Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматизації, комп'ютерно–інтегрованих технологій та систем
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно–інтегрованих технологій, автоматизації робототехніки та безпекової інженерії
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Розроблення автоматизованої системи рекуперації енергії
(тема)

Виконав:
здобувач 4 року навчання,
групи АКТСІ–22–1
Ігор ІВАНОВ
(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно–інтегровані технології
(код і повна назва спеціальності)
Тип програми освітньо–професійна
Освітня програма Системна інженерія
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. Артем БРОННІКОВ
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту
Завідувач кафедри КІТАРБІ _____ Ігор НЕВЛЮДОВ
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

2026 р.

Я, Іванов Ігор Олегович, як здобувач вищої освіти ХНУРЕ, розумію та підтримую політику закладу з академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Я не використовував штучний інтелект для підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

«30» червня 2026 р  Ігор ІВАНОВ

(підпис)

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет АКІТС

Кафедра КІТАРБІ

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно–інтегровані технології
(код і повна назва)

Тип програми освітньо–професійна

Освітня програма Системна інженерія
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КІТАРБІ _____
(підпис)

«____»_____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Здобувачеві Іванову Ігорю Олеговичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1.Тема роботи Розроблення автоматизованої системи рекуперації енергії
затверджена наказом університету від 04 червня 2026 р. № 473 Ст
2.Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 28 червня 2026
3. Вихідні дані до роботи
3.1 Комп'ютерне моделювання;
3.2 Конфігурація збірки автоматизованої системи рекуперації енергії;
3.3 Алгоритмічно побудова логіки системи.
4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі
4.1 Аналіз стану систем;
4.2 Вибір та обґрунтування апаратних рішень для моделювання;
4.3 Розроблення моделі автоматизованої системи рекуперації енергії;
4.4 Перевірка роботи алгоритмів розробленої моделі;
4.5 Оформлення пояснювальної записки кваліфікаційної роботи.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри)

Графічний матеріал у вигляді презентації – 14 арк. ф. А4

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Строк / терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технічного завдання	15.04.2026	Виконано
2	Аналіз літератури за темою	30.04.2026	Виконано
3	Аналіз та обґрунтування напрямків розробки автоматизованих систем рекуперації енергії	04.05.2026	Виконано
4	Математичне моделювання та алгоритмізація процесів керування	16.05.2026	Виконано
5	Технічне проєктування, симуляція та верифікація характеристик системи із використанням програмного віртуального забезпечення Wokwi	12.06.2026	Виконано
6	Подання роботи на перевірку Інтернет–сервісом StrikePlagiarism	13.06.2026	Виконано
7	Оформлення пояснювальної записки	18.06.2026	Виконано
8	Подання роботи на рецензію.	19.06.2026	Виконано
9	Подання роботи на підпис зав. кафедри	21.06.2026	Виконано
10	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК	23.06.2026	Виконано

Дата видачі завдання 27 квітня 2026 р.

Здобувач _____ Ігор ІВАНОВ
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____ доц. Артем БРОННІКОВ
(підпис) (посада, власне ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 75 с., 4 табл., 35 рис., 3 дод., 28 джерел.

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА, РЕКУПЕРАЦІЯ, МІКРОКОНТРОЛЕР ESP32, WOKWI, MATLAB/SIMULINK

Метою роботи є проєктування та моделювання автоматизованої системи рекуперації енергії пов’язане із підвищенням часу експлуатації акумуляторних батарей.

Об'єктом розробки є процес автоматизованої рекуперації та трансформації кінетичної енергії у електричну.

Предметом розробки є програмно–апаратне забезпечення системи керування та трансформації енергії на базі мікроконтролера.

У першому розділі проаналізовано існуючи аналоги систем рекуперації кінетичної енергії у електричну, обґрунтовано вибір компонентів та порівняно декілька конфігурацій систем рекуперації енергії на базі різних електромобілів.

У другому розділі створено модель об’єкта у вигляді коду, рівнянь і передавальних функцій та розроблено алгоритми керування системою.

У третьому розділі виконано моделювання у Wokwi, розроблено віртуальну модель механізму та проведено її аналіз за допомогою середовища Simulink.

Також, отримані результати роботи можна віднести до цілі сталого розвитку 9 "Промисловість, інновації та інфраструктура", а саме 9.2 " Забезпечити розширення використання електротранспорту та відповідної мережі інфраструктури

У результаті розроблені програмно–апаратні модулі є готовими до застосування в енерготранспорті інфраструктурі.

ABSTRACT

Explanatory note: 75 p., 4 tables., 35 figures., 3 appendices., 28 sources.

AUTOMATED SYSTEM, REGENERATION, ESP32 MICROCONTROLLER, WOKWI, MATLAB/SIMULINK

The aim of the work is the design and modeling of an automated electrical energy recovery system.

The object of development is the process of automated recovery and transformation of kinetic energy into electrical energy.

The subject of the development is the microcontroller-based hardware and software for an energy control and transformation system.

The first section analyzes existing systems for recovering kinetic energy into electrical energy, justifies the choice of components, and compares several energy recovery system configurations based on various electric vehicles.

In the second section, a model of the object is created in the form of code, equations, and transfer functions, and control algorithms for the system are developed.

In the third section, modeling was performed in Wokwi, a virtual model of the mechanism was developed, and its analysis was conducted using the Simulink environment.

Also, the results obtained can be linked to Sustainable Development Goal 9, "Industry, Innovation and Infrastructure"—specifically Target 9.2: "Ensure the expansion of electric vehicle usage and the corresponding infrastructure network."

As a result, the developed software and hardware modules are ready for use in energy transport infrastructure.

ЗМІСТ

Перелік скорочень 9
Вступ 10
1 Аналіз сучасних автоматизованих систем рекуперації енергії 12
1.1 Аналіз розповсюджених автоматизованих систем рекуперації енергії 12
1.2 Порівняльний аналіз конструктивних рішень автоматизованих систем рекуперації електричної енергії 17
1.3 Вибір конфігурації, технічних пристроїв, порівняння 21
2 Математичне моделювання та алгоритмізація процесів керування автоматизованої системи рекуперації енергії 27
2.1 Алгоритмічне забезпечення та блок – схеми роботи АСУ у різних режимах 27
2.2 Визначення з технічними засобами для розробки конструкції 32
2.3 Рівняння та розрахунки ККД об’єкту автоматизації 36
3 Проєктування, симуляція та верифікація за допомогою віртуальних середовищ 39
3.1 Проєктування електронної схеми керування автоматизованою системою рекуперації за допомогою віртуального середовища Wokwi 39
3.2 Вибір електронних компонентів 39
3.3 Сбірка схеми та розробка алгоритмів управління системою рекуперації 42
3.4 Опис програмного забезпечення системи керування 44
3.5 Віртуальна симуляція різних станів системи рекуперації 48
3.6 Моделювання контуру САК у програмному середовищі MATLAB/Simulink 52
3.7 Охорона праці 60

Висновки..... 62
Перелік джерел..... 64
ДОДАТОК А Використані для формул розрахунки 68
ДОДАТОК Б Повна програмна реалізація моделі автоматизованої рекуперації енергії..... 71
ДОДАТОК В Демонстраційний матеріал 74

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АСУ – автоматизована система керування;

БІ – кафедра безпекової інженерії;

КІТАРБІ – кафедра комп'ютерно–інтегрованих технологій, автоматизації, робототехніки та безпекової інженерії;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

САК – системи автоматичного керування;

ШІМ – широтно – імпульсна модуляція;

ADAS – Advanced Driver Assistance Systems (удосконалені системи допомоги водієві);

BMS – Battery Management System (система керування акумуляторної батареї);

CAD – Computer-Aided Design (комп'ютерне проєктування);

CAN – Controller Area Network (мережа контролерів)

I2C – Inter-Integrated Circuit (міжінтегральна схема);

KERS – Kinetic energy recovery system (система рекуперації кінетичної енергії;

LCD – Liquid Crystal Display (рідкокристалічний дисплей);

LED – Light–Emitting Diode (світлодіод);

LFP – Lithium Iron Phosphate (літій – залізо – фосфатний акумулятор);

LTO – Lithium Titanate Oxide;

MOSFET – Metal – Oxide– Semiconductor Field– Effect Transistor (польовий напівпровідниковий транзистор);

NMC – Nickel Manganese Cobalt (Літій–нікель–марганець–кобальтовий акумулятор;

PAD – Permanent – Magnet Armature Drive (електричний водяний насос);

SiC – Silicon Carbide (карбід кремнію);

SoC – State of Charge (рівень заряду акумулятора).

ВСТУП

На даний момент енергетична сфера дуже важлива для країни і створення та розповсюдження автоматизованих систем рекуперації енергії може зменшити не тільки ціну на електроенергію а й збільшити її обсяг у суспільстві що може призвести до значних економічних покращень, також це дозволить зменшити навантаження на енергетичний сектор нашої країні завдяки накопиченню вже витраченої енергії.

Нажаль це лише одна із багатьох проблем у суспільстві на даний час, але вирішення проблем ніколи не може бути комплексним, особливо якщо дивитися на загальний стан країни.

В даному випадку автоматизовані системи рекуперації енергії є досить витонченим рішенням, що дозволить зменшити потреби енергії в суспільстві та набути її із нетрадиційних джерел, теплова, кінетична, сонячна тощо.

Базуючись на можливості видобути електричну енергію з кінетичної може бути одним із таких рішень, актуальність яких завжди на часі. Вбудовані мікроконтролери та загальна мініатюризація та автоматизація дозволяють використовувати рішення, які раніше були занадто дорогими або великими для розповсюдженого застосування таких автоматизованих систем.

Крім того застосування методів моделювання у різних середовищах дозволяє проаналізувати та спрогнозувати роботу таких систем в наближених до реальних умов, це дозволяє провести аналіз міцності конструкцій і усунути проблеми продуктивності на етапах проєктування.

Актуальність теми зумовлена зростаючою потребою у альтернативних джерелах енергії, оптимізацією простору, розвитком та оптимізацією транспортної інфраструктури. Створення автоматизованих систем рекуперації електричної енергії є важливим кроком до формування ефективних, гнучких, мобільних та доступних автоматизованих електричних систем, які можуть самі забезпечити свою роботу навіть у складних умовах [1].

Мета роботи – проєктування та моделювання автоматизованої системи рекуперації енергії пов’язане із підвищенням часу експлуатації акумуляторних батарей.

Об'єкт розробки – це процес автоматизованої рекуперації та трансформації кінетичної енергії у електричну.

Предмет розробки – апаратне, програмне забезпечення для мікроконтролерної системи автоматизованої рекуперації кінетичної енергії у електричну.

Для досягнення поставленої мети, необхідно:

– провести аналіз існуючих систем рекуперації енергії, їх конструкції та системи керування;

– провести вибір та обґрунтування елементної бази і технічних засобів автоматизації;

– розробити алгоритмічне забезпечення головного циклу керування та логіки конструкції,;

– розробити математичну модель об'єкта та виконати симуляцію моделі у середовищі Wokwi;

– виконати комп'ютерне моделювання замкнутого контуру САК у середовищі Matlab/Simulink;

– розглянути питання охорони праці та безпеки життєдіяльності під час монтажу та експлуатації системи;

– оформити кваліфікаційну роботу.

Проведена робота відповідає цілям сталого розвитку (ЦСР): ЦСР 9 («Промисловість, інновації та інфраструктура») та ЦСР 7 («Доступна та чиста енергія»).

Пояснювальну записку кваліфікаційну роботи оформлено згідно з ДСТУ 3008:2015 [2], та з рекомендаціями з підготовки [3] і оформлення кваліфікаційної роботи здобувачами першого (бакалаврського) рівня вищої освіти [4].

1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ РЕКУПЕРАЦІЇ ЕНЕРГІЇ

1.1 Аналіз розповсюджених автоматизованих систем рекуперації енергії

Для початку потрібно зрозуміти що саме мається під поняттям автоматизованих систем рекуперації енергії – це системи розроблені для вловлювання, перетворення та повторного використання енергії, яка в іншому разі зникне під час технологічних процесів або роботи обладнання (наприклад теплова, кінетична, електрична). Рекуперація в електромобілях та гібридах відбувається при гальмуванні або вільному ході (рис 1.1).

KERS, при гальмуванні ця система перетворює кінетичну енергію назад в електричну і повертає її до батареї автомобіля [5]. Це дозволяє підвищити енергоефективність автомобіля і збільшує запас ходу.

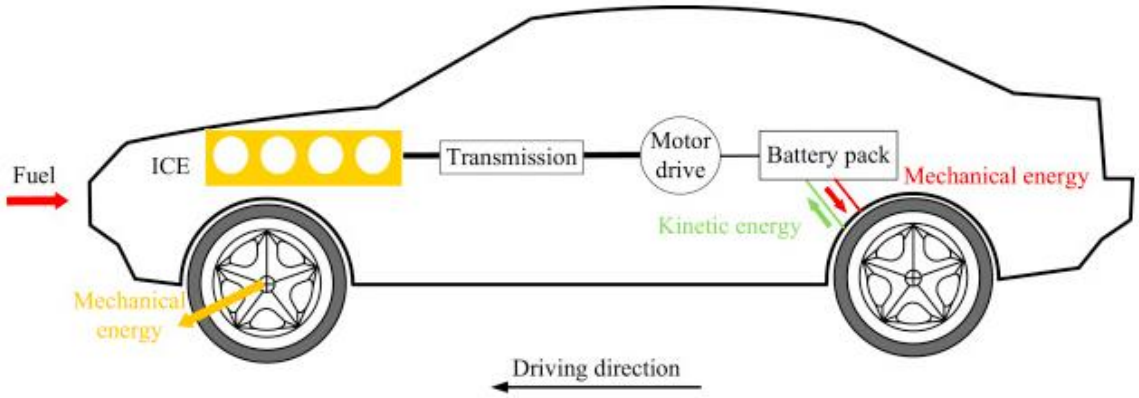


Рисунок 1.1 – Схема типової системи рекуперації кінетичної енергії в гібридному електромобілі [6]

Виходячи з різних принципів та застосувань, KERS можна розділити на чотири категорії: маховикові, електричні, пружинні, гідравлічні та пневматичні. До переваг таких систем можна віднести багато речей (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Переваги та недоліки різних KERS у автомобілях

Види систем	Переваги	недоліки	Гібридні можливості
Пружинні системи	Відсутність втрат енергії при перетворенні (чисто механічні)	Комплексні, важкі, відновляють енергію протягом коротких періодів часу	Так
Гідравлічні та пневматичні системи	Значне підвищення ефективності, невисока вартість	Займає багато місця, важкі, Рекуперація енергії протягом коротких періодів	Так
Електричні системи	Легкість, компактність генерує енергію безперервно	Обмежена продуктивність, незначна ефективність	Ні
Маховикові	Висока ефективність, надійність	Вартість, відсутність довгого зберігання енергії	Так

Якщо подивитися у сектор міського транспорту рекуперації енергії які там використовуються можна виділити електричні та гідравлічні системи.

Найбільш розповсюдженим типом з трансформацією кінетичної енергії у електричну є система рекуперації гальмівної енергії у електричну, в залежності від типу двигуна, який може бути постійного або змінного струму. На разі сучасні автомобільні системи зазвичай використовують синхронні двигуни змінного струму що дозволяє забезпечити високу ефективність трансформації та точне управління тормозним моментом. У таких системах зазвичай використовують тяговий

інвертордля трансформації змінного струму від двигуна у постійний для зарядки батареї (рис. 2.4).

Механічні системи з використанням маховиків була розроблена для автоспорту. У цій системі кінетична енергія накопляється у маховику, який швидко обертається і може розігнатися до приблизних 50000 обертів у хвилину. Ця енергія зберігається у вигляді кінетичної і може бути швидко використана для додаткового прискорення. Системи такого типу мають найбільш високу ефективність перетворення енергії, але мають високу складність конструкції і не можуть бути використані розповсюджено.

Гідравлічні і пневматичні системи використовують зжате повітря або гідравлічну рідину під тиском для накопичення енергії. При гальмуванні гідравлічний або пневматичний мотор–насос стискає робочу середу у акумуляторі високого тиску. При розгоні стиснута середа приводить у дію мотор, який допомагає основному двигуну. Такі системи зазвичай використовують у важких транспортних засобах. Велика маса такого транспорту дозволяє накопичити значну кількість енергії, однако, ефективність гірше ніж у електричних системах через витрати при стисканні та розширенні робочої середи.

Загалом ефективність рекуперативного гальмування є ключовим параметром по якому можна визначити їх практичну цінність. Загальна ефективність складається із декількох етапів перетворення енергії, кожен із яких може суттєво впливати на витрати. На першому етапі кінетична енергія автомобіля перетворюється у електричну енергію генератора. Сучасні електродвигуни в теорії можуть забезпечити загальну ефективність близько 85%–95% але фактична цифра декілька нижче і складає від 70 до 80% через реальні умови експлуатації.

