

Студентська наукова робота
зі спеціальності «Автомобільний транспорт » , напрям наукових досліджень:
«Автомобілі та трактори»

Дослідження системи рекуперації кінетичної енергії при динамічному
гальмуванні в автотранспортних засобах з електроприводом

Шифр: “Рекуперація”

2021

Зміст

План роботи.....	3
Вступ.....	4
1 Огляд електромобілів та систем рекуперації кінетичної енергії.....	5
1.1 Вихідні положення	5
1.2 Стратегія розвитку електромобілів і систем рекуперації енергії.....	8
1.3 Механічні параметри тягового приводу та систем рекуперації енергії.....	11
1.4 Енергетичні параметри тягового приводу та систем рекуперації енергії.....	11
1.5 Аналіз існуючих методик розрахунку, вибору конструктивних параметрів тягового приводу електромобіля та систем рекуперації енергії.....	11
2 Аналіз та дослідження гальмівної системи з рекуперацією кінетичної енергії в автотранспортних засобах з електроприводом... ..	13
3 Розроблення математичної моделі процесу електродинамічного гальмування автомобіля, обладнаного електроприводом та системою рекуперації енергії.....	21
Висновки.....	30
Список літератури.....	31

План роботи

Вступ

1 Огляд електромобілів та систем рекуперації кінетичної енергії

1.1 Вихідні положення

1.2 Стратегія розвитку електромобілів і систем рекуперації енергії

1.3 Механічні параметри тягового приводу та систем рекуперації енергії

1.4 Енергетичні параметри тягового приводу та систем рекуперації енергії

1.5 Аналіз існуючих методик розрахунку, вибору конструктивних параметрів тягового привода електромобіля та систем рекуперації енергії

2 Аналіз та дослідження гальмівної системи з рекуперацією кінетичної енергії в автотранспортних засобах з електроприводом

3 Розроблення математичної моделі процесу електродинамічного гальмування автомобіля, обладнаного електроприводом та системою рекуперації енергії

Висновки

Вступ

В даний час в автомобілебудуванні відбуваються значні зміни, які направлені на паливну економічність автомобілів випуск нових автомобілів на альтернативних видах палива та створення конструкцій транспортних засобів, обладнаних електричним приводом, тобто – електромобілів. Сьогодення вимагає розроблення екологічно чистих та ефективних автомобілів. Використання прогресивних енергозберігаючих і екологічно чистих технологій при створенні силових установок автотransпортних засобів вирішують, в деякій мірі, цю проблему. Провідні світові автомобілебудівники працюють у напрямку по створенню альтернативних видів палива, використанню енергоємних накопичувачів енергії, розробленню автомобілів з електричним приводом.

Автомобільний транспорт є одним із самих великих забруднювачів навколишнього середовища. Він забруднює повітря, ґрунт, поверхневі води, створює шум і вібрації, впливає на здоров'я населення. Частка транспорту в забрудненні атмосфери в країні складає біля 45%, а в великих містах до 90%.

Так як збільшується з кожним роком кількість автомобілів, відповідно пробок, то ситуація погіршується. До сказаного, необхідно додати і зменшення запасів нафти та підвищення цін на паливо. Все це заставляє вчених, конструкторів шукати нетрадиційних способів вирішення проблеми. Єдиний раціональний спосіб – створення екологічно чистого міського транспорту.

В даний час в Європі електромобіль широко використовується в житті населення і складає достойну конкуренцію традиційному автомобілю, то вітчизняне автомобілебудування суттєво відстає в розробленні цього напрямку. Тому роботи по розробленню і дослідженню електромобільного транспорту з системами електродинамічного гальмування та рекуперації енергії при цьому являються актуальними, так як лежать в руслі стратегічних розробок по підвищенню економічної і екологічної безпеки країни.

Перед розробниками електромобіля, при його проектуванні, постає питання по оцінці його пробігу шляхом вибору конструктивних параметрів тягового приводу, параметрів електродвигуна, трансмісії, джерела живлення та систем рекуперації при електродинамічному гальмуванні. Крім цього розроблені раніше методики використовують спрощені рівняння руху електромобіля при постійній швидкості або в циклах, які не відповідають реальним умовам руху. Тому удосконалення методик розрахунку і вибір конструктивних елементів електромобіля, із урахуванням процесу рекуперації енергії при динамічному гальмуванні і повномасштабної моделі руху транспортного засобу в сучасних міських умовах, є актуальним направленням розвитку методик покращення експлуатаційних характеристик електромобіля при його проектуванні.

Мета роботи полягає в аналізі і дослідженні системи рекуперації кінетичної енергії при динамічному гальмуванні в автотранспортних засобах з електроприводом. Для досягнення поставленої мети удосконалена методика розрахунку і підбору раціональних конструктивних параметрів приводу автотранспортних засобах з електроприводом. Складена математична модель, яка дає можливість дослідити процес електродинамічного гальмування з рекуперацією енергії. З використанням математичного застосунку MathCAD побудовані графіки зміни основних параметрів електромобіля при його електродинамічному гальмуванні з рекуперації енергії при цьому.

Враховуючи вище сказане, а також нашу фахову підготовку була обрана тема наукової роботи, яка направлена на вирішення викладеної вище проблеми, а саме дослідження системи рекуперації кінетичної енергії при динамічному гальмуванні в автотранспортних засобах з електроприводом.

1 Огляд електромобілів та систем рекуперації кінетичної енергії

1.1 Вихідні положення

Споживання великої кількості палива погіршує повітряний басейн країни.

Поблизу автотрас рівень забруднення атмосферного повітря в 1,3 – 1,5 рази вище, ніж в житлових районах, захищених від транспортних потоків забудовою. Повторюваність перевищення середньодобового нормативу для диоксину азоту поблизу автотрас досягає 306 діб, або 84 % часу на протязі року, житлових кварталах на віддалені від джерел забруднення – не більше 180 діб, або 49% часу на протязі року.

Тверді частинки в повітрі, або токсичні складові і озон являють серйозну загрозу для здоров'я населення. По різних оцінках, забруднене повітря загрожує здоров'ю і розвитку дітей і приводить до скорочення середньої тривалості життя приблизно на рік. Мілкодиспертні тверді частинки ТЧ 2,5 (тверді частинки розміром менше 2,5 мкм) і більш крупні ТЧ 10 (розміром менше 10 мкм) серйозно впливають на здоров'я, визиваючи зростання серцево-судинних і респіраторних захворювань і збільшуючи тим самим смертність населення.

Особливо токсичним для здоров'я являється свинець, який викидається в повітря разом з автомобільними вихлопами і в процесі роботи багатьох промислових підприємств. Санітарна норма вміст свинцю в ґрунті 32 мг/кг. Як приклад, по даним екологів, вміст свинцю на поверхні ґрунту біля траси Київ – Одеса наближається до 1000 мг/кг, в місті ж, де рух транспорту дуже інтенсивний, цей показник може бути вище в 5 раз.

Більшість рослин легко переносить підвищення вмісту важких металів в ґрунті, і тільки при вмісту свинцю більш ніж 3000 мг/кг починається пригнічення рослинного світу навколо дороги. Для тварин небезпечно вміст 150 мг/кг в кормах. Вплив свинцю навіть в самих малих дозах негативно діє на центральну нервову систему і розумовий розвиток маленьких дітей [46].

Нанести шкоду здоров'ю людини і знизити якість життя, може також підвищений рівень шуму, так як він мішає сну, відпочинку, роботі. Транспортний шум має більш негативні наслідки, чим виробничий або побутовий, так як сфера його дії значно ширше, фізичні параметри, які характеризують вплив шуму на організм людини, незрівнянно вище [5].

Щоби виключити серйозні негативні наслідки глобального потепління,

керівництвом багатьох країн світу було прийнято ряд міжнародних угод і національних законодавчих актів – як безпосередньо обмежували викид CO₂, так і сприяли більш ефективному використанню енергії і природних ресурсів. Перед світовим товариством стоїть задача 50 – відсоткового скорочення викидів діоксиду вуглецю до 2050 року.

На рисунку 1.1 представлена структура світових викидів CO₂ від транспорту, із якої можна констатувати, що основну частку складають викиди від легкових і вантажних автомобілів масою до 3,5 т (43,3 %) і викиди від вантажного транспорту (22,2 %).



Рисунок 1.1 – Структура світових викидів CO₂ від транспортного сектора економіки

З метою зниження викидів від автотранспорту в Європейському Союзі в квітні 2009 року були прийняті Правила № 443/2009, які обмежують викиди CO₂ від нових легкових автомобілів категорії M1. У відповідності з даними Правилами установлена мета: досягти до 2022 р. середньої величини викидів CO₂ на рівні 95 г/км [22].

Значний потенціал в зниженні викидів діоксиду вуглецю має використання комбінованих електроустановок (КЕУ) і електромобілів з системами рекуперації енергії.

1.2 Стратегія розвитку електромобілів і систем рекуперації енергії

Найбільш перспективні напрями подолання проблеми забруднення навколишнього середовища автотранспортом можна вирішити наступними способами.

