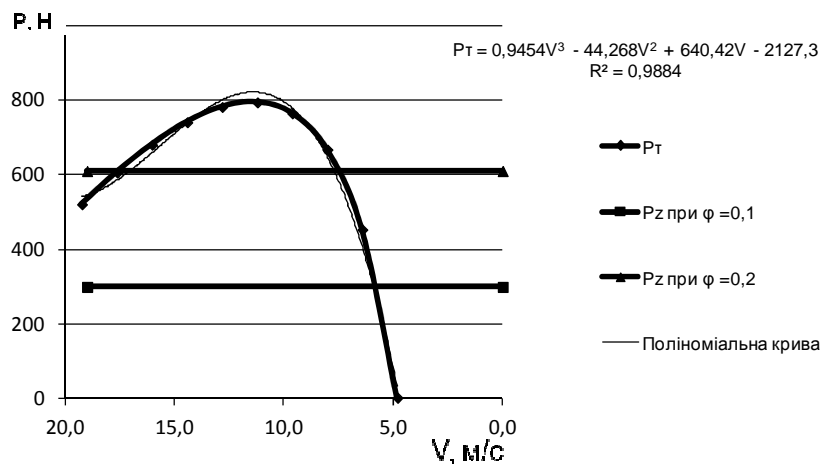
З врахуванням залежності сили струму (2.8) вираз набуде вигляду:

$$P_\tau = \frac{U_{ген} \cdot f\left(\frac{30 \cdot V \cdot u_{гре}}{\pi \cdot r_k}\right)}{V \cdot \eta_e \cdot \eta_{mp}} = \frac{U_{ген} \cdot f(n)}{V \cdot \eta_e \cdot \eta_{mp}}. \quad (4.9)$$

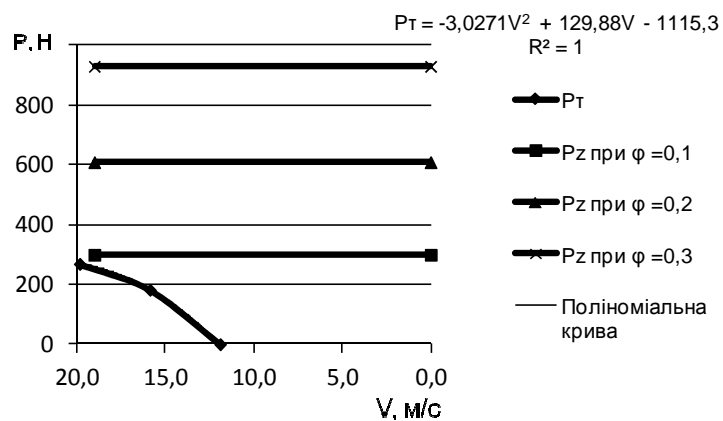
Результати розрахунків залежності гальмівної сили $P_{\tau e}$ від швидкості транспортного засобу при різних значеннях передатного числа головної передачі наведені на рисунках 4.12 (а, б, в).



а)



б)



в)

Рисунок 4.12 — Залежності гальмівної сили P_{te} від швидкості автомобіля при різних значеннях передатного числа трансмісії:

а) $u_0=10,0$; б) $u_0=8,164$; в) $u_0=3,3$

Також на цих графіках наведено значення сили зчеплення коліс з дорогою при різних значеннях коефіцієнтів зчеплення.

При передатному числі $u_0=3,3$ гальмівна сила P_{te} буде меншою від сили зчеплення навіть на обледенілій дорозі при коефіцієнті зчеплення $\varphi=0,1$. При збільшенні передатного числа u_0 до 8,164 максимальна гальмівна сила P_{te} зростає до 800 Н, що може викликати блокування коліс на дорожньому покритті з коефіцієнтом зчеплення $\varphi=0,2$. Але під час гальмування з рекуперацією енергії повного блокування коліс не виникає. Це пояснюється тим, що при початку проковзування гальмуючого колеса, зменшується його кутова швидкість і швидкість обертання ротора генератора. Це призводить до зменшення потужності генератора і, відповідно, гальмівної сили P_{te} і, як наслідок, колесо не буде блокуватися повністю.

З метою уникнення блокування коліс під час рекуперативного гальмування на автомобілі з гібридною силовою установкою і рекуперацією енергії може бути встановлена система контролю обертання коліс при гальмуванні. Суть її роботи буде зводитися до зменшення струму збудження обмотки ротора і зменшення потужності генератора та, відповідно, гальмівної сили, при значному зменшенні кутової швидкості коліс транспортного засобу.

При збільшенні передатного числа до $u_0=10,0$ зростає гальмівна сила P_{te} до 1000 Н, мінімальна швидкість, при якій припиняється рекуперація енергії зменшується до 4 м/с. Однак, при цьому обов'язковою умовою наявності системи контролю блокування коліс.

4.2.4 Рух транспортного засобу з електричним приводом на затяжених спусках

Рух автомобіля під час гальмування описується рівнянням тягового балансу автомобіля для випадку гальмування [3], залежністю (2.1).

Згідно вимог Правил ЄЕК ООН № 13 [36] для допоміжної гальмівної системи, під час випробувань тип “ІА” – “Випробування навантажених

транспортних засобів повинне проводитися таким чином, щоб енергія, що поглинається, була еквівалентна енергії, яка вивільнюється за той самий проміжок часу під час руху навантаженого транспортного засобу з середньою швидкістю 30 км/год на спуску з ухилом 7% на відстані 6 кілометрів.”

Враховуючи вищевикладені вимоги Правил ЄЕК ООН № 13 [36] можна зробити певні припущення та спрощення:

- оскільки гальмування здійснюється лише за допомогою електричного двигуна, гальмівні сили механічного складника рівні 0;
- транспортний засіб рухається з відносно невеликою швидкістю, тому опором повітря можна знехтувати, тобто $P_w=0$;
- так як рух автомобіля здійснюється з постійною швидкістю, сповільнення (j) та відповідно сила інерції (P_j) транспортного засобу рівні нулю.

З рівняння (2.4), використовуючи загальновідомі формули [125 – 129], та враховуючи, що $P_w=0$, $P_j=0$, $j=0$, отримується наступна залежність:

$$G_a \cdot f \cdot \cos \alpha + \frac{M_{\tau e} \cdot u_{mpe} \cdot \eta_t}{r_k} - G_a \cdot \sin \alpha = 0. \quad (4.10)$$

Звідси можна отримати значення гальмівного моменту електродвигуна, під час руху транспортного засобу на зтяжному спуску:

$$M_{\tau e} = \frac{G_a \cdot r_k \cdot \eta_t}{u_t} \cdot (\sin \alpha - f \cdot \cos \alpha). \quad (4.11)$$

Оскільки в даному випадку розглядається гальмівні випробування типу “ПА”, то рівняння (4.11) можна записати, підставивши відомі величини, а саме задавши значення коефіцієнта корисної дії трансмісії ($\eta_t = 0,9$), коефіцієнта опору кочення ($f = 0,016$) та ухилу дорожнього полотна $\alpha = 0,07^\circ$:

$$M_{\tau e} = 0,05 \frac{G_a \cdot r_k}{u_t} = 0,05 \frac{m_a \cdot r_k}{u_t}, \quad (4.12)$$

де m_a – маса автомобіля.

Під час здійснення гальмування на зтяжному спуску з урахуванням (4.11), необхідна потужність електродвигуна для здійснення рекуперативного гальмування та, відповідно, потужність, яку мають сприйняти накопичувачі енергії:

$$N_{\tau e} = G_a \cdot V \cdot \eta_t \cdot \eta_e \cdot (\sin \alpha - f \cdot \cos \alpha), \quad (4.13)$$

де η_e – коефіцієнт корисної дії електродвигуна.

З іншої сторони, потужність електродвигуна визначається його технічними характеристиками [155]:

$$N_{\tau e} = U \cdot I \cdot \eta_e, \quad (4.14)$$

де U – робоча напруга електросистеми, В;

I – сила струму, А;

З рівнянь (4.13) та (4.14) можна визначити значення сили струму, яка виникатиме в системі під час електричного гальмування на спуску:

$$I = \frac{G_a \cdot V \cdot \eta_t \cdot \eta_e}{U} \cdot (\sin \alpha - f \cdot \cos \alpha). \quad (4.15)$$

Після спрощень, прийнятих у рівнянні (4.12), з врахуванням вимог Правил ЄКЕ ООН № 13 [36] ($V=30$ км/год) та коефіцієнта корисної дії електродвигуна ($\eta_t = 0,8$), можна записати наступну залежність:

$$I = 3.2 \frac{m_a}{U}. \quad (4.16)$$

Рівняння (4.16) описує процес рекуперативного гальмування автомобіля з електричним приводом під час випробувань тип “ПА”, згідно вимог Правил ЄКЕ ООН № 13 [36].

Кількість енергії, яка буде вивільнена під час рекуперативного гальмування та, відповідно, яка повинна бути поглинута накопичувачами енергії [33]:

$$A_r = N \cdot t, \quad (4.17)$$

де t – час здійснення гальмування, який визначається, для випробувань тип “ПА” Правил ЄКЕ ООН № 13 [36], за відомою залежністю:

$$t = \frac{s}{v} = \frac{6000 \cdot 3,6}{30} = 720 \text{ с}. \quad (4.18)$$

З врахуванням вимог Правил ЄКЕ ООН № 13 [36] та залежностей (4.17) та (4.18), робота електродвигуна, яка буде виконана під час рекуперативного гальмування, для гальмівних випробувань тип “ПА”:

$$A_r = 720 \cdot N. \quad (4.19)$$

З іншої сторони, кількість енергії, яку можуть сприйняти накопичувачі енергії буде рівна [33]:

$$A_n = U \cdot C, \quad (4.20)$$

де C – ємність накопичувачів енергії, А*год.

Таким чином, для можливості застосування електричного складника гальмівної системи в якості допоміжної системи (системи сповільнення без гальм) необхідно, щоб:

$$A_n > A_\tau, \quad (4.21)$$

тобто,

$$U \cdot C > 720 \cdot G_a \cdot V \cdot \eta_t \cdot \eta_e \cdot (\sin \alpha - f \cdot \cos \alpha), \quad (4.22)$$

або, з врахуванням значення ухилу:

$$U \cdot C > 50,4 \cdot G_a \cdot V \cdot \eta_t \cdot \eta_e. \quad (4.23)$$

Звідси можна визначити необхідну ємність накопичувачів енергії, приймаючи, для розрахунків, максимально допустиму силу струму:

$$C > \frac{50,4 \cdot G_a \cdot V \cdot \eta_t \cdot \eta_e}{U}. \quad (4.24)$$

Отримана залежність (4.24) дає можливість проводити розрахунки та прогнозування необхідної ємності накопичувачів енергії, таким чином можна забезпечити акумулювання та рекуперацію максимальної кількості енергії.

4.3 Засади функціонування системи управління рекуперацією енергії гібридного автомобіля

За результатами проведеної роботи запропоновано алгоритм роботи системи управління рекуперацією енергії, суть якого полягає в наступному.

Система управління рекуперацією постійно, відразу ж після початку руху відстежує стан накопичувачів енергії та проводить теоретичні розрахунки можливої кількості рекуперованої енергії, з тим, щоб забезпечити максимальну ефективність роботи системи рекуперації енергії. При цьому одночасно забезпечується підвищення ефективності системи рекуперативного гальмування. Алгоритм роботи системи управління рекуперативним гальмуванням наведена на рис. 4.13.

Після початку руху автомобіля система управління проводить оцінку стану накопичувачів енергії. Розрахунок здійснюється із заданої максимальної швидкості руху. Враховуючи, що найбільш ефективно дана система працює в умовах міста, за початкове значення доцільно прийняти максимально допустиму швидкість руху $V=60$ км/год.

Під час руху транспортного засобу система управління рекуперативним гальмуванням проводить моніторинг наступних показників: положення педалі гальм (γ), швидкість автомобіля (v), стан накопичувачів енергії (C_{ϕ}). Якщо стан накопичувачів не дозволяє акумулювати усю вироблену енергію, то система подає сигнал на управління електричним двигуном і переводить транспортний засіб на електричний рушій.

Транспортний засіб рухається на електричній тязі до того моменту, доки, не буде забезпечено вільний обсяг накопичувачів, щоб акумулювати усю рекуперовану енергію. При досягненні необхідної вільної ємності накопичувачів енергії знову подається сигнал на систему управління електродвигуном, яка повертається до закладеного алгоритму роботи, тобто система переводить автомобіль на урухомник, робота якого є доцільнішою.

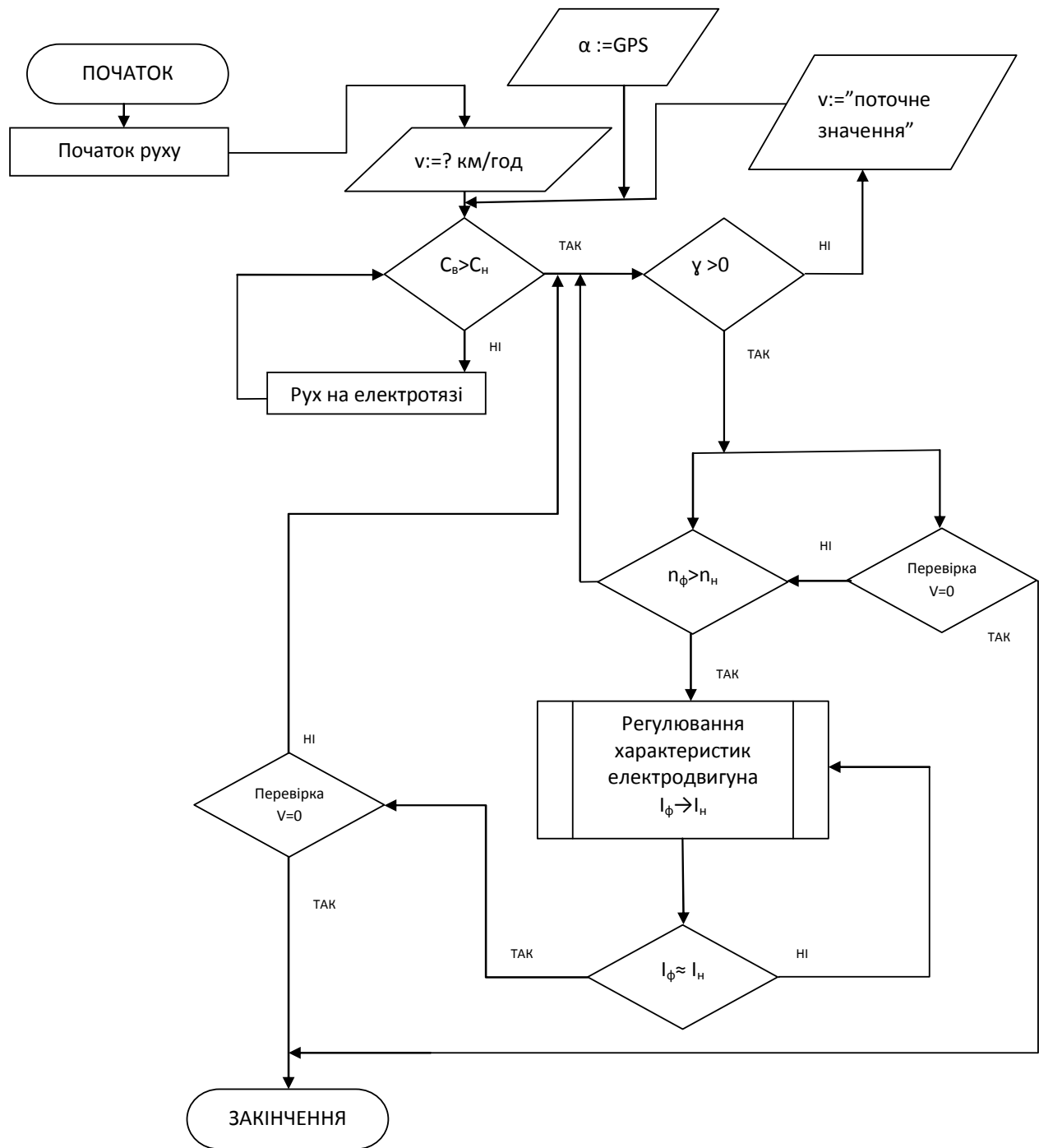


Рисунок 4.13 – Алгоритм роботи системи управління рекуперацією енергії гібридного автомобіля

Крім того використовуючи дані GPS-навігатора проводиться аналіз напрямку та кута нахилу дорожнього полотна (α).

Під час здійснення рекуперативного гальмування, коли кут повороту педалі гальм (γ) набуває значення відмінного від 0, система управління здійснює перевірку значення обертів електричного двигуна транспортного засобу та його швидкості. У випадку, коли оберти генератора перевищуватимуть номінальні $n_{\phi} > n_n$ система управління рекуперативним гальмуванням забезпечує зменшення значення струму збудження (I_{ϕ}), до значення при якому поточне значення струму генератора буде близьким до номінального $I_{\phi} \rightarrow I_n$. Після припинення процесу рекуперативного гальмування, коли $\gamma=0$, проводиться повторна перевірка фактичного стану накопичувачів енергії, та підготовка системи до здійснення наступного гальмування. Впровадження даної системи вимагає здійснювати регулювання параметрів електричного двигуна, який працює в режимі генератора, з метою досягнення оптимальних показників усієї системи.

4.4 Прогнозування процесів рекуперативного гальмування та підвищення їх ефективності

4.4.1 Режим роботи накопичувачів енергії

Застосування рекуперативного гальмування призводить до циклічної роботи накопичувачів енергії. Якщо не враховувати роботу системи рекуперації, то для автомобіля обладнаного електричним приводом, можна досить легко провести розрахунок довговічності накопичувачів енергії, знаючи лише кількість циклів, на яку розраховані накопичувачі та задавшись даними щодо інтенсивності їх зарядки.

Однак система рекуперації енергії забезпечує значно більшу кількість циклів заряду-розряду, тому термін служби накопичувачів енергії буде меншим.