Другий етап включає в себе перетворення і конденсування електричної енергії для зарядки у акумулятор автомобіля. Інвертор та зарядний пристрій вносять додаткові втрати, близько 10–20 %. Третій етап, на якому в залежності від типу батареї та режиму зарядки втрати можуть досягати 15%. Загалом на цих етапах витрати є невід’ємною частиною процесів що при загальному підрахунку може знизити ефективність зарядки майже вдвічі (табл. 1.2).

Проводячи аналіз факторів від яких залежить ефективність рекуперації енергії можна визначити такі параметри як температура, швидкість руху, стан батареї та інтенсивність гальмування [7].

При низьких температурах ефективність заряду акумуляторів на літій–іонній основі може впасти до 50–60% від номінальних значень, при зарядці батареї при зарядженому стані рекуперація може обмежуватися для запобіганню перезарядки. Через низьку швидкість ефективність накопичення заряду також може знизитися. Також важливо зазначити що рекуперація найбільш ефективна при плавному гальмуванні, а під час різкого може потребувати фрикціоні гальма.

Якщо досліджувати ситуацію теоретично та практично виходить що теоретичні показники складають приблизно мінімум 60% тоді як практичні показники показують максимально 20% в умовах міста та 25% у горбистих місцях.

Таблиця 1.2 – Статистика ефективності рекуперації енергії при різних умовах руху

Умови руху	Ефективність рекуперації	Приріст запасу ходу
Міський цикл (часті зупинки	Висока	20–30%
Заміська траса з рівнинами	Низька	3–5%
Гірська місцевість (спуски)	Дуже висока	25–35%
Швидкісна автомагістраль	Мінімальна	2–4%

У сучасному транспорті системи рекуперації стали стандартом у всіх електромобілях та більшості гібридів, сучасні системи дозволяють реалізувати управління однією педаллю, де водій може контролювати як прискорення так і гальмування лише педаллю акселератора. Гібриди використовують рекуперацію не тільки для зарядки батареї, а й для оптимізації роботи двигунів внутрішнього

згорання. Система управління автоматично розподіляється між електричними та бензиновими двигунами що забезпечує максимальну ефективність розходу пального.

Якщо розглянути інновації то можна виділити розвиток адаптивних систем, які підстроюються під звички водіїв, оптимізують інтенсивність рекуперації в залежності від умов руху тощо.

Також до інновацій можна віднести покращення накопичувачів енергії, сучасні літій–залізо–фосфатні батареї забезпечують більш стабільну роботу у широких діапазонах температур та краще переносять часті цикли зарядки від рекуперації. Загалом одним із недавніх досягнень у інновації автоматизованих систем рекуперації енергії можна визначити анонс першої активної підвіски із системою рекуперацією енергії.

Компанія ZF Friedrichshafen AG уклала партнерство з Levant Power Corp., що базується у Воберні, штат Массачусетс, США, для створення першої у світі повністю активної системи підвіски з функцією рекуперації енергії. Технологія GenShock – це повністю активна система для легкових автомобілів, яка поєднуватиме динаміку, безпеку та комфорт з мінімальним споживанням енергії та рекуперацією енергії [8].



Рисунок 1.2 – Активна підвіска з автоматичною системою рекуперації енергії [8]

Така система включає в себе блок керування, електродвигун та електрогідравлічний шестерний насос. Блок встановлений зовні амортизатора утворює технічну систему активної рекуперативної системи.

Якщо ж розглядати глобальні досягнення у цій галузі пов'язані з рекуперацією можна визначити розвиток штучного інтелекту, який в подальшому відкриває нові можливості для оптимізації процесів рекуперації.

1.2 Порівняльний аналіз конструктивних рішень автоматизованих систем рекуперації електричної енергії

Якщо поділити на підрозділи конструкторські рішення можна віднести до:

– методи акумулювання енергії;
– схеми перетворень;
– алгоритмів мікропроцесорного керування.

Як вже було сказано раніше, конструкторські рішення у системах рекуперації енергії можна поділити на електрохімічні (використовуючи акумуляторні батареї, механічні з використанням маховика, комбіновані системи з акумулятору та супер конденсатору, автоматизовані системи керування рекуперацією з використанням різних датчиків. У кожному із цих методів використовуються різні схеми перетворень. Можна виділити схему з матричним перетворювачем, комбіновану схему, та базову схему.

Якщо ж роздивлятися алгоритми мікропроцесорного керування можна виділити алгоритм детермінованого кооперативного розподілу, керування на базі нечіткої логіки та алгоритм прогнозного моделювання (табл. 1.3).

Хоча комбіновані та схеми з матричним перетворювачем і користуються популярністю, базові схеми є найбільш розповсюдженими серед таких схем через новизну технології, та малий відсоток електрокарів на автомобільному ринку, через обмеження в необхідності постійної підзарядки звичайні автомобілі все ще користуються найбільшим попитом.

Таблиця 1.3 – Таблиця порівняння алгоритмів

Критерій порівняння алгоритмів	Детермінований (паралельний)	Нечітка логіка	Прогнозне моделювання	Гібридний
Складність архітектури	Низька (8\16 біт)	Середня (32 біт)	Висока (multicore\SoC)	Висока (ШІМ–драйвери, DC\DC)
Ефективність енергозбереження	Базова (10–15%)	Висока (20–25%)	Максимальна (15–30%)	В залежності від ситуації
Вартість реалізації	Мінімальні	середня	Висока (потреба сенсорів)	Максимальна через супер–конденсатор
Вплив на АКБ	Негативний (Пікові струми)	Помірна	Оптимальний (через контроль температури)	Найкращі(мінімальний знос)

Є дуже гарне конструкторське рішення для гібридних систем у вигляді алгоритму керування потоками енергії, його використання дозволяє захистити літієву батарею від деградації під час пікових струмів рекуперації. Суть алгоритму полягає в використанні алгоритму частотного розділення, за допомогою інвертора(рис. 2.4) імпульсна складова струму спрямовується у DC/DC перетворювач, далі в супер – конденсатор, а низькочастотна в акумуляторну батарею через головний комутатор. До переваг можна віднести ефективне поглинання кінетичної енергії. До мінусів же можна віднести вартість та масу бортової електроніки [9].

Якщо детально роздивитися алгоритм прогнозного моделювання то можна зауважити що суть алгоритму полягає у використанні даних з сенсорів та GPS – датчиків щоб передбачити майбутню швидкість та оптимізувати рекуперацію

енергії шляхом оптимізації у реальному часі. Конструкторно він реалізується через використання потужних автомобільних обчислювальних платформ. До переваг цього алгоритму можна віднести дуже високий ККД рекуперації та контроль температур, до недоліків же можна віднести високу обчислювальну складність алгоритму (табл 1.3).

Алгоритм нечіткої логіки базується на фазифікації вхідних сигналів та змінних та по цим змінним формує вихідний коефіцієнт розподілу рекуперативного моменту, весь алгоритм реалізується завдяки 32–бітних мікроконтролерах, які мають апаратну підтримку обчислень з комою. Він ефективно працює при нелінійності компонентів але потребує тривалого процесу налаштування (табл 1.3).

Детермінований алгоритм є найпростішим рішенням. Мікропроцесор зчитує положення гальма, швидкість авто, та стан заряду акумуляторної батареї. За допомогою заданих математичних кривих мікропроцесор обчислює необхідний гальмівний момент, при відповідних заданих параметрах алгоритм може задіяти гідравлічну систему для гальмування за потреби. Конструкторно це реалізовано через інтеграцію інвертора двигуна з блоком ESP через шину CAN. Сигнал який мікропроцесор зчитує з датчика ходу педалі розкладається на два різних вектору керування [9].

До переваг такого алгоритму можна віднести високу швидкість обчислень та низьку потребу пам’яті для реалізації.

До недоліків ж можна віднести слабку адаптацію до різних коефіцієнтів (наприклад зчеплення), алгоритм не враховує температуру акумуляторної батареї.

Ще до різних конструкторських рішень можна віднести також різні апаратні конфігурації для інтеграції систем рекуперації та акумуляторів. Одним із варіантів конфігурацій є конфігурація із двох – направленим Buck – Boost перетворювачем (рис. 2.10). Це одна із базових схем для поєднання двигуна – акумулятору. Ця конфігурація має такі складові як транзистори для зменшень динамічних втрат, зворотні діоди інтегровані в транзистори або підключені паралельно для проходження струму в моменти перемикання, конденсатори встановлені на входах

та виходах для згладжування пульсації напруги і дросель, який є головним елементом і підключається до середньої точки між транзисторами та виходом до акумуляторної батареї.

Ця конфігурація має декілька режимів роботи згідно назві, знижувальний та підвищувальний режими. У першому режимі (Buck) енергія рухається від високовольтної шини до акумуляторної батареї або навпаки залежно від архітектурних рішень прийнятих при формуванні конфігурації). Результатом роботи цього режиму є зниження вихідної напруги відносно вхідної пропорційно коефіцієнту ШІМ. У другому режимі (Boost) енергія гальмування від мотор – генератора повертається для зарядку акумуляторної батареї в результаті напруга підвищується до рівня, необхідного для подолання потенціалу батареї та її ефективного заряду [10].

До переваг такої конфігурації можна віднести високий ККД, мінімальну кількість компонентів та просте керування. Недоліки ж включають в себе прямий зв’язок між інвертором та АКБ що підвищує ризики при аварії, високі пульсації струму що потребує потужних конденсаторів та дроселів. Також можна віднести до мінусів те що транзистори працюють під повним навантаженням напруги шини, що негативно скасується на їх працездатності з часом. Зазвичай до цієї схеми додають додаткові допоміжні резонансні контури для увімкнення транзисторів при низькому струмі або напрузі, це робиться для мінімізації електромагнітних звад та теплових витрат. Також можуть паралельно вмикати декілька допоміжних резонансних контурів, завдяки зсуву фаз керування їде знижена пульсація струму що дозволяє зменшити дроселі і підвищити загальну потужність системи.

Ще одна конфігурація, яку можна виділити як досить перспективну є конфігурація з додаванням супер конденсаторів. Завдяки тому що супер – конденсаторам не важливо яким саме буде перепад струму, це дозволяє накопичувати струм у міських умовах, а потім послідовно передавати його до батареї. Під час гальмування тяговий двигун надає енергії у інвертор від якого вона йде до перетворювача і поглинається конденсатором від якого вже йде у основну акумуляторну батарею.

Також можна виділити класичну конфігурацію пов’язану із прямою рекуперацією енергії у батарею через подвійний інвертор та систему керування батареєю, це є найпростішою конфігурацією, мінусом якої є те що літій–іонні батареї погано сприймають високі струми при різкому гальмуванні, і це один із недоліків які можна подолати вдосконаленням схеми.

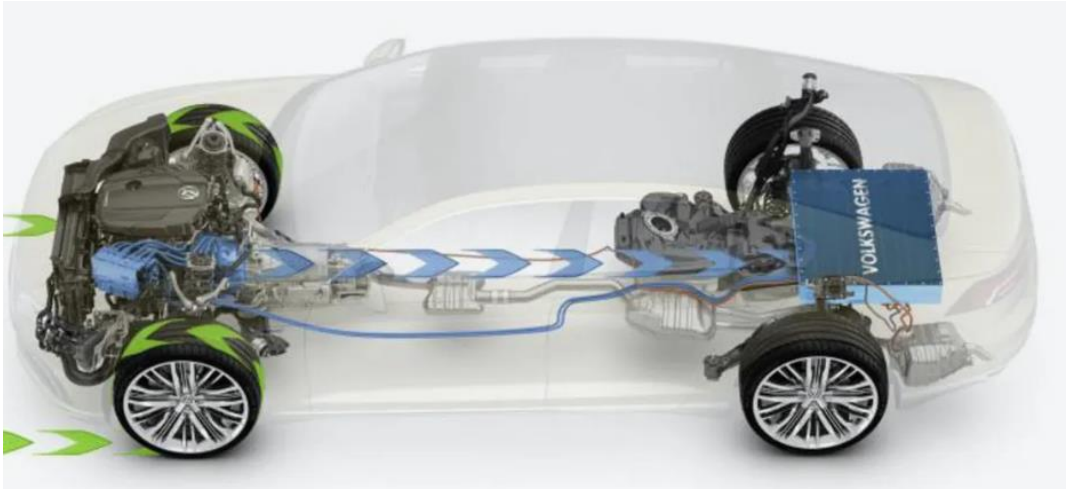


Рисунок 1.3 – Система рекуперації енергії [11]

1.3 Вибір конфігурації, технічних пристроїв, порівняння

Автоматизована система рекуперації має мати різноманітні датчики для аналізу даних, дій водія, стану автомобіля. Для автоматизованої системи рекуперації енергії я вибрав класичну версію конфігурації електричної системи через легкість із можливістю вдосконалення і автоматизації та легкістю реалізації у таких середовищах як Matlab та Wokwi.

Це дозволяє не тільки реалізувати математичну модель для отримання важливих значень, а й завдяки автоматизації вирішити одну с основних проблем класичної конфігурації систем рекуперації у електричних автомобілях.

Для автоматизованої системи рекуперації енергії у електромобілі я обрав класичну конфігурацію з інтеграцією фронтального радару та застосуванням різних методів та алгоритмів для запобігання псуванню батареї через занадто високі струми при гальмуванні та перегріву через це.

До методів які можна використати для запобіганню можна віднести впровадження динамічного обмеження струму за допомогою розрахунків за математичною матрицею. Для цього також можна використати логіку при якій піковий струм рекуперації уповільнений якщо температура занадто низька або висока, надлишок перенаправляється на механічні гальма.

Також можна використати алгоритм імпульсної рекуперації, з використанням ШІМ – керування для подання струму у батарею через мікро паузи.

Також можна застосувати превентивний менеджмент управління охолодженням.

Це дозволяє за допомогою фронтального радару приблизно отримати інформацію про гальмування що дозволяє використати охолодження батареї заздалегідь, що дозволить знизити теплові навантаження і збільшити отриману енергію.

Загалом усю систему можна поділити на 3 контури:

– для інформаційного контуру також потрібні системи керування та моніторингу батареї, датчики струму, електронні датчики натиску гальма водієм, датчики швидкості;

– до обчислювального елементу можна віднести мікроконтролер ESP32, який виконує роль локального контролера рекуперації, та закладених алгоритмів;

– до виконавчого контуру можна віднести силові та механічні підсилювачі, драйвери, інвертор, охолоджувальну помпу, у разі якщо система рекуперації обмежена алгоритмом захисту батареї гідравлічний блок.

Базуючись на цьому можна побудувати алгоритм взаємодії пристроїв у різних режимах руху у декількох випадках.

Режим превентивного ADAS – регулювання полягає у тому що радар фіксує критичне зближення з перешкодою без реакції водія, через це контролер дає команду на превентивний запуск помпи охолодження батареї.

Режим суміжного гальмування: при натисканні водієм на педаль гальмування сигнал надається на контролер, який аналізує кут натискання та у разі потреби або

забезпечує уповільнення завдяки генерації двигуна та ротора, або при глибшому натисканні подає команду яка підключає гальмівну систему.

Режим температурного та зарядного захисту система контролю заряду батареї (BMS) реагує на великий заряд батареї або занадто високу температуру батареї, контролер дає команду яка зменшує рекуперацію до 0 та блокує її для захисту батареї від теплового псування, на цей час уся кінетична енергія гальмування йде через нагрівання гальмівних дисків.

Батареї які можна доступно використати в таких системах можна віднести до 3 різних типів: NMC (літій – нікель – марганець – кобальтові батареї), LFP (літій – залізо – фосфатні батареї), LTO (літій – титанатні батареї).

Таблиця 1.4 – Порівняння типів батареї для автоматизованої системи рекуперації

Тех. характеристика	NMC	LFP	LTO
Приклад використання	Tesla 4680	BYD Blade battery	Toshiba SCiB
Пітомна енергоємність	200 – 260 Вт ×год/кг	140 – 160 Вт ×год/кг	70 – 110 Вт ×год/кг
Кількість циклів зарядки	1000 – 2000	3000 – 4500	2000 – 5000
Термічна стабільність	Низька	Висока	Не займається при пошкодженнях
При низьких температурах	Середня працездатність	Низька (сильна втрата ємності)	Гарна (працює при –30°C.

Якщо роздивлятися ретельніше то літій – титанатні батареї LTO є найбільш стабільними, ніж літій – іонні батареї, через це вони є одним із основних типів

акумуляторів та використовуються у багатьох галузях, через велику та ефективну швидкість зарядки, велике число циклів зарядки та добру працю при різних температурних умовах, а також через низький ризик перегріву вони є одним із надійніших варіантів для використання у якості автомобільних акумуляторів, проте в них є і суттєві недоліки. Низька щільність енергії та висока ціна обмежують їх використання у дешевих електромобілях (табл. 1.4).