Збереження енергії:

- покращення конструкції автомобіля;
- зменшення маси автомобіля;
- зменшення кількості автомобілів;
- організація руху і будівництво доріг з метою зменшення ймовірності створення автомобільних пробок.

Покращення паливної емісії:

- за рахунок конструкції двигуна;
- використання гібридних силових установок.

Перехід на транспортні засоби з електротягою.

Електромобілі давно цікавлять як автомобілебудівників, так і «інженерів-аматорів». В таких країнах як США, Японія, Австрія, Голландія і Ірландія виробництво електромобілів і станцій зарядки вийшло на серійний рівень.

Очікується, що до 2022 року світові продажі електромобілів виростуть до 5,9 млн. штук.

Найбільша доля виробництва електро – і гібридних автомобілів відводиться США дякуючи популярній моделі Chevrolet Volt. Японія знаходиться на другому місці за рахунок автомобіля Toyota Prius. В свою чергу, електромобіль Nissan Leaf робить Японію лідером по виробництву «чистих» електромобілів, слідом ідуть США і Китай за рахунок використання електричних таксі. Франція знаходиться на четвертому місці із-за програми використання електромобілів в Парижі під назвою «Bolloré's Bluecar».

Вивченням автомобілів з електричним приводом і системами рекуперації енергії займаються всесвітньо відомі науково-дослідницькі

інститути і центри, які працюють незалежно або спільно з світовими автовиробниками. Так, ведучим інститутом Японії в області дослідження і розвитку електромобілів є Японський автомобільний науково-дослідницький інститут (JARI); в США це Науково-дослідницький інститут електроенергетики (EPRI), який об'єднався з компанією Chevrolet для вирішення задачі повсюдного використання громадянами електромобілів; в Німеччині – Мюнхенський технічний університет (TUM), який працює спільно з концерном BMW в проекті VisioM, і Німецький федеральний науково-дослідницький інститут дорожнього руху (BAST); в Швейцарії – Інститут Пауля Шеррера; в Австрії – Віденський технологічний університет; в Кореї – Корейський електротехнічний науково-дослідницький інститут (KERI) і ін. Необхідно відмітити Інститут електродинаміки НАН України, який активно займається вивченням автомобілів з електричним тяговим приводом. До найбільш відомих науково-дослідницьких інститутів відносяться наступні: центр китайської компанії Geely; технологічні центри американської компанії Exide, які розташовані в США, Німеччині і Іспанії; центр Belenos Clean Power Holding Ltd і центр компанії Power Cell в Швейцарії; створена для вирішення стратегічних задач в області дослідження електромобілів на базі концерну Volkswagen лабораторія Electronic Research Lab (ERL), яка здійснює свою діяльність спільно з аналогічною лабораторією в Каліфорнії, Китаї і Токіо, і ін. Створення «чистого» виду транспорту автоматично піднімає питання вторинного використання батарей. Вирішенням даного питання займається створений на базі автоконцерну Nissan науково-дослідницький центр Sumitomo Corporation і Каліфорнійський науково-дослідницький центр по стійкому розвитку енергетики (CCSE), який також досліджує шляхи зниження вартості електромобілів. Частиною розвитку електромобільної галузі є установка зарядних станцій в різних місцях: житлові і адміністративні території, вулиці, торгові центри, автостради. По режиму зарядки розрізняють станції «швидкої» і «повільної» зарядки. До 2022 року в країнах EVI групи

планується установити 2,4 млн. «повільних» зарядних станцій і 6000 «швидких». Основний об'єм установки зарядних станцій приходить на Японію, в її офіційній державній цільовій програмі планується розвернути 2 млн. станцій «повільної» зарядки і 5000 «швидкої». В рамках загальнонаціонального демонстраційного проекту США орієнтовані на розвертання 22 000 зарядних станцій, причому до 2019 року установлено – 350 станцій «швидкої» зарядки. До 2019 року в Нідерландах установили 20000 «повільнених» зарядних станцій і 100 «швидких» [1]. В Японії розробкою зарядних станцій займається технічний університет міста Nagaoka, а в США – компанія Delta Electronics.

Необхідно відмітити, що для успішного розвитку електромобільної галузі велике значення має політика держави по підтримці ринків і виробництва. Хороше розроблене на національному і місцевому рівнях фінансове стимулювання споживача, зниження першопочаткових витрат на виробництво електромобіля і збільшення кількості зарядних станцій не тільки сприяють удосконаленню даної галузі в даний час, але дозволяють автовиробникам і споживачам бути впевненими в модернізації ринку в майбутньому. Підтримка виробництва батарей і паливних елементів також сприяє позитивному впливу на ринок. За останні роки затрати на розроблення батарей значно упали, тим самим знизили ціновий бар'єр в розвертанні масового виробництва електромобілів.

Вивченням електромобілів з системами рекуперації енергії і автомобілів з КЕУ займалися такі зарубіжні вчені, як Raghu Das і Peter Harrop [2]; Ronald K. Jurgen [3]; Mike Westbrook [4]; Mehrdad Ehsani, Ali Emadi, Jimin Gao [5]; Iqbal Husain [6]; Granfranco Pistoia [7]; Lindsay Brook [8]; Francois C. Badin [9].

Дослідженню роботи електродвигуна в тяговому приводі присвячені наступні роботи: Ю. В. Петренка [10]; А. П. Тарасяна [11]; В. В. Лохніна і І. А. Вербиренкова [12]; Т. Кеніо і С. Нагаморі [13], А. М. Мусіна [14], М. Б. Лейтмана [15], Ю. Ф. Архипцева [16]; Е. Г. Акімова [17]; І. А. Сиромятнікова [18]; Qinglian Ren [19] і ін.

1.3 Механічні параметри тягового приводу та систем рекуперації енергії

Як відомо із літературних джерел, основним механічним параметром тягового приводу є передавальне число коробки передач (при її установці) і передавальне число головної передачі. Практика показує, що для реалізації необхідної динаміки автомобілів необхідна коробка передач, або редуктор. Проте КЭУ, виконані з використанням послідовної схеми, можуть не мати механічної трансмісії. Використання послідовної схеми доцільно в транспортних засобах, експлуатація яких характеризується змінними режимами руху з безліччю зупинок (міські автобуси) або специфічними умовами роботи, які пов'язані з тривалим використанням електродвигуна в режимі генератора (лісова техніка, військова техніка і інша спецтехніка).

З збільшенням частоти обертання електродвигуна відбувається спад його крутного моменту, що сприятливо позначається на транспортному засобу.

1.4 Енергетичні параметри тягового приводу та систем рекуперації енергії

Енергоживлення і пробіг електромобіля в основному залежить від типу тягової акумуляторної батареї. До вибору і дослідження роботи тягової батареї електромобіля та систем рекуперації енергії підійшли наступні автори: В.Н. Аносов [20]; А.К. Макаров [21]; А. А. Хечінашвілі [22]; Д.В. Вершинін [23] і ін. Серед зарубіжних учених необхідно відмітити D. Ragone [24]; P. Frantzeskakis [25]; Ronald K. Jargen [3].

1.5 Аналіз існуючих методик розрахунку, вибору конструктивних параметрів тягового привода електромобіля та систем рекуперації енергії

Можна зауважити, що конструктивні параметри тягового привода електромобіля діляться на три групи: «енергетичні» (параметри батареї),

«силові» (параметри електродвигуна) і «механічні» (параметри трансмісії). Найбільш прийнятна «енергетична» група вибір параметрів якої докладно викладені в роботі А. В. Іонесяна [26]. Автором досліджені основні енергетичні показники руху електромобіля (пробіг, витрати енергії при русі, витрати енергії на одиницю шляху і вантажопідйомності, питома енергія батареї), на основі яких проводиться вибір типу і маси комплексу батарей. Розглянуті чотири типи тягових акумуляторних батарей (ТАБ): свинцево-кислотних, нікель-кадмієвих, нікель-металогідридних, літій-іонних. Для оптимізації співвідношення між вантажопідйомністю і пробігом при виборі маси комплексу батарей електромобіля використовується поняття транспортної роботи:

$$A = G_e \cdot L, \text{ т} \cdot \text{км} \quad (1.1)$$

де G_e – вантажопідйомність електромобіля (кг);

L – пробіг (км).

Методика вибору ємкості ТАБ представлена в роботі Н. І. Сліпченка [27]. Вибір оптимального значення ємкості, яка визначає масу комплексу батарей, ґрунтується на забезпеченні заданого пробігу. Пробіг електромобіля являється єдиним енергетичним показником. В якості тягово-швидкісного показника виступає швидкість руху автомобіля, при якій досягається максимальний пробіг.

Вибір «силових» параметрів докладно викладено в роботі В. І. Строганова [28]. В методиці представлена математична модель, яка дозволяє в єдиному координатному базисі описати взаємозв'язок між умовами руху електромобіля і роботою тягової системи. Дана методика дозволяє підійти до вибору електродвигуна більш детально. Перша її відмінність від методики вибору електродвигуна з допомогою тягового розрахунку – це дослідження не тільки механічних параметрів, але і електричних. Друга відмінність – принципіальний підхід. В тяговому розрахунку вибір електродвигуна здійснюється на основі аналізу експлуатаційних показників електромобіля при установці різних варіантів

електродвигуна (модель: електродвигун – колесо – дорога). В представленій же методиці зворотний підхід: вибір електродвигуна здійснюється виходячи із вимог (заданих) експлуатаційних показників (модель: дорога – колесо – електродвигун). Але обидві методики ґрунтуються на графіку тягового балансу автомобіля.