Як відомо, [33, 35, 157 – 159] глибина розряду батареї має безпосередній вплив на термін її служби, тому важливим є на етапі проектування та

експериментального виробництва провести розрахунки довговічності акумуляторної батареї.

Циклічність та глибина заряду-розряду батарей від стаціонарних джерел цілком залежить від запрограмованого режиму їх роботи та запасу ходу, тому дане питання в цьому випадку розглядатися не буде. Натомість необхідно розглянути дане питання для системи рекуперації енергії.

З метою накопичення статистичних даних під час поїздки м. Луцьк проводилася реєстрація режимів гальмування транспортного засобу. Результати отриманих даних наведено у таблиці 4.5 та у вигляді гістограми на рис. 4.14.

Таблиця 4.5 - Розподіл гальмівних режимів транспортного засобу
(N , випадків)

Початкова швидкість гальмування, км/год	Кінцева швидкість гальмування, км/год								Всього випадків
	70	60	50	40	30	20	10	0	
70	0	2	14	3	5	0	2	12	38
60	0	0	4	5	17	11	5	21	63
50	0	0	0	5	13	19	1	29	67
40	0	0	0	0	11	23	10	41	85
30	0	0	0	0	0	19	1	59	79
20	0	0	0	0	0	0	4	59	63
10	0	0	0	0	0	0	0	7	7
Всього випадків	0	2	18	13	46	72	23	228	402

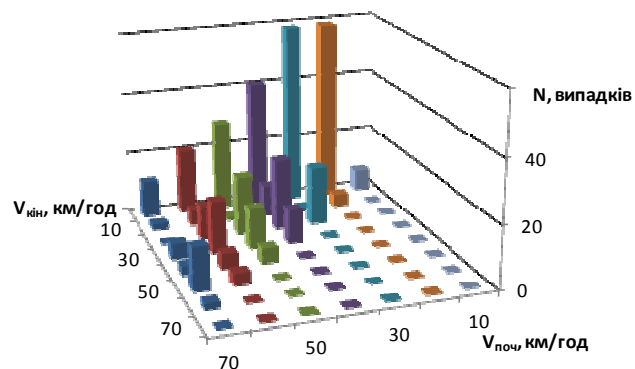


Рисунок 4.14 – Розподіл гальмівних режимів транспортного засобу

Наведена на рис. 4.14 гістограма відображає розподіл гальмувань транспортного засобу за період спостережень.

Якщо прийняти період спостережень за один умовний цикл та перейти до імовірності станів системи, то можна отримати матрицю імовірностей переходів станів системи.

Матриця імовірності станів запишеться у вигляді:

$$A = \begin{pmatrix} P_{70-60} & P_{70-50} & P_{70-40} & P_{70-30} & P_{70-20} & P_{70-10} & P_{70-0} \\ 0 & P_{60-50} & P_{60-40} & P_{60-30} & P_{60-20} & P_{60-10} & P_{60-0} \\ 0 & 0 & P_{50-40} & P_{50-30} & P_{50-20} & P_{50-10} & P_{50-0} \\ 0 & 0 & 0 & P_{40-30} & P_{40-20} & P_{40-10} & P_{40-0} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_{30-20} & P_{30-10} & P_{30-0} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{20-10} & P_{20-0} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{10-0} \end{pmatrix}, \quad (4.25)$$

де $P_{V_1-V_2}$ - імовірність переходу системи зі стану 1 у стан 2.

Таблиця 4.6 – Матриця ймовірності переходів гальмівних режимів транспортного засобу

Початкова швидкість гальмування, км/год	Кінцева швидкість гальмування, км/год								Сума імовірностей подій
	70	60	50	40	30	20	10	0	
70	0,000	0,005	0,035	0,007	0,012	0,000	0,005	0,030	0,0945
60	0,000	0,000	0,010	0,012	0,042	0,027	0,012	0,052	0,1567
50	0,000	0,000	0,000	0,012	0,032	0,047	0,002	0,072	0,1667
40	0,000	0,000	0,000	0,000	0,027	0,057	0,025	0,102	0,2114
30	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,047	0,002	0,147	0,1965
20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,010	0,147	0,1567
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,017	0,0174
Сума імовірностей подій	0,000	0,005	0,045	0,032	0,114	0,179	0,057	0,567	1,000

Сума усіх стовпців та рядків матриці дорівнює 1, оскільки події вважаються несумісними.

Графічно матриця переходів станів зображена на рис. 4.15.

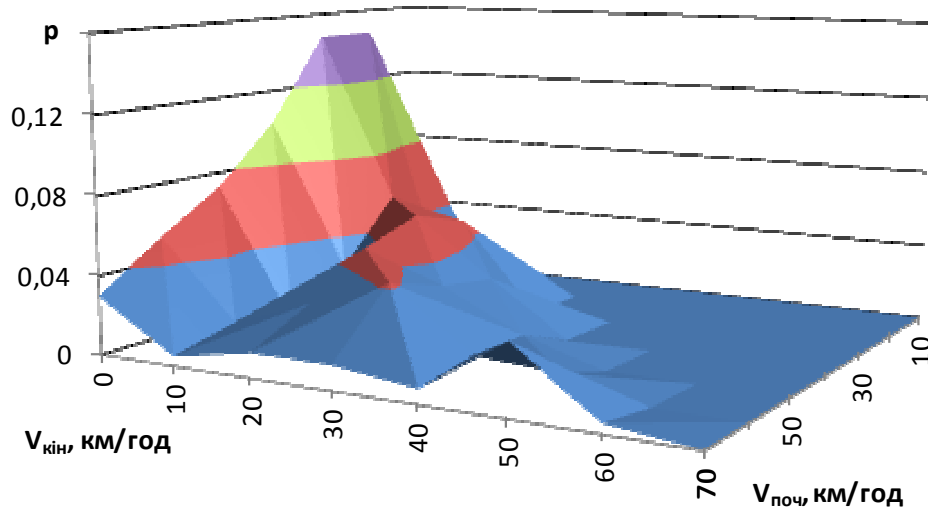


Рисунок 4.15 – Розподіл ймовірності переходів транспортного засобу у гальмівних режимах

За залежностями (2.15) та (2.25) розраховано енергетичні показники для матриці зміни станів, які наведено у таблиці 4.7 та на діаграмі 4.16.

Рисунок 4.7 – Енергетичні показники гальмівних режимів транспортного засобу (Дж)

Початкова швидкість гальмування, км/год	Кінцева швидкість гальмування, км/год						
	60	50	40	30	20	10	0
70	25132	50264	75395	100527	125659	150791	175923
60	0	22228	44456	66684	88911	111139	133367
50	0	0	18981	37962	56943	75924	94904
40	0	0	0	15468	30936	46404	61871
30	0	0	0	0	11678	23357	35035
20	0	0	0	0	0	7469	14938
10	0	0	0	0	0	0	51

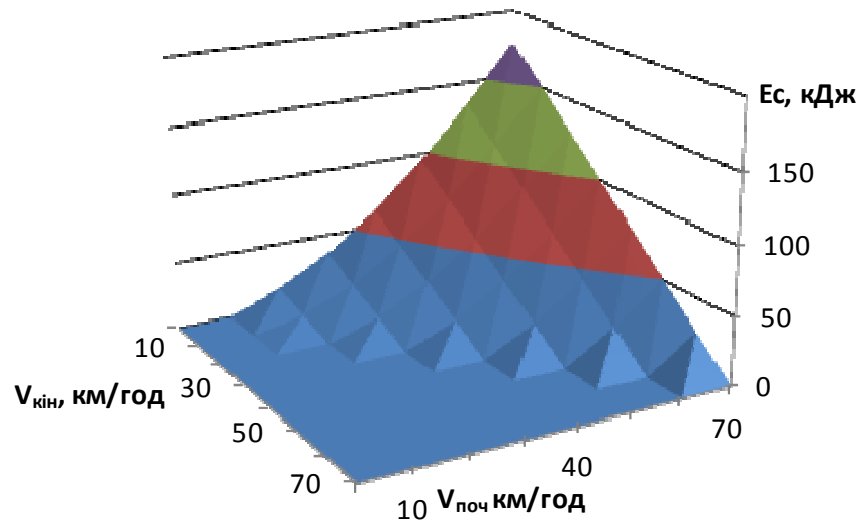


Рисунок 4.16 – Енергетичні показники гальмівних режимів транспортного засобу

За цими ж залежностями (2.15) та (2.25) проведено розрахунок кількості рекуперованої енергії для матриці переходу станів системи з врахуванням можливих імовірностей. Результати розрахунків наведені у таблиці 4.8 та на рис. 4.17.

Таблиця 4.8 - Кількість рекуперованої енергії, згідно матриці переходу станів системи

Початкова швидкість гальмування, км/год	Кінцева швидкість гальмування, км/год								Всього енергії, Дж
	70	60	50	40	30	20	10	0	
70	0	125	1750	563	1250	0	750	5251	9690
60	0	0	221	553	2820	2433	1382	6967	14376
50	0	0	0	236	1228	2691	189	6846	11190
40	0	0	0	0	423	1770	1154	6310	9658
30	0	0	0	0	0	552	58	5142	5752
20	0	0	0	0	0	0	74	2192	2267
10	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Всього енергії, Дж	0	125	1972	1352	5721	7446	3608	32710	52934

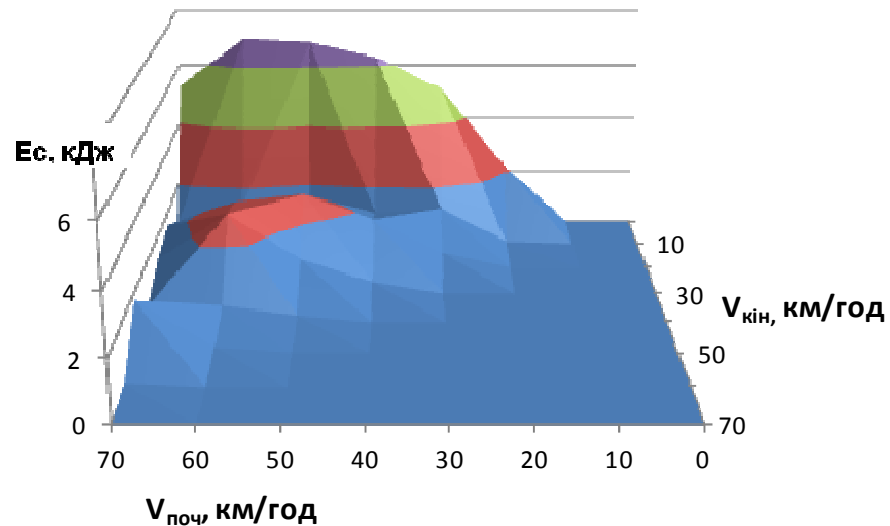


Рисунок 4.17 - Кількість рекуперованої енергії, згідно матриці переходу станів системи

За одиничними енергетичними показниками матриці зміни станів, які наведено у таблиці 4.7, з врахуванням алгоритму роботи системи рекуперативного гальмування (див. рис. 4.13), можна визначити глибину розряду системи накопичення енергії під час рекуперативного гальмування, для кожного діапазону зміни швидкості.

В загальному формула для розрахунків матиме вигляд [158]:

$$\rho = A_n \cdot \frac{100}{E_n}, \quad (4.26)$$

де ρ - глибина розряду, %;

A_E - кількість рекуперованої енергії, Дж;

E_n - максимальна кількість енергії системи накопичення, Дж.

Використавши залежність (4.26), отримано розподіл глибини розряду системи накопичення, для досліджуваного діапазону швидкостей.

Таблиця 4.9 – Розподіл глибини розряду системи накопичення (%)

Початкова швидкість гальмування, км/год	Кінцева швидкість гальмування, км/год						
	60	50	40	30	20	10	0
70	0,47	0,93	1,40	1,86	2,33	2,79	3,26
60	0,00	0,41	0,82	1,23	1,65	2,06	2,47
50	0,00	0,00	0,35	0,70	1,05	1,41	1,76
40	0,00	0,00	0,00	0,29	0,57	0,86	1,15
30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,22	0,43	0,65
20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,14	0,28
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0009 4

Як видно з наведеної таблиці 4.9, під час руху транспортного засобу на рівнинній місцевості у міському циклі глибина розряду накопичувачів енергії становить до 4 %. Однак при цьому необхідно враховувати, що під час рекуперативного гальмування виникають великі струми рекуперації, якими не завжди можна проводити зарядку накопичувачів енергії. Тому як один з варіантів підвищення ресурсу роботи накопичувачів енергії є встановлення буферного суперконденсатора. Даний суперконденсатор забезпечить поглинання усієї рекуперованої енергії та поступову її віддачу у акумуляторні батареї, при цьому за допомогою інверторів, можна забезпечити оптимальні струми зарядки.

Необхідна ємність суперконденсатора розраховується за залежністю [159]:

$$C = \frac{2 \cdot E}{U^2}, \quad (4.27)$$

де C - ємність суперконденсатора, Ф;

E - кількість рекуперованої енергії, Дж;

U - напруга генератора, В.

Для енергетичних показників, наведених у таблиці 4.8, за залежністю (4.27) проведено розрахунок необхідної ємності суперконденсаторів, для забезпечення поглинання усієї рекуперованої енергії. Результати розрахунків зведено у таблицю 4.10.

Таблиця 4.10 – Необхідні ємності суперконденсаторів, Ф

Початкова швидкість гальмування, км/год	Кінцева швидкість гальмування, км/год						
	60	50	40	30	20	10	0
70	87	175	262	349	436	524	611
60	0	77	154	232	309	386	463
50	0	0	66	132	198	264	330
40	0	0	0	54	107	161	215
30	0	0	0	0	41	81	122
20	0	0	0	0	0	26	52
10	0	0	0	0	0	0	0

Наведена таблиця дозволяє провести аналіз та вибір суперконденсаторів необхідної ємності, а також оптимізувати роботу енергетичної системи, з метою зменшення кількості суперконденсаторів.

Крім розрахунку необхідної ємності іоністора, з врахуванням режимів його роботи, потрібно враховувати час його розрядки, з тим, щоб забезпечити акумулювання усієї рекуперованої енергії під час наступного гальмування. Час розрядки суперконденсатора, з врахуванням режиму зарядки акумулятора визначається за залежністю:

$$t = \frac{CU_p}{I_p}, \quad (4.28)$$

де U_p - напруга розрядки суперконденсатора, фактично це напруга акумулятора, В;

I_p - струм зарядки акумулятора, А.

Час розрядку суперкондансатора наведено у таблиці 4.11.

Таблиця 4.11 – Час розряду суперконденсатора (с)

Початкова швидкість гальмування, км/год	Кінцева швидкість гальмування, км/год						
	60	50	40	30	20	10	0
70	70	140	209	279	349	419	489
60	0	62	123	185	247	309	370
50	0	0	53	105	158	211	264
40	0	0	0	43	86	129	172
30	0	0	0	0	32	65	97
20	0	0	0	0	0	21	41
10	0	0	0	0	0	0	0

Для визначення працездатності суперконденсатора та перевірки розрахованої або вибраної ємності необхідно провести аналіз його роботи у міському їздовому циклі. Часові характеристики міського їздового циклу, згідно EN 1986 – 1:2001 наведено у таблиці 4.12.

Таблиця 4.12 – Часові характеристики міського їздового циклу, згідно EN 1986 – 1:2001

№ з/п	Вимоги EN 1986 – 1:2001				Накопичена енергія, кДж
	Режим руху	Швидкість руху або її зміна, км/год	Тривалість режиму, с	Час розрядки, с	
1	Зупинка	0	11	0	0
	Прискорення	0...15	4	0	0
2	Постійна швидкість	15	8	0	0
3	Сповільнення	15...0	5	0	15
4	Зупинка	0	21	41	0
5	Прискорення	0...15	6	0	0
6	Зміна швидкості, прискорення	15...32	6	0	0

Таблиця 4.12 – Закінчення

№ з/п	Вимоги EN 1986 – 1:2001				Накопичена енергія, кДж
	Режим руху	Швидкість руху або її зміна, км/год	Тривалість режиму, с	Час розрядки, с	
7	Постійна швидкість	32	24	0	0
8	Сповільнення	32...0	11	0	35
9	Зупинка	0	21	97	0
10	Прискорення	0...15	6	0	0
11	Зміна швидкості, прискорення	15...35	11	0	0
12	Зміна швидкості, прискорення	35...50	9	0	0
13	Постійна швидкість	50	12	0	0
14	Сповільнення	50...35	8	0	38
15	Постійна швидкість	35	15	105	0
16	Сповільнення	35...0	10	0	61
17	Зупинка	0	7	172	0

Таким чином, як видно з таблиць 4.12 та 4.13, під час руху транспортного засобу з електричним приводом у міському циклі, можуть мати місце випадки, коли суперконденсатор не матиме можливості забезпечити акумулювання усієї рекуперованої енергії. З метою забезпечення безперебійної роботи системи, уникнення її перевантаження та для безпеки водія та пасажирів необхідним є встановлення гальмівного реостату, який би включався в роботу у випадках виходу з ладу системи накопичення енергії або системи управління електричним двигуном. Також гальмівний реостат забезпечить гасіння надлишкової енергії у випадку експлуатації транспортного засобу у нетипових для нього умовах, наприклад експлуатацію транспортного засобу з малим обсягом накопичувачів енергії у гірських умовах.

На сучасному етапі розвитку науки та техніки, враховуючи також вимоги нормативних документів щодо екології вибір накопичувачів енергії це завжди компроміс між витратами на виробництво автомобіля та економічним і екологічним ефектами, досягнутими в процесі його експлуатації.

