

**МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА**

**МР.АТ-73.00.00.000 ПЗ**

**Група АТм-24-2**

**Буратчук Віталій**

**2025**



Інститут інженерної механіки та робототехніки

Кафедра автомобільного транспорту

Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр

Спеціальність: 274“Автомобільний транспорт”

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри АТ

Проф. \_\_\_\_\_ С.І. Криштопа

“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2025 р.

## ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ

Студенту \_\_\_\_\_ Буратчуку Віталію Івановичу  
(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи: Аналіз впливу експлуатаційних умов на процес розряду літій-іонної батареї електромобіля.

керівник роботи \_\_\_\_\_ Гнип М.М., д.ф., доцент  
(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “ \_\_\_ ” листопада 2025 року № \_\_\_\_\_

2. Строк подання студентом роботи \_\_\_\_\_ 18.12.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи \_\_\_\_\_

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити)

Вступ. 4.1 Огляд літературних джерел 4.1.1 Типи електромобілів 4.1.2 Типи акумуляторів для електромобілів 4.1.3 Обігрів акумулятора та салону за низьких температур зовнішнього повітря 4.1.5 Стандарти та типи заряджання електромобілів 4.1.6 Система рекуперації гальм 4.1.7 Статичне випробування ємності акумуляторів електромобілів 4.1.8 Вплив температури навколишнього середовища на ефективність керування електромобілем 4.2 Експериментальне дослідження та методологія 4.2.1 Об'єкт дослідження 4.2.2 Процес та умови експериментального дослідження 4.2.3 Експериментальне дослідницьке обладнання та інструменти 4.3 Результати експериментальних досліджень 4.3.1. Результати, отримані під час експерименту 4.4 Економічна оцінка 4.5 Висновки. 4.6 Перелік посилань на джерела. 4.7 Додатки .

5. Перелік графічного матеріалу

5.1 презентаційні плакати в PowerPoint.

Консультанти по магістерській роботі із зазначенням розділів

| Розділ        | Консультант       | Підпис, дата   |                  |
|---------------|-------------------|----------------|------------------|
|               |                   | Завдання видав | Завдання прийняв |
| Нормоконтроль | доц. Прунько І.Б. |                |                  |

7. Дата видачі завдання 03.11.2025 р.

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

| № з/п | Назва етапів дипломного роботи  | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|---|-------------------------------|----------|
| 1     | Вступ. 4.1 Огляд літературних джерел 4.1.1 Типи електромобілів 4.1.2 Типи акумуляторів для електромобілів 4.1.3 Обігрів акумулятора та салону за низьких температур зовнішнього повітря   | 17.11.2025 р.                 |          |
| 2     | 4.1.5 Стандарти та типи заряджання електромобілів 4.1.6 Система рекуперації гальм 4.1.7 Статичне випробування ємності акумуляторів електромобілів 4.1.8 Вплив температури навколишнього середовища на ефективність керування електромобілем | 21.11.2025 р.                 |          |
| 3     | 4.2 Експериментальне дослідження та методологія 4.2.1 Об'єкт дослідження 4.2.2 Процес та умови експериментального дослідження   | 22.11.2025 р.                 |          |
| 4     | 4.2.3 Експериментальне дослідницьке обладнання та інструменти   | 29.11.2025 р.                 |          |
| 5     | 4.3 Результати експериментальних досліджень 4.3.1. Результати, отримані під час експерименту  | 12.12.2025 р.                 |          |
| 6     | 4.4 Економічна оцінка 4.5 Висновки. 4.6 Перелік посилань на джерела. 4.7 Додатки. Оформлення записки. Нормоконтроль.  | 18.12.2025 р.                 |          |
| 7     | Готовність роботи до попереднього захисту.  | 18.12.2025 р.                 |          |

Студент \_\_\_\_\_  
(Особистий підпис)

Буратчук В.І.  
(Розшифровка підпису)

Керівник \_\_\_\_\_  
(Особистий підпис)

Гнип М.М.  
(Розшифровка підпису)

## АНОТАЦІЯ

У магістерській роботі досліджується вплив експлуатаційних факторів на розряд літій-іонного акумулятора електромобіля та метою є визначення значень розряду та інших характеристик акумулятора. Розглянуто транспортні засоби з електродвигунами та їх типи. Розглянуто різні типи електричних акумуляторів, що використовуються в транспорті. Було проведено аналіз наукових статей інших дослідників, що дозволило виявити недоліки літій-іонного акумулятора та проаналізувати його властивості та характеристики. Послідовно описано обладнання та методологію, що використовувалися під час експериментального дослідження.

Під час дослідження було обрано 5 стандартних ситуацій зони комфорту використання електричних пристроїв (тобто режим ECO з вимкненими електричними пристроями, коли ввімкнено кондиціонер та радіо, кондиціонер та підігрів сидінь, радіо та підігрів сидінь та використання кондиціонера з увімкненим радіо та підігрівом сидінь), на основі яких проводилися реальні випробування за заданим маршрутом з ухилом  $2,8^\circ$  та ухилом  $3,0^\circ$ . Під час випробувань на ділянці спідвею підтримується постійна швидкість 50-60 км/год, а дані з різних ситуацій збираються за допомогою діагностичного обладнання «Consult III Plus». Отримані дані обробляються, а числові розрахунки виконуються за допомогою обладнання «MS Office». Під час випробувань використовується літій-іонний акумулятор 3-го покоління, який встановлений в автомобілі Nissan Leaf. Результати дослідження були оброблені та проаналізовані, порівняні між собою та з роботами, виконаними іншими дослідниками. Представлено висновки та рекомендації дипломної роботи.

*Ключові слова: Ключові слова: електромобіль, літій-іонний акумулятор, розряд, заряд, RBS, ємність*

## ABSTRACT

The master's thesis investigates the influence of operational factors on the discharge of a lithium-ion battery of an electric vehicle and the aim is to determine the discharge values and other characteristics of the battery. Vehicles with electric motors and their types are considered. Different types of electric batteries used in transport are considered. An analysis of scientific articles by other researchers was conducted, which allowed identifying the shortcomings of the lithium-ion battery and analyzing its properties and characteristics. The equipment and methodology used during the experimental study are consistently described.

During the study, 5 standard situations of the comfort zone of using electrical devices were selected (i.e. ECO mode with electrical devices turned off, when the air conditioner and radio are turned on, air conditioner and seat heating, radio and seat heating and using the air conditioner with the radio and seat heating on), on the basis of which real tests were conducted on a given route with a slope of 2.8° and a slope of 3.0°. During the tests on the speedway section, a constant speed of 50-60 km/h is maintained, and data from various situations are collected using the diagnostic equipment "Consult III Plus". The obtained data are processed, and numerical calculations are performed using the equipment "MS Office". During the tests, a 3rd generation lithium-ion battery is used, which is installed in a Nissan Leaf car. The results of the study were processed and analyzed, compared with each other and with the work performed by other researchers. The conclusions and recommendations of the thesis are presented.

Keywords: Keywords: electric vehicle, lithium-ion battery, discharge, charge, RBS, capacity

| ЗМІСТ  | С.        |
|--|-----------|
| ВСТУП.....   | 6         |
| <b>1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>   | <b>8</b>  |
| 1.1 Типи електромобілів .....  | 8         |
| 1.2 Типи акумуляторів для електромобілів .....   | 10        |
| 1.3 Обігрів акумулятора та салону за низьких температур<br>зовнішнього повітря .....             | 14        |
| 1.4 Стандарти та типи заряджання електромобілів .....  | 16        |
| 1.5 Запас ходу та термін служби літій-іонного акумулятора .....                                  | 20        |
| 1.6 Система рекуперації гальм .....  | 23        |
| 1.7 Статичне випробування ємності акумуляторів електромобілів .....                              | 25        |
| 1.8 Вплив температури навколишнього середовища на ефективність<br>керування електромобілем ..... | 28        |
| <b>2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МЕТОДОЛОГІЯ .....</b>                                       | <b>29</b> |
| 2.1 Об'єкт дослідження.....  | 35        |
| 2.2 Процес та умови експериментального дослідження .....   | 36        |
| 2.3 Експериментальне дослідницьке обладнання та інструменти .....                                | 38        |
| <b>3 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ .....</b>   | <b>42</b> |
| 3.1. Результати, отримані під час експерименту .....   | 42        |
| <b>4 ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА .....</b>   | <b>55</b> |
| <b>ВИСНОВКИ.....</b>   | <b>58</b> |
| <b>ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА.....</b>  | <b>60</b> |
| <b>ДОДАТКИ .....</b>   | <b>62</b> |

|           |       |               |        |      |   |                   |          |         |
|-----------|-------|---------------|--------|------|---|-------------------|----------|---------|
|           |       |               |        |      | <b>МР.АТм-73.00.00.000 ПЗ</b>   |                   |          |         |
| Зм.       | Арк.. | № докум.      | Підпис | Дата |   |                   |          |         |
| Розроб.   |       | Буратчук В.І. |        |      | Аналіз впливу експлуатаційних умов<br>на процес розряду літій-іонної батареї<br>електромобіля | Літ.              | Арк.     | Акрушів |
| Перевір.  |       | Гнип М.М.     |        |      |   |                   | <b>6</b> |         |
| Реценз.   |       |               |        |      |   | ІФНТУНГ, АТм-24-2 |          |         |
| Н. контр. |       | Прунько І.Б.  |        |      |   |                   |          |         |
| Затверд.  |       | Криштопа С.І. |        |      |   |                   |          |         |

## ВСТУП

**Актуальність.** Використання електромобілів у країнах Європейського Союзу зростає, оскільки зростають прагнення країн ЄС збільшити відновлювані ресурси та зменшити використання викопного палива та забруднення навколишнього середовища. Найбільшим викликом залишається просування та розширення розробки та створення електромобілів у повністю незалежних країнах.

Електромобілі поступово займають все більшу частку автомобільного ринку, тому їх технічні характеристики також важливі. Метою цієї роботи є дослідження того, як змінюється розряд літій-іонних акумуляторів у різних режимах роботи з різними комбінованими варіаціями використання електронних пристроїв.