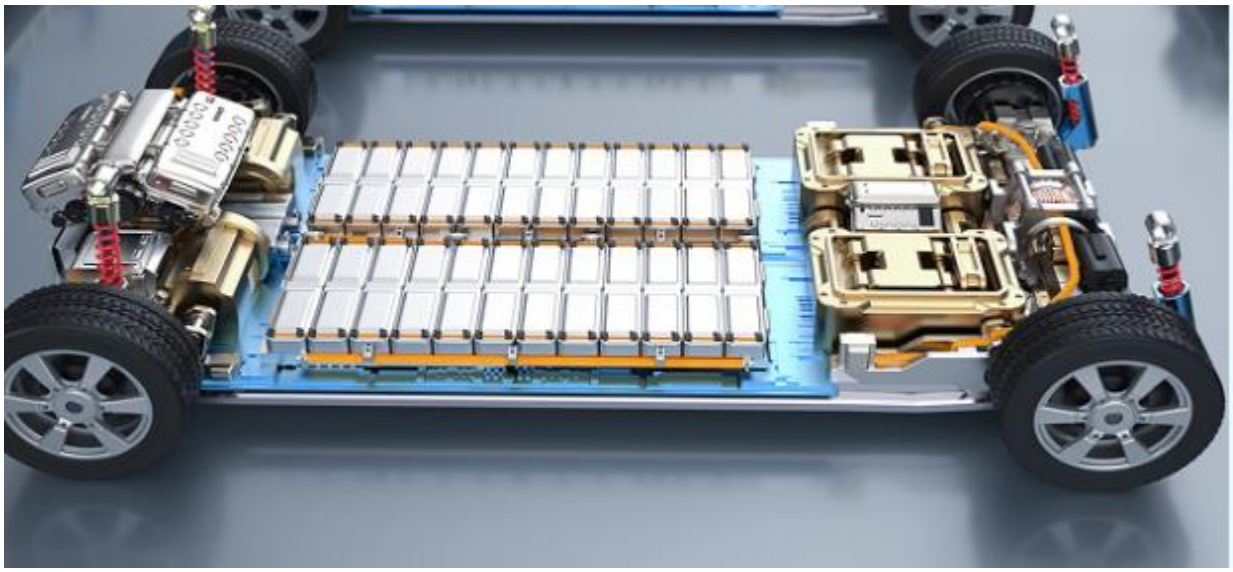


Рисунок 1.4 – Літій – титанатні батареї [12]

Літій – залізо – фосфатні батареї є одним із найрозповсюдженіших типів акумуляторів через низьку ціна та відносно великий термін роботи у порівнянні із близькими конкурентами через доступність ресурсів, з яких роблять такі батареї загальне використання таких акумуляторів досягає майже третини ринку (табл. 1.4). До переваг таких батарей також можна віднести термічну стабільність та можливість витримувати великі струми під час зарядки, що позитивно сказається на часі зарядки та впливу на термін служби акумуляторів із таких батарей. Проте до недоліків можна віднести те що процес їх виробництва відносно складний та дорогий при порівнянні з аналогами. Також через те що під час зарядження та розрядження такі батареї матеріали, з яких виробляють такі батареї до розбухання батарей через хімічні реакції [12].

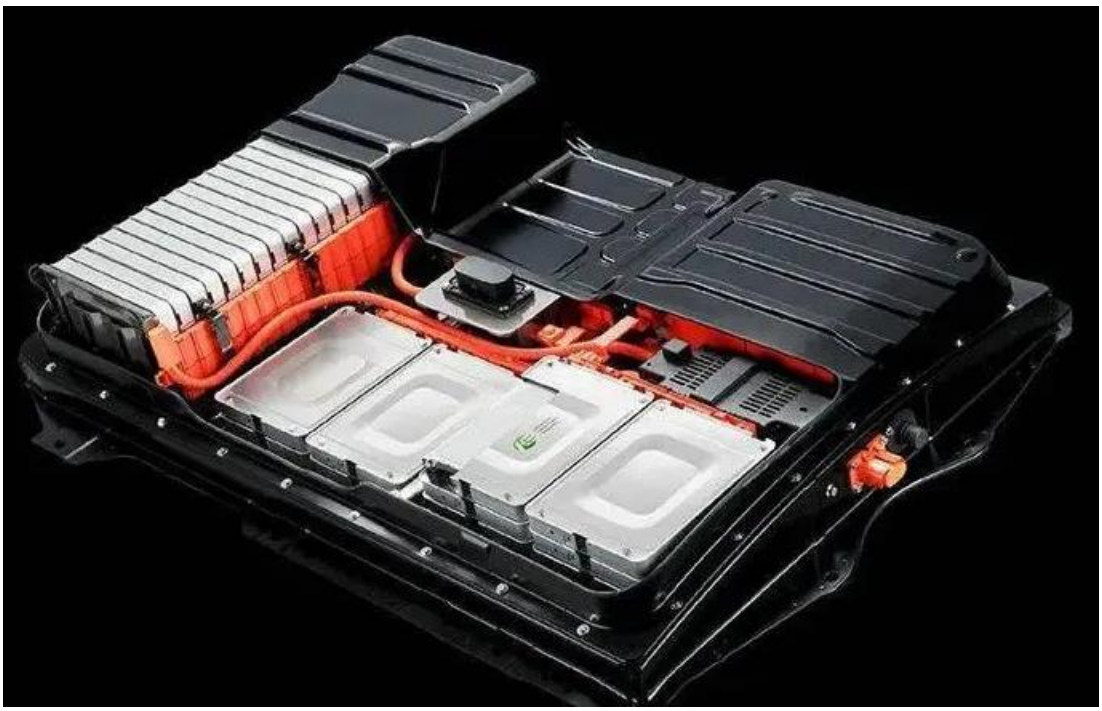


Рисунок 1.5 – Літій – залізо – фосфатні батареї [13]

Літій – нікель – марганець – кобальтові батареї є одним із самих популярних акумуляторів, через склад такі батареї мають компактні розміри і відносно невелику у порівнянні з конкурентами, через високу продуктивність вони виступають стандартом у сфері автомобільних акумуляторів, хоч вони і мають більш високу ємність у порівнянні з конкурентами, через існування більш дешевих та менш токсичних аналогів поступово уступають конкурентам, через потреби до утилізацію кобальту я не можу назвати такі батареї фаворитом для використанні у електричних автомобілях (табл. 1.4). Такі батареї не тільки безпечні та довговічні, вони також підтримають в віддають стабільну напругу. Акумулятори на базі цих батарей без проблем віддавати високі струми, це робить їх гарним вибором при використанні у автомобілях або обладнанні що потребує великих пускових струмів.

Також можна зазначити що у складі таких батарей немає токсичних важких металів це приводить к спрощеній утилізації та чистішому виробництві. Проте погана робота при низьких температурах та низька пітома ємність і номінальна напруга а також те що при однаковій ємності він буде важчим та більшим за аналоги (рис. 1.5) унеможливлює його використання у якості варіанта для автоматизованої системи [14].



Рисунок 1.6 – Літій – нікель–марганець–кобальтові батареї [15]

Згідно цим характеристикам для автоматизованої системи рекуперації енергії я вважаю важливим та обґрунтованим кроком використовувати електромобілі на базі Літій – нікель – марганець – кобальтових акумуляторів через великий запас ходу, низьку ціну у порівнянні із конкурентами та відносно стабільні температурні діапазони для використання автоматизованих систем охолодження. Такі батареї зберігають баланс між потужністю, енергетичною щільністю та довговічністю. Також, через склад цих батарей, вони мають підвищену безпеку, стабільність, ціну та довговічність у своїй сфері застосування [16]. Це робить такий тип батарей одним із флагманів на ринку електромобілів.

2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА АЛГОРИТМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ КЕРУВАННЯ АТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ РЕКУПЕРАЦІЇ ЕНЕРГІЇ

Для створення ефективної автоматизованої системи рекуперації енергії потрібно розробити схему сприйняття, керування та реагування на різні частини. Сама система має складатися с датчиків, елементів керування та менших систем на основі такої схеми і починається побудова АСУ (автоматизованої системи управління).

2.1 Алгоритмічне забезпечення та блок – схеми роботи АСУ у різних режимах

Блок – схема це візуальне представлення алгоритму або аналізу задачі за допомогою геометричних елементів (блоків), які позначають операції, потік або дані [17].

Зазвичай такі схеми використовують для візуального сприйняття системи на етапах проєктування з урахуванням усіх потрібних функцій. Якщо подивитися на (рис. 2.1) першу блок схему представлену у роботі, то можна визначити базову логіку, якою коригується система через перевірку показників з різних датчиків які використовуються у автоматизованій системі рекуперації.

Базуючись на першій блок – схемі можна виділити основні моменти та датчики які потрібно використати в системі.

До таких датчиків відносяться:

– датчик температури та рівня заряду акумуляторної батареї;

– датчик швидкості обертання коліс;

– датчик відстані до перешкоди;

– датчик положення педалі гальма.

Використання такого набору датчиків дозволяє створити систему рекуперації енергії с 3х – лінійним захистом батареї.

Наступну блок – схему (рис 2.2) можна визначити як більш детальне описання умов при яких використовується той чи інший режим гальмування, під час якого відбувається АБО не відбувається рекуперація та підготовка до енергетичних навантажень на батарею.

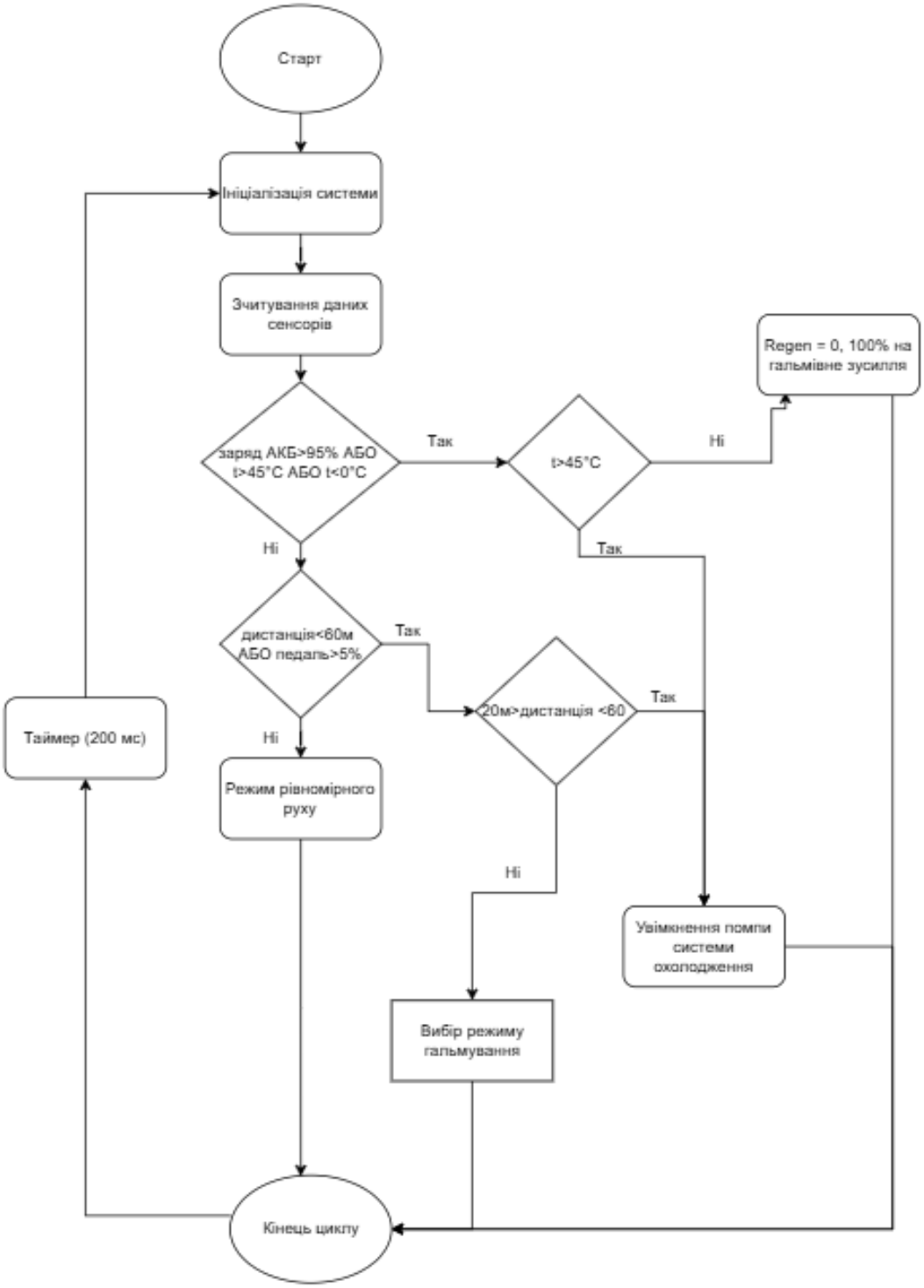


Рисунок 2.1 – Загальна блок – схема системи захисту батареї

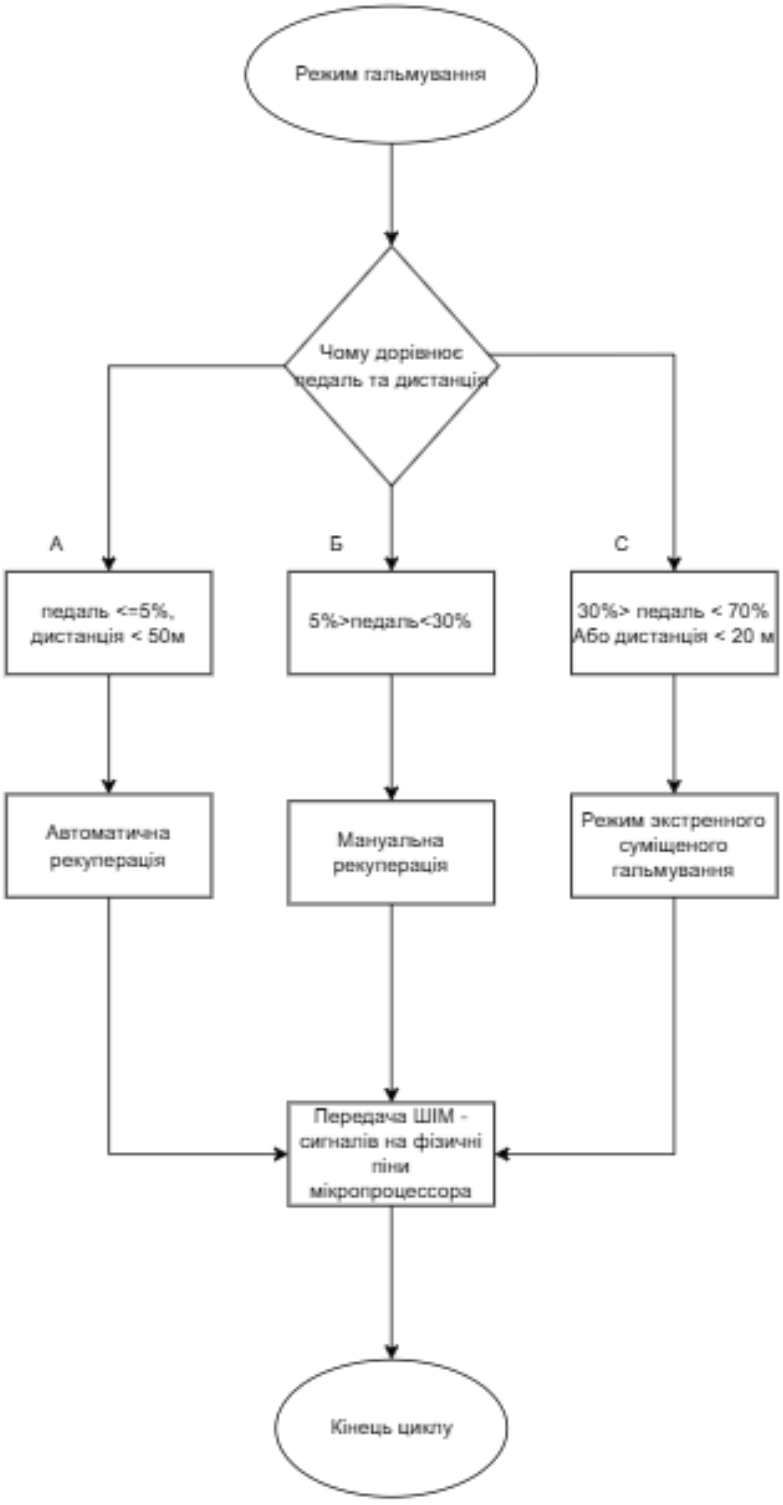


Рисунок 2.2 – Блок – схема системи захисту батареї у режимі гальмування

На цій блок схемі (рис. 2.2) можна позначити 3 типи реакції системи на різні показники з датчиків:

– реакція типу А – спрацьовує у разі якщо до перешкоди відстань становить менше 50 метрів та педаль гальма не натискається, загалом ця ситуація активується виключно радаром як первинним показником. У цій реакції системи струм під час

рекуперації заздалегідь подається на затвори транзисторів, що дозволяє зменшити термоудар по холодній акумуляторній батареї через підготовку до нього;

– реакція типу Б – Активується за сигналом датчика положення педалі гальма. Система реагує на дію водія, автоматика під цей час балансує між ШІМ – зарядом АКБ та тиском у гальмівних супортах завдяки блоку системи гальмування. Якщо батарея через температурний ліміт не може прийняти увесь заряд, рекуперація утримується на безпечному рівні а решта гальмівної сили компенсується колодками;

– реакція типу С (критична) – активується за сигналом датчиків термоконтролю та напруги батареї. Система реагує на небезпечний стан накопичувача або близьке зіткнення. При цьому спрацьовує вищій пріоритет, на головну функцію системи виходить захист батареї від критичних пошкоджень, рекуперація повністю зупиняється і машина повністю переходить на механічні гальма.