Таблиця 4.13 – Сумарні часові характеристики міського їздового циклу,
згідно EN 1986 – 1:2001

№ з/п	Режим руху	Тривалість режиму, с	Час розрядки, с	Накопичена енергія, кДж
1	Накопичення енергії суперконденсатором	4,7	0	15
2	Віддача енергії у тягову батарею	57	41	0
3	Накопичення енергії суперконденсатором	4,7	0	35
4	Віддача енергії у тягову батарею	59	97	0
5	Накопичення енергії суперконденсатором	2,7	0	38
6	Віддача енергії у тягову батарею	25	105	0
7	Накопичення енергії суперконденсатором	4,7	0	61
8	Віддача енергії у тягову батарею	10	172	0

Наведена методика розрахунку дозволяє провести розкладку енергетичних показників транспортного засобу, обладнаного електричним приводом у будь-якому швидкісному діапазоні та провести розрахунки системи накопичення енергії.

Чинники, які дозволяють змінювати енергетичні показники та гальмівні властивості транспортного засобу:

- струмошвидкісні показники електричного двигуна, який працює в режимі генератора;
- передатне число трансмісії;
- напруга генератора та системи накопичення.
- принцип роботи та конструкція системи накопичення енергії.

Проводячи розрахунки системи накопичення енергії на етапі проектування транспортного засобу можна досягти оптимального ефекту від

застосування рекуперації енергії за показниками: “вартість транспортного засобу – економічний та екологічний ефекти під час експлуатації”.

4.4.2 Пропозиції по реалізації підвищення ефективності систем рекуперації енергії

Як показали результати досліджень, для забезпечення максимально ефективного процесу рекуперативного гальмування необхідно ще на етапі розробки конструкції та проектування транспортного засобу проводити відповідні розрахунки.

Оскільки тягово-швидкісні властивості автомобіля є визначальними, то розрахунок системи рекуперативного гальмування повинен проводитися після тягово-швидкісних розрахунків, але перед вибором таких елементів транспортного засобу, як електричний двигун, елементи трансмісії, які забезпечують передачу крутного моменту від електричного двигуна до коліс автомобіля, ємність накопичувачів енергії, крім того у системі управління тяговим двигуном повинна бути передбачена підсистема управління рекуперативним гальмуванням.

Вхідними даними для розрахунку системи рекуперативного гальмування є:

- повна маса автомобіля;
- радіус кочення колеса;
- струмошвидкісна характеристика електричного двигуна;
- значення напруги, яка подається в накопичувачі.

Також для проведення розрахунків необхідно задати:

- максимальне значення сповільнення рекуперативного гальмування.

Дане значення повинно вибиратися виходячи з вимог нормативних документів та статистичних даних. Згідно Правил ЄЕК ООН № 13 [36], ДСТУ 3649:2010 [152], допоміжна гальмівна система повинна забезпечувати сповільнення під час гальмування не менше $0,6 \text{ м/с}^2$. З

іншої сторони, згідно статистичних даних, виходячи також з показників комфорту водія та пасажирів, значення сповільнення при здійсненні службового гальмування становить 2...2,5 м/с². Таким чином значення сповільнення для забезпечення ефективного рекуперативного гальмування повинен вибиратися з діапазону 0,6...2,5 м/с²;

- значення максимальної швидкості.

Виходячи з теорії автомобіля [125], враховуючи результати наведені у розділі 2 дисертаційної роботи, гальмівна сила буде рівна:

$$P_{\tau e} = M_a \cdot j \cdot \delta_{об} - k_w \cdot B \cdot H \cdot V^2 - G_a \cdot \psi. \quad (4.30)$$

Потужність електричного двигуна, необхідна для забезпечення заданого гальмівного засилля визначається за наступною залежністю:

$$N_{\tau e} = P_{\tau e} \cdot V_{\max}. \quad (4.31)$$

В свою чергу час гальмування визначатиметься, залежно від заданого сповільнення та максимальної швидкості:

$$t = \frac{V_{\max}}{j}. \quad (4.32)$$

Враховуючи залежності (4.30) та (4.31), необхідна потужність електричного двигуна, для забезпечення ефективного рекуперативного гальмування визначатиметься за залежністю:

$$N_{\tau e} = (M_a \cdot j \cdot \delta_{об} - k_w \cdot B \cdot H \cdot V_{\max}^2 - G_a \cdot \psi) \cdot V_{\max}. \quad (4.33)$$

Проведені дослідження показують, що для ефективного використання системи рекуперативного гальмування потрібно застосовувати електричний двигун потужністю на 10...20 % більше, ніж отримано при розрахунках тягово-швидкісних властивостей. Тому, після визначення потужності електричного двигуна в генераторному режимі, доцільно провести аналіз та остаточний вибір електричного урухомника.

Визначення передатного відношення трансмісії для електричного двигуна в генераторному режимі проводиться після вибору тягового урухомника, оскільки для достовірних розрахунків необхідним є значення обертів, при яких припиняється рекуперація енергії, передатне число трансмісії розраховується за залежністю:

$$u_{\text{тр. ел.}} = \frac{n_{\text{min}} \cdot \pi \cdot r_{\text{к}}}{30 \cdot V_{\text{min}}} \quad (4.34)$$

При цьому в конструкції транспортного засобу можуть застосовуватися різні передатні механізми від звичайної коробки передач до комбінованого механізму, який в тяговому режимі має одне передатне число, а в зворотному інше.

Прикладом такої схеми може бути застосування в трансмісії автомобіля планетарного редуктора, який в автоматичному режимі забезпечує різні передатні числа під час руху транспортного засобу в тяговому та гальмівному режимах (див. рис. 4.18).

При приведеному рисунку 4.18 зображено загальний вигляд спеціального планетарного редуктора, який складається з первинного вала 1, вторинного вала 2, фрикційної муфти 3, електромагнітної котушки 4, корпусу 5, фрикційних кілець 6, сталюого натискного кільця 7, натискних пружин 8, планетарного колеса 9, алюмінієвого корпусу 10.

Під час руху транспортного засобу в тяговому режимі крутний момент через первинний вал 1 передається на вторинний вал 2, при цьому, внаслідок дії

натискних пружин 8, затискається фрикційна муфта 3, яка блокує між собою первинний вал 1 та вторинний вал 2, передатне число планетарного редуктора тоді становить 1,0.

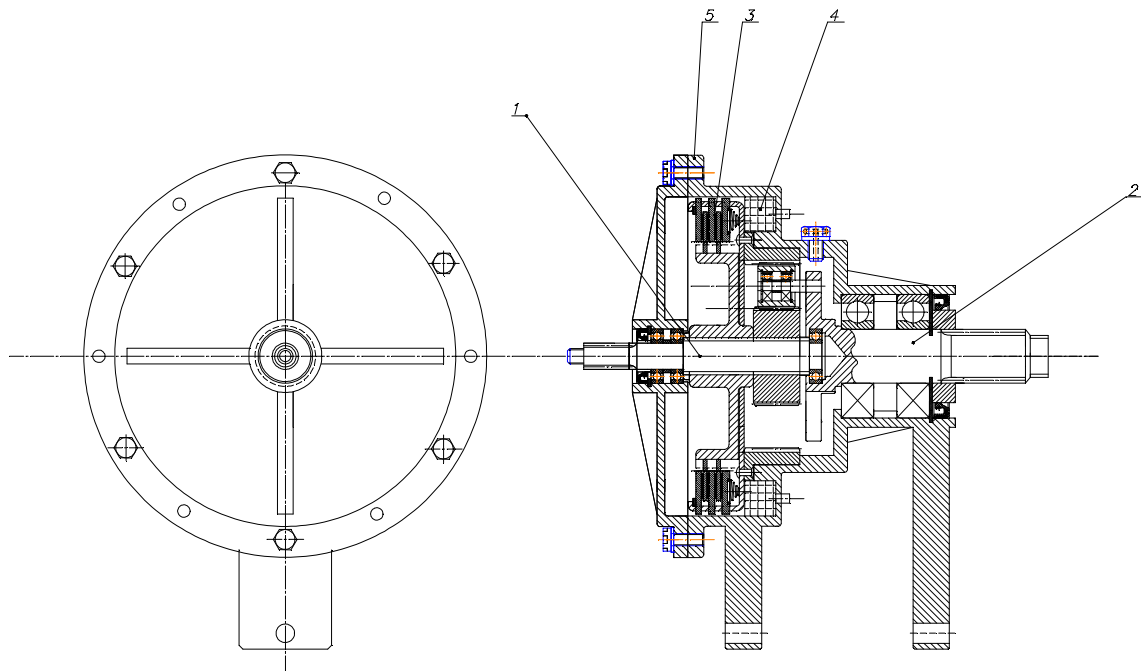


Рисунок 4.18 – Планетарний редуктор, із змінними передатними числами

Коли транспортний засіб переходить в режим гальмування, на електромагнітну котушку 4 автоматично подається сигнал системи управління. Електромагнітна котушка 4 через алюмінієвий корпус 10 фрикційної муфти 3 притягує стальне натискне кільце 7, яке, стискаючи натискні пружини 8, відходить вправо, звільняє фрикційні кільця 6 і, тим самим, розблоковує фрикційну муфту 3. При цьому, за рахунок електромагнітних сил фрикційна муфта 3 притискається до електромагнітної котушки 4, внаслідок чого виникає сила тертя між фрикційною муфтою 3 та електромагнітною котушкою 4, і фрикційна муфта 3 разом з планетарним колесом 9 зупиняється. Внаслідок розблокування фрикційної муфти 3 та зупинки планетарного колеса 9 повноцінно починає працювати планетарний редуктор, що збільшує передатне відношення до 3,0.

Запропонований спосіб забезпечує підвищення ефективності роботи системи рекуперації енергії транспортного засобу з електричним приводом в режимі гальмування. За рахунок збільшення передатного відношення трансмісії зменшується кінцева швидкість, при якій припиняється режим рекуперативного гальмування та збільшується кількість рекуперованої енергії.

Після проведення розрахунків конструктивних параметрів, вибору основних вузлів та агрегатів транспортного засобу, проводиться перевірка тягового двигуна за показниками перевантаження у генераторному режимі.

Для цього за залежностями (2.47), (2.48) будуються графіки енергетичних показників та гальмівних властивостей, залежності сили струму від обертів та гальмівного моменту від сили струму. Графік енергетичних показників та гальмівних властивостей дозволить провести аналіз кількості питомої та загальної енергії, виробленої генератором, що дозволить в подальшому провести вибір накопичувачів енергії.

Графік залежності сили струму від обертів відобразить значення струмів, які необхідні для розрахунків силової електричної частини, а також забезпечать розробку адекватного програмного забезпечення для управління процесом рекуперативного гальмування. Здійснення розробки програмного забезпечення повинно ґрунтуватися на принциповій схемі роботи системи рекуперації наведеній на рис. 4.13.

Необхідна ємність батарей розраховується залежно від потужності тягового урухомника, необхідної дальності поїздок та інших чинників, відповідно до передбачуваних режимів руху.

Оскільки процес рекуперативного гальмування характеризується малими часовими рамками та великими потужностями, зокрема значними струмами та енергіями, які виробляються електричним двигуном і направляються у накопичувачі, то маючи графіки енергетичних показників та гальмівних властивостей, можна провести вибір накопичувачів енергії потрібної потужності та встановити комбіновані джерела енергії, наприклад поєднати суперконденсатори та акумуляторні батареї, або встановити кілька блоків

аккумуляторних батарей, які, за відповідного програмного забезпечення, по чергово зможуть акумулювати рекуперовану енергію.

Наведена методика, також може застосовуватися у розрахунках конструктивних параметрів, автомобілів, які перебувають у експлуатації, з метою встановлення на них електричного привода.

4.4.3 Прогнозовані процеси рекуперативного гальмування під час руху транспортного засобу

Отримані результати наукових досліджень дають можливість здійснювати прогнозування процесів рекуперативного гальмування під час руху транспортного засобу.

Зважаючи на те, що практично усі сучасні автомобілі обладнані GPS-навігаторами, з яких можливо отримати інформацію щодо геометричних параметрів дороги, то реалізація цього проекту є цілком здійсненою.

Основою для прогнозування процесів рекуперативного гальмування під час руху транспортного засобу є принципова схема роботи системи, наведена на рис. 4.13. Здійснивши прив'язку системи управління двигуном до даних GPS-навігатора можна з високою точністю прогнозувати необхідні режими руху транспортного засобу, з метою забезпечення мінімальної витрати енергії.

Особливу вагу прогнозування процесів рекуперативного гальмування матиме під час руху транспортного засобу на різко пересіченій та гористій місцевостях, оскільки під час здійснення руху на затяжних спусках, кількість рекуперованої енергії буде значно зростати, тому достовірні розрахунки та підготовка вільної ємності накопичувачів енергії матиме вирішальне значення.

4.4.4 Розрахунок системи рекуперативного гальмування

Методику розрахунку системи рекуперативного гальмування можна представити наступною схемою:

- визначення тягово-швидкісних властивостей;
- вибір основних елементів транспортного засобу;
- визначення потрібної потужності двигуна та ефективного передатного відношення трансмісії з точки зору системи рекуперації енергії;
- вибір електродвигуна та параметрів трансмісії;
- визначення розкладки енергетичних показників у заданому діапазоні швидкостей;
- вибір системи накопичення енергії;
- розрахунок режимів роботи системи накопичення енергії;
- розрахунок ефективності системи рекуперативного гальмування;
- передача результатів розрахунків для програмування системи управління тяговим електродвигуном та системою накопичення енергії.

4.5 Показники ефективності системи рекуперативного гальмування

В міському електричному та залізничному транспорті ефективність системи рекуперації в кількісному вимірі оцінюється коефіцієнтом рекуперації [160], який визначається як відношення витрат енергії на тягу до генерованої енергії при гальмуванні:

$$k_{\text{рек}} = \frac{\int_0^T U(t) \cdot I(t) dt}{2 \cdot \int_0^T U_{\text{дв}}(t) \cdot I_{\text{дв}}(t) dt}. \quad (4.35)$$

Фірма Segelek для оцінювання ефективності системи рекуперації енергії використовує термін “фактор рекуперації”. Фактор рекуперації це коефіцієнт, який також визначається як відношення витрат енергії на тягу до генерованої енергії при гальмуванні.

Однак дані методи оцінки ефективності системи рекуперації енергії не придатні для формування порівняльних характеристик різних транспортних засобів.

На основі проведених досліджень можна запропонувати два показника ефективності рекуперативного гальмування:

- $k_{рек}$ – коефіцієнт рекуперації, який у відсотковому значенні характеризує ступінь використання можливостей системи рекуперативного гальмування транспортного засобу;
- $K_{рек}$ – фактор рекуперації, який дозволить провести порівняльний аналіз ефективності систем рекуперації електричної енергії різних транспортних засобів.

Коефіцієнт рекуперації $k_{рек}$ визначається як відношення кількості енергії, рекуперованої транспортним засобом $E_{рек}$ до максимально можливої кількості рекуперованої енергії E_K :

$$k_{рек} = \frac{E_{рек}}{E_K}, \quad (4.36)$$

$$\text{де } E_K = \frac{m_a(V_n^2 - V_k^2)}{2}. \quad (4.37)$$

Даний коефіцієнт дозволить, окрім оцінювання ефективності системи рекуперації енергії транспортного засобу, проводити оцінювання ступеня використання можливостей системи рекуперації енергії водієм.

У [14, 15] відмічено, вплив стилю водіння на енергетичні показники транспортного засобу. Тому встановлення на транспортному засобі показника ступеня використання системи рекуперації енергії спонукатиме водіїв до її ефективнішого використання, що призведе до поліпшення показників енергоефективності. Значення коефіцієнта рекуперації енергії за поїздки, визначатиметься за наступною залежністю:

$$k_{pn} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{E_{рек}}{E_K}, \quad (4.38)$$

де n - кількість гальмувань.

Отримавши дані щодо ефективності роботи системи рекуперації енергії для двох автомобілів неможливо провести їх порівняння, оскільки транспортні засоби відрізняються масово-габаритними показниками, потужностями двигунів і т.п.

Тому пропонується застосувати в якості оціночного показника фактор рекуперації $K_{рек}$, приведений до одиниці маси транспортного засобу. Фактор рекуперації дозволяє визначити кількість рекуперованої енергії на одиницю маси транспортного засобу (Дж/кг):

$$K_{рек} = \frac{E_{рек}}{m_n}, \quad (4.39)$$

де m_n - повна маса автомобіля, кг.

При цьому кількість рекуперованої енергії визначається під час рекуперативного гальмування транспортного засобу зі швидкості 60 км/год.

Провівши розрахунки за залежністю (4.39), отримано:

- фактор рекуперації енергії для автомобіля “ГАЗЕЛЬ” [91] становить 51 Дж/кг;

- фактор рекуперації енергії для автомобіля ГСУ-1 становить 109 Дж/кг.

Таким чином можна стверджувати про більш ефективну роботу системи рекуперації автомобіля ГСУ-1, оскільки в конструкції транспортного засобу ГСУ-1, під час рекуперативного гальмування збільшується передатне число трансмісії, що дозволяє отримати більшу кількість рекуперованої енергії.

Фактор рекуперації дає змогу проводити моделювання енергетичних показників на стадії проектування транспортних засобів, а також у випадку переобладнання автомобілів на електричну тягу. Наведена залежність дозволяє уніфікувати конструкції електричного привода, для певного діапазону масових показників транспортних засобів. Наприклад: підприємство займається виробництвом модельного ряду транспортних засобів від мікроавтобусів до автобусів надвеликої місткості. При проектуванні нової моделі проводиться аналіз фактора рекуперації енергії, в результаті чого транспортний засіб обладнується електричним приводом, який є найбільш ефективним в даному випадку.