Виробники електромобілів масово виробляють автомобілі з використанням літій-іонних акумуляторів, але головною проблемою, що залишається, є запас ходу електромобіля після повної зарядки. Відомо, що запас ходу електромобіля визначається не лише переважаючою зовнішньою температурою, але й типом зарядки, стилем водіння та дорожніми умовами. Виробники електромобілів розглядають, як покращити продуктивність цих акумуляторів у різних умовах, тому проводяться незліченні випробування.

Для досягнення цієї мети використовується програмне забезпечення корпорації Nissan "Consult-III Plus" та "Carwings", а об'єктом дослідження буде електромобіль Nissan Leaf з встановленим літій-іонним акумулятором третього покоління.

**Метою роботи** є дослідження впливу експлуатаційних факторів на розряд літій-іонних акумуляторів в електромобілях.

**Завдання дослідження:**

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MP.AT-73.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 7    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

1. Провести огляд літератури та наукових статей, пов'язаних з електромобілями;
2. Визначити значення розрядів та інші характеристики, що впливають на літій-іонні акумулятори під час експериментальних випробувань;
3. Оцінити та проаналізувати отримані дані за змінних умов експлуатації.

**Об'єкт дослідження** – літій-іонна батарея електромобіля Nissan Leaf як основне джерело електричної енергії, що забезпечує роботу силової установки транспортного засобу.

**Предмет дослідження** – експлуатаційні фактори, що впливають на розряд літій-іонних акумуляторів в електромобілях.

**Практичне значення** отриманих результатів полягає у наступному:

1. Проведено огляд літератури та наукових статей, пов'язаних з електромобілями (EV);
2. Визначено значення розрядів літій-іонних батарей та інші їх характеристики;
3. Проведено аналіз витрат на паливо транспортних засобів та витрат під час заряджання електромобіля.

**Наукова новизна.** Проведені дослідження впливу експлуатаційних факторів на розряд літій-іонного акумулятора електромобіля.

**Методи дослідження.** У роботі використано методи аналізу науково-технічної інформації, теоретичні та експериментальні дослідження впливу експлуатаційних факторів на розряд літій-іонного акумулятора електромобіля.

**Особистий внесок автора.** Автором визначено основні завдання роботи, обрано та опановано методи їх вирішення, визначено, що найбільший вплив на розряд акумулятора має використання електричних пристроїв комфортної зони під час експлуатації.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MP.AT-73.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 8    |

# 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

## 1.1 Типи електромобілів

Електромобілі – це повністю або частково електричні транспортні засоби, які поділяються на чотири основні типи: гібридні електромобілі (HEV), Плагін-гібриди (PHEV), гібридні електромобілі з подовженим запасом ходу (REV) та повністю електричні транспортні засоби (BEV). Моделі та огляд характеристик кожного типу представлені на рисунку 1.1.

Таблиця 1.1 - Огляд різновидів електромобілів [1]

| Гібридні транспортні засоби (HEV)  | Плагін-гібриди (PHEV)  | Гібриди з подовженим запасом ходу (REV)  | Повністю електричні транспортні засоби (BEV)   |
|--|--|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>Автомобіль працює як від двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ), так і від електродвигуна;</li> <li>Акумулятори заряджаються шляхом гальмування (рекуперативне гальмування);</li> <li>Може долати короткі відстані виключно на електротязі.</li> <li>Toyota Prius</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Автомобіль живиться як від ДВЗ, так і від електродвигуна (працюючи паралельно або в інших режимах);</li> <li>Акумулятори можна заряджати від мережі;</li> <li>Відстань, яку можна подолати лише на електродвигуні: 40-60 км.</li> <li>Volvo V70 PHEV</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Автомобіль працює від електродвигуна; ДВЗ лише заряджає акумулятор;</li> <li>Акумулятори можна заряджати від мережі;</li> <li>Відстань, яку можна подолати лише на електродвигуні: 40-80 км.</li> <li>Chevrolet Volt</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Автомобіль працює виключно на електриці;</li> <li>Максимальна ємність акумулятора;</li> <li>Акумулятори заряджаються від мережі;</li> <li>Запас ходу: 100-300 км.</li> <li>Nissan Leaf</li> </ul> |
|   |   |    |   |

### *Гібридні автомобілі (HEV – Hybrid Electric Vehicle)*

Цей тип автомобіля має вбудований двигун внутрішнього згоряння та електродвигун. Вони характеризуються кращою економією палива, ніж автомобілі, оснащені електромобілем. Електродвигун в автомобілях виконує лише допоміжну функцію, тому багато експертів та технічних спеціалістів не класифікують автомобілі HEV як електромобілі. Більшість автомобілів, що експлуатуються в Україні та світі та використовують електродвигун, є автомобілями типу HEV.

### *Плагін-гібриди (або гібриди з можливістю підзарядки від мережі) (PHEV – Plug-in Hybrid Electric Vehicle)*

Автомобілі також мають вбудований двигун внутрішнього згоряння та електродвигун. Гібриди цього типу можуть проїжджати досить великі відстані лише на електродвигуні. Використання автомобіля в місті дозволяє подолати маршрут, призначений для потреб одного дня, використовуючи лише електроенергію. Двигун внутрішнього згоряння починає працювати одразу після розрядки електричного акумулятора. Також можливий «паралельний» режим, коли електродвигун та двигун внутрішнього згоряння працюють одночасно. На відміну від автомобілів HEV, підключаються гібриди можна заряджати від електромережі.

### *Гібриди з розширеним запасом ходу (REV – Range Extended Vehicle)*

Основною відмінною рисою гібридного автомобіля з розширеним запасом ходу від автомобіля з підзарядкою від мережі є те, що в електромобілі REV двигун внутрішнього згоряння (ДВЗ) не з'єднаний з осями автомобіля та не забезпечує прямого руху. Автомобіль завжди живиться від електродвигуна, а двигун ДВЗ використовується лише для обертання генератора електродвигуна, коли акумулятор розряджений. Гібриди з розширеним запасом ходу відрізняються більшим запасом ходу в режимі електродвигуна, ніж автомобілі PHEV.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MP.AT-73.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 10   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

## *Повністю електричні транспортні засоби (BEV – Battery Electric Vehicle)*

Цей тип транспортного засобу живиться виключно від електродвигунів. Ємність акумулятора чистого електромобіля є найбільшою, оскільки автомобілі BEV взагалі не використовують викопне паливо. Транспортні засоби мають найбільші екологічні переваги та економію палива порівняно з іншими типами електромобілів [1].

### **1.2 Типи акумуляторів для електромобілів**

Акумулятори – це пристрої, які перетворюють хімічну енергію на електричну. Акумулятори використовуються більшістю сучасних пристроїв – мобільними телефонами, ноутбуками, фотоапаратами тощо. Акумулятори також використовуються в електромобілях, де вони підтримують подачу енергії до електродвигуна.

Існує два типи акумуляторів – одноразові та акумуляторні. У цьому випадку акумуляторні акумулятори набагато кращі, оскільки їх можна використовувати кілька разів, тобто розряджати та заряджати для нового використання. Цей тип акумуляторів може бути різних типів, які відрізняються складом та найважливішими параметрами – питомою енергією (Вт·год/кг), напругою елементів, кількістю циклів зарядки. Серед найпопулярніших акумуляторів – свинцево-кислотні, нікель-кадмієві та літій-іонні. Кожен електродвигун вимагає відповідної напруги, яка отримується послідовним з'єднанням елементів акумулятора (якщо двигун вимагає напруги 120 В, а кожен елемент має 5 В, потрібно підключити  $120/5 = 24$  елементи).

Заряджений акумулятор не завжди забезпечуватиме однакову кількість енергії, це дуже залежить від різних факторів навколишнього середовища. Час розряду залежатиме від струму розряду, температури навколишнього середовища тощо. Занадто високий струм розряду скорочує термін служби

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MP.AT-73.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 11   |

акумулятора, як і занадто висока або занадто низька температура навколишнього середовища, а також шкідливий для повного розряду акумулятора. Термін служби літій-іонного акумулятора можна подовжити, якщо не заряджати його повністю – це означає, що той самий акумулятор можна використовувати довше, але відстань, яку проїжджає електромобіль на одному заряді, зменшиться (через неповний заряд акумулятора) [4].

Існує кілька типів технологій акумуляторних батарей, що використовуються в гібридних та електричних транспортних засобах. Основні типи технологій з їхніми характеристиками представлені в таблицях 1.2 та 1.3.

Таблиця 1.2 -Типи акумуляторів [6]

|                                 |   |
|---------------------------------|---|
| Свинцево-кислотні (Pb-кислотні) | Свинцево-кислотні акумулятори є найстарішими акумуляторними батареями, що перезаряджаються, з низьким співвідношенням енергії до маси та енергії до об'єму. Ці фактори означають, що свинцево-кислотні акумулятори займають багато місця під час встановлення в транспортних засобах, зокрема через їхню високу питому вагу. У будь-якому випадку, цей тип акумуляторів має відносно високе співвідношення потужності до ваги, є дешевим і тому добре підходить для використання в дорожніх транспортних засобах. |
| Нікель-кадмієві (NiCd)          | Ці акумулятори вирізняються найдовшим терміном служби (понад 1500 циклів), але мають низьку щільність енергії порівняно з іншими типами акумуляторів. Кадмій токсичний і шкідливий як для людей, так і для тварин, тому вони переважно використовуються в побуті та наразі замінюються літій-іонними та нікель-металгідридними акумуляторами відповідно до законодавства ЄС.  |
| Нікель-металгідридні (NiMH)     | Технологія акумуляторів схожа на нікель-кадмієві акумулятори, за винятком того, що кадмій замінений менш екологічно чистим елементом. Акумулятори мають у 3-4 рази більшу ємність, ніж NiCd акумулятори, але порівняно з літій-іонними акумуляторами, енергетична ємність менша, а саморозряд вищий. Вони використовуються в гібридних автомобілях: Toyota Prius, Toyota RAV4 та інших акумуляторних електромобілях, а також у побутовій електроніці.   |