Якщо розглянути наступну блок – схему (рис. 2.3) то можна побачити методи обміну інформації між блоками:

– під час руху машини: У разі якщо водій натискає гальма, датчик положення деталі розташований у блоці інформаційного контуру гальма надсилає сигнал центрального керуючого пристрою (ESP) через цифровий протокол CAN;

– обробка захисту: Програма в другому блоці (центральний керуючий пристрій) одночасно зчитує дані від інтелектуальної системи менеджменту батареї, у разі відповідних показників температури розраховується ліміт енергії, можливий для прийняття батареєю;

– керування інвертором: Генератор ШІМ також розташований у другому блоці створює імпульси з частотою 50кГц. Ці сигнали проходять через драйвери і відмикають транзистори в інвесторі. Двигун починає чинити магнітний опір коліс, машина сповільнюється, змінний струм перетворюється на постійний;

– згладжування та накопичення: Струм проходить через випрямляч струму (конденсатор) для фільтрації високочастотних перешкод і потрапляє безпосередньо в батарею розташовану в четвертому блоці під наглядом від датчика струму вбудованого в інтелектуальну систему менеджменту батареї;

– робота датчику відстані та колодок: Якщо радар, розташований у першому блоці, помічає перешкоду заздалегідь, мікроконтролер запускає помпу охолодження розташовану у третьому блоці (рис 2.3). У разі різкого гальмування або занадто високої температури батареї контролер надає команду електромеханічному модулятору гальмівних колодок, розташованому у третьому блоці, дотискати механічні колодки, компенсуючи гальмівну силу.

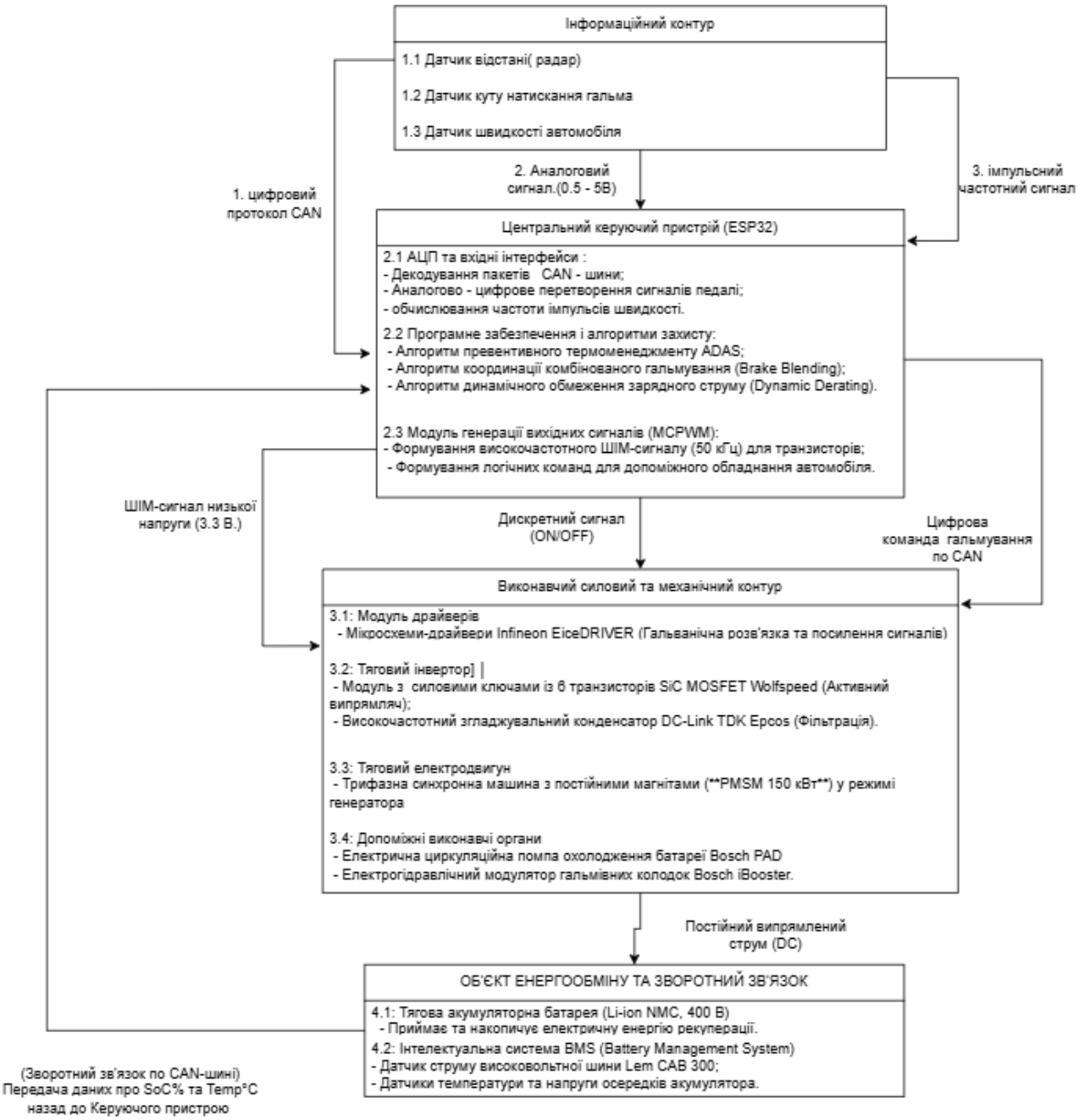


Рисунок 2.3 – Блок схема зв’язків та взаємодій різних блоків системи

2.2 Визначення з технічними засобами для розробки конструкції

Ефективність системи рекуперації напряму залежить від якості компонентів, з яких вона побудована та алгоритмів які використаються під час її праці. Тому потрібно вибрати компоненти які можна використовувати для системи заздалегідь та розрахувати усі необхідні показники.

Якщо відштовхуватися від батареї, як основного елементу навколо якого будується електрокар. В моєму випадку як електрокар я використав Tesla model 3 з балансованими характеристиками, вага складає 1763 кг. Його пікова потужність тягового двигуна сягає 282 кінським силам що дорівнює приблизно 210 кВт.[18] Як батарею ми використовуємо тип NMC номінальна напруга якої сягає 400 В. а ємність 60 кВт. год.

Для силової частини АСУ використовується тяговий – двонаправлений трифазний мостовий перетворювач, працюючий в режимі активного випрямляча та маючий у себе 6 транзисторів на базі карбіду кремнію. Для цього можна вибрати модель FS03MR12A6MA1B (рис. 2.4) завдяки видатним характеристикам та великому ККД він покриває потрібні характеристики майже вдвічі.

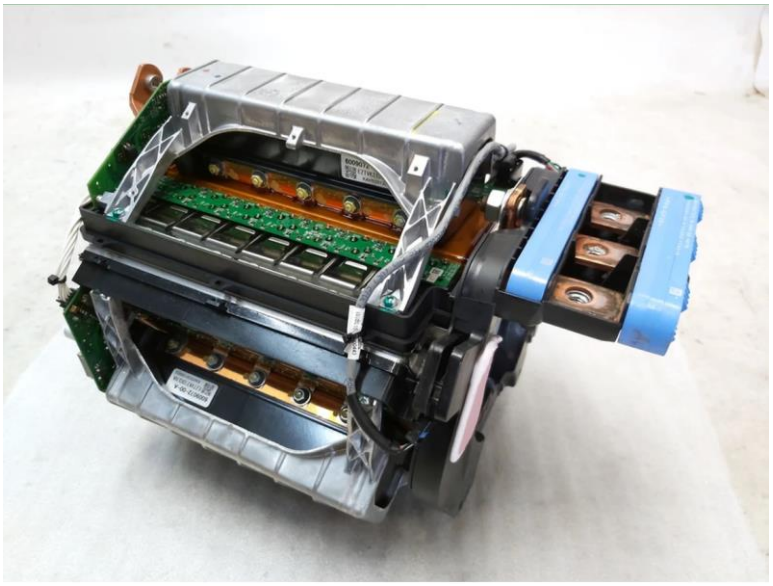


Рисунок 2.4 – Інвертор мотора (BASE) Tesla model [18]



Рисунок 2.5 – Infineon HybridPACK™ Drive CoolSiC™ (Модель: FS03MR12A6MA1B) [19]

Як варіант для системних плати драйверів транзистора можна використати Infineon EiceDRIVER серії 1ED301x (рис. 2.5). Їх функція полягає у підсиленні слабких сигналів від процесора до потужних імпульсів придатних для транзисторів.

Як варіант для конденсатору (DC– link) можна використати TDK Epcos серії B3277x. Для згладжування напруги цього достатньо.



Рисунок 2.6 – EiceDRIVER серії 1ED301x) [20]

Як частину системи менеджменту для захисту батареї можна використати плату BQ76PL455A–Q1 від Texas Instruments. Ця плата може контролювати струм заряду комірок батареї (рис. 2.6).

До датчиків які можна використати в такій системі слід віднести датчик дистанція для якого можна використати Continental ARS 408–21 с робочою частотою у 77ГГц, та дальністю роботи до 250 метрів.

Як датчик положення педалі можна використати Hella 6PV. Він видає лінійний сигнал від 0.5 до 4.5 В. в залежності від сили натискання на педаль. [21].

Для датчика швидкості автомобіля можна використати датчик обертів колів моделі Bosch через доступність та високу точність що дозволяє точніше використовувати ШІМ – генерацію рекуперації при зупинках.

Датчиком струму можна обрати безконтактний датчик моделі CAB 500–C/SP5 з великими діапазонами вимірювань, що дозволяє контролювати вхідну потужність рекуперації. Такі датчики спеціально розроблені для моніторингу батарей, через це в них гарна точність та великий тепловий діапазон праці.

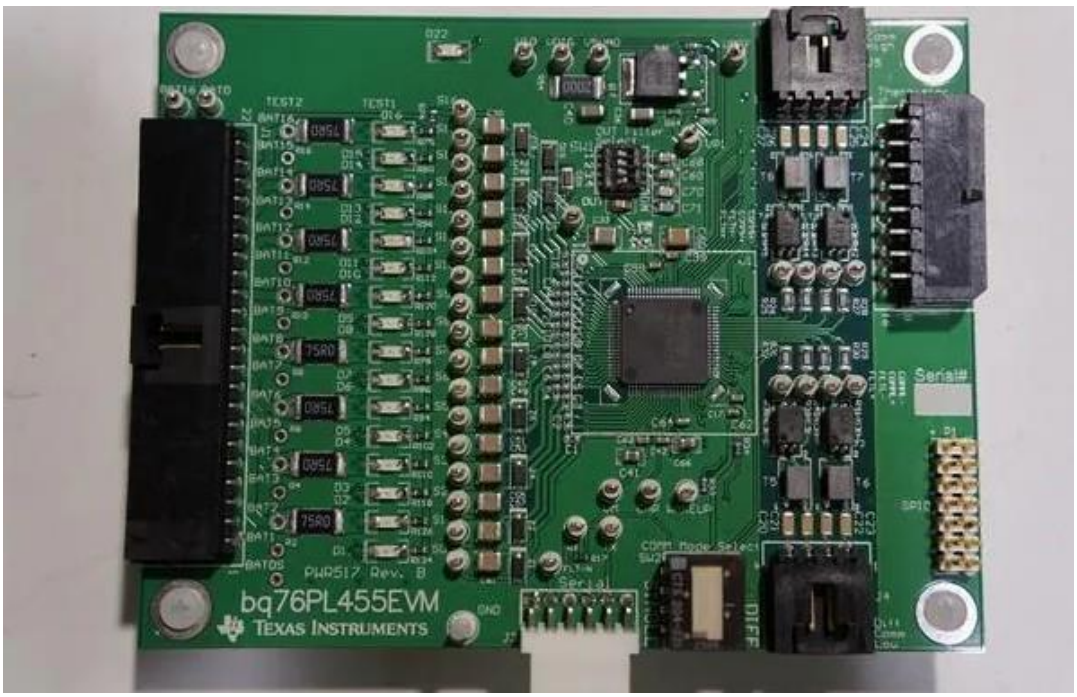


Рисунок 2.7 – плата BQ76PL455A–Q1 [22]

Основним мозком усієї системи рекуперації можна використати мікроконтролер ESP32 (рис. 2.7) через його доступність, швидкодію, можливість керування ШІМ та наявністю Wi – Fi, що дозволяє подальшу модернізацію.

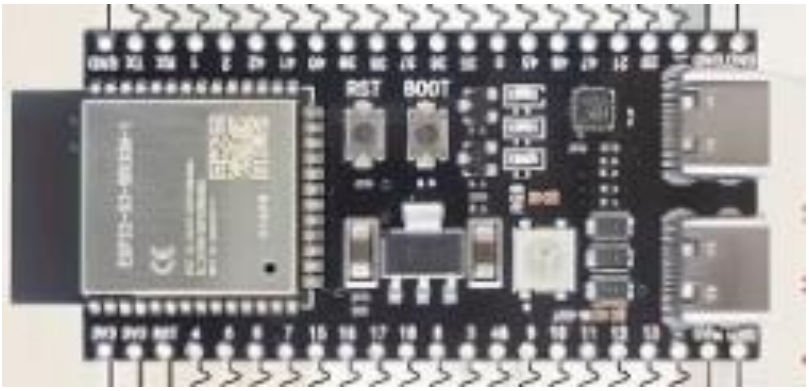


Рисунок 2.8 – ESP32 [23]

До допоміжних елементів такої системи можна віднести електричну помпу охолодження батареї та електрогідравлічний блок гальм як варіант до конфігурації обрані Без щіткова помпа Bosch PAD (12B).(рис. 2.8) та Bosch iBooster Gen 2 (рис. 2.9) через надійність.



Рисунок 2.9 – Насос охолоджуючої рідини Bosch [24]



Рисунок 2.10 – Bosch iBooster Gen 2 [25]

2.3 Рівняння та розрахунки ККД об’єкту автоматизації

Для підтвердження математичної моделі автоматизованої системи рекуперації енергії потрібно провести розрахунки для ефективного динамічного аналізу стійкості через середовище Matlab. Базою для цього аналізу виступають диференційні рівняння. Симуляції дозволяють досягти більш точних характеристик усієї системи та отримати приблизні значення ефективності рекуперації при різних умовах.

Вхідними даними для аналізу виступають диференційні рівняння та комплектація і структура самої системи, завдяки підбору елементів конфігурації можна визначити їх точні характеристики завдяки технічним каталогам. Відомо, що маса електромобіля m = 1746 кг, можна взяти ділянку відстанню у L = 1000 . а температуру близько T 10 °C для ефективної роботи батареї, швидкістю автомобіля буде вказано стале обмеження в місті у 60 км/год. Що дозволяє отримати швидкість автомобілю у метрах на секунду за допомогою формули швидкості (2.1).

$$v = \frac{t}{L} = \frac{36000}{1000} = 16.67 \frac{\text{м}}{\text{с}}, \quad (2.1)$$

Виходячи з цього значення швидкості (16.67 м/с), значення маси автомобіля (m) та рівняння випливає рівняння кінетичної енергії(2.2) (E_k) автомобіля для якого нам потрібна маса та швидкість.

$$E_k = \frac{1}{2} \times mv^2 = \frac{1}{2} \times 1746 \times (16.67)^2 \text{ Дж} = 242.6 \text{ кДж}, \quad (2.2)$$

Тепер можна розрахувати на представленій ділянці висоту зміни рельєфу (h) взявши за сталу ухил θ = 4°, в залежності від ділянки його можна змінити для моделювання більш точних розрахунків та для формули потенційної енергії на спуску(2.5) , яка дуже важлива для рекуперації енергії це є одним із найважливіших параметрів.

$$h = L \div sin(\theta)° = 1000 \div \sin(4)^{\circ} \approx 69.75 = 70 \text{ м}, \quad (2.3)$$

Отримавши значення зміни рельєфу можна зробити висновок, що якщо електрокар буд їхати до низу він у кінці маршруту зупиниться на 70 метрів нижче чим був від рівня моря.