На основі огляду і аналізу літератури, а також розгляду різних діючих методик розрахунків конструктивних параметрів тягового привода електромобіля та систем рекуперації енергії можна констатувати:

- однонаправленість розрахунку – вибір конструктивних параметрів здійснюється на основі досліджень або енергетичних параметрів, тобто забезпечення заданого пробігу або мінімальних витрат енергії, або тягово-швидкісних показників;

- в розглянутих методиках не досліджується динаміка привода електромобіля та система рекуперації енергії при використанні його в міських циклах . Тому являється актуальним дослідження динаміки привода електромобіля та систем рекуперації енергії.

Враховуючи те, що в Україні мало приділяється уваги електромобілям, в тому числі системам рекуперації енергії і серійно не випускається жодна модель, то для дослідження користуємося літературними джерелами як вітчизняних так і зарубіжних учених.

2 Аналіз та дослідження гальмівної системи з рекуперацією кінетичної енергії в автотранспортних засобах з електроприводом

Дослідження систем рекуперації кінетичної енергії в автотранспортних засобах з електроприводом нерозривно пов'язані з дослідженням їх альтернативних джерел живлення. Такі дослідження дають можливість значно підвищити ефективність автотранспортних засобів з електроприводом при їх розробленні та, в майбутньому після виготовлення, експлуатації.

Підсумовуючи зроблений нами аналіз сучасного стану автомобілебудівної галузі можна відмітити, що автомобілебудівники велику увагу приділяють паливним елементах на водню, як альтернативному виду палива. Також, як альтернативне джерело енергії, в світовій практиці, використовуються інерційні накопичувачі, так звані маховики. Ефективним альтернативним джерелом енергії також являються іоністори (конденсатори великої потужності). І найбільш поширеним альтернативним джерелом енергії залишаються акумуляторні батареї. Альтернативний вид палива паливні елементи на водні мають питому енергоємність яка в 5...7 разів більша щільності енергії бензину, що є перспективним напрямом, який необхідно розвивати. В таблиці 2.1 приведені основні показники джерел енергії автотранспортних засобів з електроприводом [28].

Автомобілебудівні компанії Honda, Hyundai, Daimler Chrysler, Toyota та ін. при виробництві автомобілів інтенсивно використовують альтернативне джерело енергії – паливні елементи на водню. Але мала кількість заправних станцій сервісних центрів поки що стримує стрімкий ріст цього напрямку.

Так як, запасену енергію в маховику можливо використовувати на 95%, то це є перспективним напрямом використання як альтернативного виду джерела енергії в автотранспортних засобах – маховичних накопичувачів енергії.

Таблиця 2.1 – Характеристика енергоємності накопичувачів енергії для автотранспорту

Джерело енергії	Макс. ККД установки, %	Питома енергоємність, кВт·год/кг
Бензин	25...30	13...14
Водень	50...60	38
Маховики різного типу	80...95	0,05...4,17

Продовження таблиці 2.1

Електричні іоністори	90...98	0.003...0,006
Свинцево-кислотна ТАБ	50...60	0,025...0,04
Нікель-метал- гідридна ТАБ	70...80	0,06...0,08

Відоме застосування маховичних накопичувачів, як альтернативного виду джерела енергії у спортивних та гоночних автомобілях, а також у міських автобусах наступними автобудівними корпораціями Jaguar XF, Porsche GT3 R Hybrid. Значної досконалості сучасним маховичним системам і варіаторам надав творець маховиків проф. Н.В. Гуліа.

У ХНАДУ [33] розроблена маховична система для гібридного транспортного засобу та електромобіля. Ця маховична система покращує показники рекуперативного гальмування та розгону (рис.2.1, 2.2).

Використання маховичної системи рекуперативного гальмування дає можливість значно збільшити ресурс та довговічність ТАБ, в тому числі ККД автотранспортного засобу.

Коли здійснюється гальмуванні або рух за інерцією електричні машини починають працювати як генератори і цим самим перетворюють рекуперативну механічну енергію в електричну, яка подальше використовується для заряду високовольтної акумуляторної батареї.

Одним із перспективних шляхів являється використання іоністорів (суперконденсаторів) для зберігання і подальшого використання збереженої електричної енергії.

При створенні автомобіля ХНАДУ [33] в його силовій установці були задіяні автомобільні свинцево-кислотні акумулятори ємністю 100 А·год кожна. Відповідно , для забезпечення необхідних параметрів напруги живлення та ємності акумуляторні батареї з'єднувалися послідовно-па-

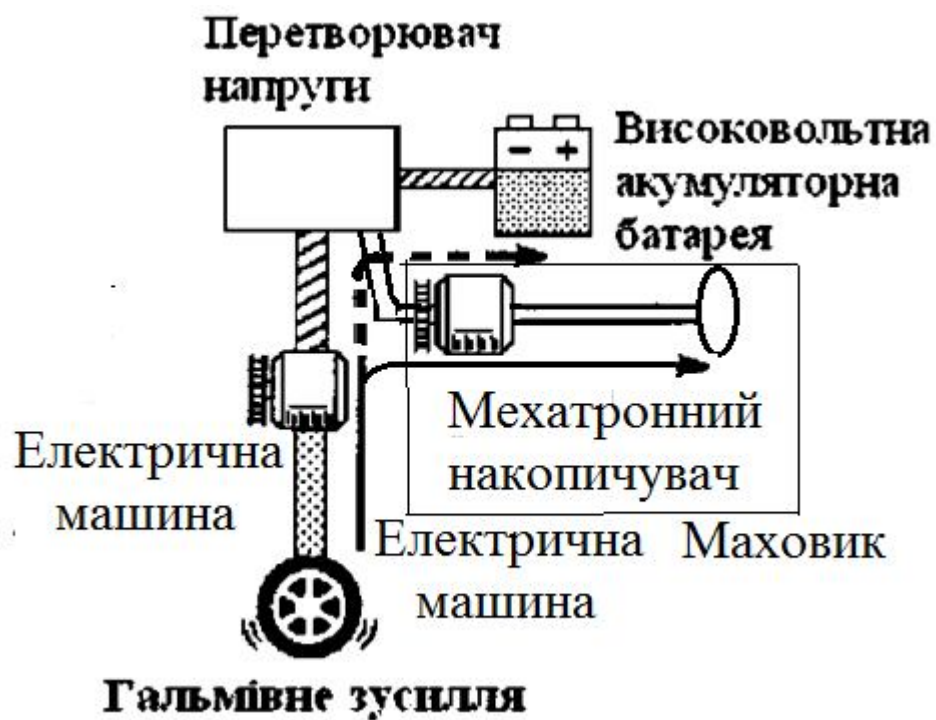


Рисунок 2.1 – Схема роботи мехатронного накопичувача енергії (рекуперативне гальмування)

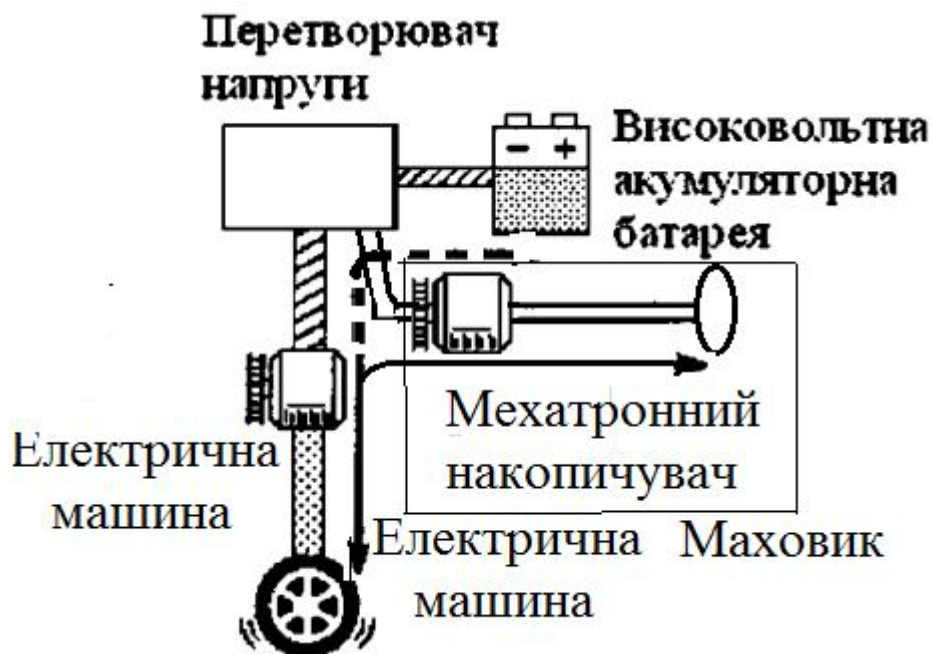


Рисунок 2.2 – Схема роботи мехатронного накопичувача енергії (розгін автомобіля)

паралельно. В свою чергу, для значного покращення технічних характеристик акумуляторних батарей, що використовувалися, паралельно їм приєднувався імпульсний конденсатор С великої ємності ІКЕ 40-28 (іоністор, рис.2.3) [33]. В автомобільній практиці цей конденсатор великої ємності ІКЕ 40-28 часто буває задіяний для полегшення пуску ДВЗ великовантажних автомобілів в тяжких умовах експлуатації особливо при сильних морозах, а також – коли сильно розряджена батарея. В даному випадку конденсатор значно зменшує при пуску початковий струм акумуляторних батарей, що в результаті термін її служби збільшується в декілька разів.. Крім того, конденсатор найбільш прийнятний, тому що він на відміну від АКБ як швидко віддає накопичену енергію, так швидко її і поглинає що дає можливість найбільш продуктивно бути задіяний при використанні рекуперативної енергії, отриманої в результаті гальмування транспортного засобу .