Продовження таблиці 1.2

|                                  |  |
|----------------------------------|--|
| Літій-іонні (Li-ion)             | Деякі сучасні літій-іонні акумулятори мають високу щільність заряду. Основними недоліками є мінливість ємності та потенційний перегрів. Ця технологія використовується в побутовій електроніці (наприклад, мобільних телефонах) і лише нещодавно почала застосовуватися в автомобільній промисловості (електромобіль Tesla Roadster та гібридний автомобіль Toyota Prius).   |
| Літій-іонні полімерні            | Ідентична технологія літій-іонним акумуляторам, з нижчою щільністю заряду, але довшим терміном служби та надтонкою конструкцією (товщиною близько 1 мм). Найбільшим недоліком є високий рівень перезаряду, і якщо акумулятор розряджається до певної межі напруги, він може втратити свою ємність.   |
| Розплавлені солі нікелю (NaNiCl) | Найбільш відомий як акумулятор типу "Zebro", що належить до групи акумуляторів на основі розплавленої солі. Розчин розплавленої солі використовується як електроліт, що забезпечує вищу щільність енергії, а також щільність потужності для акумуляторних батарей. Він характеризується широким діапазоном робочих температур - 270 - 350° С, тому до використання компонентів акумулятора пред'являються суворі вимоги. Перегрів може спричинити значні теплові втрати, навіть коли акумулятор не використовується. |

Таблиця 1.3 - Властивості різних типів акумуляторів [6]

| Тип батареї        | Питома енергія (Вт·год/кг) | Енергія / Ємність (Вт·год/л) | Потужність / Вага (Вт/кг) | Кількість циклів заряду для однієї батареї | ККД енергії | Енергетична щільність | Саморозряд за 24 години |
|--------------------|----------------------------|------------------------------|---------------------------|--|-------------|-----------------------|-------------------------|
| Свинцево-кислотний | 40                         | 60-75                        | 180                       | 500  | 82.5 %      | 100 %                 | 1 %                     |
| NiCd               | 60                         | 50-150                       | 150                       | 1350                                       | 72.5 %      | 150 %                 | 5 %                     |
| NiMH               | 70                         | 140-300                      | 250-1000                  | 1350                                       | 70.0 %      | 175 %                 | 2 %                     |
| Li-ion             | 125                        | 270                          | 1800                      | 1000                                       | 90.0 %      | 313 %                 | 1 %                     |
| Li-ion polymer     | 200                        | 300                          | >3000                     |  |             | 500 %                 |                         |
| NaNiCl             | 125                        | 300                          |                           | 1000                                       | 92.5 %      | 313 %                 | 0 %                     |

Чим вища щільність енергії, тим більший запас ходу автомобіля, а отже, правильне співвідношення енергії до ваги акумулятора може збільшити обсяг продажів електромобілів.

Як ми бачимо з таблиці даних, акумуляторні батареї саморозряджаються набагато частіше, ніж лужні батареї (до 5% на день, залежно від температури та типу акумулятора). Сучасні літєві батареї демонструють покращення в цьому процесі.

Термін служби акумулятора слід визначати та розраховувати з точки зору витрат користувача на знос акумулятора та витрати на заміну. Цей показник залежить від кількох факторів, таких як частота використання автомобіля, його заряджання та розряджання. Виробник транспортного засобу повинен порадижити, як продовжити термін служби акумулятора (ефективність заряджання та ємність акумулятора) [6].

Акумулятори електромобілів можна заряджати на спеціальних зарядних станціях або безпосередньо від мережі. Згідно з останніми дослідженнями, більшість користувачів електромобілів заряджають свої транспортні засоби вночі. Це зручно, тому що, повернувшись додому, можна залишити електромобіль заряджатися на ніч, а вранці він матиме повністю заряджений акумулятор. Додаткова інфраструктура не потрібна – заряджання можна здійснювати від звичайної електричної розетки. Це також актуально для електромереж, оскільки додаткове використання вночі допомагає згладити криву попиту на електроенергію. Крім того, у більшості країн, включаючи Україну, використовується тариф на електроенергію за двома часовими поясами – зарядка акумулятора вночі дешевша [4].

Літій-іонний акумулятор електромобіля Nissan Leaf складається з 48 літій-іонних акумуляторних модулів, кожен з яких складається з 4 з'єднаних елементів, що створюють загальну напругу 393 В.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MP.AT-73.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 14   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

### 1.3 Обігрів акумулятора та салону за низьких температур зовнішнього повітря

Заряджання акумулятора електромобіля за низьких температур зовнішнього повітря (температура нижче 0°) може збільшитися в кілька разів, якщо заряджання проводиться в режимі швидкого заряджання. Наприклад, якщо акумулятор холодний, тобто його температура досягає -20° С, заряджання до 80% може тривати до 3 годин. Щоб акумулятор не замерз, рекомендується заряджати його одразу після завершення експлуатації електромобіля, поки температура акумулятора вища за температуру зовнішнього повітря. Як змінюється час заряджання акумулятора в холодну погоду, показано на рисунку 1.1.

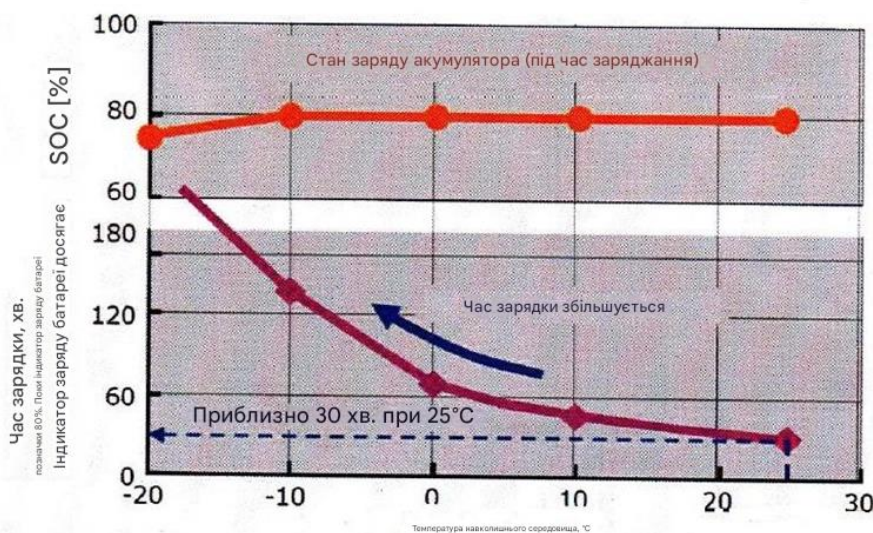


Рисунок 1.1 - Залежність часу заряджання акумулятора від переважаючої температури зовнішнього середовища [7]

Щоб запобігти замерзанню акумуляторів, виробники електромобілів підключають до акумуляторних елементів спеціальні підігрівачі акумуляторів. Вони працюють як автономні системи опалення, тому потребують багато електроенергії, тому рекомендується підтримувати рівень заряду акумулятора електромобіля якомога вищим у холодну погоду. Нагрівальний елемент активується автоматично, коли температура

зовнішнього повітря досягає  $-20^{\circ}\text{C}$ , і використовує енергію від літій-іонного акумулятора. Якщо рівень заряду акумулятора досягає приблизно 30%, обігрівач припиняє роботу. Нагрівальні елементи найкраще використовувати під час заряджання акумуляторів електромобіля, тоді необхідна кількість електроенергії подається безпосередньо з розетки. Під час роботи обігрівач використовує 300 Вт енергії.

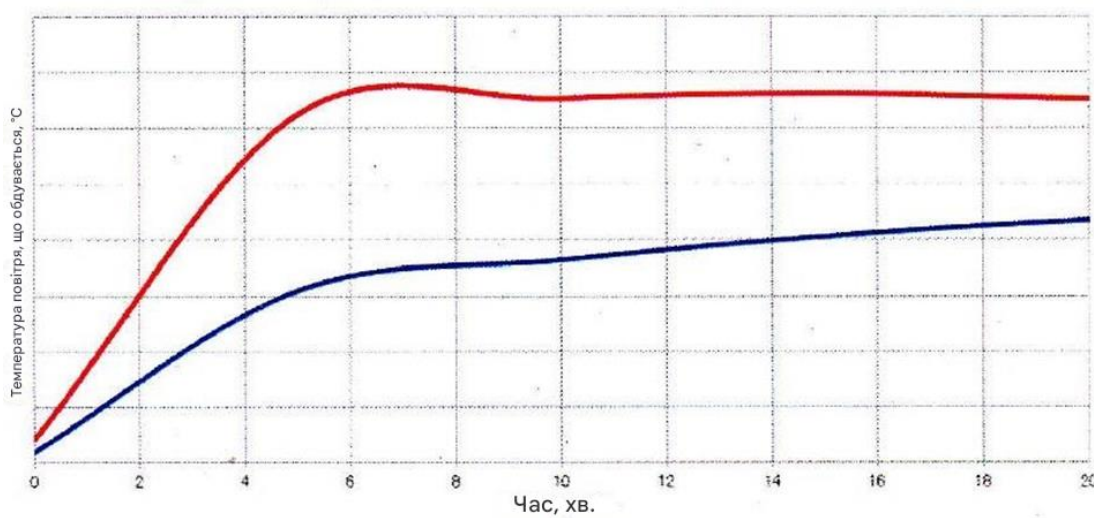


Рисунок 1.2 - Графік температури повітря вентилятора [7]

Згадані раніше нагрівальні елементи також встановлені біля вентилятора салону. Принцип роботи залишається тим самим, лише коли ввімкнено підігрів акумулятора, автоматично вмикається і підігрів салону. Порівнюючи підігрів температури повітря, що продувається вентиляторами дизельного та електричного двигунів, підігрів чітко видно на рисунку 1.2 (червона лінія – електромобіль, синя – дизельний двигун). Підігрів салону та акумулятора збільшує запас ходу. Для подальшого збільшення запасу ходу рекомендується прогріти салон та акумулятори перед початком поїздки. Це можна зробити вручну або за допомогою смарт-додатків на мобільних пристроях, комп'ютера з доступом до Інтернету або кнопки на пульті дистанційного керування замком, поки електромобіль підключений до



(від побутової мережі). Перш за все, необхідно розуміти, що акумулятор електромобіля має постійний струм, а мережа – змінний. Тому для заряджання електромобіля ми повинні перетворити (випрямити) змінний струм у постійний. Для цього використовується зарядний пристрій, який є невід'ємною частиною кожного електромобіля. Під час заряджання електромобіля від станції змінного струму струм заряджання обмежується не лише потужністю самої станції, але й потужністю зарядного пристрою електромобіля, який заряджається. Виробник електромобіля завжди вказує значення максимального струму заряджання.