Наступним кроком буде визначення коефіцієнта корисної дії елементів системи рекуперації (η) за допомогою формули розрахунку коефіцієнта корисної дії ккд(η) (2.4) Згідно технічній документації трансмісія автомобіля має $\eta_{\text{тр}}$ = 97%, тяговий двигун $\eta_{\text{дв}}$ = 94% а SiC MOSFIT інвертор $\eta_{\text{інв}}$ 0.98% це дозволяє отримати теоретичне ККД системи.

$$\eta = \eta_{\text{тр}} \times \eta_{\text{дв}} \times \eta_{\text{інв}} = 0.97 \times 0.94 \times 0.95 \approx 0.866 = 87\%, \quad (2.4)$$

Наступною формулою, яку варто використати є формула потенційної енергії (E_p) при спуску з урахуванням прискорення вільного падіння (2.5) для якої

використовують масу автомобіля, стале прискорення вільного падіння g = 9.81 м/с^2, та висоту зміни рельєфу h (2.3) з урахуванням ККД системи η.

$$E_{\text{р}} = \eta \times m \times g \times h \; 1746 \times 9.81 \times 70 \approx 1198978 \text{ Дж} = 1198.9 \text{ кДж}, \qquad (2.5)$$

Далі йде розрахунок ефективності рекуперативного гальмування з урахуванням ККД (2.4) в це рівняння визначає загальну енергію отриману при рекуперативному гальмуванні на даній ділянці (2.6).

$$E_r = \eta \times (E_{\text{р}} + E_k) = 0.87 \times (242.6 + 1198.9) \approx 1254.1 \text{ кДж}, \qquad (2.6)$$

Однією з останніх формул використаних у даному розділі є коригування коефіцієнту температурного впливу (2.7) на обраний акумулятор через навколишню температуру у 10°C є ідеальними, то й температурний вплив (T_f) = 96% згідно технічних відомостей батареї.

$$E_{adjusted} = \text{T}_f \times E_r = 0.96 \times 1254.1 \approx 1203.9 \text{ кДж}, \qquad (2.7)$$

Нажаль з урахуванням технічної документації, а не реальних значень при яких ККД зазвичай падав до 20 – 40% й ідеальних умов розрахунків без врахування різної місцевості та перепадів температури не тільки у батареї, а й у всього автомобілю кінцеве значення буде дорівнювати приблизно 150 – 200 кДж. Також важливо зауважити що данні розрахунки не враховують тормозний момент автомобіля.

3 ПРОЄКТУВАННЯ, СИМУЛЯЦІЯ ТА ВЕРИФІКАЦІЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ВІРТУАЛЬНИХ СЕРДОВИЩ

3.1 Проєктування електронної схеми керування автоматизованою системою рекуперації за допомогою віртуального середовища Wokwi

Wokwi це онлайн–симулятор для плат Arduino, Raspberry Pi Pico та ESP32, або навіть для кастомних плат. Цей симулятор дозволяє вивчати, досліджувати та будувати проєкти без фізичних плат [26].

В загальному сенсі такі онлайн–симулятори дозволяють перевірити справну роботу датчиків, реакції на різні алгоритми да дослідити логіку автоматизації за допомогою точного програмування, також такі онлайн середовища дозволяють тестувати проєкти витрачаючи на це менше часу та грошей ніж при реальних випробуваннях.

3.2 Вибір електронних компонентів

Створення віртуальної моделі завжди починається із підбору компонентів, які підходять по призначенню для реалізації макету, який допомагає вирішити проблеми із тестуванням пробних макетів різних проєктів.

До основного елементу таких макетів можна віднести мікропроцесорну плату, завдяки вдалому підбору елементів я маю змогу використати такий–самий мікропроцесор як і у розрахункових та алгоритмічних частинах.

Мікроконтролер ESP32 доступний та надійний вибір не тільки для тестового макета, а й для реальних проєктів (рис 3.1). Він дозволяє вобробляти сигнали з датчиків з високою точністю та виконувати складні обчислювальні алгоритми відповідно до вказаної логіки керування системою.



Рисунок 3.1 – Мікроконтролер ESP32 у середовищі Wokwi [24]

Наступним елементом, який буде задіяний у створенні макета можна виділити LED – дисплей для виводу інформації про внутрішні процеси і демонстрації стабільної роботи датчиків, також він виводить поточний статус батареї для демонстрації роботи алгоритмів.

Хоча LED – дисплей і є одним із головних елементів для візуалізації процесів у таких середовищах, він не являється необхідним елементом для моєї системи і буде застосований виключно для демонстрації у середовищі. Зазвичай його присутність пов’язана з використанням асинхронного інтерфейсу I2C, це дозволяє зменшити кількість задіяних пінів та підвищити надійність схеми через легке підключення (рис 3.2).

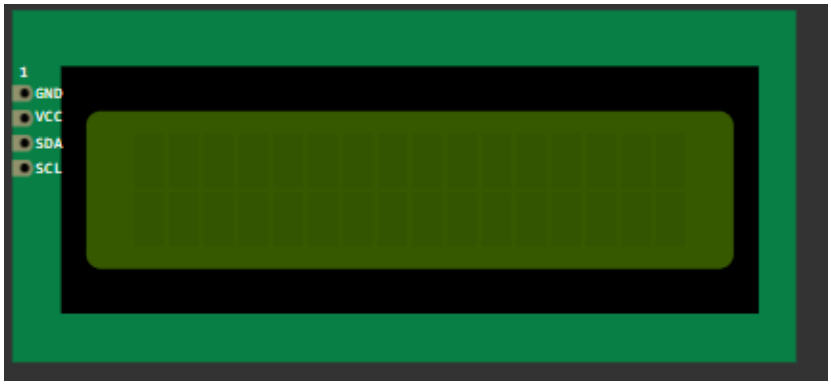


Рисунок 3.2 – LED – дисплей у середовищі Wokwi

Наступним елементом потрібним для візуалізації схеми є світлодіоди LED (рис. 3.3), вони виступають у якості показників спрацювання алгоритму при певних обставинах що дозволяє імітувати інші пристрої і їх реакцію на алгоритми при

певних обставинах. Це дозволяє дослідити як себе можуть повести силові та виконавчі органи електромобіля завдяки симуляції.

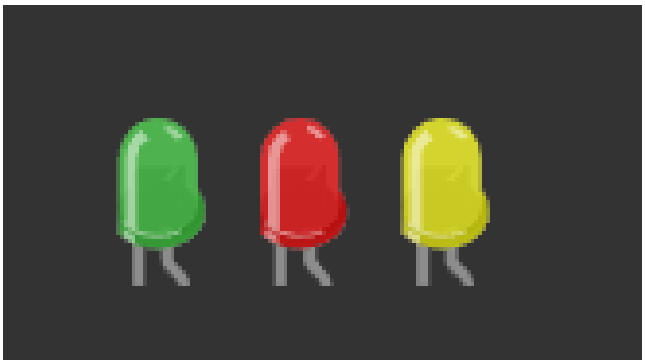


Рисунок 3.3 – Світлодіоди LED у середовищі Wokwi

Наступним елементом якій буде використовуватися у середовищі будуть резистори з визначеним опаром. Через те що світлодіоди замітають інші пристрої з вбудованими резисторами, необхідно імітувати їх існування для точної імітації системи у вигляді макету.

В залежності від типу приладу або системи резистори можуть бути дуже різні, вони є пасивними елементами електричного кола, які використовують для створення електричного опору, що дозволяє знижувати напругу або обмежувати кількість електроенергії. В незалежності від електроприладу резистори є однією з його складових і входять у стандартну конфігурацію більш ніж 99% електроприладів, вони дозволяють захищати компоненти та забезпечувати стабільність. Винятком з цього твердження можна назвати лише прості електричні кола. У разі коли прилади складаються лише з джерел живлення, вимикача та активного навантаження [27].

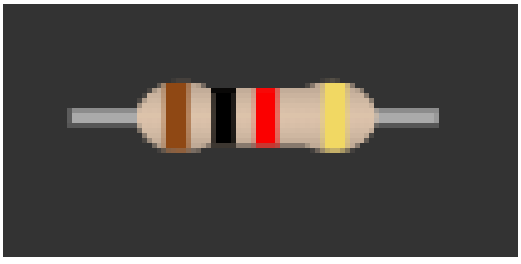


Рисунок 3.4 – Резистор у середовищі Wokwi

Останнім компонентом який я буду використовувати для створення макету є потенціометри (рис 3.5), завдяки потенціометрам можна імітувати дуже багато показників датчиків, я буду використовувати їх для емуляції показників температури та заряду батареї, положення керма та радару, який буде перевіряти наявність об’єктів у межі 50 метрів та надавати ці данні до мікропроцесора для обчислювання та запуску логіки алгоритмів.

Через легкість програмування у середовищі Wokwi потенціометри можуть імітувати дуже великий перелік датчиків та сигналів.

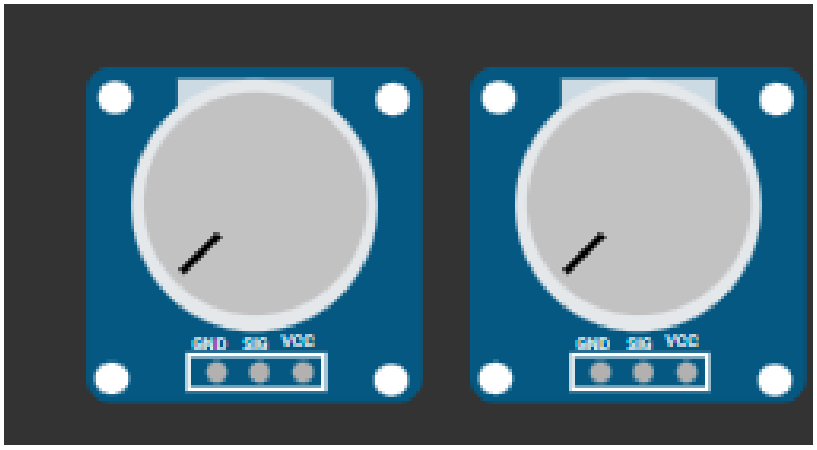


Рисунок 3.5 – Потенціометри у середовищі Wokwi

3.3 Сбірка схеми та розробка алгоритмів управління системою рекуперації

Для точної перевірки спрацювання алгоритмів рекуперації було створено віртуальний макет у віртуальному середовищі для моделювання Wokwi (рис 3.6). Це дозволило використати основні компоненти вибрані для конфігурації або їх аналоги за допомогою інших інструментів наданих онлайн – середовищем, наладити роботу компонентів та детально розглянути алгоритми у різних ситуаціях.

Це дає можливість забезпечити точне, швидке виконання алгоритмів основним керуючим приладом та стабільно реагувати залежно від зміни показників датчиків, їх подальшої обробки і приймати рішення на цій базі, після чого формувати сигнали до виконавчих модулів, задіяних в алгоритмах.

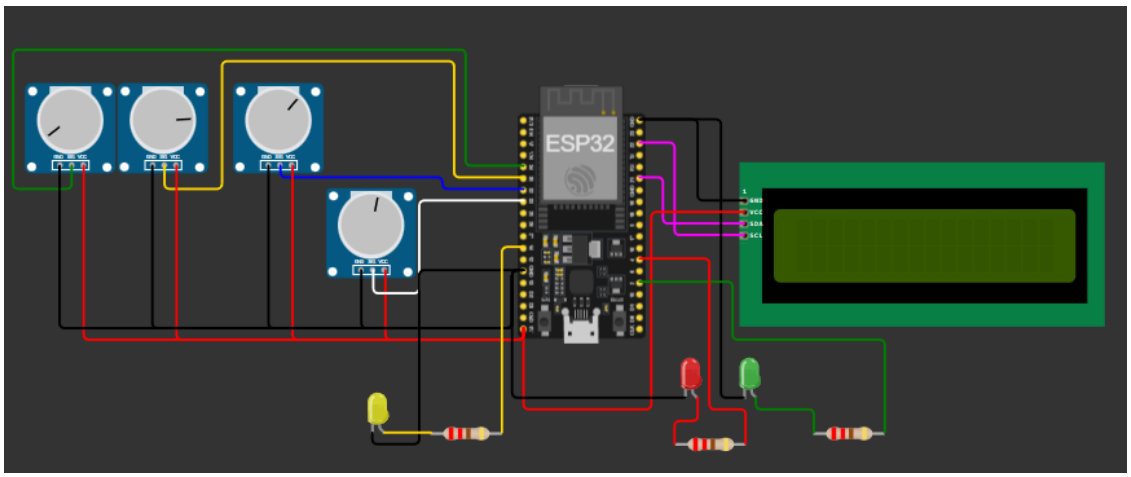


Рисунок 3.6 – Віртуальна модель макета автоматизованої системи рекуперації енергії у середовищі Wokwi

На цій віртуальній моделі макету можна побачити усі вказані елементи або їх аналоги підключені до центрального обчислювального мікропроцесора. Потенціометри реалізовані та налаштовані для імітації різних показників, зліва направо датчик положення педалі, датчик рівню заряду батареї, датчик відстані та датчик температури батареї. Усі датчики підключені до центрального мікропроцесора, який обробляє їх сигнали та формує нові до інших виконавчих модулів, заміною яких виступають світлодіоди.

Це дозволяє точно налаштувати показники для імітації різних ситуації, від рекуперативного гальмування до повної зупинки рекуперації через критичну ситуацію що є мінімальними вимога до автоматизованої системи рекуперації енергії.

Для виведення і сприймання візуальної інформації підключено LED – дисплей з протоколом I2C, для спрощення схеми і можливості візуальної демонстрації різних ситуацій с показниками отриманими з датчиків.

В подальшому завдяки наявності блоку wifi або через пряме підключення до бортової системи можливо реалізувати вихід показників прямо не тільки на дисплей, а й на телефон.

Програмна частина макету побудована на базі опитування датчиків циклічно та реакцією на виконання умов у разі збігання значень.

Завдяки вбудованим апаратним таймерам у мікроконтролер є можливість використати функцію analogWrite(). Вона дозволяє формувати високочастотні імпульси керування затворами транзисторів на фіксованій частоті.

3.4 Опис програмного забезпечення системи керування

Програмне забезпечення мікроконтролера ESP32 розроблене у середовищі Arduino IDE може використовувати модульний підхід. Це забезпечує фіксацію показників датчиків, їх обробку, перевірку та реакцію на них, та формування сигналів відповідно до показників. Це дозволяє розділити складний процес рекуперації на чотири послідовні, ізольовані та за потреби пов’язані у реальному часі модулі.

Першим кроком в програмному забезпеченні є ініціалізація і підключення бібліотек, оголошення константних цілочисельних змінних пінів центрального обробляючого мікропроцесора і їх ініціалізація.

Лістінг коду – 3.1 згідно додатку Б

```
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
const int BRAKE_PEDAL_PIN = 34;
const int BATTERY_SOC_PIN = 35;
const int ADAS_RADAR_PIN = 32;
const int BATTERY_TEMP_PIN = 33;
const int REGEN_TO_BATTERY_LED = 2;
const int MECHANICAL_BRAKE_LED = 4;
const int COOLING_PUMP_LED = 14;
```

Початковий блок включає в себе підключення бібліотеки та оголошення аналогових ходів, до яких підключаються усі світлодіоди та потенціометри виконуючі функції датчиків та модулів.

Лістінг коду – 3.2 згідно додатку Б

```
void setup() {
Serial.begin(115200);
pinMode(REGEN_TO_BATTERY_LED, OUTPUT);
pinMode(MECHANICAL_BRAKE_LED, OUTPUT);
pinMode(COOLING_PUMP_LED, OUTPUT);
lcd.init();
lcd.backlight();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("SiC SDR System");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("MCU ESP32 Ready");
delay(2000);
lcd.clear();
```

Цей блок коду відповідає за функцію початкового налаштування контролера, він виконується лише раз під час подачі живлення або перезавантаження системи.

Спочатку відбувається зв’язок з комп’ютером через який за потреби можна відправити графіки або діагностичні дані. Далі три цифрові контакти процесора які виходять на світлодіоди, які замінюють інвертор рекуперації, блок механічних гальм і помпу охолодження. Наступним кроком є ініціалізація запуску дисплею де виводиться спочатку ("SiC SDR System"); а потім повідомлення про готовність мікроконтролера, після чого очищає екран та готує його до відображення поточних даних.

Лістінг коду – 3.3 згідно додатку Б

```
void loop() {
int brakePress = map(analogRead(BRAKE_PEDAL_PIN), 0, 4095, 0, 100);
int batterySoC = map(analogRead(BATTERY_SOC_PIN), 0, 4095, 0, 100);
 nt distanceToCar = map(analogRead(ADAS_RADAR_PIN), 0, 4095, 0, 100);
int batteryTemp = map(analogRead(BATTERY_TEMP_PIN), 0, 4095, –10, 60);
int targetRegenPower = 0;
int batteryRegenPWM = 0;
```

```
bool mechBrake = false;
bool pumpActive = false;
String statusMsg = "DRIVE";
```

Цей фрагмент коду відповідає за початок роботи головного циклу процесора, який постійно повторюється під час роботи мікроконтролера, цей етап відповідає за збір даних з датчиків та готує зміні для подальших розрахунків, через те що процесор ESP32 має 12 – бітний аналогово – цифровий перетворювач, зчитування відбувається у вигляді цифрових значень від 0 до 4095 які трансформуються у зрозумілі значення завдяки функції масштабування.