4.6 Висновки з розділу

1. Порівнянням результатів теоретичних та експериментальних досліджень встановлено, що похибка по сповільненню становить до 8 %, похибка по питомому значенню рекуперованої енергії становить до 11 %. Наведені математичні моделі є адекватними за критерієм Фішера. Окрім того проведено оцінювання невизначеності вимірювань по обох показниках. За результатами оцінювання можна стверджувати, що з рівнем довіри 0,95 дані моделі можна вважати адекватними. Певні невідповідності спостерігаються наприкінці процесу, це обумовлено нестабільністю показників на малих швидкостях, в момент припинення рекуперативного гальмування

2. Проведено теоретичні дослідження системи рекуперації енергії залежно від дорожніх умов, встановлено вплив зовнішніх факторів на роботу системи рекуперації енергії

3. З метою підвищення показників енергоефективності та гальмівних властивостей запропоновано принципову схему роботи системи управління рекуперацією енергії гібридного автомобіля

4. Запропоновано рекомендації щодо розрахунку системи рекуперації енергії, конструктивних параметрів автомобіля, а також рекомендації щодо

прогнозування режимів роботи системи рекуперації енергії та накопичувачів енергії

5. Розроблено оціночні критерії – показники енергоефективності системи рекуперації енергії.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу підвищення ефективності рекуперативного гальмування, а саме енергетичних показників та гальмівних властивостей транспортних засобів з електричним приводом.

1. За результатами проведеного аналізу останніх досліджень у сфері електричних та гібридних транспортних засобів, їх гальмівних та енергетичних властивостей встановлено необхідність застосування комплексного підходу до питань дослідження систем рекуперації енергії, при якому система рекуперації енергії розглядається з однієї сторони як елемент гальмівної системи, з іншої – як система накопичення енергії

2. Побудовано математичні моделі регульованого процесу рекуперативного гальмування, де застосовано комплексний підхід та враховано електричні і механічні впливи на ефективність даного процесу, проведено теоретичні дослідження системи рекуперації енергії залежно від дорожніх умов, встановлено вплив зовнішніх факторів на роботу системи рекуперації енергії, що дає змогу проводити розрахунок показників системи рекуперації енергії під час руху транспортного засобу

3. Розроблено методику проведення експерименту досліджень, яка базується на використанні методів двофакторного нелінійного планування експерименту з отриманням регресійних моделей нелінійного взаємоз'язку вихідних параметрів дослідження – сповільнення j та рекуперованої енергії E_p , з вхідними факторами – початкової швидкості гальмування V та струмом збудження $I_{зб}$

4. Проведено експериментальні дослідження системи рекуперативного гальмування на гібридному автомобілі ГСУ-1, за отриманими експериментальними даними побудовано рівняння регресії для визначення сповільнення та кількості питомої рекуперованої енергії, за якими здійснено моделювання процесу рекуперативного гальмування, а також, які можуть застосовуватися у системах управління рекуперацією енергії

5. Порівнянням теоретичних та експериментальних результатів

досліджень встановлено, що похибка по сповільненню становить до 8 %, похибка по питомому значенню рекуперованої енергії становить до 11 %. Обидві наведені математичні моделі є адекватними за критерієм Фішера. Окрім того проведено оцінювання невизначеності вимірювань по обох показниках. За результатами оцінювання можна стверджувати, що з рівнем довіри 0,95, дані моделі можна вважати адекватними

6. Запропоновано рекомендації щодо розрахунку системи рекуперації енергії, конструктивних параметрів автомобіля, а також рекомендації щодо прогнозування режимів роботи системи рекуперації енергії та накопичувачів енергії, розроблено оціночні критерії – показники енергоефективності системи рекуперації енергії, запропоновано принципову схему роботи системи управління рекуперацією енергії гібридного автомобіля

7. Встановлено, що впровадження розроблених рекомендацій призводить до збільшення кількості рекуперованої енергії до 20 % та поліпшення ефективності гальмування до 2 разів

8. Результати роботи прийняті до використання в ДП “Автоскладальний завод № 1” публічного акціонерного товариства “Автомобільна компанія “Богдан Моторс””: в системі управління тяговим електричним приводом гібридного автобуса А70522 застосовано алгоритм керування системою рекуперації енергії, показник ефективності роботи системи рекуперації енергії – коефіцієнт рекуперації застосовується з метою наладки тягового електричного привода, під час постановки продукції на виробництво; ТОВ «Спільне українсько-німецьке підприємство «Електронтранс»: під час проектування транспортних засобів після визначення їх тягово-швидкісних характеристик, застосовується в якості перевіркової, методика розрахунку системи рекуперативного гальмування, ТзОВ “Волиньстандарт”: методика оцінювання невизначеності ефективності гальмування, а також результати дисертаційних досліджень застосовуються співробітниками кафедри автомобілів і транспортних технологій під час викладання навчальних дисциплін.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дембіцький В. М. Вибір компоновальної схеми гібридного автомобіля та визначення режимів його руху / В. М. Дембіцький // Міжвузівський збірник “Наукові нотатки”. — Луцьк: НТУ, 2012. — Вип. 37. — С. 75–80.
2. Дембіцький В. М. Доцільність застосування рекуперації енергії під час руху автомобіля за інерцією з вимкненим зчепленням / В. М. Дембіцький, О. П. Сітовський // Міжвузівський збірник “Наукові нотатки”. — Луцьк: НТУ, 2012. — Вип. 36. — С. 83–85.
3. Сітовський О. П. Математичне моделювання процесу електричного гальмування макету транспортного засобу з гібридною силовою установкою / О. П. Сітовський, В. М. Дембіцький // Вісник СевНТУ. — Севастополь, 2012. — Вип. 135. — С. 73–75.
4. Дембіцький В. М. Методика оцінки ефективності системи накопичення енергії транспортного засобу з гібридною силовою установкою / В. М. Дембіцький // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. — Луганськ, 2013. — Вип. 15 (204). — С. 93–95.
5. Дембіцький В. М. Дослідження приводу гальмівної системи транспортного засобу з гібридною силовою установкою та рекуперацією енергії / В. М. Дембіцький // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. Серія: Автомобіле- та тракторобудування — Харків: НТУ “ХПІ”, 2013. — Вип. 29 (1002). — С. 28–33.
6. Сітовський О. П. Обґрунтування та вибір критеріїв оцінки процесу електродинамічного гальмування під час руху гібридного транспортного засобу на затяжних спусках / О. П. Сітовський, В. М. Дембіцький // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. Серія: Автомобіле- та тракторобудування — Харків: НТУ “ХПІ”, 2013. — Вип. 30 (1003). — С. 10–15.
7. Сітовський О. П. Електродинамічне гальмування гібридного транспортного засобу на дорогах з низьким коефіцієнтом зчеплення / О. П. Сітовський, В. М. Дембіцький // Автомобильный транспорт : сб. науч. тр. / М-во образования и науки Украины, ХНАДУ ; [редкол.: Туренко А. Н. (гл. ред.)

[и др.]. – Харьков, 2013. – Вып. 33. – С. 13–18
[<http://dspace.khadi.kharkov.ua/dspace/handle/123456789/728>].

8. Сітовський О. П. Методика визначення оптимального ступеня початкової зарядки накопичувачів енергії транспортних засобів / О. П. Сітовський, В. М. Дембіцький // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. Серія: Автомобіле- та тракторобудування — Харків: НТУ “ХПІ”, 2014. — Вип. 8 (1051). – С. 54–60.

9. Сітовський О. П. Оцінювання невизначеності вимірювань під час гальмівних випробувань транспортних засобів / О. П. Сітовський, В. М. Дембіцький, А.М. Кашуба, В.М. Босенко // Вісник НТУ. — К.: НТУ, 2013. — Вип. 28 (Частина I). – С. 379–388.

10. Дембіцький В. М. Методика визначення енергетичних характеристик процесу електродинамічного гальмування під час дорожніх випробувань транспортних засобів, обладнаних електроприводом та системою рекуперації енергії / В. М. Дембіцький // Вісник НТУ. — К.: НТУ, 2014. — Вип. 30 (Частина I). – С. 95–102.

11. Дембіцький В. М. Математична модель процесу електродинамічного гальмування з рекуперацією енергії транспортного засобу, обладнаного електроприводом / В. М. Дембіцький, О. П. Сітовський та ін. // Наукові нотатки. Вип. 45. – Луцьк: ЛНТУ, 2014. С. 159–167.

12. Дембіцький В. М. Експериментальні дослідження процесу електродинамічного гальмування гібридного автомобіля / В. М. Дембіцький // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. Серія: Автомобілебудування — Харків: НТУ “ХПІ”, 2015. — Вип. 10 (1119). – С. 38–43.

13. Дембіцький В. М. Регулювання параметрів генератора під час рекуперативного гальмування / В. М. Дембіцький // Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. Науковий журнал — Луцьк: Луцький НТУ, 2015. — Вип. 1 (3). – С. 65–70.

14. Дембіцький В. М. Оптимальні режими руху електричних та

гібридних транспортних засобів обладнаних системою рекуперації енергії / В. М. Дембіцький // Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції “Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту”, 21–23 жовтня. 2013 р.: збірник наукових праць. – Вінниця: ВНТУ, 2013. – С. 142–143.

15. Сітовський О. П. Вплив стилю водіння на рекуперацію енергії / О. П. Сітовський, В. М. Дембіцький // LXXI Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету: тези доповідей. – Київ, 2015. – С. 57.

16. Сітовський О. П. Перспективи розвитку автомобілів з електричним приводом в Україні / О. П. Сітовський, В. М. Дембіцький, А. М. Кашуба // LXXI Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету: тези доповідей. – Київ, 2015. – С. 57.

17. Дембіцький В. М. Поліпшення енергетичних та гальмівних показників гібридних автомобілів категорії М1 /В. М. Дембіцький // Новітні шляхи створення, технічної експлуатації, ремонту і сервісу автомобілів. Збірник тез доповідей науково-практичної конференції 8–11 вересня 2015 року. Одеса – Коблево – Одеса:Військова академія, 2015. – С. 68–71.

18. Переваги та недоліки використання електричних автомобілів [Електронний ресурс] – 2014. – Режим доступу: http://affiliate-electric-cars.prositeslab.com/uk/34/adv_and_disadv_of_having_electric_car. Дата звернення: 27.01.2015 р.

19. Гибридный автомобиль [Электронный ресурс] – 2013. – Режим доступу: http://ru.wikipedia.org/wiki/Гибридный_автомобиль.

20. Понаехали: гибриды вытесняют бензиновый транспорт [Электронный ресурс] / А. Волобуев. – 2012. – Режим доступу: <http://top.rbc.ru/economics/29/06/2012/657494.shtml>.

21. More than 400,000 Electric Cars on the Road Worldwide [Електронний

ресурс] – 2014. – Режим доступа: <http://www.electric-vehiclenews.com/2014/04/more-than-400000-electric-cars-on-road.html>.

22. Продажи электромобилей в 2015 году выросли в пять раз [Электронный ресурс] / 04.08.2015. – Режим доступа: <http://telegraf.com.ua/auto/2005744-prodazhi-elektromobiley-v-2015-godu-vyirosli-v-pyat-raz.html>. Дата обращения 10.08.2015.

23. Успіх електромобілів у Норвегії [Електронний ресурс] / 2015. – Режим доступу: <http://avtoz.net/uspih-elektromobiliv-v-norvegii>. Дата звернення: 25.08.2015.

24. Гибридные авто в Украине [Электронный ресурс] / Е. Муджири. – 2011. – Режим доступа: <http://www.plus.in.ua/novosti/1584-gibridnye-avto-v-ukraine.html>.

25. МВД закупило 1,2 тыс. гибридных Toyota Prius [Электронный ресурс] / Ю. Максимчук. – 2013. – Режим доступа: <http://www.autocentre.ua/news/law/mvd-zakupilo-toyota-prius-pochti-na-370-mln-griven-ma-55511.html>.

26. Українці почали скуповувати електромобілі [Електронний ресурс] / 2015. – Режим доступу: http://24tv.ua/news/showNews.do?ukrayintsi_pochali_skupovuvati_elektromobili&objectId=608775. Дата звернення: 05.09.2015.

27. Повідомлення міжвідомчої комісії з міжнародної торгівлі "Про зміну рішення Міжвідомчої комісії з міжнародної торгівлі від 28.04.2012 N СП-275/2012/4423-08 "Про застосування спеціальних заходів щодо імпорту в Україну легкових автомобілів незалежно від країни походження та експорту"" від 20.04.2013.

28. В Украине Mitsubishi Motors начала устанавливать зарядные станции для электрокаров [Электронный ресурс] / 2014. – Режим доступа: <http://toneto.net/news/tehnologii/v-ukraine-Mitsubishi-Motors-nachala-ustanavlivat-zaryadnie-stantsii-dlya-elektrokarov>.

29. Киевские пункты зарядки электромобилей нанесли на мировую

карту электрозаправок [Электронный ресурс] / 2014. – Режим доступа: <http://m2motors.com.ua/novosti/3813-kievskie-punkty-zaryadki-elektromobiley-nanesli-na-mirovuyu-kartu-elektrozapravok.html>.

30. Мерия Парижа сделала бесплатным прокат электромобилей [Электронный ресурс] / 2014. – Режим доступа: <http://novosti-n.org/ukraine/read/62234.html>.

31. Зареєстровано законопроект, що передбачає звільнення електромобілів від оподаткування [Електронний ресурс] / 05.02.2015. – Режим доступу: <http://ecotown.com.ua/news/Zareyestrovano-zakonoproekt-shchoperebachaye-zviltennya-elektromobiliv-vid-opodatkuvannya/>. Дата звернення 24.02.2015.

32. ООН закликає до відмови від нафти та газу до 2100 року [Електронний ресурс] / 2014. – Режим доступу: <http://unt.ua/news/society/ecology/oon-zaklikae-do-vidmovi-vid-nafti-ta-gazu-do-2100-roku>.

33. Гібридні автомобілі : моногр. / Бажинов О. В. [та ін.] ; Харк. нац. автомоб.-дорож. ун-т. – Х. : Крок, 2008. – 327 с. : рис., табл.

34. Дитковский Р. С. Разработка и обоснование выбора компоновочной схемы гибридной силовой установки городского автобуса / Р.С. Дитковский, В.П. Шевчук // за материалами III общероссийской студенческой электронной научной конференции «Студенческий научный форум». 15–20 февраля 2011 года.

35. Синергетичний автомобіль. Теорія і практика / [Бажинов О. В., Смирнов О. П., Серіков С. А., Двадненко В. Я.]. – Харків: ХНАДУ, 2011. – 236 с.

36. Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения транспортных средств категорий М, N и O в отношении торможения: Правила ЕЭК ООН № 13. – [Действительны с 04.08.2011]. – Женева.: Европейская Экономическая Комиссия Организации Объединенных наций, 2011. – 311 с.

37. Единообразные предписания, касающиеся официального

утверждения легковых автомобилей в отношении торможения: Правила ЕЭК ООН № 13-Н. – [Действительны с 04.10.2011]. – Женева.: Европейская Экономическая Комиссия Организации Объединенных наций, 2011. – 118 с.

38. Автотранспортні засоби. Гальмівні системи. Терміни та визначення.: ДСТУ 2919-94. – [Чинний від 1996-01-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 1994. – 26 с. – (Національний стандарт України).

39. Автотранспортні засоби. Гальмівні властивості. Терміни та визначення.: ДСТУ 2886-94. – [Чинний від 1996-01-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 1994. – 28 с. – (Національний стандарт України).

40. Теория электрической тяги / [Розенфельд В. Е., Исаев И. П., Сидоров Н. Н., Озеров М. И.]; под ред. И. П. Исаева. – [3-е изд.]. – М.: Транспорт, 1995. – 294 с.

41. Вешеневский С. Н. Характеристики двигателей в электроприводе. Изд. 6-е, исправленное / С. Н. Вешеневский. – М.: Энергия, 1977. – 432 с.

42. Онищенко Г. Б. Электрический привод. Учебник для вузов / Г. Б. Онищенко. – М.: РАСХН. 2003. – 320 с.

43. Магомедов М. Х. Антиблокировочные системы робастно-адаптивной стабилизации движения колесно-транспортных средств: автореф. дисс. на соискание уч. степени доктора физико-математических наук: спец. 01.02.01 “Теоретическая механика” / М. Х. Магомедов. – М., 2003. – 26 с.

44. Солнцев А. Н. Совершенствование процесса торможения автопоезда большой габаритной длины: автореф. дисс. на соискание уч. степени кандидата технических наук: спец. 05.05.03 “Колёсные и гусеничные машины” / А. Н. Солнцев. – М., 2004. – 20 с.

45. Морозов Михаил Владимирович. Методы улучшения тягово-сцепных и тормозных свойств автомобильного колеса с учетом трибологических свойств контакта шины с дорогой: автореферат дисс. на соискание уч. степени кандидата технических наук: спец. 05.05.03 “Колёсные и гусеничные машины” / Морозов Михаил Владимирович. – М., 2012. – 19 с.

46. Балакина Екатерина Викторовна. Улучшение устойчивости

движения колесной машины в режиме торможения на основе предпроектного выбора параметров элементов шасси : диссертация на соискание уч. степени доктора технических наук: спец. 05.05.03 “Колёсные и гусеничные машины” / Балакина Екатерина Викторовна. – Волгоград, 2010. – 418 с.

47. Зотов Вячеслав Михайлович. Теоретические основы виртуально-физического моделирования в реальном времени процесса торможения колеса автомобиля : диссертация на соискание уч. степени кандидата технических наук: спец. 05.05.03 “Колёсные и гусеничные машины” / Зотов Вячеслав Михайлович. – Волгоград, 2009. – 183 с.

48. Баев Владимир Валерьевич. Влияние параметров рулевого управления на самоповорот управляемых колес автомобиля с АБС в режиме экстренного торможения: диссертация на соискание уч. степени кандидата технических наук: спец. 05.05.03 “Колёсные и гусеничные машины” / Владимир Валерьевич Балаев. – Волгоград, 2006. – 170 с.

49. Аль-Дахмаши Абдуль-Нассер. Влияние конструктивных и эксплуатационных факторов на работу рекуперативной АБС на колесах прицепа малотоннажного автопоезда: дисс. на соискание уч. степени кандидата технических наук: спец. 05.05.03 “Колёсные и гусеничные машины” / Абдуль-Нассер Аль-Дахмаши. – Волгоград, 2003. – 134 с.