Під час заряджання електромобіля від зарядної станції постійного струму (швидка зарядка) сам зарядний пристрій електромобіля стає непотрібним і не бере участі в цьому процесі. Тоді швидкість зарядки залежить від параметрів самої станції. Станція швидкої зарядки зв'язується з акумулятором електромобіля, зчитує його параметри (температуру, ємність тощо) та керує процесом зарядки, контролюючи стан акумулятора. У сучасних станціях швидкої зарядки напруга зарядки становить 400 В, а струм зарядки досягає 200 А (Tesla Supercharger). Потужність легко розрахувати –  $200 \text{ А} * 500 \text{ В} = 100 \text{ кВт}$  [5].

На відміну від автомобілів, що працюють на традиційних двигунах внутрішнього згоряння, електромобіль не потребує бензину та не може його використовувати. Він використовує електричну енергію, що зберігається в літій-іонному (Li-ion) акумуляторі. Літій-іонний акумулятор автомобіля необхідно зарядити, перш ніж автомобіль можна буде керувати. Під час роботи автомобіля літій-іонний акумулятор поступово розряджається. Якщо літій-іонний акумулятор повністю розряджений, автомобіль не заведеться, доки акумулятор не буде перезаряджено. Процес заряджання зазвичай триває від 30 хвилин до 15 годин.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MP.AT-73.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 18   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

Електромобіль використовує два типи акумуляторів. Один – 12-вольтовий акумулятор, такий самий, як у автомобілях з бензиновими або дизельними двигунами, а інший – літій-іонний акумулятор (високої напруги).

12-вольтовий акумулятор живить системи та функції автомобіля, такі як аудіосистема, додаткові системи безпеки, фари та склоочисники.

Літій-іонний акумулятор живить електродвигун (тяговий двигун), який керує автомобілем. Літій-іонний акумулятор також заряджає 12-вольтовий акумулятор.

#### Режими заряджання

Режими заряджання акумуляторів визначені стандартом IEC62196 та передбачають чотири типи заряджання:

- Режим 1 – використання змінного струму від побутової мережі;
- Режим 2 – використання змінного струму від побутової мережі з вбудованим захистом у зарядному кабелі (рис. 1.3);
- Режим 3 – використання однофазного або трифазного струму від побутової мережі через спеціальний роз'єм, в якому реалізовано керування та захист (рис. 1.4);
- Режим 4 – використання постійного струму через спеціальний роз'єм – швидке заряджання (рис. 1.5).

Перший тип заряджання, Режим 1, не використовується в сучасних електромобілях, оскільки не забезпечується безпека.

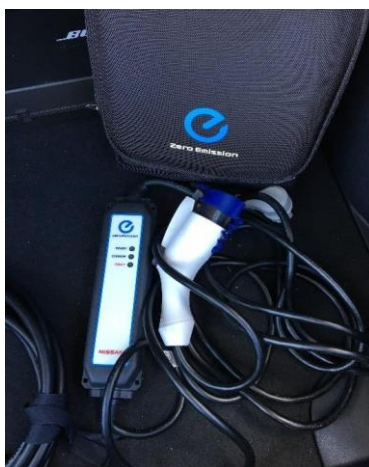


Рисунок 1.3 - Зарядний кабель Nissan Evse

|      |      |           |        |      |                       |      |
|------|------|-----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |           |        |      | MP.AT-73.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № док.ум. | Підпис | Дата |                       | 19   |

Режим 2 виконується за допомогою зарядного кабелю, який постачається з кожним електромобілем. Максимальний струм зарядки встановлено на рівні 16 А та обмежений потужністю стандартної побутової розетки. Потрібне належне заземлення розетки (наприклад, NISSAN LEAF постачається з 6-метровим кабелем, який при підключенні до стандартної побутової розетки 220 В заряджає акумулятор приблизно за 10 годин (струм 10 А). Цей кабель також можна використовувати під час підключення до громадських зарядних станцій).



Рисунок 1.4 - Однофазний тип 16А та трифазний тип Mode 3 з кабелем 32А з роз'ємами Type та Type2 [4]

Режим 3 передбачає використання однофазної або трифазної зарядної станції. Електромобіль підключається за допомогою однофазного або трифазного кабелю (залежно від конструкції електромобіля). Станція зв'язується з електромобілем через спеціальні контакти на кабелі.



Рисунок 1.5 - Станція швидкої зарядки та кабель

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MP.AT-73.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 20   |

Швидка зарядка в режимі 4 є дорогою в установці та важкодоступною для домашнього користувача. Зазвичай вони встановлюються в громадських місцях та підтримують два різні стандарти заряджання. (Наприклад: станція швидкої зарядки NISSAN може зарядити акумулятор NISSAN LEAF від 0% до 80% лише за 30 хвилин.) Для швидкого заряджання використовуються громадські зарядні станції (потужністю до 50 кВт). Датчик температури літій-іонного акумулятора можна використовувати для оцінки приблизного часу, необхідного для заряджання літій-іонного акумулятора після його розрядки (горить попереджувальний індикатор низького заряду акумулятора) до 80% заряду. Ці пристрої заряджають акумулятор найшвидше; час заряджання може змінюватися та автоматично регулюється залежно від температури акумулятора [2,4].

### **1.5 Запас ходу та термін служби літій-іонного акумулятора**

Ви можете проїхати набагато далі кожного разу, коли заряджаєте акумулятор, і є різні заходи, які ви можете взяти. Один із способів – підтримувати помірну температуру в салоні автомобіля. Інший – прогрівати/охолоджувати салон електромобіля перед завершенням заряджання. Це можна налаштувати за допомогою смартфона або просто увімкнувши таймер в автомобілі.

Запас ходу збільшується, якщо ви їдете з меншою та постійною швидкістю або використовуєте економічний режим (Рисунок 1.6). Слід пам'ятати, що щоразу, коли ви гальмуєте, електродвигун діє як генератор і перетворює енергію, яка в іншому випадку витрачалася б даремно, в енергію акумулятора [3].

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MP.AT-73.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 21   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |



Рисунок 1.6 - Запас ходу електромобіля Nissan LEAF у різних режимах роботи [3]

Здатність літій-іонного акумулятора зберігати заряд, як і у всіх акумуляторів, зменшується з віком та тривалістю використання акумулятора, через що вживаний автомобіль може проїжджати меншу відстань, ніж новий. Це звичайне та очікуване явище, і якщо воно відбувається, це не означає, що автомобіль або літій-іонний акумулятор зламалися.

На здатність літій-іонного акумулятора утримувати заряд може впливати спосіб керування автомобілем, умови, в яких він припаркований, спосіб і тип заряджання літій-іонного акумулятора, а також температура літій-іонного акумулятора під час керування та заряджання автомобіля.

Щоб забезпечити максимальний запас ходу, рекомендується використовувати налаштування за замовчуванням: режим дальньої поїздки (100% заряду). Щоб забезпечити максимальний термін служби акумулятора,

електромобіль слід керувати та заряджати відповідно до наступних рекомендацій:

- Рекомендується використовувати режим дальньої поїздки до 80%.
- Дайте акумулятору опуститися нижче 80% перед повторним зарядженням.
- Уникайте тривалого перебування акумулятора з рівнем заряду вище 80%. Якщо автомобіль не використовуватиметься протягом тривалого часу, зарядіть його в режимі дальньої поїздки 80% перед паркуванням, потім від'єднайте зарядний кабель та перевіряйте рівень заряду кожні 3 місяці.
- Не залишайте автомобіль більше ніж на 14 днів з дуже низьким зарядом акумулятора.
- Слідкуйте за тим, щоб не досягти високої температури акумулятора (температура акумулятора відображається в червоній зоні індикатора), часто використовуючи функцію швидкої зарядки постійним струмом.
- Уникайте паркування в надзвичайно спекотних або холодних місцях (вище 49°C (120°F) або нижче -25°C (-13°F)).
- Керуйте автомобілем спокійно, наприклад, використовуючи режим водіння ECO.

Нижча температура зовнішнього повітря може вплинути на запас ходу електромобіля через зменшення ємності акумулятора. Коли температура зовнішнього повітря падає до -20° С, термін служби електричного акумулятора може скоротитися. Низькі температури також можуть уповільнювати хімічні процеси, що призведе до скорочення запасу ходу з повністю зарядженим акумулятором. Крім того, електроенергія часто використовується для обігріву салону в холодну пору року. Однак виробники електромобілів подумали про це – існуючі наразі системи зарядки досить розумні та дозволяють визначити, коли користувач хоче, щоб його електромобіль був готовий до руху. Це означає, що поки електромобіль ще підключений до електромережі, система зарядки забезпечить прогрів салону

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MP.AT-73.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 23   |

перед початком руху. Інші моделі мають альтернативу обігріву салону – замість генерації теплого повітря, кермо та пасажирські сидіння підігріваються, що дозволяє заощадити до 90% енергії акумулятора порівняно зі звичайним обігрівом салону. У Фінляндії та Канаді, де зими особливо холодні, було проведено низку випробувань електромобілів, але про серйозні проблеми, окрім зменшення запасу ходу приблизно на 30%, не повідомлялося. Крім того, автомобілі з двигунами внутрішнього згоряння також відчувають проблеми взимку [4].

### 1.6 Система рекуперації гальм

Мета рекуперативних систем полягає в мінімізації впливу на розряд акумулятора та, за певних умов експлуатації, навіть у накопиченні електричної енергії в акумуляторі.