Після цього в оперативній пам’яті створюються та обнуляються змінні необхідні для приймання рішень, останнім рядком у цьому блоці виводиться режим, який зараз працює у випадку відсутності збігання с необхідними параметрами для спрацювання інших режимів.

Лістінг коду – 3.4 згідно додатку Б

```
if (distanceToCar < 60 && distanceToCar > 20) {
   pumpActive = true;
   statusMsg = "ADAS PRE–COOL";

if (brakePress > 5) {
   targetRegenPower = map(brakePress, 0, 70, 0, 255);
   if (brakePress > 70) mechBrake = true;
   statusMsg = "MANUAL REGEN";
} else if (distanceToCar <= 50 && distanceToCar > 15) {
   targetRegenPower = map(distanceToCar, 50, 20, 50, 255);
   statusMsg = "ADAS REGEN";
   if (distanceToCar <= 20) mechBrake = true;
}
```

Наступний блок відповідає за підготовку гідравліки у діапазоні 20–60% для вмикання насосу гальмування заздалегідь на потребу екстреного гальмування.

Друга частина відповідає за момент коли водій трохи натиснув педаль газу, але не більше 70 відсотків, що включає режим рекуперації, у разі перевищення цього показника вмикається режим суміжного гальмування.

Третя частина цього блоку спрацьовує у разі коли педаль гальмування не натиснута, а перешкода наближається, якщо відстань падає до 20% підключається суміжне гальмування, рекуперація повністю зупиняється.

Лістінг коду – 3.5 згідно додатку Б

```
int maxBatteryLimit = 255;
if (batterySoC >= 95) {
   maxBatteryLimit = 0;
   statusMsg = "BMS OVERCHARGE";
} else if (batteryTemp < 15) {
   maxBatteryLimit = map(batteryTemp, –25, 15, 0, 180);
} else if (batteryTemp > 45) {
   maxBatteryLimit = map(batteryTemp, 45, 60, 180, 0);
   pumpActive = true;
   statusMsg = "BMS OVERHEAT";
```

Цей блок коду відповідає за перевірку показників з батареї, у разі заряду батареї більше за 95 відсотків рекуперація повністю вимикається для запобіганню перезарядки.

Наступною частиною цього блоку йде перевірка температури батареї, при виході за доступні значення рекуперація може повністю зупинитися в залежності від мінімальної та максимальної температури.

Лістінг коду – 3.6 згідно додатку Б

```
if (targetRegenPower > 0) {
   if (targetRegenPower <= maxBatteryLimit) {
     batteryRegenPWM = targetRegenPower;
   } else {
     batteryRegenPWM = maxBatteryLimit;
     mechBrake = true;
```

У цьому блоці коду йде перевірка відповідності потужності відповідно до лімітам системи менеджменту батареї, у разі якщо потужність рекуперації вища за те що може прийняти батарея частина рекуперації йде на механічні тормоза.

Лістінг коду – 3.7 згідно додатку Б

```
analogWrite(REGEN_TO_BATTERY_LED, batteryRegenPWM);
digitalWrite(MECHANICAL_BRAKE_LED, mechBrake ? HIGH : LOW);
digitalWrite(COOLING_PUMP_LED, pumpActive ? HIGH : LOW);
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("T:" + String(batteryTemp) + "C SoC:" + String(batterySoC) + "%   ");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("R:" + String(batteryRegenPWM) + " " + statusMsg + "    ");
Serial.print("Temp:"); Serial.print(batteryTemp);
Serial.print(",SoC:"); Serial.print(batterySoC);
Serial.print(",Distance:"); Serial.print(distanceToCar);
Serial.print(",Brake_Pedal:"); Serial.print(brakePress);
Serial.print(",Regen_PWM:"); Serial.print(batteryRegenPWM);
Serial.print(",iBooster:"); Serial.println(mechBrake ? 100 : 0);
delay(200);
```

Останній блок не робить чогось особливого, він відправляє сигнал на мікропроцесор і виводить інформації на дисплей, після чого с затримкою у 200 мілісекунд починає цикл знову.

3.5 Віртуальна симуляція різних станів системи рекуперації

Завдяки дуже точній модуляції такі симулятори дозволяють змоделювати певні ситуації та перевірити їх на працездатність, першим етапом можна назвати ініціалізацію портів та їх опитування, отримання первинних показників із датчиків та вивід на дисплей рівень заряду, температуру, режим руху та ступінь натискання педалі газу.

Штатний режим роботи характеризується тим що логіка програми швидко реагує на різні параметри, завдяки тому що першим пріоритетом є збереження батареї будь яких критичних значень.

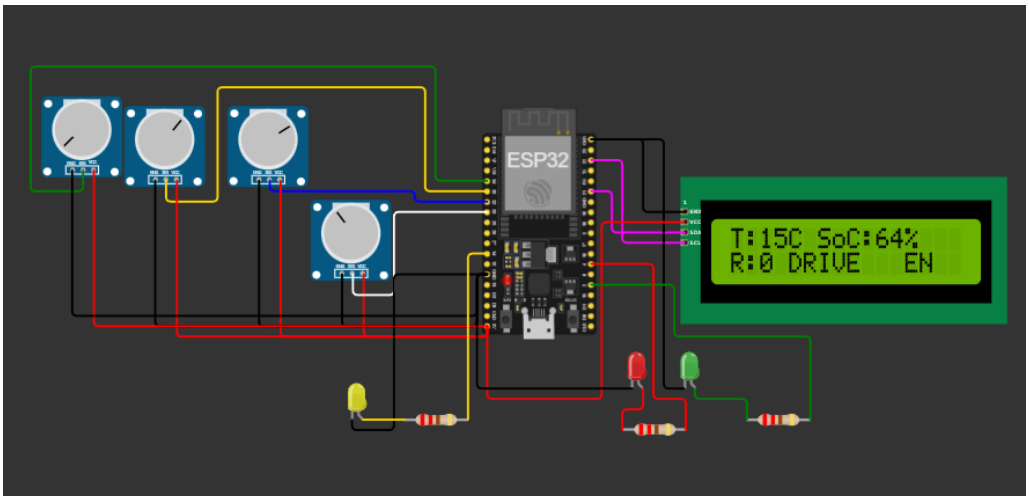


Рисунок 3.7 – Стан системи у поточному режимі при відсутності проблем та гальмування

При імітації появи перешкоди, яка наближається у відстані менше за 50 метрів без натискання педалі гальма система автоматично надсилає сигнал на пристрій с охолоджувачем с антифризом (в даному випадку жовтий світлодіод) для запобігання майбутньому тепловому удару. На LCD – дисплеї у цей час вказується ввімкнення цього режиму з написом ADAS PRE–Cool (рис 3.8).

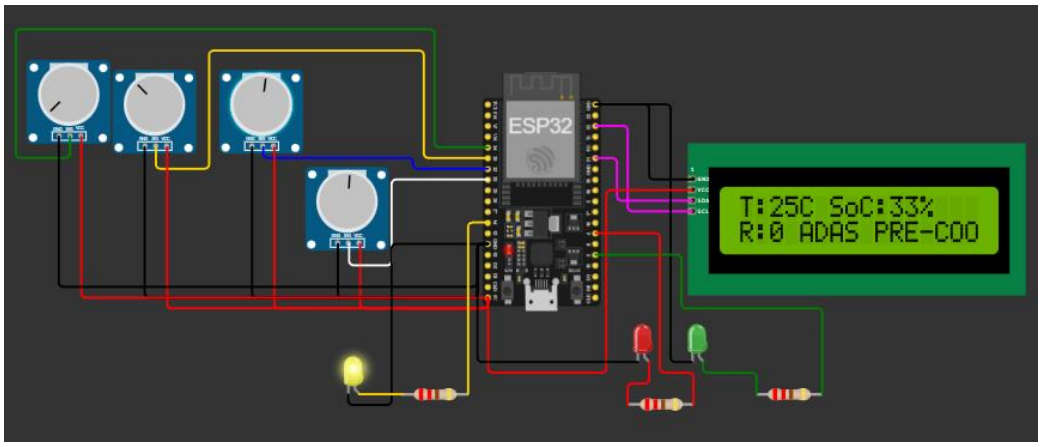


Рисунок 3.8 – Вигляд системи при спрацюванні алгоритми для охолодження батареї заздалегідь

Інша реакція, яка може відбутися у цій системі згідно показанням датчиків це режим чистої рекуперації, це моделює легке міське гальмування, немає критично близьких перешкод, показники датчиків в нормі, відбувається плавне гальмування що дозволяє спокійно, використовуючи рекуперацію, перевести кінетичну енергію гальмування у електричний струм.

Візуалізація стабільної реакції є загоранням зеленого світлодіода, що режим рекуперації працює та виводу на екран надпису MANUAL REGEN (рис 3.9). У разі коли перепона наближується а реакції від водія немає ж система автоматично вмикає помпу (жовтий світлодіод) та режим рекуперації і готується до різкого гальмування.

Змінами у цій ситуації стане те що також ввімкнеться жовтий світлодіод та напис на LCD – дисплеї зміниться на ADAS REGEN.

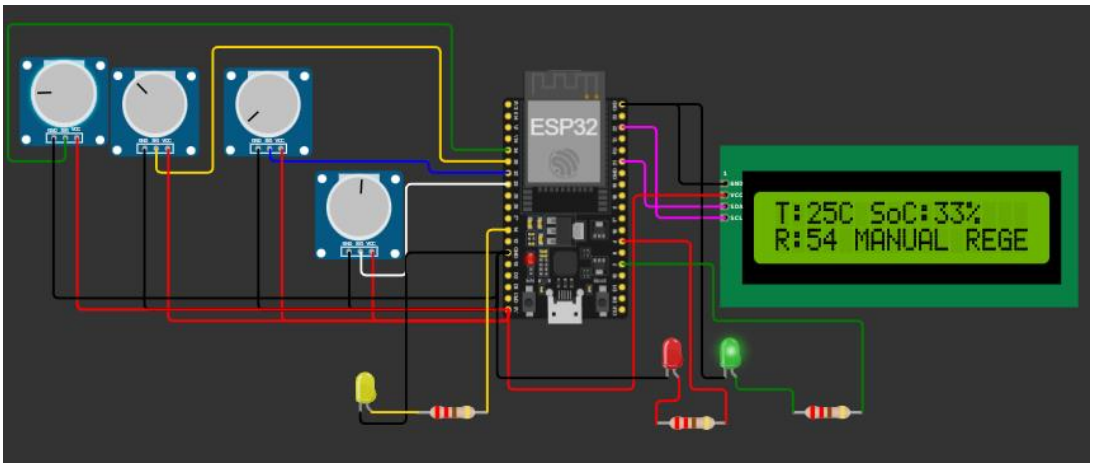


Рисунок 3.9 – Вигляд системи при спрацюванні алгоритму плавної рекуперації

Наступним станом системи можна назвати режим комбінованого гальмування, він спрацьовує при різкому гальмуванні що приводить до швидкої деградації літію батареї без захисту а потужності самої рекуперації для повільної плавної зупинки, як можна побачити на макеті (рис 3.10) вмикаються відразу зелений та червоний світлодіоди що імітують роботу режиму рекуперації та запуску блоку Bosch iBooster який підтискає механічні колодки, що допомагає двигуну знизити швидкість автомобіля.

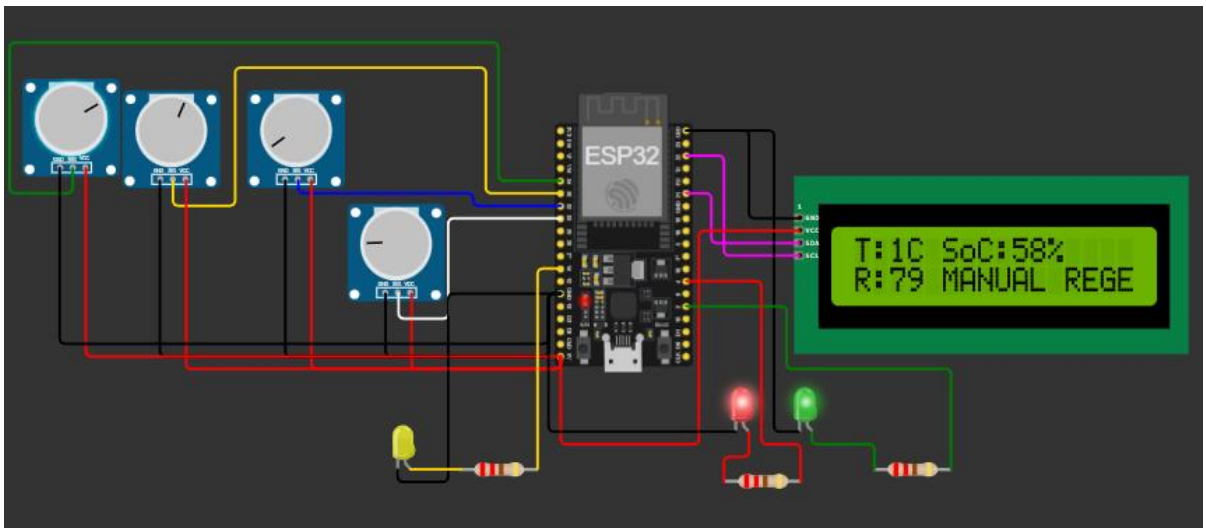


Рисунок 3.10 – Вигляд системи при спрацюванні алгоритму суміжного гальмування

Останнім режимом симуляції який можна продемонструвати є алгоритм захисту батареї у випадку перегріву або повної зарядки акумулятора. Як можна побачити на макеті (рис 3.10) це у випадку перегріву приводить до помпи охолодження при температурі батареї у 45°C рекуперація при цьому продовжується, у разі подальшого зростання температури до 55°C рекуперація повністю припиняється і вмикається червоний світлодіод (блок Bosch iBooster) для переводу усієї енергії, яка повинна була йти у батарею на механічні колодки.

У випадку коли батарея перезаряджена, для уникання таких ситуацій режим рекуперації вимикається і працює лише червоний світлодіод (блок Bosch iBooster).

Підсурмлюючи результати моделювання можна зробити висновки що мікропроцесор стабільно отримує показники с датчиків та реагує відповідно до прописаних алгоритмів у різних ситуаціях. Те що ці алгоритми працюють стабільно демонструє надійність алгоритмів.

Не зважаючи на те що модель побудована накволо ідеальних показників, вона демонструє стійку реакцію до різних значень, що відкриває можливості для подальшого додавання різних алгоритмів та елементів.

3.6 Моделювання контуру САК у програмному середовищі MATLAB/Simulink

Для верифікації автоматизованої системи рекуперації було проведено блочне моделювання у середовищі MATLAB/Simulink. Процес такого моделювання ділиться на декілька етапів:

– підбірка структурної схеми з блоків;

– налаштування з’єднань блоків між собою;

– налаштування властивостей блоків;

– симуляція схеми.

Для початку така симуляція, як було вказано вище починається зі збірки структурної схеми з блоків (рис. 3.11). Для цієї побудови цієї схеми було використано декілька блоків.

Одним із таких блоків виступає Matlab function, який виступає у ролі обчислювального комп’ютера, він обчислює над ходячі сигнали та видає значення.

Наступним невід’ємним елементом є інтегратор, його основна функція математичне моделювання накопичувальних процесів у часі.

Третім блоком який був використаний для побудови схеми був блок передаточної функції для моделювання динамічного запізнення та інерції напівпровідникових ключів інвертора.

Четвертим блоком був обраний елемент step для імітації збурень, в даному випаду натискання педалі гальмування.

П’ятим блоком було обрано блок gain для множення сигналів на постійні коефіцієнти електромобіля.

Шостим блоком використано блок sum для обчислювання підсумкового поточного рівня заряду батареї.

Сьомий блок був обраний constant для імітації статичних сигналів для можливості підставлення значень в ручну, для зручності моделювання

Восьмий блок був обраний transport delay для усунення математичного зациклення розрахунку у часі.

Останнім блоком є невід'ємний елемент будь–якої симуляції scope, він виконує функції віртуального осцилографа для візуалізації процесів та зняття графіків.

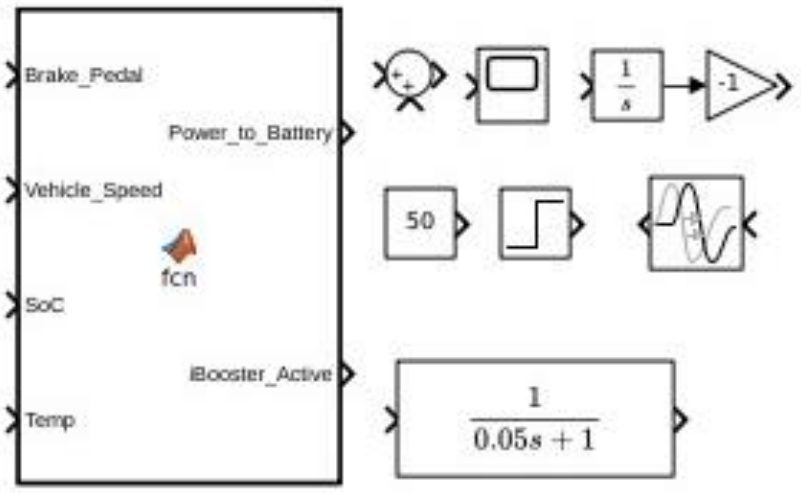


Рисунок 3.11 – Підбір блоків для побудови симуляції

Наступним кроком є налаштування з'єднань блоків між собою с врахуванням наступних змін для можливості подальшого вдосконалення схеми (рис 3.12).