Технічні характеристики конденсатора ІКЕ 40-28 (іоністора) наведені у таблиці 2.2 [33].

В склад перетворювача напруги входить як інвертор так і конвертор. Інвертор, в свою чергу, перетворює напругу АКБ для живлення електродвигуна тягового приводу. Задача конвертора – перетворення напруги яка потім використовується для заряду високовольтної акумуляторної батареї силової установки. Також конвертор подальше знижує цю напругу

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики конденсатора ІКЕ 40-28

Технічні характеристики	Одиниця вимірювання	Величина параметра
Номінальна напруга заряду	В	28
Номінальна ємність	Ф	100
Енергія, що запасається	кДж	40
Номінальна питома енергія	кДж/кг	1,33
Внутрішній опір	Ом	0,005

Час заряду від напруги акумулятора до напруги, що видає генератор	с	10
Кількість циклів заряд/розряд до втрати 30 % ємності	циклів	1000000
Робочий діапазон температур	С ⁰	-50...+60
Вага	кг	30
Діаметр	мм	230
Термін служби	років	10

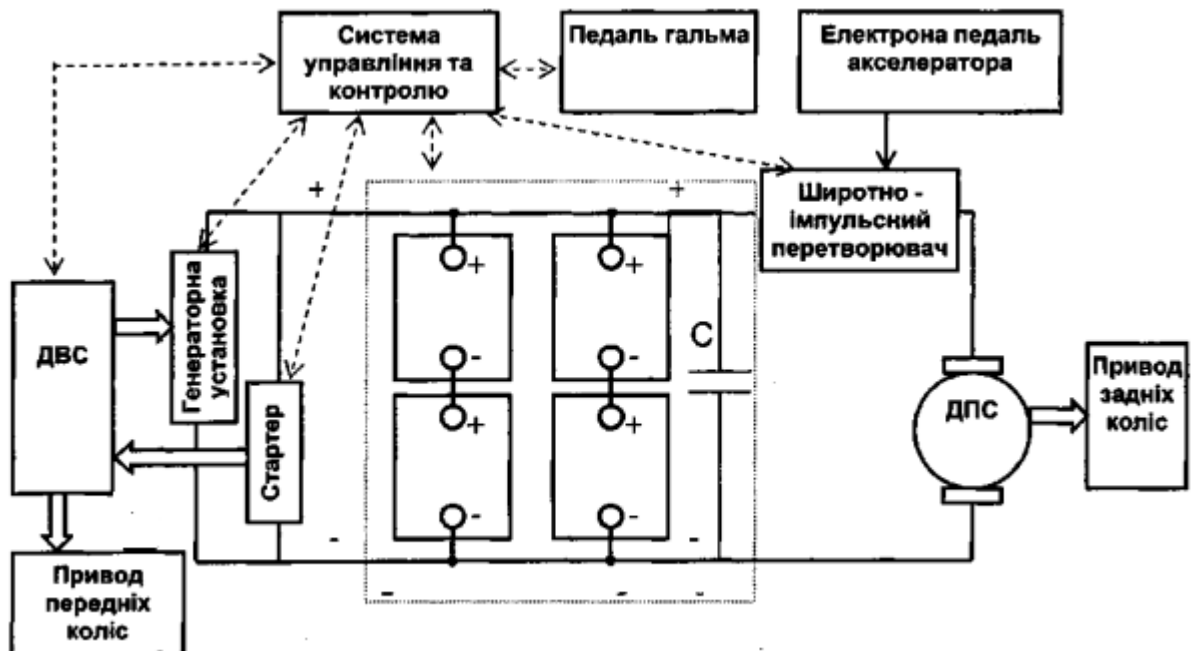


Рисунок 2.3 – Структурна схема з блоком живлення автомобіля ХНАДУ

до 12 В, необхідну для живлення стандартного електрообладнання транспортного засобу та додаткової АКБ.

В силовій установці автомобіля Toyota Prius TI [50] задіяні нікель - металгідридна батарея з 40 банок ємністю 260 ампер-годин напругою 7.2 В (6 елементів по 1.2 В) кожна, замість традиційних свинцево-кислотних АКБ.

Система об'єднаного керування динамічними параметрами автомобіля (VDIM) забезпечує координоване керування всіма гідравлічними та електричними системами й комплексами автомобіля. Якщо окремі системи ABS, TRC, VSC, EPS, VGRS, EBD, HAC звичайної гальмівної системи керувались роздільно, то VDIM реалізує спільне керування всіма перерахованими системами. Крім того, VDIM реалізує спільне керування трансмісією (у тому числі рекуперативним гальмуванням), що дозволяє поліпшити динамічні, економічні та екологічні характеристики автомобіля в різних режимах руху: при крейсерському русі по прямій, при виконанні повороту, при гальмуванні та розгоні автомобіля, при русі на підйом та на спуску та в інших ситуаціях.

В автотранспортних засобах з електроприводом використовуються дві різні системи гальмування: рекуперативна та звичайна гідравлічна.

При повільному руху або легкому натисненні на педаль гальма вступає в дію система рекуперативного гальмування, яка перетворює електродвигун в генератор (обернена електрична машина), та здійснює через перетворювач напруги заряд високовольтної акумуляторної батареї (рис. 2.4) [45].

Рекуперативне гальмування здійснюється за рахунок моменту опору обертання електричного генератора (рис. 2.5) [45]. Чим вище сила струму заряду високовольтної акумуляторної батареї, що виробляється оберненою електричною машиною, тим більше гальмівне зусилля.

Керування рекуперативним гальмуванням досягається за рахунок спільного керування гальмівною системою й трансмісією. При такому керуванні рекуперативна гальмівна система й гідравлічна гальмівна система забезпечують сумарне значення гальмівного зусилля. Одночасно враховуються коливання параметрів рекуперативної системи, викликані ступенем зарядженості акумуляторної батареї або швидкістю руху автомобіля. У результаті, зводиться до мінімуму втрата кінетичної енергії, що, замість розсіювання в простір, перетворюється в електричну енергію. В звичайних автомобілях кожна система керування динамічними параметрами