Система автомобіля може забезпечити збільшений запас ходу, перетворюючи потужність руху на електричну енергію, яка накопичується в літій-іонному акумуляторі, коли автомобіль уповільнюється або рухається під гору. Саме так працює система рекуперації гальм.

Основне призначення системи рекуперації гальм полягає в постачанні частини енергії для заряджання літій-іонного акумулятора та збільшення запасу ходу. Вторинне призначення системи полягає у створенні ефекту «гальмування двигуном», який працює залежно від стану літій-іонного акумулятора. Коли перемикач передач увімкнено, а педаль акселератора відпущено, система рекуперації гальм трохи сповільнюється, і частина енергії подається на літій-іонний акумулятор. Рівень роботи системи рекуперації гальм змінюється залежно від стану заряду літій-іонного акумулятора.

Коли важіль перемикачів передач знаходиться в положенні ECO (Економний режим) або В (за наявності), а нога не натискається на педаль акселератора, система рекуперації гальм використовує більше зусилля, ніж

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MP.AT-73.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 24   |

під час руху в положенні D (Драйв). Однак, під час руху на високих швидкостях ви можете помітити, що система рекуперації гальм гальмує автомобіль менш ефективно, ніж коли двигун використовується для гальмування звичайного автомобіля.

Система рекуперації гальм менше уповільнює транспортний засіб, коли літій-іонний акумулятор повністю заряджений. Потужність рекуперації гальм автоматично зменшується, коли літій-іонний акумулятор повністю заряджений, щоб запобігти його перезарядженню. Потужність рекуперації гальм також автоматично зменшується, коли температура акумулятора висока або низька (що позначається червоною або синьою зоною індикатора температури акумулятора відповідно), щоб запобігти пошкодженню літій-іонного акумулятора. Педаль гальма повинна використовуватися для уповільнення або зупинки транспортного засобу залежно від дорожніх умов та умов руху. Гальма транспортного засобу не залежать від системи рекуперації гальм.

Звук системи рекуперації гальм може бути чутний під час використання системи рекуперації гальм. Це нормальна характеристика електромобіля.

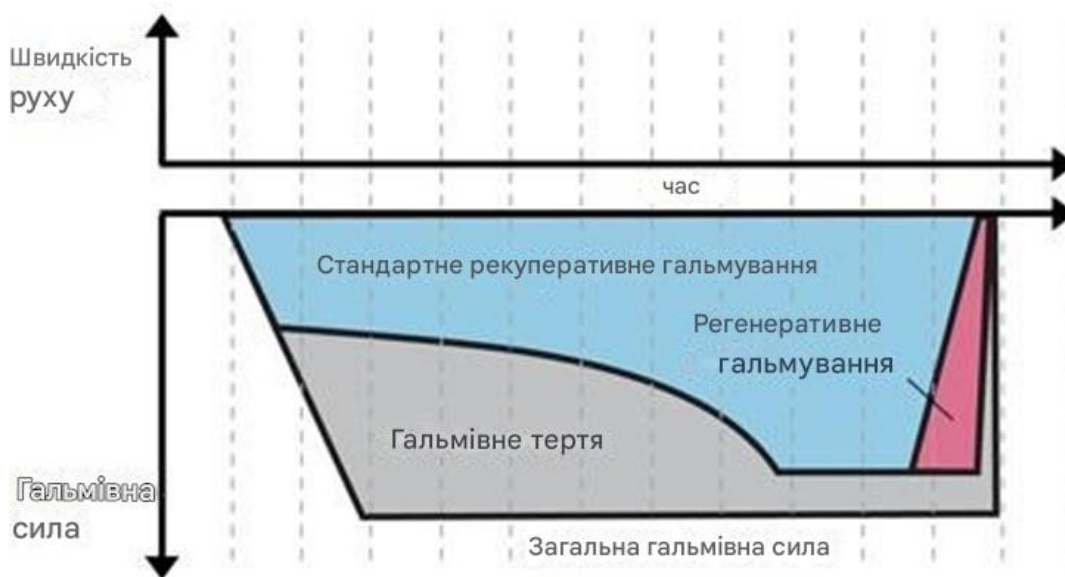


Рисунок 1.7 - Схема роботи рекуперативної системи гальмування [7]

Під час гальмування гальмівна сила формується рекуперативною та електрогідравлічною гальмівними системами. Розподіл сили контролюється блоком керування гальмами. Максимальна рекуперація залежить від швидкості автомобіля (обертів двигуна). Крутний момент двигуна на швидкості 100 км/год досягає 6400 об/хв. Чим вища потужність двигуна, тим більша кількість рекуперованого заряду, як у звичайному генераторі.

Рівень заряду безпосередньо не залежить від гальмівної сили. Коли швидкість руху стає нижчою за гальмівну силу, яка генерується рекуперативною системою. Дані датчика керування педаллю гальма, швидкість автомобіля та рівень заряду акумулятора є найважливішими параметрами для роботи рекуперативної системи [7].

### **1.7 Статичне випробування ємності акумуляторів електромобілів**

У 2013 році дослідницька група з Харбінського міського університету провела дослідження, щоб з'ясувати, як змінюються швидкість заряджання та розряджання, робоча температура, саморозряд та термін служби акумуляторів електромобілів залежно від рівня заряду. Розглянутий параметр називається станом заряду (SOC). Цей параметр може застосовуватися в різних галузях і вважається важливим параметром, який оцінює залишковий стан заряду акумуляторів. Параметр оцінюється після збору характерних даних акумулятора, таких як напруга та струм, а також робоча температура. Оцінка та точність SOC акумулятора є дуже важливими, тому під час розробки конструкцій акумуляторів можна робити припущення [9].

Дослідницька група [9] запровадила математичний вираз, що описує раніше обговорюваний параметр SOC, який можна виразити як відношення залишкової потужності до номінальної потужності, що генерується акумулятором.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MP.AT-73.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 26   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

Вчені з Китайської Народної Республіки [10] вивчали методи оцінки стану заряду та розряду акумуляторів, коротко про них:

- Метод розряду акумулятора – найнадійніший метод розрахунку стану заряду (SOC), який використовує постійний струм для безперервного розряду акумулятора. Він визначається як відношення струму розряду до часу. Метод здебільшого використовується в лабораторіях і має два недоліки. Один з них полягає в тому, що для зупинки роботи акумулятора потрібен тривалий час, а інший – це призводить до примусового вимкнення акумулятора. Метод не підходить для використання під час руху електромобіля.

- Метод споживання ампер-годин (Ah) – для оцінки SOC використовується струм навантаження. Якщо виміряний у реальному часі струм розряду є точним і є достатньо даних з початку дослідження, то це найпростіший і найстабільніший метод оцінки.

- Систематичний метод – найстаріший метод. Оскільки акумулятор є нелінійною системою, для якої важко визначити математичну модель заряджання та розряджання, динамічні характеристики акумулятора моделюються за допомогою моделі. Напруга заряджання оцінюється за текстом, написаним комп'ютерною програмою, після введення параметрів напруги, струму, номінальної потужності та температури зовнішнього середовища. Отримані вхідні дані оцінюються шляхом введення похибок оцінювання.

- Метод фільтрації Калмана – це метод фільтрації даних за нелінійними рівняннями з використанням математичної дисперсії. Метод застосовний до різних типів акумуляторів, і порівняно з іншими методами, він особливо підходить для акумуляторів гібридних електростанцій. Можливість не тільки розрахувати напругу заряджання, але й оцінити її похибки. Єдиним недоліком є високі вимоги.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MP.AT-73.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 27   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

Під час випробувань було зроблено спробу з'ясувати, як можна покращити показник заряду (SOC). Як експериментальний зразок було обрано літій-іонний акумулятор на 24 В ємністю 100 Аг, який заряджається постійним струмом 35 А та 50 А, отримані дані представлені на рисунку 1.7