50. Яворський Я. П. Вдосконалення методу теплового розрахунку автомобільних дискових гальм при тривалих гальмуваннях на основі комп'ютерного моделювання: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.22.02 / Я. П. Яворський ; Нац. ун-т "Львів. політехніка". — Л., 2004. — 20 с.

51. Кирчатий В. І. Вдосконалення процесу регулювання гальмівних сил на автотранспортних засобах категорії М3: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.22.02 / В. І. Кирчатий ; Харк. держ. автомоб.-дор. техн. ун-т. — Х., 2001. — 18 с.

52. Байцур М. В. Поліпшення гальмівних властивостей автомобілів категорії N3 при їх конверсії: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.22.02 / М. В. Байцур ; Харк. нац. автомоб.-дор. ун-т. — Х., 2007. — 23 с.

53. Осташук М. М. Розроблення методу визначення розподілу теплових потоків в елементах автомобільних дискових гальм на тривимірних моделях: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.22.02 / М. М. Осташук ; Нац. ун-т "Львів. політехніка". — Л., 2005. — 19 с.
54. Богомолів В. О. Створення і дослідження систем керування гальмуванням автотранспортних засобів: Автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.22.02 / В. О. Богомолів; Харк. держ. автомоб.-дорож. техн. ун-т. — Х., 2001. — 33 с.
55. Волков В. П. Формування функціональної стабільності гальмівних властивостей колісних машин при проектуванні: Автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.22.02 / В. П. Волков; Харк. нац. автомоб.-дорож. ун-т. — Х., 2005. — 31 с.
56. Ревин Сергей Александрович. Повышение тормозных свойств малотоннажных автопоездов с АБС: дисс. на соискание уч. степени кандидата технических наук: спец. 05.05.03 "Колёсные и гусеничные машины" / Сергей Александрович Ревин. — Волгоград, 2003. — 133 с.
57. Холл Йозеф Ласло. Улучшение тормозных качеств городского автобуса путем применения модулирования тормозного сигнала: дисс. на соискание уч. степени кандидата технических наук: спец. 05.05.03 "Колёсные и гусеничные машины" / Йозеф Ласло Холл. — Москва, 1990. — 161 с.
58. Ноздричев Александр Васильевич. Разработка блока предотвращения попутных столкновений автомобилей на режимах торможения двигателем: дисс. на соискание уч. степени кандидата технических наук: спец. 05.05.03 "Колёсные и гусеничные машины" / Александр Васильевич Ноздричев. — Курган, 2001. — 166 с.
59. Михалевич М. Г. Вдосконалення електропневматичних апаратів гальмівного приводу автотранспортних засобів: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.22.02 / М.Г. Михалевич ; Харк. нац. автомоб.-дорож. ун-т. — Х., 2009. — 21 с.
60. Крамський О. В. Вдосконалення методів розрахунку динаміки

пневмоапаратів та пневматичного гальмівного приводу автотранспортних засобів: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.22.02 / О. В. Крамський ; Харк. нац. автомоб.-дор. ун-т. — Х., 2006. — 20 с.

61. Косий Р. А. Розробка та дослідження гальмівного крана пневматичного гальмівного приводу автотранспортного засобу: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.22.02 / Р. А. Косий ; Харк. держ. автомоб.-дор. техн. ун-т. — Х., 2000. — 16 с.

62. Бондаренко А. І. Удосконалення процесів модуляції тиску в пневматичному гальмівному приводі автомобілів: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.22.02 / А. І. Бондаренко ; Харк. нац. автомоб.-дор. ун-т. — Х., 2010. — 22 с.

63. Красюк О. М. Вдосконалення електронно-пневматичної гальмівної системи автотранспортних засобів: автореф. дис. канд. техн. наук : 05.22.02 / О. М. Красюк ; Харк. нац. автомоб.-дор. ун-т. — Х., 2011. — 20 с.

64. Степанов В. Ю. Зниження нерівномірності гальмівних моментів на колесах легкового автомобіля: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.22.02 / В. Ю. Степанов ; Харк. нац. автомоб.-дор. ун-т. — Х., 2006. — 22 с.

65. Putz, M., "VE Mechatronic Brake: Development and Investigations of a Simple Electro Mechanical Brake," SAE Technical Paper 2010-01-1682, 2010, doi:10.4271/2010-01-1682.

66. Васильев В. И. Обеспечение безопасности автотранспортных средств на режимах торможения: автореф. дисс. на соискание уч. степени доктора технических наук: спец. 05.22.10 "Эксплуатация автомобильного транспорта" / В. И. Васильев. – Тюмень, 2006. – 39 с.

67. Ахметшин Альберт Махмутович. Адаптивная антиблокировочная тормозная система колесных машин: диссертация на соискание уч. степени доктора технических наук: спец. 05.05.03 "Колёсные и гусеничные машины" / Альберт Махмутович Ахметшин. – М., 2003. – 255 с.

68. Коляса О. Л. Обґрунтування теплової моделі дискових гальмових механізмів автомобільних коліс: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.22.02 /

Остап Леонідович Коляса; Національний ун-т "Львівська політехніка". — Львів, 2002. — 19 с.

69. Становська Т. П. Зниження часової складності процесів автоматизованого управління уповільненням автотранспортних засобів: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.13.06 / Т. П. Становська ; Одес. держ. політехн. ун-т. — О., 2001. — 19 с.

70. Пак Вадим Вадимович. Разработка методов и средств испытания автоматизированных тормозных систем легковых автомобилей: дисс. на соискание уч. степени кандидата технических наук: спец. 05.05.03 "Колёсные и гусеничные машины" / Вадим Вадимович Пак. – Волгоград, 2002. – 151 с.

71. Копотев Дмитрий Алексеевич. Разработка системы управления комбинированной энергосиловой установки параллельной компоновочной схемы теплового и электрического двигателей легкового автомобиля : диссертация на соискание уч. степени кандидата технических наук: спец. 05.05.03 "Колёсные и гусеничные машины" / Копотев Дмитрий Алексеевич. – Ижевск, 2011. – 167 с.

72. Карпухин Кирилл Евгеньевич. Принципы и алгоритм управления автомобилем с гибридной силовой установкой : диссертация на соискание уч. степени кандидата технических наук: спец. 05.05.03 "Колёсные и гусеничные машины" / Карпухин Кирилл Евгеньевич; [Место защиты: Моск. гос. техн. ун-т (МАМИ)]. – Москва, 2008. – 203 с.

73. Лазарева Анна Николаевна. Разработка методики расчета базовых параметров и характеристик гибридной энергосиловой установки параллельной компоновочной схемы для легкового автомобиля : дисс. на соискание уч. степени кандидата технических наук: спец. 05.05.03 "Колёсные и гусеничные машины" / Анна Николаевна Лазарева. – Ижевск, 2006. – 164 с.

74. Галиев Радик Мирзашаехович. Обоснование и выбор параметров конструкции комбинированной энергосиловой установки легкового автомобиля: дисс. на соискание уч. степени кандидата технических наук: спец. 05.05.03 "Колёсные и гусеничные машины" / Радик Мирзашаехович Галиев. –

Ижевск, 2002. – 170 с.

75. Лашкевич М. М. Разработка системы управления для электротрансмиссии с тяговыми вентильно-индуктивными двигателями: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.09.03 / М. М. Лашкевич; – М., 2013. – 20 с.

76. Ежова Елена Владимировна Электромеханический преобразователь комбинированной энергетической установки гибридного автомобиля: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.09.01 Электромеханика и электрические аппараты / Е. В. Ежова; — Самара, 2006. — 19 с.

77. Хамидуллин Радик Планетович. Совершенствование конструкции гибридной энергосиловой установки параллельной компоновочной схемы за счет устранения жесткой кинематической связи между тепловым и электрическим двигателями: диссертация на соискание уч. степени кандидата технических наук: спец. 05.05.03 “Колёсные и гусеничные машины” / Радик Планетович Хамидуллин. – Набережные Челны, 2007. – 140 с.

78. Васильев Владимир Андреевич. Снижение потерь энергии в гибридном приводе автомобиля за счет уменьшения влияния пульсационной составляющей крутящего момента ДВС и применения рациональной схемы : диссертация на соискание уч. степени кандидата технических наук: спец. 05.05.03 “Колёсные и гусеничные машины” / Владимир Андреевич Васильев. – Ижевск, 2007. – 166 с.

79. Абдель Мунем Музхер Хашем Оптимизация характеристик дизель - электрической силовой установки с целью повышения эксплуатационной топливной экономичности: дис. канд. техн. наук: 05.04.02 Тепловые двигатели / Мунем Музхер Хашем Абдель; — М., 2004. — 115 с.

80. Ноздрин Алексей Васильевич Улучшение некоторых технико-эксплуатационных свойств автомобиля с помощью комбинированной энергоустановки: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.20.01 / А. В. Ноздрин; — М., 2006. — 18 с.

81. Коршун О. В. Управление электрическим торможением генераторов для повышения устойчивости межсистемных связей: дисс. на

соискание уч. степени кандидата технических наук: спец. 05.14.02 “Электростанции и электроэнергетические системы” / Коршун Оксана Викторовна. – Санкт-Петербург, 2006. – 166 с.

82. Баатарын Пурэвсурэн Разработка алгоритмов управления и исследование применения электрического торможения для повышения динамической устойчивости развивающейся энергодефицитной энергосистемы: дисс. на соискание уч. степени кандидата технических наук: спец. 05.14.02 “Электростанции и электроэнергетические системы” / Пурэвсурэн Баатарын. – М., 2009. – 148 с.

83. Далека В. Х. Електропостачання електричного транспорту: навч. посіб. / В. Х. Далека, В. К. Нем, В. І. Скуріхін. – Харківська національна академія міського господарства. – Х.: ХНАМГ, 2012. – 168 с.

84. Колісні транспортні засоби. Тролейбуси пасажирські. Загальні технічні вимоги.: ДСТУ 4905:2008. – [Чинний від 2008-07-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 2008. – 20 с. – (Національний стандарт України).

85. Филонов А. И., Проблемы рекуперации кинетической энергии на автомобиле с гибридной силовой установкой // МГТУ «МАМИ». – С. 320–328.

86. Современные виды накопителей электрической энергии и их применение в автономной и централизованной энергетике / О. С. Попель, А. Б. Тарасенко // Теплоэнергетика. - 2011. - № 11. - С. 2-12.

87. Иванов С. А. Исследование использования суперконденсаторов в комбинированных энергоустановках транспортных средств: дис. канд. техн. наук: 05.20.01 Технологии и средства механизации сельского хозяйства / С. А. Иванов; — М., 2003. — 142 с.

88. Розробка високопотужного гібридного джерела живлення на основі батарей суперконденсаторів та акумуляторів для екологічних транспортних засобів : звіт про НДР (заключ.) НТУУ "КПІ" ; кер. роб. В. Ізотов. – К., 2012. – 96 л. + CD-ROM. - Д/б №2470-п.

89. Розроблено прототип шин, що можуть заряджати електромобілі [Електронний ресурс] / 05.05.2015. – Режим доступу:

<http://ecotown.com.ua/news/Rozrobleno-prototyp-shyn-shcho-mozhut-zaryadzhaty-elektromobili>. Дата звернення: 06.05.2015.

90. Muhammad H. Rashid / Modern electric, hybrid electric and fuel cell vehicles. Fundamentals, theory and design. Second edition/ Muhammad H. Rashid // University of West Florida, CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business, 2010. – 558 p.

91. Блохин А. Н. Результаты исследования электромобиля на шасси “ГАЗель” / А. Н. Блохин, А. М. Грошев, Т. А. Козлова и др. // Научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана: Наука и образование. – 2012. – № 12. – С. 75-106.

92. Ломакин В. В. К расчёту баланса мощности комбинированной энергоустановки гибридного автомобиля / В. В. Ломакин, к.т.н., А. В. Шабанов, к.т.н., А. А. Шабанов // Журнал автомобильных инженеров. – М.: 2014. – № 1 (84). – С. 24 – 27.

93. Сериков С. А. Теория управления силовой установкой гибридного автомобиля: дисс. на соискание уч. степени доктора технических наук: спец. 05.22.02 “Автомобили и тракторы” / Сериков Сергей Анатольевич. – Харьков, 2013. – 367 с.

94. Двадненко В. Я. Система управления электроприводом гибридного автомобиля / В. Я. Двадненко // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту: науково-виробничий збірник / ДВНЗ «ДонНТУ» АДІ. – Горлівка, 2011. – № 1(12). – С. 84–87.

95. Бажинов А. В. Разработка тягового электропривода гибридного автомобиля / А. В. Бажинов, В. Я. Двадненко, А. В. Колесников // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту: науково-виробничий збірник / АДІ «ДонНТУ». – Горлівка, 2009. – № 1.(8) – С. 118–122.

96. Анализ результатов испытаний экспериментального гибридного автомобиля в городском ездовом цикле / С. А. Сериков, В. Я. Двадненко, Ю. Н. Бороденко, Е. А. Серикова // Автомобильный транспорт : сб. науч. тр. / М-во образования и науки Украины, ХНАДУ ; [редкол.: Туренко А. Н. (гл. ред.) и др.] – Харьков, 2014. – Вып. 34. – С. 16–21.

97. Программно-аппаратный комплекс исследования рабочих процессов гибридной силовой установки / С. А. Сериков, В. Я. Двадненко, А. В. Бажинов, А. Б. Богаевский // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета: сб. науч. тр. / Харьк. нац. автомоб.-дор. ун-т ; [редкол.: Богомоллов В. А. (глав. ред.) и др.]. – Харьков : ХНАДУ, 2014. – Вып. 64. – С. 103–107.

98. Бажинов О. В. Методика определения основных параметров электросиловой установки гибридного автомобиля / О. В. Бажинов, О. С. Панікарський, В.С. Боженев // Автомобільний транспорт. — 2009. — № 25. — С. 145–150.

99. Смирнов О. П., Калмиков В. І. Характерні режими роботи гібридної енергетичної установки автомобіля // Автомобильный транспорт / Сб. научн. тр. Харьков: РИО ХНАДУ. – 2006. – № 18. – С. 13–15.

100. Сахно В. П. Моделювання та керування гібридною силовою установкою автомобіля виконаною за паралельною схемою / В. П. Сахно, О. М. Тімков, О. С. Іванов // Вісник Національного транспортного університету. — К. : НТУ, 2014. — Вип. 30. – С. 349–356.

101. Тімков О. М. Визначення та порівняння витрати палива гібридного автомобіля з паралельною силовою установкою та автомобіля з двигуном внутрішнього згоряння. / О. М. Тімков, А. П. Луцик // Управління проектами, системний аналіз і логістика. – К: НТУ – 2013. – Вип. 12. – С. 180–185.

102. Тімков О. М. Визначення потужності агрегату для рекуперації кінетичної енергії та мінімальної швидкості з якої доцільно починати рекуперації не гальмування для гібридного автомобіля в залежності від їздового циклу. / О. М. Тімков, О. С. Іванов // Управління проектами, системний аналіз і логістика. Технічна серія. – К: НТУ – 2012. – Вип. 9. – С. 197–201.

103. Тімков О. М., Іванов О. С. Використання ПІ-регулятора та теорії кінцевих автоматів для комплексного моделювання системи керування гібридного автомобіля / Олексій Миколайович Тімков, Олександр Сергійович Іванов // Управління проектами, системний аналіз і логістика. – К.: НТУ – 2012

.– Вип. 10. – С. 258–262.

104. Тімков О. М., Іванов О. С. Визначення параметрів гібридного автомобіля з використанням пакетів імітаційного (SIMULINK) і родієвого (STATEFLOW) моделювання в системі MATLAB / Олексій Миколайович Тімков, Олександр Сергійович Іванов // Управління проектами, системний аналіз і логістика. – К.: НТУ – 2012. – Вип. 10. – С. 258 – 262.

105. Іванов О. С. Вибір та обґрунтування раціональних параметрів гібридної силової установки для автомобілів категорії М₁: Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук: Спеціальність: 05.22.02 “Автомобілі і трактора” / О. С. Іванов; Національний транспортний університет. — К., 2015. — 182 с.

106. Green vehicles 2014-2015 [Електронний ресурс] – 2014. – Режим доступу:
<https://ec.europa.eu/research/participants/portal/desktop/en/opportunities/h2020/topics/2608-gv-8-2015.html>.

107. Бахмутов С. В. Совершенствование процесса рекуперации энергии гибридного автомобиля / С. В. Бахмутов, А. И. Филонов, Е. Е. Баулина // Научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана: Наука и образование. – 2013. – № 7. – С. 101–114.

108. Система рекуперативного торможения гибридного автомобиля / А. В. Бажинов, В. Я. Двадненко, А. М. Дробинин, Х. Мауш // Вісник СевНТУ: збірник наукових праць. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. — Севастополь, СевНТУ, 2013. – Вип. 143/2013. – с. 58 – 61.

109. Патент України на корисну модель №52009. Система рекуперативного гальмування гібридного автомобіля. Бажинов А. В., Двадненко В. Я., Колесников А. В. 10.08.2010. Бюл. №15, 2010 р.

110. Sangtarash, F., Esfahanian, V., Nehzati, H., Haddadi, S. et al., "Effect of Different Regenerative Braking Strategies on Braking Performance and Fuel Economy in a Hybrid Electric Bus Employing CRUISE Vehicle Simulation," *SAE Int. J. Fuels Lubr.* 1(1):828-837, 2009, doi:10.4271/2008-01-1561.