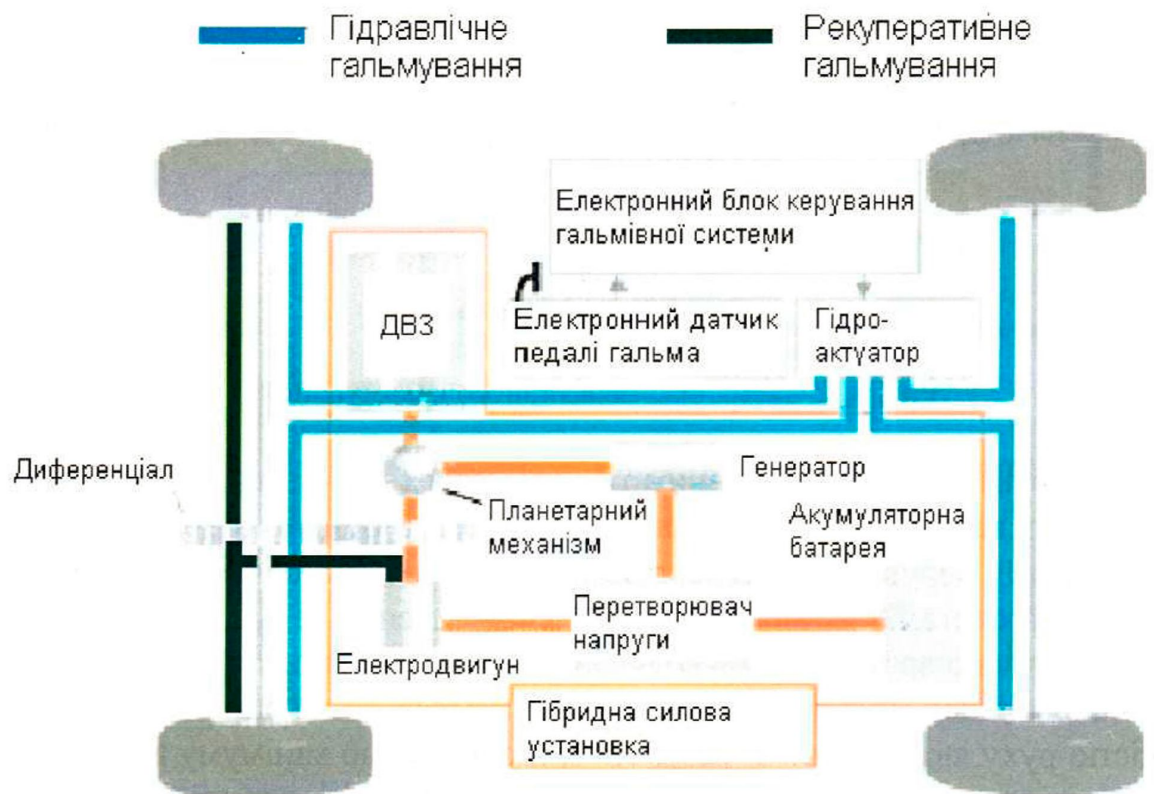


Рисунок 2.4 – Схема гальмівної системи автомобіля Toyota Prius TI

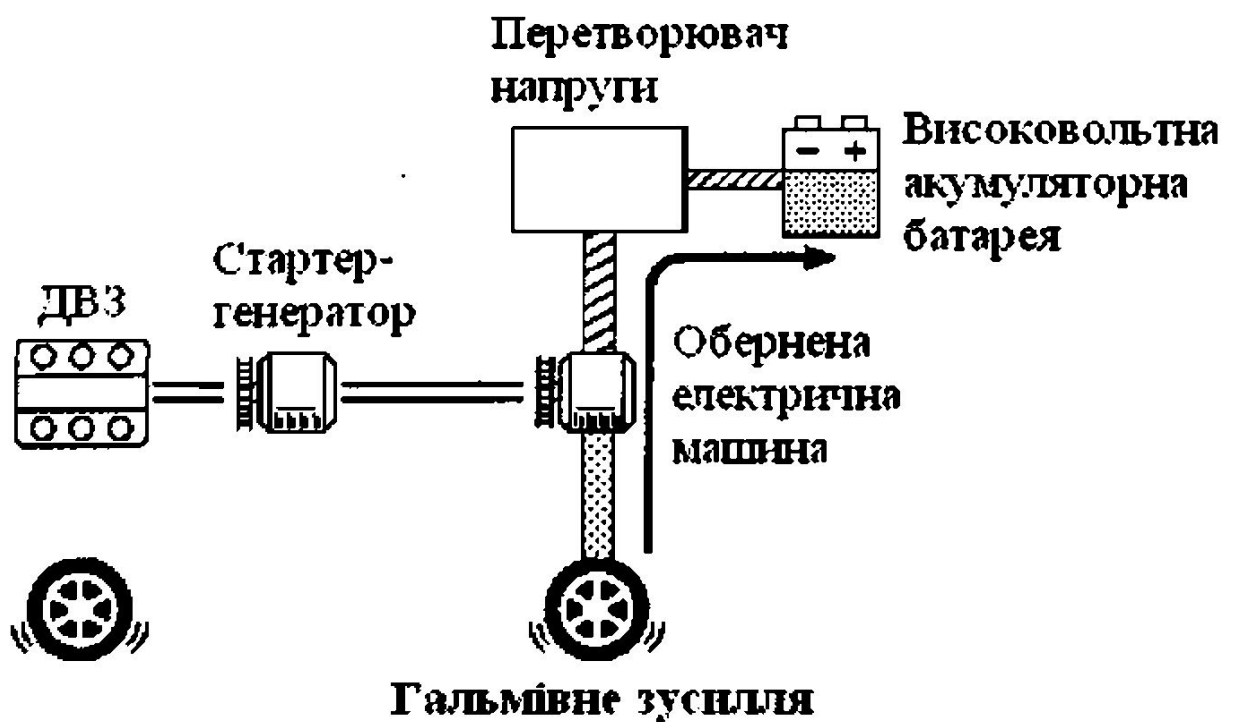


Рисунок 2.5 – Схема рекуперативного гальмування

відповідає за свою окрему область впливу й функціонує незалежно одна від одної. При цьому гідравлічна гальмівна система вступає в дію на грані необхідності для негайного виправлення ситуації. Система об'єднаного керування динамічними параметрами автомобіля реалізує спільну взаємодію всіх систем між собою без функціональних розривів. А гальмівна система вступає в дію до настання критичного моменту, чим забезпечує плавність руху автомобіля, високий рівень керованості й безпеки руху автомобіля.

Контролер кола високої напруги керує роботою перетворювача постійної напруги. Перетворювач постійної напруги, по команді контролера високої напруги, підвищує номінальну напругу високовольтної батареї з 288 В до максимального значення 650.

Інвертор перетворює напругу, що виробляється електричним генератором. Перетворювач постійної напруги, по команді контролера кола високої напруги, знижує максимальну напругу 650 В до номінальної напруги 288 В (для зарядження високовольтної батареї).

3 Розроблення математичної моделі процесу електродинамічного гальмування автомобіля, обладнаного електроприводом та системою рекуперації енергії

Як уже відмічалось, більшість існуючих конструкцій електромобілів обладнуються системами рекуперації енергії. Система рекуперації енергії дає можливість енергії, яка виділяється в процесі електродинамічного гальмування накопичуватись для подальшого використання. Система рекуперації уже давно активно використовується на залізничному транспорті, в тролейбусах та трамвайних вагонах [37].

Метою роботи являється створення математичної моделі процесу електродинамічного гальмування електромобіля, з установленою системою рекуперації.

Для обґрунтування деяких параметрів, необхідних для розроблення

названої моделі, приведемо залежності, які описують гальмування електромобіля через виконання певної роботи.

При електродинамічному гальмуванні виконуються наступні види робіт [41]:

- робота, яка здійснюється під час електродинамічного гальмування електромобіля A_{Γ} ;
- робота, яка здійснюється накопичувачами енергії при поглинанні рекуперованої енергії A_H ;
- вивільнення кінетичної енергії електромобіля, під час електродинамічного гальмування A_K :

$$\begin{aligned} A_{\Gamma} &= P_i S; \\ A_H &= U I t; \\ A_K &= m_a v^2 / 2, \end{aligned} \quad (3.1)$$

де P_i – сила інерції електромобіля, Н;

S – пройдений шлях, м;

U – напруга накопичувачів, В;

I – сила струму, А;

t – час, с;

m_a – маса електромобіля, кг;

v – швидкість електромобіля.

Сила інерції електромобіля визначається:

$$P_i = m_a j, \quad (3.2)$$

де $j = dv/dt$ – сповільнення електромобіля, м/с².

Сповільнення електромобіля визначається:

$$j = \frac{D_{re} + Q}{*_{om}} g, \quad (3.3)$$

де D_{re} – гальмівний динамічний фактор електромобіля при електродинамічному гальмуванні;

Q – сумарний опір дороги;

$*_{om}$ – коефіцієнт, що враховує обертові маси електромобіля;

g – прискорення вільного падіння, м/с^2 .

$$D_{re} = \frac{P_{re} + P_w}{G_a}, \quad (3.4)$$

де P_w – сила опору повітря;

G_a – вага електромобіля;

P_{re} – гальмівна сила електричного складника електромобіля.

Гальмівна сила електромобіля, під час здійснення електродинамічного гальмування визначається

$$P_{re} = \frac{M(t)u}{r_k 0_{tr}} = \frac{30Ulu}{r_k 0_{tr} Bn}, \quad (3.5)$$

де $M(t)$ – крутний момент електродвигуна, диференціальне рівняння якого нами складене виходячи із джерела [36].

$$M(t) = A_0 u + A_1 M'(t) + A_2 u^2 Yg'(t), \quad (3.6)$$

де A_0 , A_1 , A_2 – постійні електродвигуна. Значення постійних визначаються виразами:

$$A_0 = \frac{2M_k}{S_k}; \quad A_1 = \frac{1}{\omega_0 S_k}; \quad A_2 = \frac{2M_k}{\omega_0 S_k}, \quad (3.7)$$

де M_k – критичний момент двигуна;

S_k – критичне ковзання ротора;

ω_0 – синхронна кутова швидкість двигуна;

t – час;

$u = u_{tre}$ – передаточне число трансмісії електроприводу;

r_k – радіус кочення колеса, м;

0_{tr} – коефіцієнт корисної дії трансмісії;

n – оберти електродвигуна, хв^{-1} .

Загальний ККД із двох складників: електричного 0_{tre} та механічного 0_{trm} визначатиметься за формулою

$$0_{tr} = 0_{tre} 0_{trm}. \quad (3.8)$$

Крутний момент електродвигуна $M(t)$ також відповідає наступній залежності:

$$M(t) = \frac{30N_{ed}}{Bn} = \frac{30UI}{Bn}, \quad (3.9)$$

де N_{ed} – потужність електродвигуна, яка визначається залежністю

$$N_{ed} = UI. \quad (3.10)$$

Оберти електродвигуна можна виразити через швидкість руху електромобіля

$$n = \frac{30vu_{tre}}{Br_k}. \quad (3.11)$$

Для полегшення вирішення поставленої задачі спростуємо умови на даному етапі:

- приймаємо, що електромобіль рухається по горизонтальній ділянці дороги;
- розглядаємо тільки міський режим руху електромобіля, дорожнє полотно перебуває у нормальному стані, тому приймаємо $Q=0$;
- коефіцієнт врахування обертових мас приймаємо $^*_{om} = 1$.