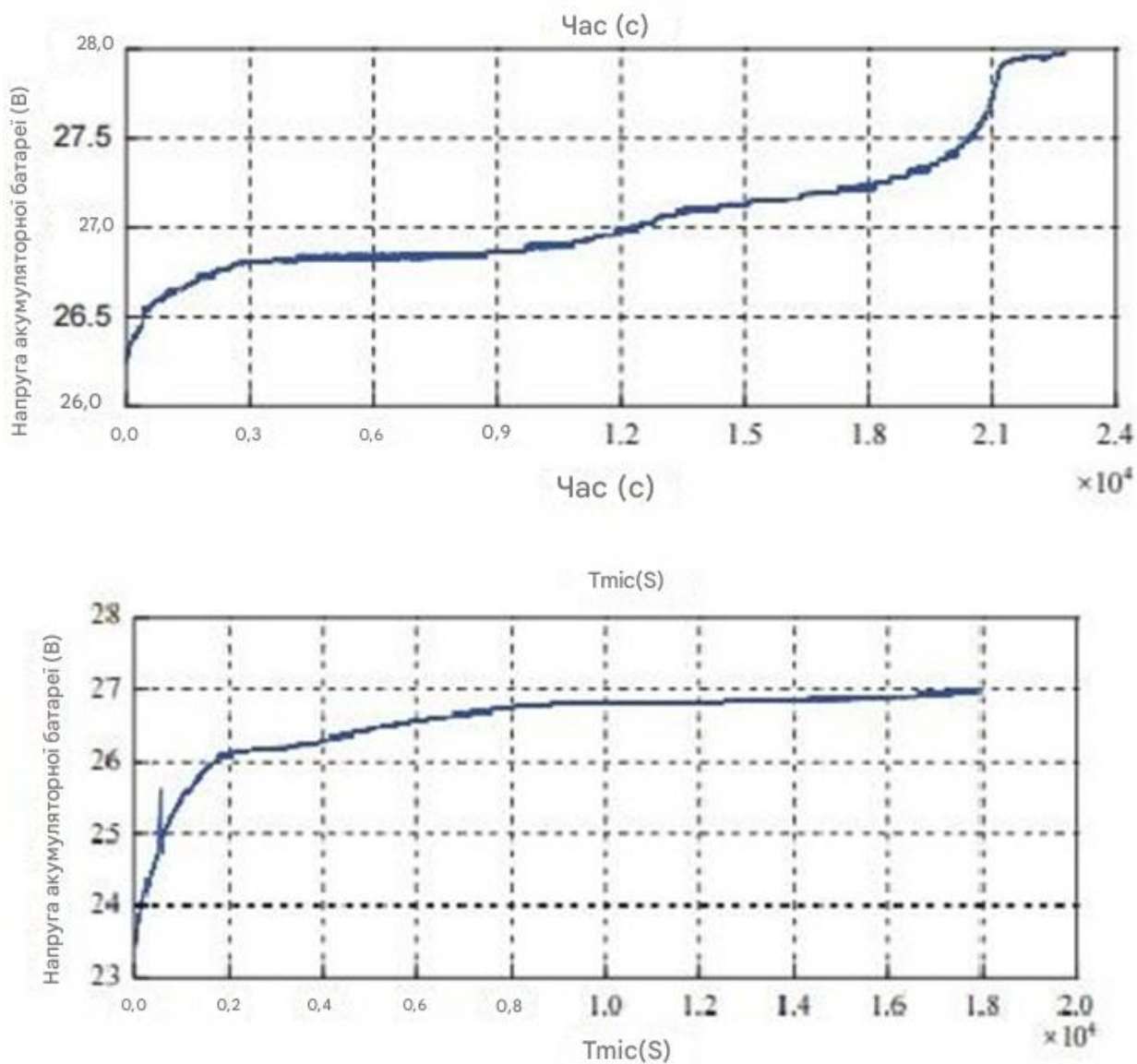


Рисунок 1.7 - Результати заряджання акумулятора [10]

Згідно з отриманими результатами, зроблено висновок, що електрична сила заряду акумулятора обернено пропорційна індукованій напрузі в акумуляторній батареї, тобто при зарядці акумулятора постійним струмом 35

А індуквана напруга досягає 28 В, а при зарядці струмом 50 А граничне значення становить 27 В.

Враховуючи методи дослідження, можна стверджувати, що параметр стану рівня заряду оцінюється безпосередньо від обраного типу методу. Згідно з практичним застосуванням, метод розрахунку Аг - ампер-година є найбільш поширеним. Зазвичай його поєднують з іншими методами визначення. Систематичний метод та метод фільтрації Калмана є більш перспективними методами, що застосовуються на сьогоднішній день, хоча вони ще не повністю розроблені. Рівень заряду та розряду акумулятора, температура, саморозряд та довговічність мають значний вплив на оцінку стану заряду (SOC). Зі швидким розвитком технологій та умов експлуатації електродвигуна дуже важко оцінити статичний стан заряду акумуляторів [9, 10].

### **1.8 Вплив температури навколишнього середовища на ефективність керування електромобілем**

Вчені з Національної лабораторії Айдахо (США) проводили випробування з лютого по травень 2016 року, щоб визначити вплив холоду на ходові якості електромобіля. Предметом дослідження був автомобіль Nissan Leaf 2015 року випуску з номінальною ємністю акумулятора 24 кВт·год. Електромобіль зберігався та заряджався на відкритій парковці. У дослідженні використовувалися послуги одного водія, який створював маршрут, що складався з сільської місцевості, міста та шосе. Протягом тестового періоду маршрут проїжджав кілька разів на день, щоб зрозуміти споживання енергії та обмеження запасу ходу, які коливаються залежно від робочої температури компонентів електромобіля. Отримані дані записуються та обробляються за допомогою спеціального програмного забезпечення. Оскільки температура протягом тестового періоду коливалася від -12 до 23° С, споживання електроенергії та запас ходу значно коливалися. У

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MP.AT-73.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 29   |

найхолодніший день автомобіль Nissan Leaf споживав цілих 467 Вт·год на милю, а відстань, пройдена з повністю зарядженим акумулятором, становила лише 50 миль, тобто ~ 80,46 км. Результати поїздки, здійсненої в найтепліший період, не були несподіванкою, оскільки відомо, що зі зростанням температури зовнішнього повітря споживання електроенергії має тенденцію до зменшення. Пройдена відстань становила 90 миль, тобто ~144,84 км.

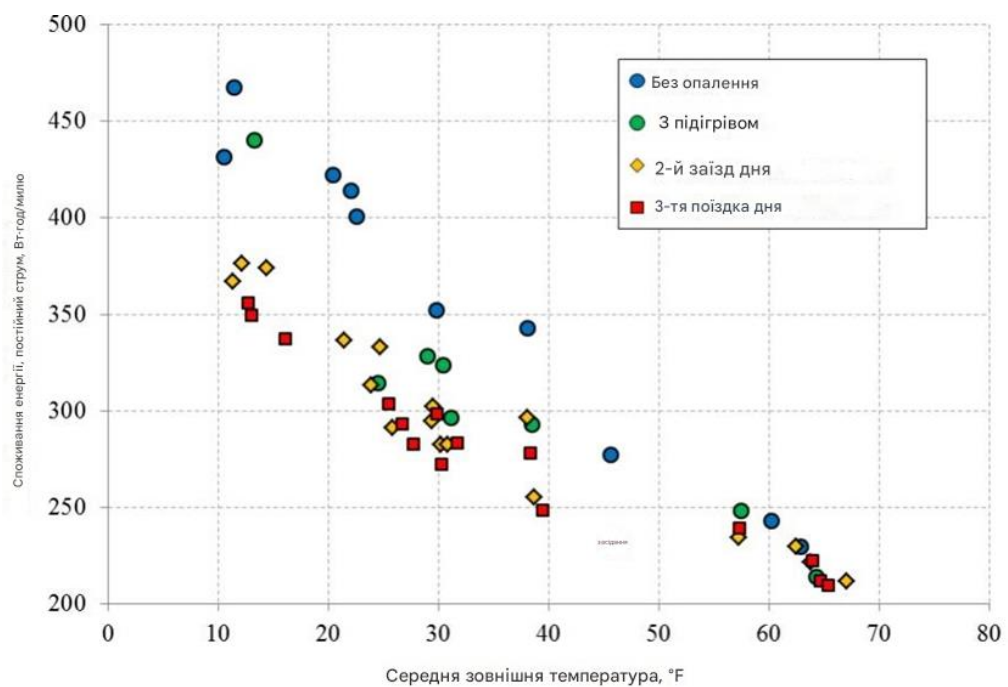


Рисунок 1.8 - Залежність споживання енергії від температури навколишнього середовища [11]

Процедура та умови випробування:

- Усі тест-драйви виконує один і той самий водій;
- У автомобілі немає вантажу;
- Круїз-контроль вимкнено під час поїздок через складні дорожні умови;
- Використовуються лише прилади ближнього світла та клімат-контролю;
- Залишено на вулиці на 24 години перед випробуванням;

|      |      |          |        |      |
|------|------|----------|--------|------|
|      |      |          |        |      |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

- Випробування проводяться, коли дорожнє покриття чисте, немає снігу чи мокрогo снігу;
- Підігрів керма та сидінь вимкнено під час випробування;
- Автономний таймер клімат-контролю використовується протягом 30 хвилин перед випробуванням для прогріву салону електромобіля та акумулятора.

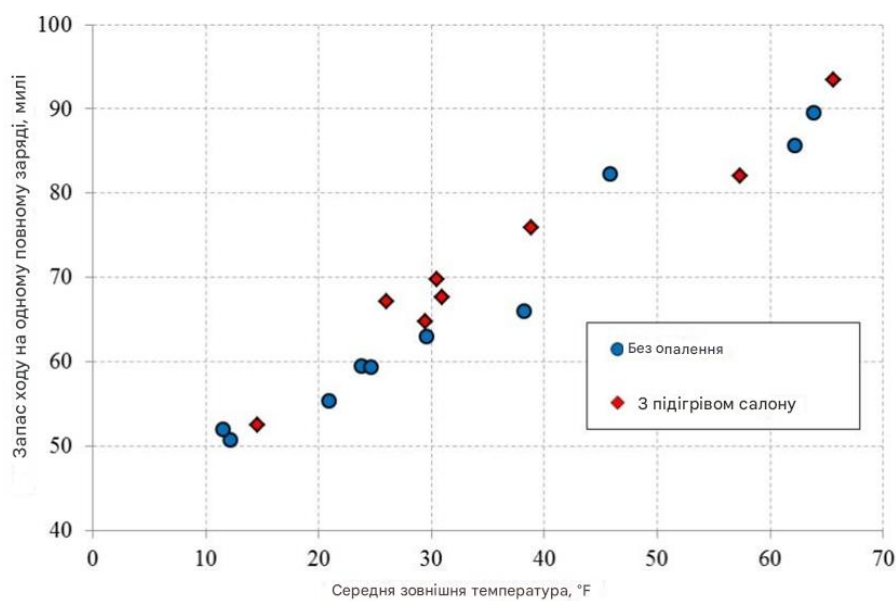


Рисунок 1.9 - Залежність пройденої відстані від температури навколишнього середовища [11]

Згідно з отриманими результатами (рисунки 1.8 та 1.9), ми бачимо, що з підвищенням температури зовнішнього повітря або попереднім нагріванням салону електромобіля та акумулятора середнє споживання електроенергії на одиницю відстані зменшується, а дальність подолання дистанції збільшується [11, 12].

Дослідники з Мічигану та Республіки Корея провели дослідження з метою розробки та оцінки управління зарядом і розрядом акумулятора в режимі реального часу та збільшення кількості циклів служби акумулятора на основі його фізичних властивостей. Електромобілі зазвичай живляться від великої кількості акумуляторних елементів, що вимагає ефективно функціонуючої системи управління акумулятором (BMS). Система допомагає

захистити акумуляторні елементи від суворих умов, одночасно ефективно забезпечуючи необхідну потужність. Під час випробувань спочатку реєструються фізичні динамічні властивості електромобіля, які впливають на швидкість заряджання та розряджання акумулятора. Наприклад, енергія, що генерується та накопичується системою рекуперативного гальмування (RBS), викликає сплески електричного струму в акумуляторі, що знижує його довговічність. На основі принципу роботи системи накопичення енергії підготовлені маніпулятивні контролери заряду та розряду зі спеціально розробленим алгоритмом. Випробування показали, що запропоноване керування рівнем розряду та/або заряду покращує довговічність акумулятора до 37,7% з низькими додатковими витратами порівняно з системами накопичення енергії.