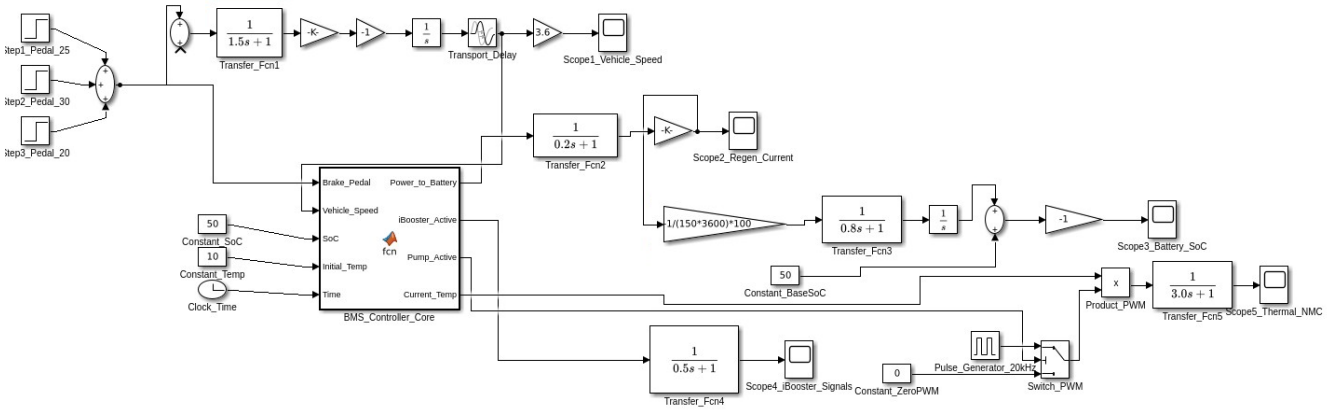


Рисунок 3.12 – Встановлення зв'язківка між блоками у віртуальному середовищі Simulink

Третім етапом моделюванні можна назвати налаштування усіх властивостей блоків, в даному випадку виділяється блок Matlab function, який вміщує в себе код алгоритмів, обмежувачів, чисельні дані отримані із технічного паспорту моделі

машини, найменування входів та виходів з цього блоку та розрахунків більшої частини схеми.

Зразок коду – Matlab function 3.8

```
function [Power_to_Battery, iBooster_Active] = fcn(Brake_Pedal, Vehicle_Speed, SoC, Temp)
Power_to_Battery = 0.0;
iBooster_Active = 0.0;
Mass = 1746.0;
Efficiency = 0.90;
maxBatteryLimit = 0.96;
if SoC >= 98.0
maxBatteryLimit = 0.0;
end
Acceleration = (Brake_Pedal / 100.0) * 3.5;
Total_Brake_Power = Mass * Acceleration * Vehicle_Speed;
if Brake_Pedal <= 30.0
Power_to_Battery = Total_Brake_Power * Efficiency * maxBatteryLimit;
iBooster_Active = 0.0;
else
Max_Safe_Power = (30.0 / 100.0) * 3.5 * Mass * Vehicle_Speed;
Power_to_Battery = Max_Safe_Power * Efficiency * maxBatteryLimit;
iBooster_Active = 1.0;
end
end
```

Наступним згідно порядку додавання можна виділити налаштування інтеграторів в першому з яких вказана швидкість автомобіля отримана з формули у другому пункті (2.1), а у другому інтеграторі встановлені значення для математичної інтеграції за часом вхідний струм рекуперації налаштований на початкові умови (рис. 3.13).

Третім блоком який потребує налаштування був блок передаточної функції для моделювання динамічного запізнення напівпровідникових ключів інвертора. В налаштуваннях цього блоку використовується стала часу запізнення у 50 мс (рис. 3.14).

Четвертий блок step відповідає за симуляцію водієм натискання педалі гальмування, в даному випадку плавного, і потребує налаштування у вигляді початкового значення та кінцевого значення, а також у вигляді кроку часу, через який значення змінюється (рис. 3.15).

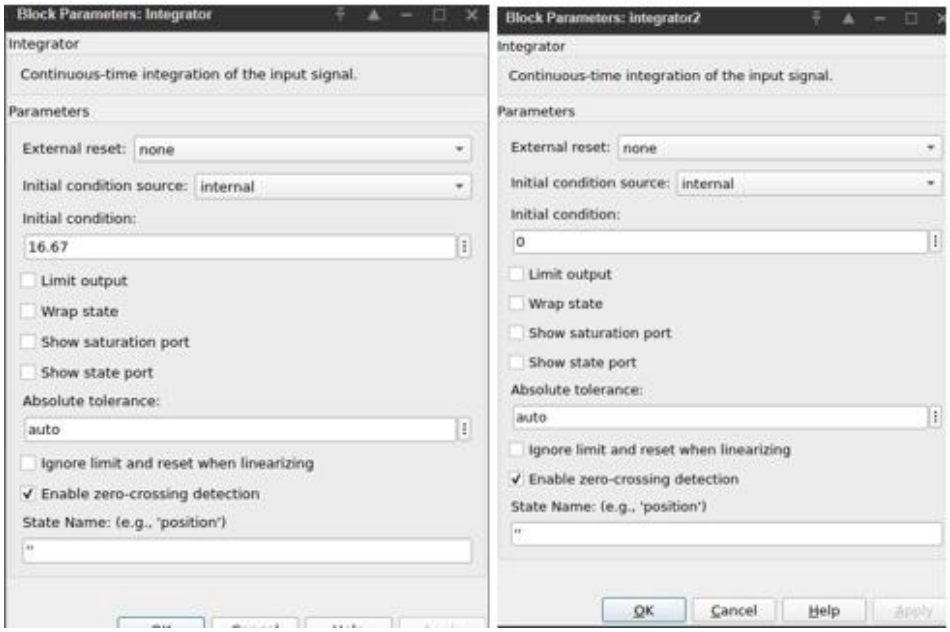


Рисунок 3.13 – Налаштування інтеграторів

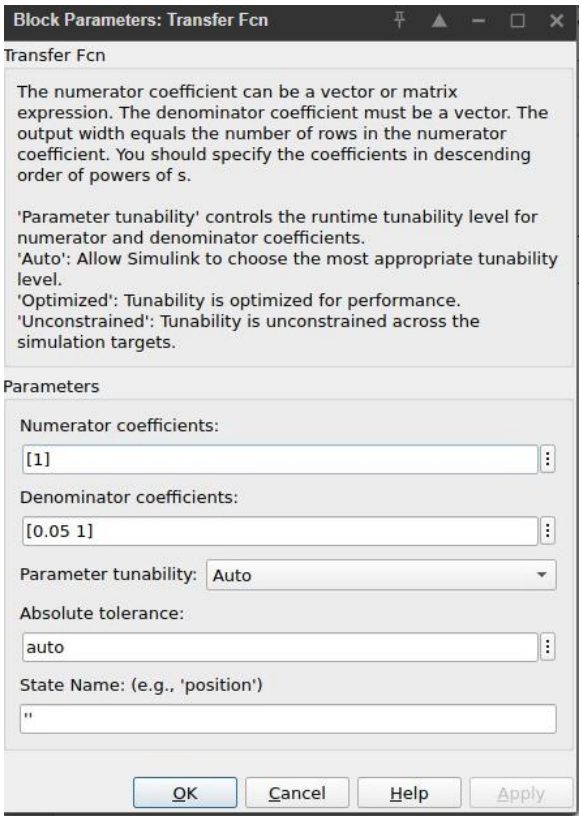


Рисунок 3.14 – Налаштування блоку передаточної функції

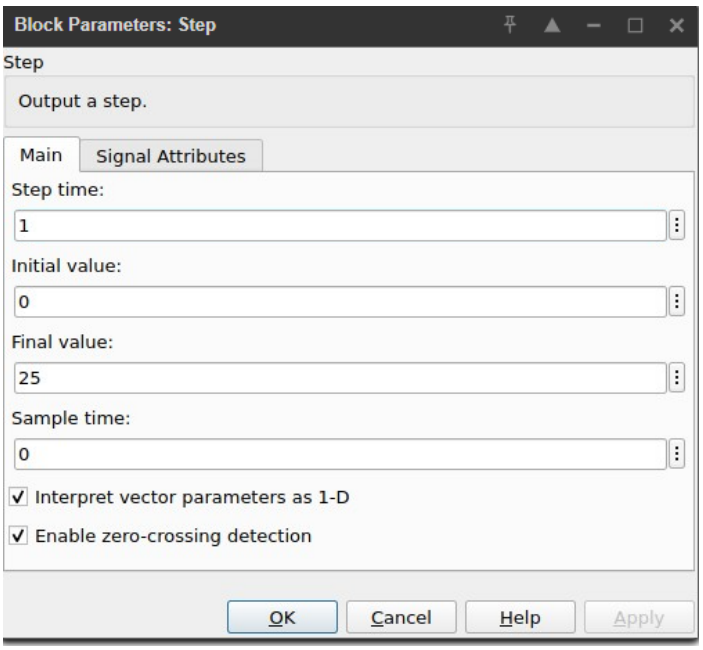


Рисунок 3.15 – Налаштування блоку step

П’ятий блок, використаний в схемі gain відповідає за множення сигналів на постійні фізичні константи. В схемі використано 5 таких блоків:

– перший блок задає максимальне екстрене гальмування автомобіля (3.5/100);

– другий з від’ємним знаком (-1) для перетворення прискорення на гальмування;

– третій переводить метри на секунду в кілометри на годину ;

– четвертим блоком gain вати розрахованої потужності діляться на номінальну напругу батареї (1/400 В) обчислюючи струм рекуперації в амперах для п’ятого блоку;

– п’ятий переводить ампери струму заряду в відсотки ємності батареї (рис. 3.16).

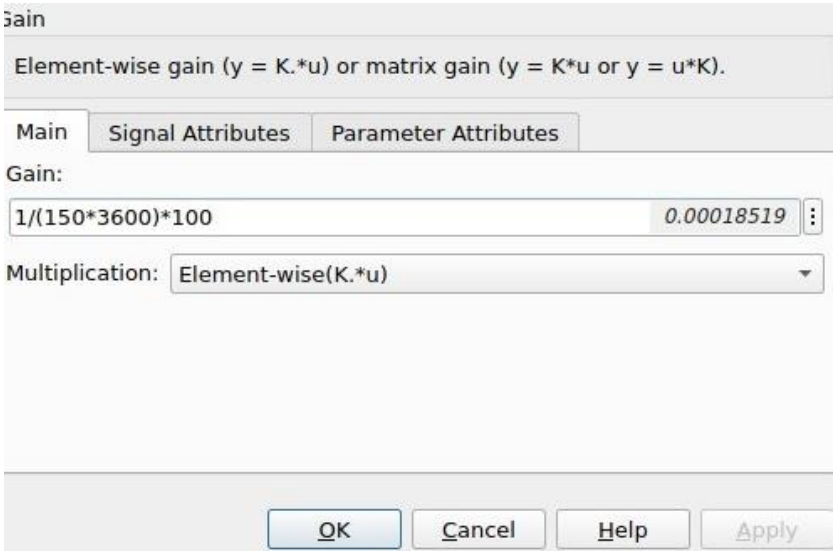


Рисунок 3.16 – Налаштування п’ятого блоку gain.

Шостий блок sum не потребує зміни налаштувань у даній конфігурації схеми його призначення приймати згенерований другим інтегратором сигнал секунд і додавати його до початкового заряду акумулятора.

Сьомий блок const використовується для модуляції значень у даній конфігурації схеми, температури батареї, початкового заряду батареї.

Восьмий блок потребує вказання затримки сигналу на мізерний крок у часі (10 мс) від інтегратора до входу блоку Matlab function для імітації часу дискретизації.

Останній блок scope, як вже було вказано виконує функцію віртуального осцилографа, при тому що він має налаштування, стандартних налаштувань достатньо для його справної роботи.

У четвертому етапі моделювання можна виділити симуляції схеми та створення графіків за допомогою блоків scope.

Якщо розглянути отримані графіки можна побачити на першому графіку зміну швидкості автомобіля до і після натискання педалі гальмування, це доводить що гальмування у режимі рекуперації є стабільним та плавним.

У цьому режимі роботи алгоритмів при рекуперації і критичній ситуації відбувається стабільно і згідно показникам графіку у цьому режимі повна зупинка електромобіля відбудеться за 30 секунд, змінюючи кут по мірі натискання педалі гальмування (рис. 3.17).

На другому графіку можна побачити підняття заряду батареї при рекуперації, і її подальший лінійний хід пов’язаний із зміною режиму на критичний (рис. 3.18). З цього графіку можна зробити виводи про спрацювання алгоритмів, діючих у різних режимах роботи системи.

На третьому графіку можна побачити поступове збільшення температури починаючи від начального заряду тепла та подальшого його росту у різних режимах пов’язаних із застосування плавно сповільнюється відповідно до алгоритмів роботи системи протидії перегріву під час нагрівання батареї автомобіля (рис 3.19). З цього можна зрозуміти що під час роботи режимів тепло постійно надходить до батареї та підвищує її температуру.

Данні графіки демонструють справну роботу алгоритмів та доцільність використання цього віртуального середовища для моделювання систем такого типу.