Так як

$$j = \frac{gP_{re}}{G_a}. \quad (3.12)$$

То підставивши (3.5) у (3.12), а потім у (3.2) одержимо

$$P_i = m_a j = \frac{M(t)u_{tpe}}{r_k 0_{tr}}. \quad (3.13)$$

Приймаючи до уваги залежності (3.13) та (3.1), робота, яка виконується силами гальмування буде:

$$A_{\Gamma} = \frac{M(t)u_{tpe}}{r_k 0_{tr}} S. \quad (3.14)$$

Також можна записати, що пройдений шлях електромобіля

визначається як:

$$S = \int_{t_p}^{t_k} v dt, \quad (3.15)$$

де t_p – час початку електродинамічного гальмування, с;

t_k – час закінчення гальмування, с.

Якщо врахувати (3.13) то рівняння (3.16) буде мати наступний вигляд:

$$A_{\Gamma} = P_i \int_{t_p}^{t_k} v dt. \quad (3.16)$$

Підставивши (3.13) у (3.16) та проінтегрувавши вираз по часу, отримаємо залежність, яка показує роботу електромобіля, виконану під час електродинамічного гальмування:

$$A_{\Gamma} = \frac{M(t)u_{tpe}}{r_k O_{tr}} \int_{t_p}^{t_k} v dt = \frac{M(t)u_{tpe}}{r_k O_{tr}} \int_{t_p}^{t_k} dt = \frac{M(t)u_{tpe}}{r_k O_{tr}} (t_p - t_k). \quad (3.17)$$

Для визначення необхідних параметрів математичною моделю запишемо наступні вирази:

$$P_{re} = \frac{M(t)u_{tpe}}{r_k O_{tr}}. \quad (3.18)$$

$$N_e = \frac{Bn}{30} M(t). \quad (3.19)$$

$$I = \frac{N_e}{U}. \quad (3.20)$$

Система рівнянь (3.17) – (3.20) відображає математичну модель процесу електродинамічного гальмування автомобіля, обладнаного електроприводом та системою рекуперації енергії.

Для електромобіля на базі ЗАЗ – 1102, характеристика якого приведена в таблиці 3.1 визначимо основні параметри, які характеризують процес електродинамічного гальмування.

Прийmemo для розрахунків $(t_p - t_k) = 5$ с. Підставивши дані приведені в таблицях 3.1– 3.2 у систему рівнянь (3.17) – (3.20) і використавши математичний застосунок MathCAD, отримаємо наступні параметри, які

характеризують електродинамічне гальмування і рекуперацію енергії електромобіля.

На рисунках 3.1 – 3.5 зображені отримані показники під час електродинамічного гальмування: роботи $Y(t) = A_T$; гальмівної сили $P(t) = P_{re}$;

Таблиця 3.1 – Результати розрахунку початкової зарядки накопичувачів енергії електромобіля

Найменування параметру	Позначення	Одиниці вимірювання	Фактичні дані
Маса електромобіля	m_a	кг	727
Робоча напруга	U	В	288
Максимальна швидкість перед електрогальмуванням	v	км/год	70
ККД трансмісії	η_{trm}	=	0,9
ККД електродвигуна	η_{tre}	=	0,8
ККД загальний	η_{tr}	=	0,72
Потужність електродвигуна	N_e	кВт	30
Радіус кочення колеса	r_k	м	0,3
Передаточне число трансмісії		=	3,5

Таблиця 3.2 – Значення постійних електродвигуна

Тип електро- двигуна	Режим роботи електро- двигуна	Кутова швидкість ротора електро- двигуна, рад/с	Постійні електродвигуна		
			A_0	A_1	A_2
4ПФ180К N =30 кВт n = 3000 об/хв	робоча характе- ристика	314,16	39473,2	-0,31832	-502,5072

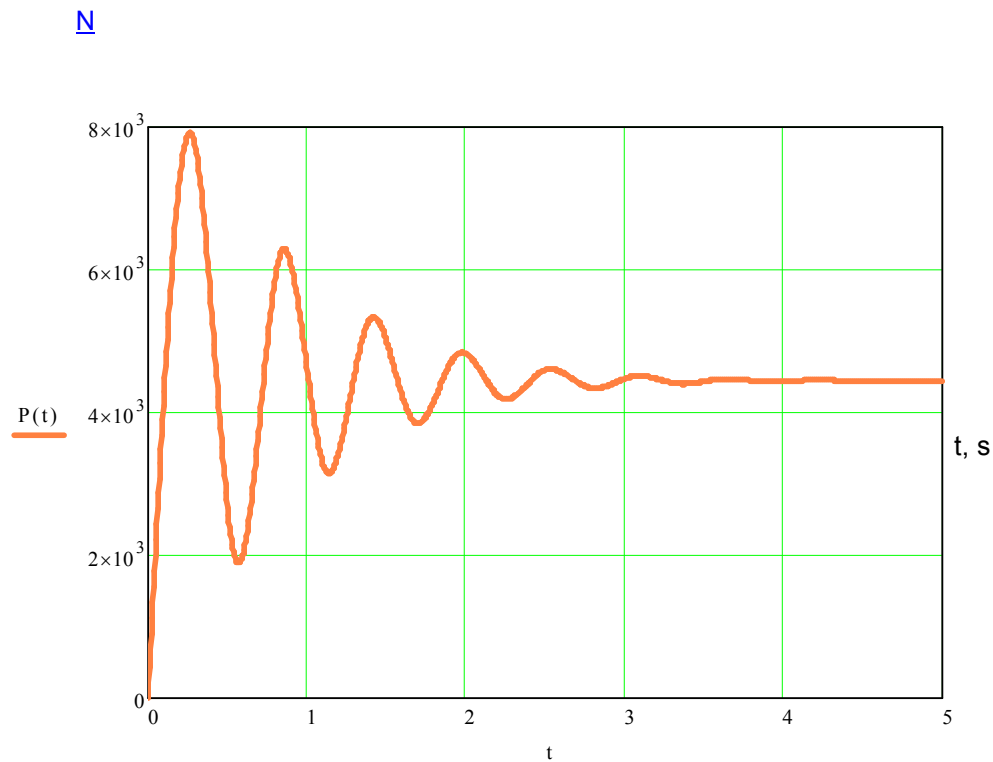


Рисунок 3.2 – Графік гальмівної сили $P(t) = P_{re}$ електромобіля, під час здійснення електродинамічного гальмування

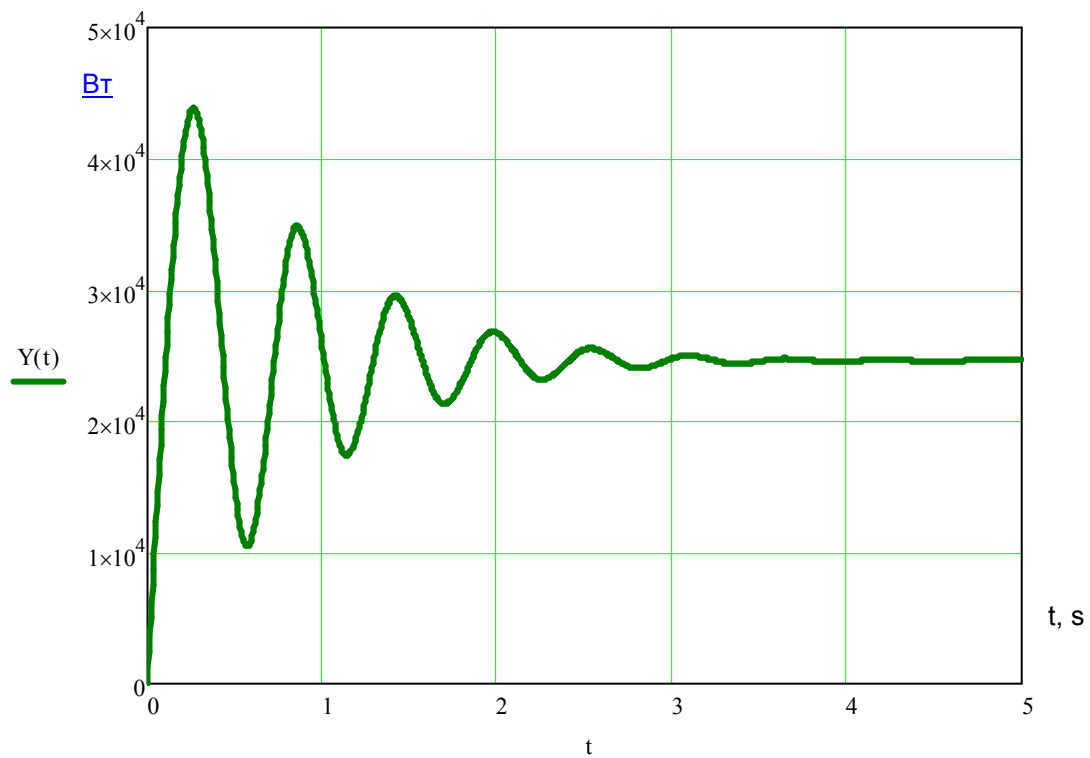


Рисунок 3.3 – Графік потужності електродвигуна $Y(t) = N_e$, який працює в режимі генератора, під час здійснення електродинамічного гальмування