111. Zheng, K., Yao, Y., Shen, T., Hikiri, K. et al., "Modeling and Control of Regenerative Braking System in Heavy Duty Hybrid Electrical Vehicles," SAE Technical Paper 2008-01-1569, 2008, doi:10.4271/2008-01-1569.
112. Hartley, J., Day, A., Campean, I., McLellan, R. et al., "Braking System for a Full Electric Vehicle with Regenerative Braking," SAE Technical Paper 2010-01-1680, 2010, doi:10.4271/2010-01-1680.
113. Kovnat, A., "Combining Hybrid Electric Technology with Multi-axle Drivelines," *SAE Int. J. Commer. Veh.* 3(1):9-21, 2010, doi:10.4271/2010-01-1899.
114. von Albrichsfeld, C. and Karner, J., "Brake System for Hybrid and Electric Vehicles," SAE Technical Paper 2009-01-1217, 2009, doi:10.4271/2009-01-1217.
115. Park, M., Kim, S., Yang, L., and Kim, K., "Development of the Control Logic of Electronically Controlled Hydraulic Brake System for Hybrid Vehicle," SAE Technical Paper 2009-01-1215, 2009, doi:10.4271/2009-01-1215.
116. Cross, D., "Optimization of Hybrid Kinetic Energy Recovery Systems (KERS) for Different Racing Circuits," SAE Technical Paper 2008-01-2956, 2008, doi:10.4271/2008-01-2956.
117. Surampudi, B., Redfield, J., and Ostrowski, G., "Mild Regenerative Braking to Enhance Fuel Economy via Lowered Engine Load Due to Alternator," SAE Technical Paper 2008-01-2560, 2008, doi:10.4271/2008-01-2560.
118. Hartavi, A., Uygan, I., Sezer, V., Güvenç, L. et al., "Electric Regenerative Power Assisted Brake Algorithm for a Front and Rear Wheel Drive Parallel Hybrid Electric Commercial Van," SAE Technical Paper 2008-01-2606, 2008, doi:10.4271/2008-01-2606.
119. Kohmäscher, T. and Murrenhoff, H., "Efficient Recuperation of Kinetic Energy - Hybrid Versus Hydrostatic Approach," SAE Technical Paper 2007-01-4153, 2007, doi:10.4271/2007-01-4153.
120. Okada, H., Yanagita, Y., Isomura, T., and Sekiguchi, T., "A Study of Regenerative Braking Control of the Switched Reluctance Motor for Electric Racing Karts," SAE Technical Paper 2007-01-0401, 2007, doi:10.4271/2007-01-0401.

121. J. J. Chen, L. X. Zhou, X. B. Ning, C. L. Zhao, "Design of Hybrid Electric Bus on Regenerative Braking System", *Applied Mechanics and Materials*, Vols 300-301, pp. 333–337, Feb. 2013.
122. Varocky B. J. Benchmarking of Regenerative Braking for a Fully Electric Car / B. J. Varocky. - TNO Automotive, Helmond & Technische Universiteit Eindhoven – p. 54.
123. Сітовський О. П. Аналіз режимів руху легкового автомобіля малого класу в міських умовах для визначення оптимальної ємності акумуляторних батарей в ГСУ / О. П. Сітовський, А. М. Кашуба // *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля*. — Луганськ.: Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, 2013. — Вип. 15 (204) Частина 2. – с. 243–246.
124. Іванов О. С. Рекуперація кінетичної енергії автомобіля та використання функції (системи) “СТАРТ-СТОП” для покращення паливно-економічних та екологічних показників автомобіля / О. С. Іванов // *Вісник СевНТУ: збірник наукових праць. Серія: Машиноприладобудування та транспорт*. — Севастополь, СевНТУ, 2011. – Вип. 122/2011. – с. 30–32.
125. Основы теории автомобиля и трактора: учебное пособие для механических специальностей вузов / В. В. Иванов, В. А. Иларионов, М. М. Морин, В. А. Мاستиков. — М. : «Высшая школа», 1970. — 224 с.
126. Диваков Н. В. Теория автомобиля / Н. В. Диваков, Н. А. Яковлев. — М. : «Высшая школа», 1962. – 302 с.
127. Смирнов Г. А. Теория движения колёсных машин: Учебник для студентов автомобильных специальностей вузов / Г. А. Смирнов. – М.: Машиностроение, 1981 – 271 с.
128. Тарасик В. П. Теория движения автомобиля: Учебник для вузов / В. П. Тарасик. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 478 с.
129. Артамонов М. Д. Основы теории и конструкции автомобиля. Учебник для техникумов / М. Д. Артамонов, В. А. Иларионов, М. М. Морин. – Изд. 2-е, перераб., М.: Машиностроение, 1974. – 288 с.

130. Ефремов И. С. Троллейбусы (теория, конструкция и расчёт) / И. С. Ефремов. – Издание третье, исправленное и дополненное. – М.: Высшая школа, 1989. – 488 с.
131. Генераторы зарубежных автомобилей / Акимов А. В., Акимов С. В., Лейкин Л. П.— М.: Издательство «За рулем», 1998. — 80 с.
132. Безбородова Г. Б. Моделирование движения автомобиля / Г. Б. Безбородова, В.Г. Галушко. - К.: Вища школа, 1978. - 168 с.
133. Брускин Д. Э. Электрические машины. Учеб. для электротехн. спец. вузов. В 2-х ч. / Д. Э. Брускин, А. Е. Зорохович, В. С. Хвостов — 2-е изд. М.: Высшая школа, 1987. – 319 с.
134. Регульований електропривод. Теорія. Моделювання: Навчальний посібник/ І. М. Голодний, Ю. М. Лавріненко, М. В. Синявський та ін. За ред. Голодного І. М. – К.: Аграр Медіа Груп, 2012. – 513 с.
135. Сериков С. А. Управление вектором тока тягового вентильного электродвигателя силовой установки гибридного автомобиля / С. А. Сериков // Автомоб. трансп. : сб. науч. тр. – 2009. – Вып. 25. – С. 127–133.
136. Овсянников Е. М. Управление тяговым асинхронным электроприводом гибридных автомобилей по минимуму потерь и максимуму перегрузочной способности / Е. М. Овсянников, Нгуен Куанг Тхиеу, Нгуен Хак Туан // Сборник научных трудов 65-ой международной научно-технической конференции Ассоциации автомобильных инженеров (ААИ) – М.: МАМИ, 2009. – С. 120–129.
137. Потапенко Е. М. Методы энергооптимального управления асинхронным электроприводом / Е. М. Потапенко, А. А. Шийка // Электротехнические и компьютерные системы. – Одесса: ОНПУ, №15 (91), 2014. – С. 364–366.
138. Сериков С. А. Идентификация математической модели тягового электропривода автомобиля / С. А. Сериков // Електротехніка і електромеханіка. Науково-практичний журнал – Харків: ХПІ, № 3, 2010. – С. 56–60.
139. Воронин С. Г. Электропривод летательных аппаратов: Учебно-

методический комплекс / С. Г. Воронин. – Челябинск: ЮУрГУ, 2006. – 171 с.

140. Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения легковых автомобилей, приводимых в движение только двигателем внутреннего сгорания либо приводимых в движение при помощи гибридного электропривода, в отношении измерения объема выбросов двуокиси углерода и расхода топлива и/или измерения расхода электроэнергии и запаса хода на электротяге, а также транспортных средств категорий М1 и N1, приводимых в движение только при помощи электропривода, в отношении измерения расхода электроэнергии и запаса хода на электротяге: Правила ЕЭК ООН №101. - [Введены в действие 04.04.2005]. – Женева.: Европейская Экономическая комиссия Организации Объединенных наций, 2005. – 128 с.

141. Electrically propelled road vehicles - Measurement of energy performances - Part 1: Pure electric vehicles: EN 1986 – 1:2001. – [Enacted 01.04.2001]. – Brussel.: The European Committee for Standardization, 2001. – 16 p.

142. Electrically propelled road vehicles - Measurement of energy performances - Part 2: Thermal electric hybrid vehicles: EN 1986 – 2:2001. – [Enacted 01.04.2001]. – Brussel.: The European Committee for Standardization, 2001. – 21 p.

143. Автотранспортные средства. Топливная экономичность. Методы испытаний: ГОСТ 20306-90. – [Введён в действие 01.01.1992]. – М.: Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам, 1991. – 34 с.

144. Новик Ф. С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф. С. Новик, Я. Б. Арсов. – М.: Машиностроение; София: Техника, 1980. – 304 с.

145. Нефёдов А. Ф. Планирование эксперимента и моделирование при исследовании эксплуатационных свойств автомобилей / А. Ф. Нефёдов, Л. Н. Высочин. – Львов, Выща школа, изд-во при Львов. ун-те. 1976 г. – 160 с.

146. Метрологія. Застосування "Руководства по выражению неопределенности измерений": ДСТУ-Н РМГ 43:2006 (РМГ 43:2001, IDT). -

[Введений в дію 01.07.2007]. — К. : Держспоживстандарт України, 2006. — 28 с. — (Національні стандарти України).

147. Рекомендації з метрологічного забезпечення випробувальних і калібрувальних лабораторій: СТУ — Р УкрАО 913.15:2007. - [Введений в дію 01.02.2007]. — Стандарт УкрАО, 2007. — 101 с.

148. Жарко Ю. Г. Испытания автотранспорта: стандартизация, сертификация, оценивание неопределенности измерений / Ю. Г. Жарко // Системи обробки інформації: зб. наук. пр. — Х.: ХУПС, 2008. — Вип. 4 (71). — С. 108-111.

149. Жарко Ю. Г. Оценивание неопределённости измерений тормозного пути при испытаниях транспортных средств / Ю. Г. Жарко, И. П. Захаров, С. Н. Сакало // Системи обробки інформації: зб. наук. пр. — Х.: ХУПС, 2012. — Вип. 1 (99). — С. 70–73.

150. Мержиєвська В. В. Засади оцінювання невизначеності результатів випробувань транспортних засобів та їхніх складових частин [Електронний ресурс] — Режим доступу: <https://sites.google.com/site/yakavoska/articles/zasadi>. Дата доступу: 25.12.2013 р.

151. Никитин В. А. Методы и средства измерений, испытаний и контроля: Учебное пособие – 2-е изд. перераб. и доп. / В. А. Никитин, С. В. Бойко. - Оренбург: ГОУ ОГУ, 2004. – 462 с.

152. Колісні транспортні засоби. Вимоги щодо безпечності технічного стану та методи контролювання.: ДСТУ 3649:2010. – [Чинний від 2011-07-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 2010. – 56 с. – (Національний стандарт України).

153. Работа автомобильной шины / [Кнороз В. И., Кленников Е. В., Петров И. П. и др.]; под ред. В. И. Кророза. – М.: Транспорт, 1976. – 238 с.

154. Процедура оцінювання невизначеності вимірювань витрат енергії згідно з методикою СОУ-Н 74.30 – 03363588.0017/020:2010 — ПРО 13-01-11. - [Введена в дію 01.10.2011]. — Процедура ДП НДКТИ МГ, 2011. — 11 с.

155. Теория и расчет тягового привода электромобилей: Учебное

пособие для вузов по спец. “Городской электрический транспорт” и “Электрическая тяга и автоматизация тяговых устройств” / Под ред. И. С. Ефремова. – Москва: Высшая школа, 1984. – 383 с.

156. Сітовський О. П. Експериментальні дослідження параметрів LiFePO₄ батарей. / О. П. Сітовський, А. М. Кашуба // Автомобильный транспорт : сб. науч. тр. / М-во образования и науки Украины, ХНАДУ ; [редкол.: Туренко А. Н. (гл. ред.) [и др.]. – Харьков, 2013. – Вып. 63. – с. 98–100.

157. Акумуляторні батареї [Електронний ресурс] – 2014. – Режим доступу: <http://sutem.com.ua/923alten.php>. Дата звернення: 25.06.2015 р.

158. Расчет емкости аккумуляторных батарей [Электронный ресурс] – 2013. – Режим доступа: http://avtonom.com.ua/statii/istochniki_bespereboynogo_pitania_stabilizatori/raschet-emkosti. Дата обращения: 25.06.2015 г.

159. Суперконденсаторы или ионисторы вместо аккумулятора. Новая технология Ё-мобиль. [Электронный ресурс] – 2013. – Режим доступа: http://green-car.com.ua/index.php?option=com_content&view=article&id=62&Itemid=78. Дата обращения: 25.06.2015 г.

160. Саблін О. І. Дослідження ефективності процесу рекуперації електроенергії в умовах метрополітену / О. І. Саблін // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 6(8). – С. 9-13. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/j-pdf/Vejpte_2014_6\(8\)_3.pdf](http://nbuv.gov.ua/j-pdf/Vejpte_2014_6(8)_3.pdf). Дата звернення: 26.06.2015 г.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Документи щодо впровадження та використання результатів досліджень



ДОЧІРНЕ ПІДПРИЄМСТВО "АВТОСКЛАДАЛЬНИЙ ЗАВОД № 1"

вул. Рівненська, 42, м. Луцьк, 43010, код ЄДРПОУ 21752230
тел./факс (0332) 78-41-25, 78-41-07

E-mail: prdirect@luaz.com, dp1@luaz.com, Web-сторінка http: www.luaz.com

07.07.2015 № 73/07-07

На № _____ від _____



ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор технічний – головний конструктор
ДП "АСЗ №1" АТ "АК" Богдан Моторс"

Б.С. Гвоздик

2015 р.

АКТ

**про використання результатів дисертаційної роботи
«Поліпшення енергетичних показників та гальмівних властивостей гібридних
автомобілів категорії М1 шляхом застосування рекуперативного гальмування»
здобувача наукового ступеня кандидата технічних наук
Дембіцького Валерія Миколайовича**

Комісія у складі начальника відділу сертифікації і випробувань Тітаренка Д.В., начальника випробувальної лабораторії Чумагіна О.А., провідного фахівця Робака Я.М. склала цей акт про наступне.

Результати досліджень, які отримані Дембіцьким В.М. під час виконання дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.02 – автомобілі та трактори, використані ДП «Автоскладальний завод № 1» публічного акціонерного товариства «Автомобільна компанія «Богдан Моторс»» під час виробництва транспортних засобів, а саме:

– в системі управління тяговим електричним приводом гібридного автобуса Богдан А70522 застосовано алгоритм керування системою рекуперації енергії, за рахунок якого збільшується кількість акумуляованої енергії під час рекуперативного гальмування;

– показник ефективності роботи системи рекуперації енергії – коефіцієнт рекуперації, який застосовується з метою наладки тягового електричного привода, під час постановки продукції на виробництво.

Розроблено робочу методику випробувань РМ 5.4-341-58/01 «Робоча методика випробувань. Колісні транспортні засоби. Визначення ефективності системи рекуперативного гальмування».

Акт складений для пред'явлення в спеціалізовану вчену раду, і не є підставою для фінансових розрахунків.

Члени комісії:

Начальник відділу сертифікації і випробувань

Д.В. Тітаренко
Д.В. ТІТАРЕНКО

Начальник випробувальної лабораторії

О.А. Чумагін
О.А. ЧУМАГІН

Провідний фахівець

Я.М. Робака
Я.М. РОБАК

ТзОВ «Волиньстандарт»

Юридична адреса: 43006, м. Луцьк, вул. Гулака-Артемівського, 16/13
 Фактична адреса: 43006, Україна, Волинська обл., м. Луцьк, вул. Сосюри, 2.
 розрахунковий рахунок 26007500071165 у банку ПАТ «Креді Агріколь Банк» у м. Луцьку, МФО 300614,
 ЄДРПОУ 38796493



ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор
ТзОВ «Волиньстандарт»

Ю.В. Котлярчук

_____ 2015 р.

ДОВІДКА

**про використання результатів дисертаційної роботи
 «Поліпшення енергетичних показників та гальмівних властивостей гібридних
 автомобілів категорії М1 шляхом застосування рекуперативного гальмування»
 здобувача наукового ступеня кандидата технічних наук
 Дембіцького Валерія Миколайовича**

Товариство з обмеженою відповідальністю «Волиньстандарт» займається проведенням випробувань колісних транспортних засобів. Під час проведення гальмівних випробувань, згідно вимог ДСТУ ISO/IEC 17025:2006 необхідно проводити оцінювання невизначеності показників.

Під час оцінювання результатів гальмівних випробувань використовуються результати досліджень, які отримані Дембіцьким В.М. під час виконання дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.02 – автомобілі та трактори.

Зокрема, з метою оцінювання невизначеності показників сповільнення, яке виникає під час гальмування транспортних засобів застосовується, методика оцінювання невизначеності ефективності гальмування.

Начальник випробувальної
лабораторії ТзОВ «Волиньстандарт»

Д.С. Гіляровський



ЕЛЕКТРОНТРАНС

ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ СПІЛЬНЕ УКРАЇНСЬКО-НІМЕЦЬКЕ ПІДПРИЄМСТВО «ЕЛЕКТРОНТРАНС»

вул. Шевченка, 311
м. Львів, 79069 Україна

тел.: +38(032) 239-58-17
факс: +38(032) 239-57-18

e-mail: office@eltrans.electron.ua
web: www.eltrans.electron.ua

ЄДРПОУ: 37965405 ІПН: 379654013070
Свід. пл. ПДВ №: 200059676

р/р 26059000000564 у ПАТ "БІС Банк"
м. Львова МФО 325213

ЗАТВЕРДЖУЮ

Генеральний директор
ТОВ СП «Електронтранс»

[Handwritten signature] В.Б. Пецух

» 2015 р.



ДОВІДКА

**про використання результатів дисертаційної роботи
«Поліпшення енергетичних показників та гальмівних властивостей гібридних
автомобілів категорії М1 шляхом застосування рекуперативного
гальмування»
здобувача наукового ступеня кандидата технічних наук
Дембіцького Валерія Миколайовича**

Сучасні екологічні та економічні проблеми призводять до необхідності створення транспортних засобів на альтернативних видах енергії. ТОВ «Спільне українсько-німецьке підприємство «Електронтранс» проводить роботи по розробках, проектуванню та виготовленню транспортних засобів, в т.ч. з електричним приводом.

Під час розробок та проектування транспортних засобів з електричним приводом використовуються результати досліджень, які отримані Дембіцьким В.М. під час виконанні дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.02 – автомобілі та трактори.