Електромобіль має рекуперативну гальмівну систему (RBS), яка використовує отриману енергію гальмування для заряджання літій-іонного акумулятора. Під час гальмування RBS перетворює кінетичну енергію автомобіля на електричну, яка передається в акумулятор і використовується для живлення автомобіля.

Метою випробувань було з'ясувати, який вплив RBS має на системи накопичення енергії. Згідно з отриманими результатами (Рисунок 1.10), ми бачимо, що зі зміною швидкості електромобіля в діапазоні швидкостей 0-90 км/год, струм розряду змінюється в діапазоні -20-70 А.

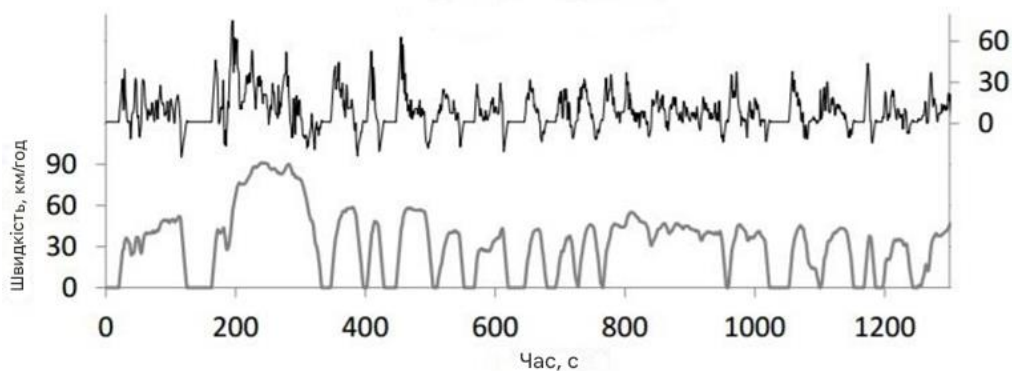


Рисунок 1.10 - Залежність струму живлення електромобіля від швидкості руху [13]

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MP.AT-73.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 32   |

Як згадувалося раніше, термін служби акумулятора скорочується через виникнення стрибків електричного струму, що виникають під час роботи системи RBS. Щоб вирішити цю проблему, вчені встановлюють ультраконденсатори (UCS) як додаткову систему в BMS. BMS з UCS утворює гібридну систему накопичення енергії (HESS). Система працює за принципом амортизатора, плавно та швидко поглинаючи виникаючі коливання, а також використовуючи властивості UCS, оскільки потужність та щільність енергії прискорюють передачу миттєвих перебоїв електроенергії від RBS. Єдиним мінусом є висока вартість системи.

Після проведення додаткових досліджень було виявлено, що при безпосередньому підключенні системи HESS до акумулятора (рис. 1.11), UCS діє як фільтр і пропускає невеликі стрибки енергії, зменшуючи розряд акумулятора. Однак, при підключенні HESS до перетворювача постійного струму з акумулятором, стрибки напруги зменшуються до 20%, а довговічність акумулятора збільшується до 13%.

Для підвищення ринкового попиту на електромобілі та забезпечення їх фінансової доступності, системи управління акумуляторами повинні витримувати різкі зміни швидкості заряду та розряду, які суттєво впливають на продуктивність акумуляторів.

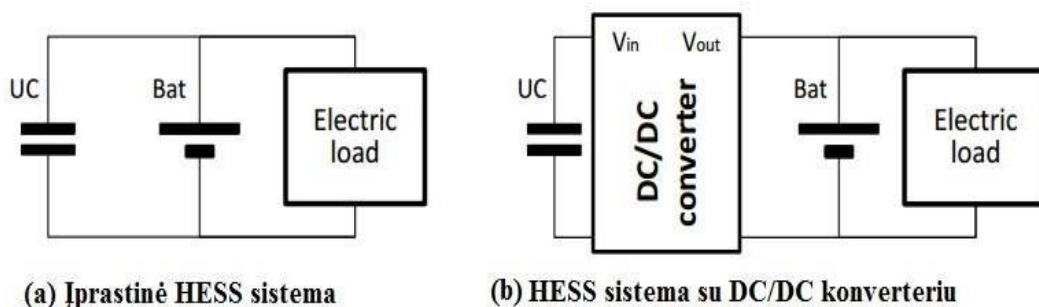


Рисунок 1.11 - Принципова схема гібридної системи накопичення енергії [13]

Під час експерименту було виявлено, що ефективного управління акумуляторами можна досягти за допомогою додаткових систем HESS, що зменшить витрати на споживання електроенергії. Удосконалення системи підвищить ефективність акумулятора без збільшення його вартості [13,14, 19].

У 2009 році дослідники з кафедри електротехніки Монреальського університету досліджували, як покращити та легко адаптувати динамічну модель акумулятора для своїх потреб. Енергія заряду та розряду моделі акумулятора була експериментально перевірена з чотирма різними типами акумуляторів, а саме свинцево-кислотними (Pb-Acid), нікель-кадмієвими (NiCd), літій-іонними (Li-ion) та нікель-металгідридними (NiMH). Під час випробувань використовувалися криві розряду виробника, і для визначення необхідних параметрів використовувалися лише три точки даних з кожної кривої. Створена динамічна модель акумулятора була оброблена за допомогою програмного забезпечення та використана для моделювання електромобіля на основі джерел живлення від акумуляторів гібридної електростанції. Отримані результати підтверджують цілі дослідників та відображають динамічну надійність енергії акумулятора. Криві розряду дуже схожі на модель Шепарда, яка може описувати зміну напруги енергії акумулятора при зміні даних струму незалежно від розімкнутого кола та стану заряду.

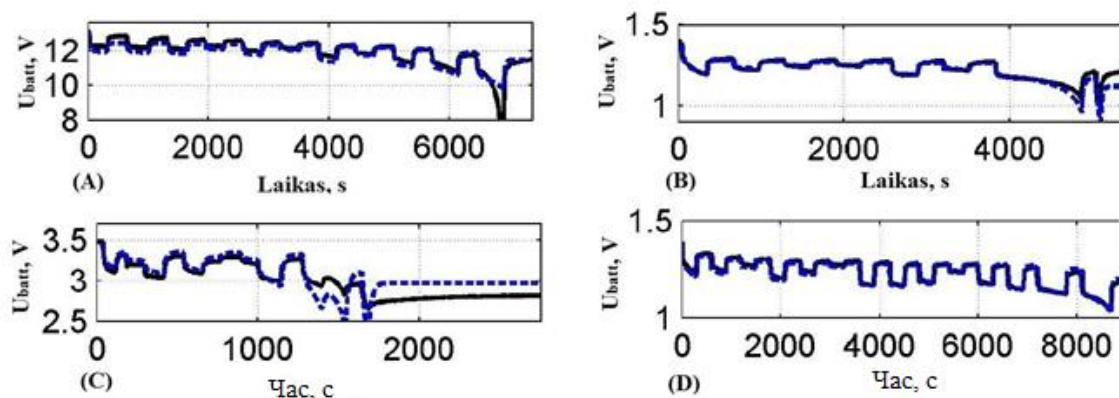


Рисунок 1.12 - Результати дослідження [14]

Результати, отримані під час дослідження, показують, що при розрядці свинцево-кислотного акумулятора ємністю 7,2 Аг постійним струмом протягом майже двох годин питома напруга акумулятора коливається в межах 8-12 В.

При розрядці нікель-кадмієвого акумулятора ємністю 2,3 Аг протягом півтори години питома напруга акумулятора коливається в межах 0,8-1,4 В.

Коли літій-іонний акумулятор ємністю 2,3 Аг розряджається протягом приблизно однієї години, досягнута питома напруга акумулятора коливається в діапазоні 2,5-3,4 В.

Коли нікель-металгідридний акумулятор ємністю 6,5 Аг розряджається протягом двох з половиною годин, досягнута питома напруга акумулятора коливається в діапазоні 1,1-1,4 В.

Результати досліджень доводять, що, вибравши будь-які три опорні точки з кривих розряду, наданих виробником, можна визначити динамічну енергетичну надійність акумулятора. Знаючи надійність акумулятора, можна налаштувати або створити більш надійні системи управління акумулятором для більш ефективного використання об'єкта [15, 16, 17, 18].

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MP.AT-73.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 35   |

## 2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МЕТОДОЛОГІЯ

Метою експериментального дослідження є вивчення того, як спільне використання пристроїв комфорту впливає на розряд літій-іонних акумуляторних елементів під час роботи. Тому для проведення дослідження необхідно зібрати якомога більше даних. Для дослідження було об'єднано кілька пристроїв збору даних, здатних одночасно вимірювати певні параметри. Також було створено спеціальний маршрут, метою якого є створення максимально реалістичних умов під час щоденної експлуатації.

### 2.1 Об'єкт дослідження

Об'єктом експериментального дослідження були обрані літій-іонні (Li-ion) акумулятори для електромобілів третього покоління. Характеристики обраних акумуляторів представлені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. Характеристики літій-іонного акумулятора електромобіля [2, 7]


|   |                                |                          |
|---|--------------------------------|--------------------------|
|  | Номинальна напруга, В          | 397                      |
|   | Номинальна ємність, кВт·год    | 30                       |
|   | Кількість елементів у батареї  | 48                       |
|   | Розташування елементів батареї | (4 – 4 – 2 – 2)х2<br>+24 |
|   | Габаритні розміри              | 1547 x 1188 x 264        |
|   | Вага, кг                       | 275.0                    |
|   | Створювана потужність, кВт     | >80                      |

Літій-іонні акумулятори мають дуже високу ємність, тому цей тип акумуляторів був випробуваний за максимально реалістичних умов експлуатації.