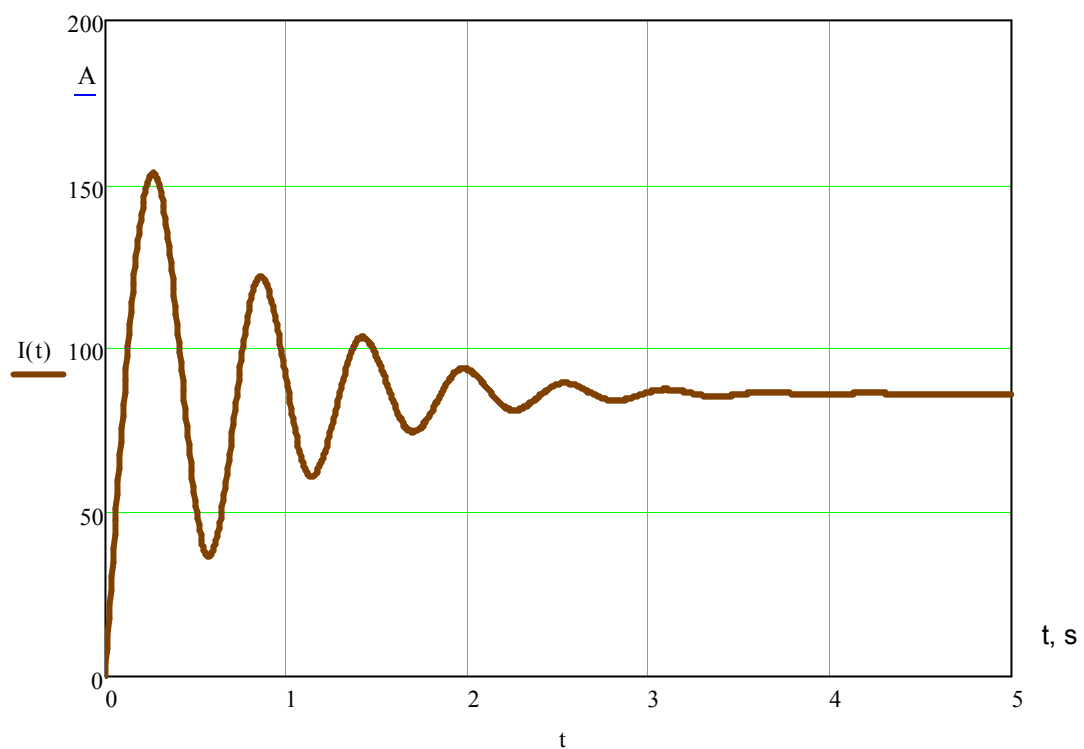


Рисунок 3.4 – Графік зміни струму електродвигуна $I(t) = I$, який працює в режимі генератора, під час здійснення електродинамічного гальмування

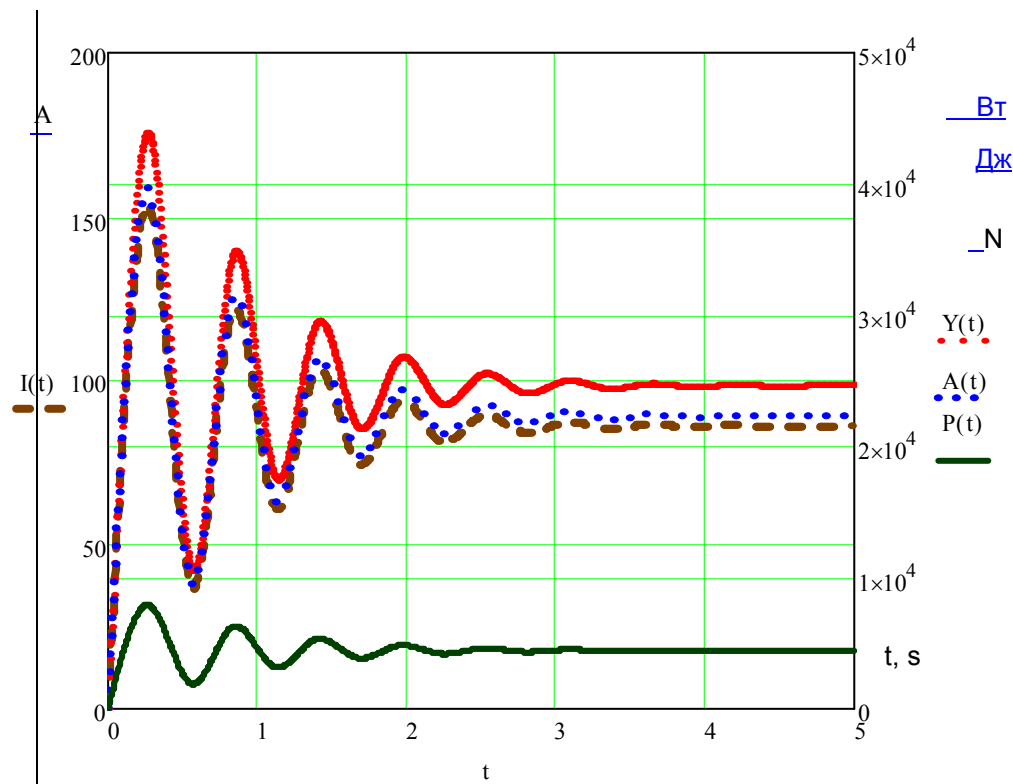


Рисунок 3.5 – Графік зміни струму $I(t) = I$, потужності $Y(t) = N_e$ електродвигуна, який працює в режимі генератора, роботи $A(t) = A_r$ та гальмівної сили $P(t) = P_{re}$, під час здійснення гальмування

потужності $Y(t) = N_e$ та струму $I(t) = I$ електродвигуна, який працює в режимі генератора.

На рисунку 3.5 зображені вищеперераховані основні параметри, які характеризують процес електродинамічного гальмування та рекуперацію енергії. З графіків видно, що процес динамічний і має коливальний характер.

Отже, розроблена математична модель дає можливість, з використанням застосунку MathCAD, дослідити процес електродинамічного гальмування і рекуперацію кінетичної енергії в автотранспортних засобах з електроприводом.

Висновки

В студентській науковій роботі на основі аналізу тенденцій розвитку автомобілебудівної галузі та існуючих технічних рішень електромобілів та їх гальмівних систем з рекуперацією енергії досліджено електродинамічне гальмування з рекуперацією кінетичної енергії автотранспортного засобу.

При виконанні даної наукової роботи, з використанням математичного моделювання, була досліджена динаміка механізму привода електромобіля з рекуперацією кінетичної енергії.

Також при виконанні роботи розглянуті і вирішені питання, які передбачені планом:

- виконаний аналіз наукових праць в області створення електротранспортних засобів з рекуперацією енергії;
- зроблений огляд і аналіз існуючих конструкцій електротранспортних засобів з рекуперацією енергії ;
- теоретично досліджено, з використанням математичного програмного середовища MathCAD, динаміку механізму привода електромобіля з системою електродинамічного гальмування з рекуперацією енергії транспортного засобу;
- отримано результати які можуть бути використані при проектуванні, розрахунку та визначенні динамічних навантажень на електромобілі та їх системи рекуперації.

Доказана ефективність конструктивних змін і необхідність динамічного розрахунку механізму привода електромобіля з системою рекуперації при їх створенні.

Актуальність теми очевидна. Тому необхідно продовжувати дослідження направлені на створення ефективного електротранспорту і систем електродинамічного гальмування з рекуперацією кінетичної енергії.

Список літератури

1. Global ev outlook Understanding the Electric Vehicle Landscape to 2020, April 2013.
2. Raghu Das, Peter Harrop /Electric Vehicle Forecasts, Trends and opportunities 2015-2025 / - IDTechEx Ltd. 2014-10-01 197с.
3. Ronald K. Jurgen / Electric and Hybrid-Electric Vehicles / Published by SAE International with a Product Code of PT-85 2002-02-01 208 с.
4. Mike Westbrook / The Electric and Hybrid Electric Car / SAE International and Institution of Electrical Engineers with a Product Code of R-322 2001-11-01 197.
5. Mehrdad Ehsani, Ali Emadi, Jimin Gao / Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles/ CRC Press with a Product Code of B-884, ISBN of 978-1-4200539-8-2 2009-09-21 557 с.
6. Iqbal Husain / Electric & Hybrid Vehicles: Design Fundamentals 2nd edition / CRC Press with a Product Code of B-881, ISBN of 978-1-4398117-5-7, 2010- 08-09 523 с.
7. Gianfranco Pistoia / Battery Operated Devices and Systems: From Portable Electronics to Industrial Products // 2008-12-02 Specs: Published by Elsevier with a Product Code of B-ELS-008, ISBN of 80080932545, and 408 pages.
8. Lindsay Brook / Chevrolet Volt--Development Story of the Pioneering Electrified Vehicle / SAE International with a Product Code of PT-149, ISBN of 978-0-7680- 4765-3, 2011-04-04 224 с.
9. Francois C. Badin / Hybrid Vehicles/ Editions Technip with a Product Code of B-950, ISBN of 9782710809944, 2013-07-01 352 с.
- 10 . Петренко Ю.В. Торцевой асинхронный двигатель для мотор-колеса легкового электромобиля. Реферат дисс. на соис. учной степени к. т. н. НЭТИ Новосибирск 1984 г.– 30 с.
11. Тарасян А.П. Оптимизация электропривода электромобиля с

широотно-импульсным управлением. Реферат дисс. на соис. учной степени к.т.н. ЕПИ К.Маркса Ереван 1984 г.– 30 с.