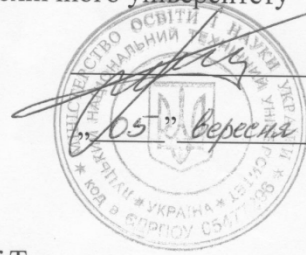
Зокрема, під час проектування транспортних засобів після визначення їх тягово-швидкісних характеристик, застосовується в якості перевіркової, методика розрахунку системи рекуперативного гальмування.

Зазначена методика дає можливість здійснювати підбір агрегатів та вузлів транспортного засобу з оптимальними характеристиками, що, в свою чергу, призводить до покращення ефективності роботи системи рекуперативного гальмування.

Головний конструктор

В.В. Сидь

ЗАТВЕРДЖУЮ
Ректор Луцького національного
технічного університету



П.П. Савчук

2015 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційного дослідження **Дембіцького Валерій Миколайовича** на тему: **«Поліпшення енергетичних показників та гальмівних властивостей гібридних автомобілів категорії М1 шляхом застосування рекуперативного гальмування»** на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.02 – автомобілі та трактори.

Комісія у складі:


Голова – завідувач кафедри АТТ, к.т.н., доцент Мурований І.С.;

Члени комісії – доцент кафедри АТТ, к.т.н., доцент Сітовський О.П.;
доцент кафедри АТТ, к.т.н., доцент Павлюк В.І.

цим Актом засвідчує, що результати дисертаційного дослідження **Дембіцького Валерій Миколайовича** на тему: **«Поліпшення енергетичних показників та гальмівних властивостей гібридних автомобілів категорії М1 шляхом застосування рекуперативного гальмування»** використовуються на кафедрі автомобілів і транспортних технологій Луцького національного технічного університету під час вивчення дисципліни “Автомобілі (теорія)”.

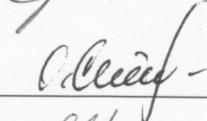
Голова комісії

К.т.н., доцент

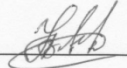
 _____ І.С. Мурований

Члени комісії

К.т.н., доцент

 _____ О.П. Сітовський

К.т.н., доцент

 _____ В.І. Павлюк

„05” 09 2015 р.

ДОДАТОК Б

Результати теоретичних досліджень системи рекуперації гальмування під час службового гальмування

Таблиця Б.1 – Результати теоретичних досліджень системи рекуперації гальмування під час службового гальмування

t, c	$V, m/c$	$n, xv.^{-1}$	I, A	P_t, H	P_w, H	P_f, H	P_c, H	$j, m/c^2$	S, m	$A_t, Дж$	$A_c, Дж$	$A_e, Дж$	$E, Дж$	$E_{лит}, Дж$
0,00	15,00	5670,38	300,00	970,00	67,50	80,93	1118,43	2,03	1,50	1455,00	1677,65	2057,13	1684,03	40416,67
0,10	14,80	5593,51	300,00	970,00	65,68	80,93	1116,61	2,03	1,48	1435,27	1652,22	2025,78	3345,23	39868,75
0,20	14,59	5516,76	300,00	970,00	63,89	80,93	1114,82	2,03	1,46	1415,58	1626,93	1994,61	4983,63	39321,72
0,30	14,39	5440,14	300,00	970,00	62,13	80,93	1113,06	2,02	1,44	1395,92	1601,80	1963,63	6599,28	38775,57
0,40	14,19	5363,64	300,00	970,00	60,39	80,93	1111,33	2,02	1,42	1376,29	1576,81	1932,82	8192,21	38230,28
0,50	13,99	5287,25	300,00	970,00	58,69	80,93	1109,62	2,02	1,40	1356,69	1551,97	1902,19	9762,45	37685,84
0,60	13,78	5210,99	300,00	970,00	57,01	80,93	1107,94	2,01	1,38	1337,12	1527,27	1871,74	11310,04	37142,24
0,70	13,58	5134,84	300,00	970,00	55,35	80,93	1106,28	2,01	1,36	1317,58	1502,70	1841,45	12835,02	36599,46
0,80	13,38	5058,80	300,00	970,00	53,72	80,93	1104,66	2,01	1,34	1298,07	1478,27	1811,33	14337,42	36057,50
0,90	13,18	4982,87	300,00	970,00	52,12	80,93	1103,06	2,01	1,32	1278,59	1453,97	1781,37	15817,26	35516,32
1,00	12,98	4907,06	300,00	970,00	50,55	80,93	1101,48	2,00	1,30	1259,13	1429,81	1751,58	17274,60	34975,94
1,10	12,78	4831,35	300,00	970,00	49,00	80,93	1099,93	2,00	1,28	1239,71	1405,77	1721,94	18709,44	34436,32
1,20	12,58	4755,75	300,00	970,00	47,48	80,93	1098,41	2,00	1,26	1220,31	1381,86	1692,46	20121,84	33897,47
1,30	12,38	4680,25	300,00	970,00	45,99	80,93	1096,92	1,99	1,24	1200,94	1358,07	1663,13	21511,81	33359,35
1,40	12,18	4604,86	300,00	970,00	44,52	80,93	1095,45	1,99	1,22	1181,59	1334,40	1633,94	22879,39	32821,98
1,50	11,98	4529,57	300,00	970,00	43,07	80,93	1094,00	1,99	1,20	1162,27	1310,86	1604,91	24224,61	32285,32
1,60	11,78	4454,38	300,00	970,00	41,65	80,93	1092,59	1,99	1,18	1142,98	1287,42	1576,01	25547,50	31749,37
1,70	11,58	4379,28	300,00	970,00	40,26	80,93	1091,19	1,98	1,16	1123,71	1264,11	1547,26	26848,09	31214,11
1,80	11,39	4304,28	300,00	970,00	38,89	80,93	1089,83	1,98	1,14	1104,46	1240,90	1518,65	28126,41	30679,53
1,90	11,19	4229,37	300,00	970,00	37,55	80,93	1088,48	1,98	1,12	1085,24	1217,80	1490,16	29382,47	30145,63
2,00	10,99	4154,56	300,00	970,00	36,24	80,93	1087,17	1,98	1,10	1066,05	1194,81	1461,81	30616,32	29612,38
2,10	10,79	4079,84	300,00	970,00	34,94	80,93	1085,88	1,97	1,08	1046,87	1171,93	1433,59	31827,98	29079,78
2,20	10,60	4005,20	300,00	970,00	33,68	80,93	1084,61	1,97	1,06	1027,72	1149,15	1405,50	33017,47	28547,81
2,30	10,40	3930,66	300,00	970,00	32,43	80,93	1083,37	1,97	1,04	1008,59	1126,47	1377,53	34184,82	28016,46
2,40	10,20	3856,19	300,00	970,00	31,22	80,93	1082,15	1,97	1,02	989,49	1103,89	1349,68	35330,06	27485,72
2,50	10,00	3781,82	300,00	970,00	30,02	80,93	1080,96	1,97	1,00	970,40	1081,40	1321,95	36453,21	26955,58
2,60	9,81	3707,52	300,00	970,00	28,86	80,93	1079,79	1,96	0,98	951,34	1059,01	1294,34	37554,30	26426,02

Таблица Б.1 - Продовження

t, c	$V, м/с$	$n, хв.^{-1}$	I, A	$P_i, Н$	$P_w, Н$	$P_f, Н$	$P_c, Н$	$j, м/с^2$	$S, м$	$A_r, Дж$	$A_c, Дж$	$A_e, Дж$	$E, Дж$	$E_{лит}, Дж$
2,70	9,61	3633,30	300,00	970,00	27,71	80,93	1078,65	1,96	0,96	932,29	1036,72	1266,84	38633,34	25897,03
2,80	9,42	3559,17	300,00	970,00	26,59	80,93	1077,53	1,96	0,94	913,27	1014,51	1239,45	39690,36	25368,60
2,90	9,22	3485,11	300,00	970,00	25,50	80,93	1076,43	1,96	0,92	894,27	992,39	1212,16	40725,39	24840,72
3,00	9,02	3411,12	292,40	960,13	24,43	80,93	1065,49	1,94	0,90	866,38	961,45	1174,23	41728,14	24065,97
3,10	8,83	3337,89	281,20	943,60	23,39	80,93	1047,92	1,91	0,88	833,18	925,29	1130,01	42692,47	23143,78
3,20	8,64	3265,86	270,18	926,61	22,39	80,93	1029,94	1,87	0,86	800,52	889,79	1086,60	43619,00	22236,79
3,30	8,45	3195,07	259,35	909,17	21,43	80,93	1011,54	1,84	0,85	768,43	854,95	1044,01	44508,39	21345,37
3,40	8,27	3125,55	248,71	891,28	20,51	80,93	992,72	1,80	0,83	736,92	820,79	1002,26	45361,30	20469,87
3,50	8,09	3057,32	238,27	872,92	19,62	80,93	973,48	1,77	0,81	705,98	787,31	961,35	46178,41	19610,66
3,60	7,91	2990,41	228,03	854,11	18,77	80,93	953,82	1,73	0,79	675,65	754,53	921,30	46960,42	18768,11
3,70	7,74	2924,85	218,00	834,84	17,96	80,93	933,73	1,70	0,77	645,93	722,45	882,12	47708,02	17942,57
3,80	7,57	2860,67	214,31	839,10	17,18	80,93	937,21	1,70	0,76	634,98	709,23	865,73	48442,96	17638,36
3,90	7,40	2796,26	204,16	817,79	16,41	80,93	915,14	1,66	0,74	604,92	676,93	826,31	49143,09	16803,33
4,00	7,23	2733,36	194,25	796,01	15,68	80,93	892,63	1,62	0,72	575,57	645,43	787,88	49809,26	15987,97
4,10	7,07	2672,01	191,62	803,26	14,99	80,93	899,18	1,63	0,71	567,77	635,57	775,58	50466,40	15771,44
4,20	6,90	2610,20	186,51	800,36	14,30	80,93	895,59	1,63	0,69	552,63	618,39	754,45	51106,03	15350,96
4,30	6,74	2548,65	176,17	774,24	13,64	80,93	868,81	1,58	0,67	521,99	585,75	714,68	51710,19	14499,82
4,40	6,58	2488,93	166,14	747,67	13,00	80,93	841,61	1,53	0,66	492,27	554,12	676,15	52279,94	13674,13
4,50	6,43	2431,09	156,42	720,69	12,41	80,93	814,03	1,48	0,64	463,47	523,50	638,86	52816,37	12874,29
4,60	6,28	2375,14	147,02	693,34	11,84	80,93	786,11	1,43	0,63	435,62	493,91	602,84	53320,56	12100,67
4,70	6,14	2321,11	137,95	665,67	11,31	80,93	757,92	1,38	0,61	408,73	465,37	568,08	53793,63	11353,57
4,80	6,00	2269,01	129,19	637,75	10,81	80,93	729,50	1,33	0,60	382,80	437,86	534,60	54236,68	10633,27
4,90	5,87	2218,87	127,24	642,30	10,34	80,93	733,57	1,33	0,59	377,01	430,58	525,54	54673,04	10472,49
5,00	5,74	2168,45	120,32	621,50	9,87	80,93	712,30	1,30	0,57	356,51	408,60	498,75	55085,66	9903,02
5,10	5,61	2119,50	111,51	589,29	9,43	80,93	679,65	1,24	0,56	330,40	381,06	465,26	55468,07	9177,72
5,20	5,48	2072,78	103,10	557,13	9,02	80,93	647,08	1,18	0,55	305,48	354,81	433,33	55821,64	8485,67
5,30	5,37	2028,31	95,10	525,14	8,64	80,93	614,71	1,12	0,54	281,76	329,82	402,95	56147,75	7826,78

Таблиця Б.1 - Закінчення

t, c	$V, м/с$	$n, хв.^{-1}$	I, A	$P_t, Н$	$P_w, Н$	$P_f, Н$	$P_c, Н$	$j, м/с^2$	$S, м$	$A_t, Дж$	$A_c, Дж$	$A_e, Дж$	$E, Дж$	$E_{лит}, Дж$
5,40	5,25	1986,06	87,49	493,42	8,28	80,93	582,63	1,06	0,53	259,23	306,10	374,09	56447,79	7200,85
5,50	5,15	1946,01	80,28	462,08	7,95	80,93	550,97	1,00	0,51	237,87	283,63	346,75	56723,10	6607,59
5,60	5,05	1908,14	73,47	431,24	7,64	80,93	519,82	0,95	0,50	217,68	262,39	320,90	56975,04	6046,57
5,70	4,95	1872,42	67,03	401,00	7,36	80,93	489,29	0,89	0,50	198,62	242,35	296,52	57204,93	5517,26
5,80	4,86	1838,78	60,98	371,46	7,10	80,93	459,49	0,84	0,49	180,69	223,51	273,56	57414,06	5019,04
5,90	4,78	1807,20	55,30	342,72	6,86	80,93	430,51	0,78	0,48	163,84	205,81	252,01	57603,69	4551,16
6,00	4,70	1777,61	49,97	314,86	6,63	80,93	402,43	0,73	0,47	148,06	189,24	231,81	57775,05	4112,79
6,10	4,63	1749,95	44,99	287,97	6,43	80,93	375,34	0,68	0,46	133,31	173,75	212,93	57929,35	3703,02
6,20	4,56	1724,16	40,35	262,12	6,24	80,93	349,29	0,64	0,46	119,55	159,31	195,31	58067,72	3320,83
6,30	4,50	1700,15	36,03	237,35	6,07	80,93	324,35	0,59	0,45	106,75	145,87	178,91	58191,26	2965,17
6,40	4,44	1677,86	32,01	213,71	5,91	80,93	300,56	0,55	0,44	94,86	133,40	163,68	58301,05	2634,90
6,50	4,38	1657,20	28,30	191,25	5,77	80,93	277,94	0,51	0,44	83,84	121,85	149,56	58398,09	2328,86
6,60	4,33	1638,09	24,86	169,96	5,63	80,93	256,53	0,47	0,43	73,65	111,16	136,50	58483,33	2045,84
6,70	4,29	1620,46	21,68	149,88	5,51	80,93	236,32	0,43	0,43	64,25	101,30	124,44	58557,69	1784,63
6,80	4,24	1604,22	18,76	130,98	5,40	80,93	217,32	0,40	0,42	55,58	92,22	113,32	58622,02	1544,00
6,90	4,20	1589,28	16,07	113,26	5,30	80,93	199,50	0,36	0,42	47,62	83,87	103,10	58677,14	1322,72
7,00	4,17	1575,57	13,60	96,70	5,21	80,93	182,85	0,33	0,42	40,30	76,21	93,71	58723,79	1119,58
7,10	4,13	1563,00	11,34	81,27	5,13	80,93	167,33	0,30	0,41	33,60	69,19	85,10	58762,68	933,39
7,20	4,10	1551,50	9,27	66,93	5,05	80,93	152,91	0,28	0,41	27,47	62,76	77,22	58794,47	763,01
7,30	4,08	1540,99	7,38	53,63	4,99	80,93	139,55	0,25	0,41	21,86	56,89	70,01	58819,77	607,30
7,40	4,05	1531,40	5,65	41,34	4,92	80,93	127,20	0,23	0,41	16,75	51,53	63,43	58839,16	465,21
7,50	4,03	1522,66	4,08	30,00	4,87	80,93	115,80	0,21	0,40	12,08	46,64	57,44	58853,14	335,69
7,60	4,01	1514,70	2,65	19,57	4,82	80,93	105,32	0,19	0,40	7,84	42,20	51,97	58862,22	217,77
7,70	3,99	1507,46	1,34	9,98	4,77	80,93	95,68	0,17	0,40	3,98	38,16	47,00	58866,82	110,54
7,80	3,97	1500,88	0,16	1,19	4,73	80,93	86,85	0,16	0,40	0,47	34,48	42,49	58867,37	13,11

ДОДАТОК В

Результати теоретичних досліджень системи рекуперації гальмування в міському їздовому циклі, згідно EN 1986 – 2:2001

Таблиця В.1 – Результати теоретичних досліджень системи рекуперації гальмування в міському їздовому циклі

t, c	$j, \text{м/с}^2$	$V, \text{м/с}$	$P_f, \text{Н}$	$P_w, \text{Н}$	$P_j, \text{Н}$	$P_t, \text{Н}$	$P_c, \text{Н}$	$A_f, \text{Дж}$	$A_w, \text{Дж}$	$A_j, \text{Дж}$	$A_t, \text{Дж}$	$A_c, \text{Дж}$	$A_{\Sigma \text{ накоп.}}, \text{Дж}$	$E_m, \text{Дж}$	$E_c, \text{Дж}$
1	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	1,04	1,04	54	1	772	0	827	56	1	803	0	860	860	10318	10318
13	1,04	2,08	54	2	772	0	828	112	5	1606	0	1723	2583	22405	33583
14	1,04	3,12	54	5	772	0	832	168	17	2409	0	2595	5178	36325	72491
15	1,04	4,16	54	10	772	0	836	224	40	3212	0	3477	8655	52159	129828
16	0,00	4,17	54	10	0	0	64	225	41	0	0	265	8921	4247	142730
17	0,00	4,17	54	10	0	0	64	225	41	0	0	265	9186	4512	156163
18	0,00	4,17	54	10	0	0	64	225	41	0	0	265	9451	4778	170127
19	0,00	4,17	54	10	0	0	64	225	41	0	0	265	9717	5043	184622
20	0,00	4,17	54	10	0	0	64	225	41	0	0	265	9982	5309	199647
21	0,00	4,17	54	10	0	0	64	225	41	0	0	265	10248	5574	215204
22	0,00	4,17	54	10	0	0	64	225	41	0	0	265	10513	5840	231291
23	0,00	4,17	54	10	0	0	64	225	41	0	0	265	10779	6105	247910