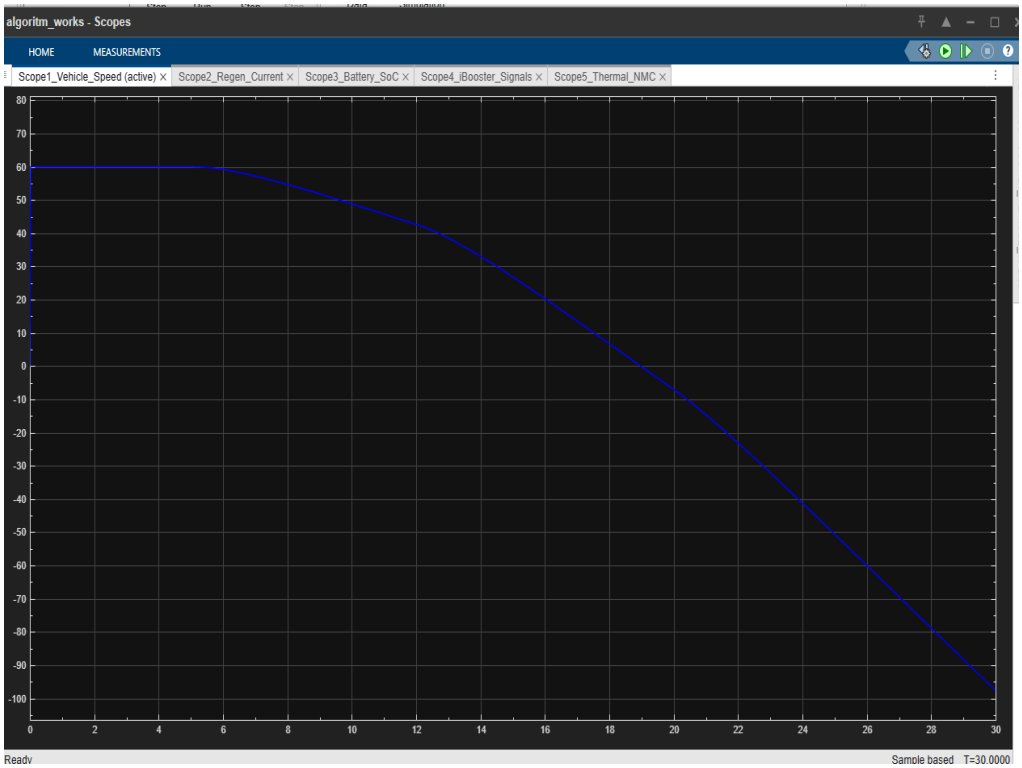


Рисунок 3.17 – Графік падіння швидкості при режимі рекуперації енергії

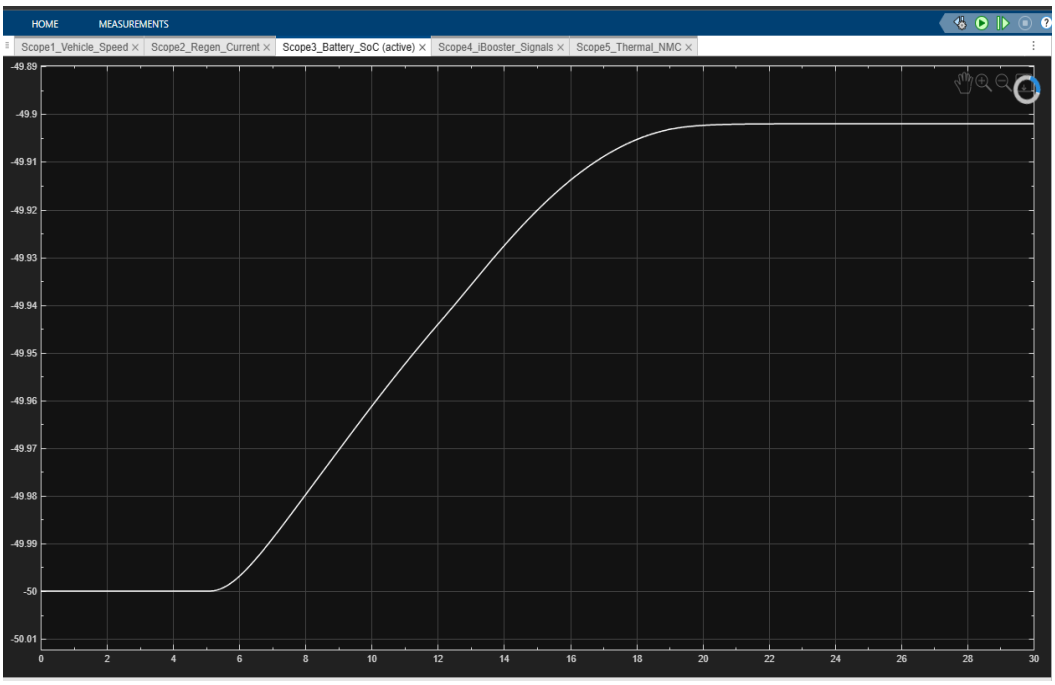


Рисунок 3.18 – Графік заряду батареї під час зміни режимів роботи системи

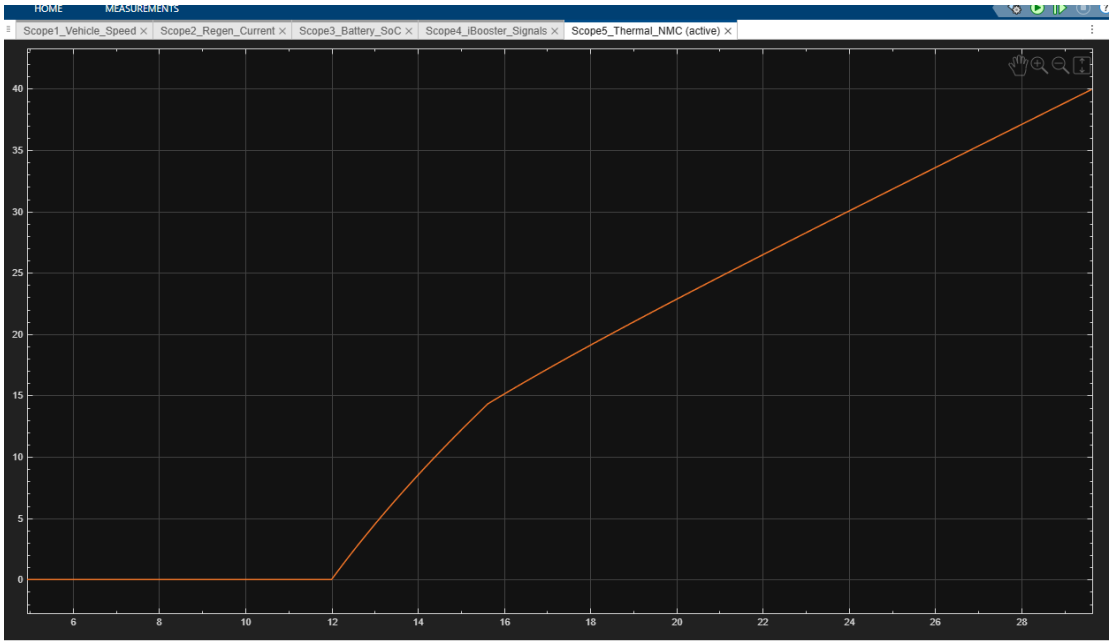


Рисунок 3.19 – Графік підвищення температури та його зниження шляхом застосування помпи при різних режимах роботи системи

Характеристики отриманих графіків доказують точність налаштування алгоритмів для даного випадку отриманих показників. завдяки точному налаштуванню програмного середовища simulink можна покращити ці алгоритмі, додати нові гілки в залежності від використаного обладнання. Це дозволяє

оптимістично ставитись до подальших вдосконалень цієї або схожих моделях на шляху до сталих цілей розвитку.

3.7 Охорона праці

При розробці та експлуатації автоматизованої системи рекуперації енергії було враховано вимоги техніки безпеки та охорони праці. Автоматизована система рекуперації енергії поєднує у собі електричні та акумуляторні компоненти, що свідчить про те що основними ризиками є ураження електричним струмом та можливість отримання травм при неправильному поводженні з акумулятором.

Для забезпечення безпечної роботи та захисту користувачів у проєкті реалізовано декілька технічних і програмних рішень:

– електробезпека: Усі електронні елементи мають бути розташовані в середині корпусу електромобіля, мати ізоляцію та знеструмлення для унеможливлення випадкового контакту з частинами системи під напругою;

– програмний захист: (аварійний режим): у алгоритмах керування автоматизованою системою рекуперації на постійному потоку встановлено відстеження заряду акумулятору, його температури, та потужності заряду який надходить для зарядки. У разі збігання будь–якого з цих показників система рекуперацій негайно зупиняє усі процеси рекуперації окрім суміжного гальмування, переводить увесь заряд для батареї на тормозні колодки для його гасіння у вигляді тепла, ізолює та за потреби охолоджує батарею при загрозі зіткнення для запобіганню кінетичних, електричних та теплових пошкоджень батареї. До цього також входять алгоритми запобігання що дозволяє вмикати запобіжні заходи до виникнення критичних ситуацій;

– пожежна безпека: блок акумулятору та інші блоки системи рекуперації енергії мають вбудовані резистори для розмикання кола у разі критичних перенавантажень, акумуляторна батарея ж має датчики температури, вбудований блок менеджменту заряду батареї та охолоджувальну помпу для зниження

температури, ізоляція усіх з’єднань має бути виконана з термостійких матеріалів, не підтримуючих горіння.

Впроваджені апаратні та програмні заходи дозволяють звести до мінімальних ризиків виникнення аварійних ситуацій, забезпечуючи безпечне використання автоматизованої системи рекуперації енергії як для користувачів так і для монтажників.

ВИСНОВКИ

Під час виконання кваліфікаційної роботи була розроблена, досліджена та реалізована модель автоматизованої системи рекуперації енергії з використанням програмного забезпечення для віртуальної симуляції у різних середовищах, в яких є можливості для симуляції , налаштування та модифікування різних компонентів та розрахунків.

У роботі охоплено увесь цикл від технічного проєктування включаючи в себе аналіз сучасного стану автоматизованих систем рекуперації, новітніх розробок пов’язаних с цією темою та різних складових на різних конфігураціях. Представлено та обгрунтовано вибір типу живлення та пояснено основну відмінність у електромобілях та гібридних автомобілях. Також було виконано математичні розрахунки для створення моделі, що дозволило моделювання алгоритмів роботи системи.

Аналіз сучасного стану автоматизованих систем рекуперації енергії показав що інтеграція автоматизованих систем на основі базових систем рекуперації енергії являється актуальних напрямом розвитку технології з великою можливістю для подальшого вдосконалення цієї галузі.

Автоматизована частина системи забезпечує зниження темпів псування акумуляторів та підвищує точність та безпеку систем рекуперації, мінімізуючи вплив несприятливих та мінливих факторів та зменшує витрати на такі системи.

У роботі було надано обґрунтування вибору компонентів та моделі акумулятору для досягання потрібних конфігурацій системи та її рівня автоматизації, проведено аналіз та здатність подальшого вдосконалення таких систем.

Практична частина роботи включає в себе такі етапи як:

– розробку та перевірки алгоритмів та налаштування віртуального макета моделі автоматизованої системи рекуперації енергії, що дозволяє переконатися у його можливості подальшого вдосконалення та реалізації;

– програмування та інтеграцію датчиків та блоків необхідних для коректної роботи автоматизованої системи рекуперації;

– проведено симуляцію дії алгоритмів у декількох віртуальному середовищах.

Результати симуляцій підтвердили коректність роботи системи. Візуалізація роботи алгоритмів дозволила оцінити їх швидкодію та точність роботи у декількох середовищах, оцінити швидкодію та визначити які елементи схем у віртуальних середовищах можна використовувати для симуляції затримки сигналів, присутньої у звичайного обладнання.

В ході кваліфікаційної роботи було досягнуто поставленої мети. Створена модель автоматизованої системи рекуперації може бути вдосконалена, адаптована та інтегрована для подальшого використання в галузі.

Результати роботи відповідають цілям сталого розвитку 9 "Промисловість, інновації та інфраструктура", а саме 9.2 " Забезпечення розширення використання електротранспорту та відповідної мережі інфраструктури".

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ

1. Розумне місто Україна: що це таке і як воно працює в українських реаліях [Електронний ресурс] // Visit Ukraine – SERVICE PORTAL ABOUT UKRAINE 24/7. – Режим доступу: https://visitukraine.today/uk/blog/2183/smart city-ukraine-what-it-is-and-how-it-works-in-ukrainian-realities?srsltid=AfmBOo qGtHmwUCK__wOstnBtxD9UzVgm1IdVby9xPIgEgFdSSl7zoN7l#yak viglyadayus-smart-city-ta-skilki-ix-u-sviti (дата звернення: 15.06.2026).

2. ДСТУ 3008–15. Інформація та документація. Звіти у сфері науки та техніки. Структура та правила оформлення. – Введ. 2015–06–22. – К. : Держстандарт України, 2017. – 29 с.

3. Навчальний посібник з підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів вищої освіти денної і заочної форм навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно–інтегровані технології» освітньої програми «Автоматизація та комп'ютерно–інтегровані технології» : Навчальний посібник / І. Ш. Невлюдов, В.А. Андрусевич, О. В. Токарєва, С. П. Новоселов, О. В. Сичова. – Харків : Видавництво Іванченка І. С., 2022. 151 с.

4. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно–інтегровані технології освітньої програми «Системна інженерія» / Навчальний посібник : І.Ш. Невлюдов, О.М. Цимбал, О.В. Токарєва, А.І. Бронніков. – Харків: ХНУРЕ, 2022. – 66 с.

6 How Kinetic Energy Recovery Systems (KERS) Work [Electronic resource] // sciencedirect – URL: https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/kinetic–energy–recovery–system (дата звернення: – 10.06.2026)

7 Рекуперативне гальмування: суть та специфіка технології [Електронний ресурс] // ecofactortech – Режим доступу: https://ecofactortech.com/ua/regenerative-braking-in-electric-vehicles/ (дата звернення: – 10.06.2026).

8 From Regenerative Suspension to Electromagnetic Suspension Systems [Electronic resource] // iqpc – URL: https://www.iqpc.com/media/1000533/36001.pdf (дата звернення: – 10.06.2026).

9 Wenzhong Ma, Xingtian Feng and Shuguang Song. Advanced Power Electronics Technology Open Textbook Library 170c.

10 Ahmed Abu-Siada Modeling, Control and Monitoring of Automotive Electric Drives Open Textbook Library 54c.

11 Акумуляторні батареї Volkswagen [Електронний ресурс] // volkswagen. – URL: https://www.volkswagen.ua/service-and-accessories/original-service-parts/original-parts/battaries (дата звернення: 15.06.2026).

12 How long Do EV BATTERIES LAST (Complete 2026 Guide) [Electronic resource] // thepunthought – URL: https://thepunthought.com/how-long-do-ev-batteries-last-complete-2026-guide/ (дата звернення: 15.06.2026).

13 Чи можуть літій-титанатні акумулятори підірвати виробництво акумуляторів? [Електронний ресурс] // lithiumbatterytech – URL: https://www.lithiumbatterytech.com/uk/can-lithium-titanate-batteries-disrupt-the-battery-industry/ (дата звернення: 15.06.2026).

14 Літій-залізо-фосфатний акумулятор: переваги та недоліки технології LiFePO4 [Електронний ресурс] // – magnitofon – URL: https://magnitofon.com.ua/litij-zalizo-fosfatnyj-akumulyator-perevagy-ta-nedoliky-tehnologiyi-lifepo4/ (дата звернення: 15.06.2026).

15 lithium iron phosphate (LiFePO4) battery for electric vehicles [Electronic resource] // evlithium – URL: https://www.evlithium.com/Blog/lithium-iron-phosphate-battery-for-electric-vehicl.html (дата звернення: 15.06.2026).

16 Features of Bonnen 96V Battery [Electronic resource] // bonnenbatteries – URL: https://www.bonnenbatteries.com/product/96v-battery-ultra-thin-and-lightweight-10kwh-nmc-ev-lithium-battery-pack-for-electric-vehicle-and-boat/ (дата звернення: 15.06.2026).

17 Літій-нікель-марганець-кобальтові акумулятори (Li-NMC): сучасне рішення для енергетики [Електронний ресурс] // akumulyator.center – URL: https://akumulyator.center/blog/energetichna-nazelezhnist/litiy-nikel-marganec-kobaltovi-akumulyatori-li-nmc-suchasne-rishennya-dlya-energetiki-ta-transportu/ (дата звернення: 15.06.2026).

18 Інвертор мотора (BASE) [Електронний ресурс] // stock-tesla – URL: https://stock-tesla.com/product/1003389-00-k/?gad_source=1&gad_campaignid=23959352800&gbraid=0AAAABDpjEW07pt5pWvcQ50UYjCwzaLfqn&gclid=Cj0KCQjwjb3SBhDgARIsAMKiWzgwxCn5BmoGQkZgLyLxvNkq3nhOMiQUocb-1PYnUh-SJsXgyh1zRtEaAl0SEALw_wcB (дата звернення: 15.06.2026).

19 Блок-схеми алгоритмів [Електронний ресурс] // studfile – URL: https://studfile.net/preview/7021441/page:11/boat/ (дата звернення: 15.06.2026).

20 HybridPACK™ Drive module [Electronic resource] // infineon. – URL: https://www.infineon.com/assets/row/public/documents/10/49/infineonfs03mr12a6ma1lb-datasheet-en.pdf (дата звернення: 15.06.2026).

21 1ED3011MC12I [Електронний ресурс] // infineon./ – Режим доступу: https://www.infineon.com/part/1ED3011MC12I (дата звернення: 15.06.2026).

22 Датчик положення дросельної заслінки [Електронний ресурс] // zap-zap. – URL: https://zap-zap.com.ua/catalogs/datchik-polozheniya-drosselnoj-zaslonki/?srsltid=AfmBOoo_lkFLrErDqldZ8KJ9LFQuUQzrmxhoq-V5Vz1kgu8CgXN77RvZ (дата звернення: 15.06.2026).

23 BQ76PL455EVM [Електронний ресурс] // no.mouser.com – URL: https://no.mouser.com/ProductDetail/Texas-Instruments/BQ76PL455EVM?qs=Ut1FAN7b%2FuqYsM8We3zEsw%3D%3D&srsltid=AfmBOoqfBdUcoTJP55SPZTeRBPPyvQg5dqtj5S-3bwiynh_SfSK9tw7K (дата звернення: 15.06.2026).

24 ESP32 DevKit V1 [Електронний ресурс] // rozetka – URL: https://rozetka.com.ua/ua/127376176/p127376176/?gad_source=1&gad_campaignid=17201392056&gbraid=0AAAADNakmfAOcvtWiFrMxlWpMzvd4TJN&gclid=CjwKCAjw5ZXQBhBdEiwAI5XVWQVbvIZ3P4cxrvja5Hsh6YIIwGFZRaiVex29IP2_9R-UgU3QK8jtdRoC-SEQAvD_BwE (дата звернення: 15.06.2026).

25 Насос охолоджуючої рідини Bosch [Електронний ресурс] // avtozvuk. – URL: https://avtozvuk.ua/ua/bosch-0392023004/p538706 (дата звернення: 15.06.2026).

26 Bosch iBooster Gen 2 [Electronic resource] // www.ebay– URL: https://www.ebay.com/itm/227262945450 (дата звернення: 15.06.2026).

27 Wokwi Online Arduino Simulator [Electronic resource]. – URL: https://wokwi.com/ (дата звернення: 15.06.2026).

28 Що таке резистор: принцип роботи, типи, схеми з’єднання [Електронний ресурс] // radiotechlab.– URL: https://radiotechlab.com.ua/sho-take-rezistor/ (дата звернення: 15.06.2026).

29 Безпека під час роботи з акумуляторами: як запобігти аваріям і псуванню обладнання [Електронний ресурс] // vinur. – URL: https://vinur.com.ua/ua/aboutus/usefull-info/articles/bezpeka-pid-chas-roboty-z-akumulyatoramy-yak-zapobigty-avariyam-i-psuvannyu-obladnannya?srsltid=AfmBOorzqa75WxQQWJnw92_e4jiUnPdq0UjCMKwfTdRwpXlK-ikTEM0f