12. Лохнин В.В., Вербиренкова И.А. Вентильные тяговые двигатели в электроприводе. Журнал «Энергетика Татарстана» №2, 20011 г. – с. 56-59.

13. Кенио Т., Нагамори С. Двигатели постоянного тока с постоянными магнитами. М.: Энергоатомиздат, 1989. —184 с.

14. Мусин А. М. Аварийные режимы асинхронных электродвигателей и способы их защиты. М.: Колос, 1979.—112 с.

15. Лейтман М. Б. Автоматическое измерение выходных параметров электродвигателей: (методы и аппаратура). — Москва: Энергоатомиздат, 1983. – 152 с.

16. Архипцев Ю.Ф. Асинхронные электродвигатели. Энергия, 1975.– 212 с.

17. Акимов Е.Г. Выбор асинхронных двигателей общего назначения. Методические рекомендации. 2005 г. – 29 с.

18. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.

19. Ren Qinglian, Crolla Dave and Morris, Adrian (2010) The effect of TransmissionDesign on Electric Vehicle (EV) Performance. The Journal of Energy and Power Engineering, 4 (3). pp. 46-51. ISSN 1934-8975.

20. Аносов В. Н. Методы и средства повышения эффективности систем тягового электропривода автономных транспортных средств. Автореферат дисс. на соис. ученой степени д.т.н. Новосибирск – 2008.

21. Макаров А.К. Электромобиль с комбинированной энергетической установкой, включающей солнечную батарею. Автореферат дисс. на соис. ученой степени к.т.н. Москва –1998.

22. Хечинашвили А. Система контроля и управления источником энергии тягового привода электромобиля. Автореферат дисс. на соис. Ученой степени к.т.н. Москва –2006. – 30 с.

23. Вершинин Д.В., Водичев В.А., Войтенко В.А. / Особенности выбора

параметров бортового источника питания электротранспортного средства // Электромашинобудування. – К.: Техника – 2008.–Вип 71.– С.5. – 11.

24. D. V. Ragone/Review of Battery Systems for Electrically Powered Vehicles / SAE Technical Paper 680453, 1968 – 9 с.

25. P. Frantzeskakis / Design of a Parallel-Series Hybrid Electric Vehicle Using Multi-Objective Optimization Techniques/ Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Applied Science at Concordia University Montreal, Quebec, Canada May 1994 – 185 с.

26. Ионесян А.В. Моделирование нестационарных режимов работы аккумуляторной батареи электромобиля. Реферат дисс. на соис. учной степени к.т.н. МАДИ – Москва 2009 – 30 с.

27. Слипченко Н.И., Письменецкий В.А., Гуртовой М.Ю., Махлова В.О. Определение оптимальной дальности пробега электромобиля с учетом его основных параметров. Восточно-Европейский журнал передових технологий / Н.И. Слипченко, В.А. Писменецкий, М.Ю. Гуровой, В.О. Махлова // Журнал автомобильных инженеров. – 2015. – № 3(32). С. 45 – 52.

28. Строганов В.И. Аналитическое моделирование тяговой системы электромобилей и автомобилей с КЭУ В.И. Строганов, В.Н. Козловский, А.Г. Сорокин А.Г., Л.Н. Мифтахова // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – №7. – С. 107–113.

29. Справочник по динамике сооружений / Под общ. ред. Б. Г. Коренева.– М.: Стройиздат, 1972. – 511 с.

30. Бахмутов С.В. Конструктивные схемы автомобилей с гибридными силовыми установками: учебное пособие / С.В. Бахмутов, А.Л. Карунин, А.В. Круташов .– М.: МГТУ «МАМИ», 2007.– 71 с.

31. Капустин А.А. Гибридные автомобили: учебное пособие / А.А. Капустин, В.А. Раков; М-во образ. и науки РФ, Вологод. гос. ун-т. – Вологда: ВоГУ, 2006. – 96 с.

32. Умняшкин В.А. Теория автомобиля: учеб. пособие / В.А. Умняшкин, Н.М. Филькин, Р.С. Музафаров.– Ижевск. Изд-во ИжГТУ, 2006.– 272 с.

33. Бажинов О.В. Гібридні автомобілі / О.В. Бажинов, О.П. Смирнов, С.А. Серіков, А.В. Гнатов, А.В. Колесніков. – Харків, ХНАДУ, 2008. – 327 с.
34. Коллац Л. Задачи на собственные значения: Монография.– М.:Наука, 1968.– 504 с.
35. Тондл А. Автоколебания механических систем: Монография.–М.: Мир, 1979.– 432 с.
36. Ключев В.И. Ограничение динамических нагрузок электропривода / В.И. Ключев. – М.: Энергия, 1976. – 320 с.
37. Ефремов И.С. Троллейбусы (теория, конструкция и расчет) издание третье, исправленное и дополненное / И.С. Ефремов. – М.: Высшая школа, 1989. –488 с.
38. Интернет-журнал «Коммерческая биотехнология» [электронный ресурс] :[офиц. сайт]. – Электрон. дан. Режим доступа: [http://cbio.ru / page / 43 / id / 4922 /](http://cbio.ru/page/43/id/4922) свободный.
39. Анализ шумового воздействия транспорта на городскую среду и население». Актуальные вопросы инновационного развития транспортного комплекса / Материалы 2-ой Международной научно-практической конференции. – Орел: ФГБОУ ВПО «Госуниверситет–УНПК», 2012. С.114-117.
40. Блохин А.Н., Грошев А.М., Козлова Т.А., Яржемский А.Д., Серопян М.С. Результаты теоретических и экспериментальных исследований электромобиля на шасси «ГАЗель». Наука и образование №12 2012.
41. Дембіцький В.М. Математична модель процесу електродинамічного гальмування з рекуперацією енергії транспортного засобу, обладнаного електроприводом / В.М. Дембіцький, О.П. Сітовський, Ю.В. Булік, М.А. Демидюк // Міжвузівський збірник «Наукові нотатки» Луцьк, 2014. Випуск № 45. – С. 159 – 166.
42. Ноженко О.С. Підвищення енергетичної ефективності тепловоза активізацією робочих середовищ: автореф. дис. на здобуття наукового ст. канд. техн. наук: спец:05.22.07 «Рухомий склад залізниць та тяга поїздів» /

О.С. Ноженко; Східн. нац. У. Луганськ, 2010. н-т ім. В. Даля–Луганськ, 2010.– 19 с.

43. Сериков С.А. Управление вектором тока тягового вентильного электродвигателя силовой установки гибридного автомобиля: Сб. науч. тр. – Харьков: ХНАДУ. –2009. – Выпуск 25. – С. 127 – 133.

44. Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения легковых автомобилей в отношении торможения: Правила ЕЭК ООН № 13-Н. – [Введены в действие 04.10.2011]. Женева.: Европейская экономическая комиссия Организации Объединенных наций, 2011. – 118 с.

45. Раков, В.А. Исследование автопарка гибридных автомобилей / В.А. Раков // Транспорт на альтернативном топливе. – 2013. – № 1(31). – С. 18-23.

46. Раков, В.А. Методика оценки технического состояния гибридных силовых установок автомобилей: дис. ...канд. техн. наук: 05.22.10 / В.А. Раков. – Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2018. – 181 с.

47. 2010 Toyota Prius Repair Manual. Service Manager, Your Distributor / Toyota Motor Corporation. – Тойта, 2009. – 8061 p.

48. Обучающая брошюра для специалистов. Двигатель автомобиля Toyota Prius / ТМК. – Москва, 2018. – 91 с.

48. Обучающая брошюра для специалистов. Двигатель, работающий по циклу Аткинсона-Миллера / ТМК. – Москва, 2010. – 11 с.

49. Обучающая брошюра для специалистов. Гибридная система автомобиля Toyota Prius / ТМК. – Москва, 2016. – 87 с.

50. Обучающая брошюра для специалистов. Отличия автомобиля Toyota Prius ZVW 30 от предыдущих моделей / ТМК. – Москва, 2017. – 115 с.

51. Обучающая брошюра для специалистов. Шасси автомобиля Toyota Prius / ТМК. – Москва, 2017. – 105 с.

52. Петров Р.Л. На сколько реальны заявленные показатели расхода топлива и эмиссии CO₂ для гибридных автомобилей / Р.Л. Петров // Журнал автомобильных инженеров. – 2015. – № 2(31). – С. 45-50.