Таблица В.1 – Продолжения

t, c	$j, m/c^2$	$V, m/c$	P_f, H	P_w, H	P_j, H	P_t, H	P_c, H	$A_f, Дж$	$A_w, Дж$	$A_j, Дж$	$A_t, Дж$	$A_c, Дж$	$A_{\Sigma \text{ накоп.}}, Дж$	$E_m, Дж$	$E_c, Дж$
24	-0,83	3,34	54	6,25	- 616	0	- 556	180	21	- 2056	0	- 1855	8923	- 44530	214159
25	-0,83	2,51	54	3,53	- 616	0	- 559	135	9	- 1545	0	- 1401	7523	- 35018	188064
26	-0,83	1,68	54	1,58	- 616	0	- 561	90	3	- 1033	0	- 940	6582	- 24445	171142
27	-0,83	0,85	54	0,40	- 616	0	- 562	46	0	- 522	0	- 476	6107	- 12845	164879
28	-0,83	0,02	54	0	- 616	0	- 562	1	0	- 10	0	- 9	6097	- 262	170723
29	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6097	0	176821
30	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6097	0	182918
31	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6097	0	189015
32	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6097	0	195112
33	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6097	0	201210
34	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6097	0	207307
35	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6097	0	213404
36	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6097	0	219502
37	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6097	0	225599
38	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6097	0	231696
39	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6097	0	237793
40	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6097	0	243891
41	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6097	0	249988
42	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6097	0	256085
43	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6097	0	262182
44	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6097	0	268280
45	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6097	0	274377
46	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6097	0	280474
47	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6097	0	286571
48	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6097	0	292669

Таблица В.1 – Продолжения

t, c	$j, \text{м/с}^2$	$V, \text{м/с}$	$P_f, \text{Н}$	$P_w, \text{Н}$	$P_j, \text{Н}$	$P_t, \text{Н}$	$P_c, \text{Н}$	$A_f, \text{Дж}$	$A_w, \text{Дж}$	$A_j, \text{Дж}$	$A_t, \text{Дж}$	$A_c, \text{Дж}$	$A_{\Sigma \text{ накоп.}}, \text{Дж}$	$E_m, \text{Дж}$	$E_c, \text{Дж}$
49	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6097	0	298766
50	0,69	0,69	54	0,27	512	0	567	37	0	354	0	391	6488	19546	324409
51	0,69	1,38	54	1,07	512	0	567	74	1	707	0	783	7271	39930	370827
52	0,69	2,07	54	2,4	512	0	569	112	5	1061	0	1177	8448	61213	439312
53	0,69	2,76	54	4	512	0	571	149	12	1414	0	1575	10023	83461	531221
54	0,69	3,45	54	7	512	0	573	186	23	1768	0	1977	12000	106743	647988
55	0,69	4,14	54	10	512	0	576	223	40	2121	0	2384	14384	131134	791121
56	0,79	4,93	54	14	587	0	654	266	67	2892	0	3225	17609	180606	986111
57	0,79	5,72	54	18	587	0	659	309	105	3355	0	3769	21378	214829	1218550
58	0,79	6,51	54	24	587	0	664	351	155	3819	0	4325	25703	250838	1490766
59	0,79	7,30	54	30	587	0	671	394	218	4282	0	4894	30597	288766	1805235
60	0,79	8,09	54	37	587	0	677	436	297	4745	0	5479	36076	328754	2164586
61	0,79	8,88	54	44	587	0	685	479	393	5209	0	6081	42158	370950	2571613
62	0,00	8,89	54	44	0	0	98	480	394	0	0	874	43032	54190	2667960
63	0,00	8,89	54	44	0	0	98	480	394	0	0	874	43906	55064	2766056
64	0,00	8,89	54	44	0	0	98	480	394	0	0	874	44780	55938	2865899
65	0,00	8,89	54	44	0	0	98	480	394	0	0	874	45654	56812	2967491
66	0,00	8,89	54	44	0	0	98	480	394	0	0	874	46528	57686	3070831
67	0,00	8,89	54	44	0	0	98	480	394	0	0	874	47402	58560	3175918
68	0,00	8,89	54	44	0	0	98	480	394	0	0	874	48276	59434	3282754
69	0,00	8,89	54	44	0	0	98	480	394	0	0	874	49150	60308	3391338
70	0,00	8,89	54	44	0	0	98	480	394	0	0	874	50024	61182	3501670
71	0,00	8,89	54	44	0	0	98	480	394	0	0	874	50898	62056	3613750
72	0,00	8,89	54	44	0	0	98	480	394	0	0	874	51772	62930	3727578
73	0,00	8,89	54	44	0	0	98	480	394	0	0	874	52646	63804	3843154

Таблица В.1 – Продолження

t, c	$j, m/c^2$	$V, m/c$	P_f, H	P_w, H	P_j, H	P_t, H	P_c, H	$A_f, Дж$	$A_w, Дж$	$A_j, Дж$	$A_t, Дж$	$A_c, Дж$	$A_{\Sigma \text{ накоп.}}, Дж$	$E_m, Дж$	$E_c, Дж$
74	0,00	8,89	54	44	0	0	98	480	394	0	0	874	53520	64678	3960478
75	0,00	8,89	54	44	0	0	98	480	394	0	0	874	54394	65552	4079550
76	0,00	8,89	54	44	0	0	98	480	394	0	0	874	55268	66426	4200371
77	0,00	8,89	54	44	0	0	98	480	394	0	0	874	56142	67300	4322939
78	0,00	8,89	54	44	0	0	98	480	394	0	0	874	57016	68174	4447255
79	0,00	8,89	54	44	0	0	98	480	394	0	0	874	57890	69048	4573320
80	0,00	8,89	54	44	0	0	98	480	394	0	0	874	58764	69922	4701132
81	0,00	8,89	54	44	0	0	98	480	394	0	0	874	59638	70796	4830693
82	0,00	8,89	54	44	0	0	98	480	394	0	0	874	60512	71670	4962001
83	0,00	8,89	54	44	0	0	98	480	394	0	0	874	61386	72544	5095058
84	0,00	8,89	54	44	0	0	98	480	394	0	0	874	62260	73418	5229863
85	0,00	8,89	54	44	0	0	98	480	394	0	0	874	63134	74293	5366416
86	- 0,81	8,08	54	37	- 601	- 339	- 849	436	296	- 4859	- 2736	- 4127	59007	- 354906	5074643
87	- 0,81	7,27	54	30	- 601	- 178	- 696	392	216	- 4372	- 1298	- 3764	55244	- 327451	4806200
88	- 0,81	6,46	54	23	- 601	0	- 524	348	151	- 3885	0	- 3385	51859	- 297856	4563587
89	- 0,81	5,65	54	18	- 601	0	- 530	305	101	- 3397	0	- 2991	48868	- 266232	4349215
90	- 0,81	4,84	54	13	- 601	0	- 534	261	64	-2910	0	- 2586	46282	- 232696	4165386
91	- 0,81	4,03	54	9	- 601	0	- 538	217	37	-2423	0	- 2169	44113	- 197376	4014292
92	- 0,81	3,22	54	6	- 601	0	- 542	174	19	-1936	0	- 1744	42370	- 160403	3898002
93	- 0,81	2,41	54	3	- 601	0	- 544	130	8	-1449	0	- 1311	41059	- 121918	3818453
94	- 0,81	1,60	54	1,5	- 601	0	- 546	86	2	-962	0	- 873	40186	- 82067	3777445
95	- 0,81	0,79	54	0,5	- 601	0	- 547	43	0	-474	0	- 432	39754	- 41004	3776627
96	- 0,81	-0,02	54	0	- 601	0	- 548	-1	0	13	0	12	39766	1110	3817491
97	0	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	39766	0	3857256

Таблица В.1 – Продолжения

t, c	$j, \text{м/с}^2$	$V, \text{м/с}$	$P_f, \text{Н}$	$P_w, \text{Н}$	$P_j, \text{Н}$	$P_t, \text{Н}$	$P_c, \text{Н}$	$A_f, \text{Дж}$	$A_w, \text{Дж}$	$A_j, \text{Дж}$	$A_t, \text{Дж}$	$A_c, \text{Дж}$	$A_{\Sigma \text{накоп}}, \text{Дж}$	$E_m, \text{Дж}$	$E_c, \text{Дж}$
98	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	39766	0	3897022
99	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	39766	0	3936787
100	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	39766	0	3976553
101	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	39766	0	4016319
102	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	39766	0	4056084
103	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	39766	0	4095850
104	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	39766	0	4135615
105	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	39766	0	4175381
106	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	39766	0	4215146
107	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	39766	0	4254912
108	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	39766	0	4294677
109	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	39766	0	4334443
110	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	39766	0	4374208
111	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	39766	0	4413974
112	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	39766	0	4453739
113	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	39766	0	4493505
114	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	39766	0	4533270
115	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	39766	0	4573036
116	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	39766	0	4612801
117	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	39766	0	4652567
118	0,69	0,69	54	0,27	512	0	567	37	0	354	0	391	40156	46128	4738461
119	0,69	1,38	54	1,07	512	0	567	74	1	707	0	783	40939	93170	4871787
120	0,69	2,07	54	2	512	0	569	112	5	1061	0	1177	42117	141262	5053988
121	0,69	2,76	54	4	512	0	571	149	12	1414	0	1575	43691	190544	5286649
122	0,69	3,45	54	7	512	0	573	186	23	1768	0	1977	45668	241161	5571501

Таблица В.1 – Продолжения

t, c	$j, \text{м/с}^2$	$V, \text{м/с}$	$P_f, \text{Н}$	$P_w, \text{Н}$	$P_j, \text{Н}$	$P_t, \text{Н}$	$P_c, \text{Н}$	$A_f, \text{Дж}$	$A_w, \text{Дж}$	$A_j, \text{Дж}$	$A_t, \text{Дж}$	$A_c, \text{Дж}$	$A_{\Sigma \text{накоп}}, \text{Дж}$	$E_m, \text{Дж}$	$E_c, \text{Дж}$
123	0,69	4,14	54	10	512	0	576	223	40	2121	0	2384	48052	293263	5910431
124	0,51	4,65	54	12	379	0	445	251	56	1761	0	2068	50120	256456	6214940
125	0,51	5,16	54	15	379	0	448	278	77	1954	0	2310	52430	288691	6553751
126	0,51	5,67	54	18	379	0	451	306	102	2147	0	2555	54985	321978	6928160
127	0,51	6,18	54	21	379	0	454	333	133	2340	0	2806	57792	356388	7339533
128	0,51	6,69	54	25	379	0	458	361	168	2533	0	3062	60854	391993	7789318
129	0,51	7,20	54	29	379	0	462	388	210	2726	0	3325	64179	428867	8279040
130	0,51	7,71	54	33	379	0	466	416	257	2920	0	3593	67772	467086	8810304
131	0,51	8,22	54	38	379	0	471	444	312	3113	0	3868	71640	506726	9384801
132	0,51	8,73	54	43	379	0	475	471	374	3306	0	4151	75790	547868	10004309
133	0,51	9,24	54	48	379	0	481	499	443	3499	0	4441	80231	590592	10670691
134	0,51	9,75	54	53	379	0	486	526	521	3692	0	4739	84969	634981	11385903
135	0,46	10,21	54	59	342	0	454	551	598	3487	0	4636	89605	625838	12096710
136	0,46	10,67	54	64	342	0	459	576	682	3644	0	4902	94508	666706	12853022
137	0,46	11,13	54	70	342	0	465	601	774	3801	0	5176	99684	709150	13656679
138	0,46	11,59	54	75	342	0	471	625	874	3959	0	5458	105142	753237	14509600
139	0,46	12,05	54	82	342	0	477	650	983	4116	0	5748	110890	799036	15413778
140	0,46	12,51	54	88	342	0	484	675	1100	4273	0	6047	116938	846619	16371287
141	0,46	12,97	54	94	342	0	490	700	1225	4430	0	6355	123293	896057	17384282
142	0,46	13,43	54	101	342	0	497	725	1360	4587	0	6672	129965	947423	18454998
143	0,46	13,89	54	108	342	0	504	749	1505	4744	0	6999	136963	1000793	19585756
144	0,00	13,89	54	108	0	0	162	749	1505	0	0	2254	139217	324577	20047296
145	0,00	13,89	54	108	0	0	162	749	1505	0	0	2254	141471	326831	20513344
146	0,00	13,89	54	108	0	0	162	749	1505	0	0	2254	143725	329085	20983900
147	0,00	13,89	54	108	0	0	162	749	1505	0	0	2254	145979	331339	21458964

Таблица В.1 – Продолжения

t, c	$j, m/c^2$	$V, m/c$	P_f, H	P_w, H	P_j, H	P_t, H	P_c, H	$A_f, Дж$	$A_w, Дж$	$A_j, Дж$	$A_t, Дж$	$A_c, Дж$	$A_{\Sigma \text{ накоп}}, Дж$	$E_m, Дж$	$E_c, Дж$
148	0,00	13,89	54	108	0	0	162	749	1505	0	0	2254	148233	333593	21938536
149	0,00	13,89	54	108	0	0	162	749	1505	0	0	2254	150487	335847	22422616
150	0,00	13,89	54	108	0	0	162	749	1505	0	0	2254	152741	338101	22911204
151	0,00	13,89	54	108	0	0	162	749	1505	0	0	2254	154995	340355	23404301
152	0,00	13,89	54	108	0	0	162	749	1505	0	0	2254	157249	342609	23901905
153	0,00	13,89	54	108	0	0	162	749	1505	0	0	2254	159503	344863	24404017
154	0,00	13,89	54	108	0	0	162	749	1505	0	0	2254	161757	347117	24910637
155	0,00	13,89	54	108	0	0	162	749	1505	0	0	2254	164011	349371	25421765
156	- 0,52	13,37	54	100	- 386	- 967	- 1199	721	1342	- 5162	- 12934	- 3099	160913	- 483371	25102405
157	- 0,52	12,85	54	93	- 386	- 924	- 1163	693	1191	- 4961	- 11870	- 3076	157836	- 482993	24780325
158	- 0,52	12,33	54	85	- 386	- 877	- 1124	665	1052	- 4760	- 10817	- 3043	154794	- 480721	24457441
159	- 0,52	11,81	54	78	- 386	- 828	- 1082	637	925	- 4559	- 9784	- 2997	151796	- 476595	24135641
160	- 0,52	11,29	54	72	- 386	- 776	- 1037	609	808	- 4359	- 8760	- 2942	148855	- 470657	23816781
161	- 0,52	10,77	54	65	- 386	- 720	- 987	581	701	- 4158	- 7750	- 2875	145979	- 462951	23502684
162	- 0,52	10,25	54	59	- 386	- 659	- 932	553	605	- 3957	- 6753	- 2800	143180	- 453524	23195139
163	- 0,52	9,73	54	53	- 386	- 593	- 872	525	517	- 3756	- 5768	- 2714	140466	- 442423	22895896
164	0,00	9,72	54	53	0	0	107	525	516	0	0	1041	141506	170667	23207028
165	0,00	9,72	54	53	0	0	107	525	516	0	0	1041	142547	171707	23520242
166	0,00	9,72	54	53	0	0	107	525	516	0	0	1041	143588	172748	23835537
167	0,00	9,72	54	53	0	0	107	525	516	0	0	1041	144628	173789	24152913
168	0,00	9,72	54	53	0	0	107	525	516	0	0	1041	145669	174829	24472371
169	0,00	9,72	54	53	0	0	107	525	516	0	0	1041	146710	175870	24793909
170	0,00	9,72	54	53	0	0	107	525	516	0	0	1041	147750	176911	25117529
171	0,00	9,72	54	53	0	0	107	525	516	0	0	1041	148791	177951	25443231
172	0,00	9,72	54	53	0	0	107	525	516	0	0	1041	149831	178992	25771014

Таблиця В.1 – Закінчення

t, c	$j, m/c^2$	$V, m/c$	P_f, H	P_w, H	P_j, H	P_t, H	P_c, H	$A_f, Дж$	$A_w, Дж$	$A_j, Дж$	$A_t, Дж$	$A_c, Дж$	$A_{\Sigma \text{ накоп.}}, Дж$	$E_m, Дж$	$E_c, Дж$
173	0,00	9,72	54	53	0	0	107	525	516	0	0	1041	150872	180033	26100878
174	0,00	9,72	54	53	0	0	107	525	516	0	0	1041	151913	181073	26432823
175	0,00	9,72	54	53	0	0	107	525	516	0	0	1041	152953	182114	26766849
176	0,00	9,72	54	53	0	0	107	525	516	0	0	1041	153994	183154	27102957
177	0,00	9,72	54	53	0	0	107	525	516	0	0	1041	155035	184195	27441147
178	0,00	9,72	54	53	0	0	107	525	516	0	0	1041	156075	185236	27781417
179	- 0,97	8,75	54	43	- 720	- 452	- 1075	472	377	- 6304	- 3958	- 5455	150621	- 976414	26961078
180	- 0,97	7,78	54	34	- 720	- 283	- 916	420	265	- 5605	- 2205	- 4920	145700	- 885667	26226032
181	- 0,97	6,81	54	26	- 720	- 73	- 713	368	178	- 4906	- 494	- 4361	141339	- 789385	25582348
182	- 0,97	5,84	54	19	- 720	0	- 647	315	112	- 4208	0	- 3781	137558	- 688053	25035633
183	- 0,97	4,87	54	13	- 720	0	- 653	263	65	- 3509	0	- 3181	134377	- 582171	24591021
184	- 0,97	3,90	54	9	- 720	0	- 658	211	33	- 2810	0	- 2567	131811	- 472248	24253151
185	- 0,97	2,93	54	5	- 720	0	- 661	158	14	- 2112	0	- 1939	129871	- 358806	24026155
186	- 0,97	1,96	54	2	- 720	0	- 664	106	4	- 1413	0	- 1303	128568	- 242382	23913645
187	- 0,97	0,99	54	0,6	- 720	0	- 666	54	1	- 715	0	- 661	127907	- 123521	23918692
188	- 0,97	0,02	54	0	- 720	0	- 666	1	0	- 16	0	- 15	127893	- 2784	24043816
189	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	127893	0	24171708
190	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	127893	0	24299601
191	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	127893	0	24427493
192	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	127893	0	24555386
193	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	127893	0	24683279
194	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	127893	0	24811171
195	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	127893	0	24939064