Літій-іонні акумулятори, обрані для тесту, можна знайти встановленими в, мабуть, найпопулярнішому автомобілі у світі, Nissan Leaf.

Характеристики обраного електромобіля представлені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - Технічні характеристики електромобіля [2, 7]

|   |                                       |                                 |
|---|---------------------------------------|---------------------------------|
|  | <b>Двигун</b>                         | <b>Повністю електричний при</b> |
|   | Максимальний крутний момент, Н·м      | 254 [3008-1000 грп]             |
|   | Привідні колеса                       | Передні                         |
|   | Максимальна швидкість, км/год         | 144                             |
|   | Прискорення до 100 км/год, с          | 11.5                            |
|   | Маса автомобіля, кг                   | 1570                            |
|   | Габаритні розміри, мм                 | 4445 – 1770 – 15 [база 2700]    |
|   | Середнє споживання на 100 км, кВт·год | 12                              |

Обраний електромобіль – це динамічний та маневрений міський автомобіль.

## 2.2 Процес та умови експериментального дослідження

Експериментальна продуктивність акумулятора, тобто вплив заряджання та розряджання під час роботи, аналізується шляхом визначення реальних умов експлуатації електромобіля після його заряджання за допомогою швидкої зарядної станції.

На початку експериментальних випробувань швидкість розряджання акумулятора оцінювалася шляхом вимірювання в режимі реального часу за допомогою струмових кліщів та діагностичного обладнання. Вимірювання розряду тестового акумулятора проводилося з активованим струмом електродвигуна, а також з увімкненими кількома зонами комфорту, такими як ближнє світло фар, кондиціонер та радіо. Оскільки електростанція не генерує енергію для руху електромобіля, струм розряджання вимірювався струмовими кліщами на тоншому дроті, тобто дроті, який подає електричний струм для живлення пристроїв салону електромобіля. Дані, отримані під час



розподіл по осях не мають суттєвого впливу на визначення параметрів розрядки, оскільки випробування проводяться лише за присутності водія;

- Кожна поїздка з різними режимами навантаження повторюється кілька разів за однакових умов, і середнє значення виводиться з результатів випробувань.

### **2.3 Експериментальне дослідницьке обладнання та інструменти**

Сучасні автомобілі мають різноманітні електричні блоки керування, які записують певні дані, пов'язані з ними, та надсилають їх до головного блоку керування (ЕСМ), який керує всіма іншими блоками. Користувачі, чії автомобілі мають кращу конфігурацію, отримують інформацію про передбачувану відстань, яку потрібно подолати, за допомогою бортового комп'ютера. Також за допомогою G-сенсора миттєва G-сила відображається на екрані комп'ютера. Хоча автомобілі оснащені найсучаснішими технологіями, за допомогою стандартного автомобільного обладнання неможливо контролювати всі необхідні параметри. Тому під час дослідження було використано спеціальне обладнання - Panasonic Toughbook CF-19 з програмним забезпеченням Consult III Plus та VIM

Обладнання використовується для підключення до блоків керування двигуном та літій-іонним акумулятором, а також для запису необхідних даних. Діагностичне обладнання з модулем інтерфейсу автомобіля та роз'ємом, а також останньою версією програмного забезпечення Consult III Plus (рисунок 2.2) спеціально адаптовано для автомобілів марок Nissan та Infiniti.

За допомогою цього обладнання можна контролювати та записувати параметри силової установки автомобіля, перепрограмувати блоки керування, просто підключившись до головного блоку керування транспортного засобу. Під час дослідження фіксувалися основні експлуатаційні параметри електромобіля. Отримані дані дуже точні, дані

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MP.AT-73.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 39   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

записуються з точністю 1, 3 та 6 мілісекунд, або з інтервалом 1 та 3 секунди.



Рисунок 2.2 - Діагностичне обладнання з програмним забезпеченням Consult III Plus [8]

Дані, отримані під час дослідження, обробляються за допомогою того ж програмного забезпечення Consult III Plus та MS Excel. Дані з кожного тестового запуску аналізуються окремо та порівнюються один з одним.

#### Струмові вимірювальні кліщі КТ203 AC/DC

Обладнання (рис. 2.3) використовується для вимірювання величини розрядженого електричного струму без розриву кола живлення. Для цього не потрібно зупиняти обладнання або джерело живлення, щоб виміряти струм.

Під час експерименту для визначення змінних значень електричного струму використовувалися струмовимірювальні кліщі КТ203 AC/DC, які відповідають вимогам до контрольних пристроїв. Такий пристрій широко використовується в процесах автомобільного слюсарного виробництва.



Рисунок 2.3 - Струмові вимірювальні кліщі KT203 AC/DC

Керування пристроєм здійснюється за допомогою функціональних кнопок, а результати вимірювань відображаються на рідкокристалічному дисплеї.

Чутливі елементи та обчислювальний блок вимірювального приладу встановлені в одному корпусі, живляться від додаткового джерела живлення - джерела 9В.

### ***Маршрут***

Обраний маршрут має значний вплив на результати експериментів та їх поширення, тому його вибору було приділено багато уваги. Виробники автомобілів проводять випробування в закритих лабораторіях, зберігаючи ідеальні умови експлуатації. Щоб отримати реалістичні та повсякденні результати водіння, необхідно приділяти багато уваги вибору маршруту, а також враховувати час, щоб інтенсивність руху не була надто інтенсивною та не спотворювала результати.

Під час складання маршруту (Рисунок 2.4) метою було створити якомога різноманітніші умови руху. Після оцінки плану міста Івано-Франківська обраний тестовий маршрут пролягає: вул. Калушське шосе – вул. Галицька – Набережна – вул. Целевича – вул. Хіміків.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MP.AT-73.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 41   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

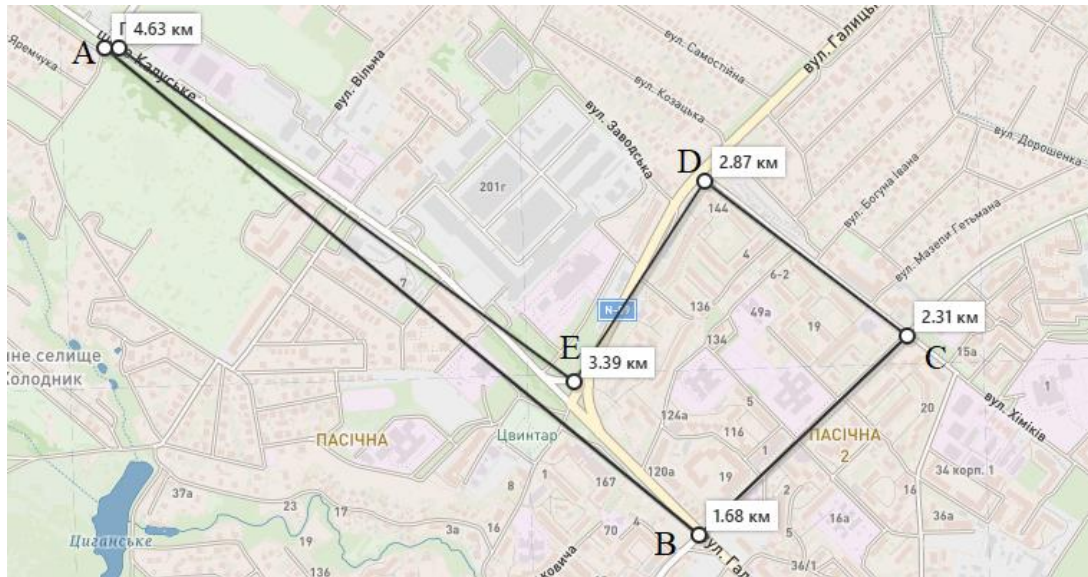


Рисунок 2.4 - Маршрут дослідження в місті Івано-Франківськ

Маршрут, визначений для дослідження, можна розділити на чотири ділянки:

- В – С: ділянки з інтенсивним рухом транспорту з певними дорожніми об'єктами, такими як світлофори та нерегульовані пішохідні переходи;
- А – В, D - Е: довжина ділянки на схилі з уповільненням руху. Електромобіль рухається з постійною швидкістю та рівномірним уповільненням;
- С – D: довжина ділянки на підйомі з максимальним прискоренням. Електромобіль рухається з постійною швидкістю з увімкненим круїз-контролем, і все контролюється комп'ютером.

Відповідно до маршруту, отримані дані покажуть, як змінюється вплив факторів експлуатації транспортного засобу на характеристики літій-іонних акумуляторних елементів за різних умов експлуатації. Також буде спостерігатися, який вплив має робота системи рекуперативного гальмування на розряд/заряд акумулятора.

### 3 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Під час експериментальних досліджень за різних умов експлуатації були визначені основні характеристики розряду літій-іонного акумулятора:

- Статична ємність акумулятора;
- Статична номінальна потужність, що генерується літій-іонним акумулятором для рушійної системи;
- Час статичного розряду в кіловат-годинах.

#### 3.1 Результати, отримані під час експерименту

Під час експерименту вимірювалися питомі характеристики акумулятора та параметри автомобіля за допомогою різних факторів зони комфорту, що використовуються під час експлуатації. Для розрахунку характеристик розряду літій-іонного акумулятора вимірюються температура акумулятора, рівень заряду елементів, швидкість автомобіля, споживання енергії та безліч інших параметрів. Потім дані оброблялись за допомогою спеціальних пакетів програмного забезпечення MS Office, а отримані дані порівнювались у вигляді графіків та стовпчастих діаграм.

##### 3.1.1 Режим ECO та всі електричні пристрої зони комфорту вимкнені

Акумулятор заряджали за допомогою швидкої зарядної станції потужністю 50 кВт постійним струмом за нормальної температури  $10\pm 2^{\circ}\text{C}$ . Принаймні через 30 хвилин після заряджання літій-іонного акумулятора запускали тестові запуски, і після обробки даних характеристики акумулятора визначали шляхом алгоритмічного усереднення даних. Отримані результати представлені на рисунках 3.1-3.5. Зведений виклад результатів представлено в таблиці 3.1.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MP.AT-73.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 43   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

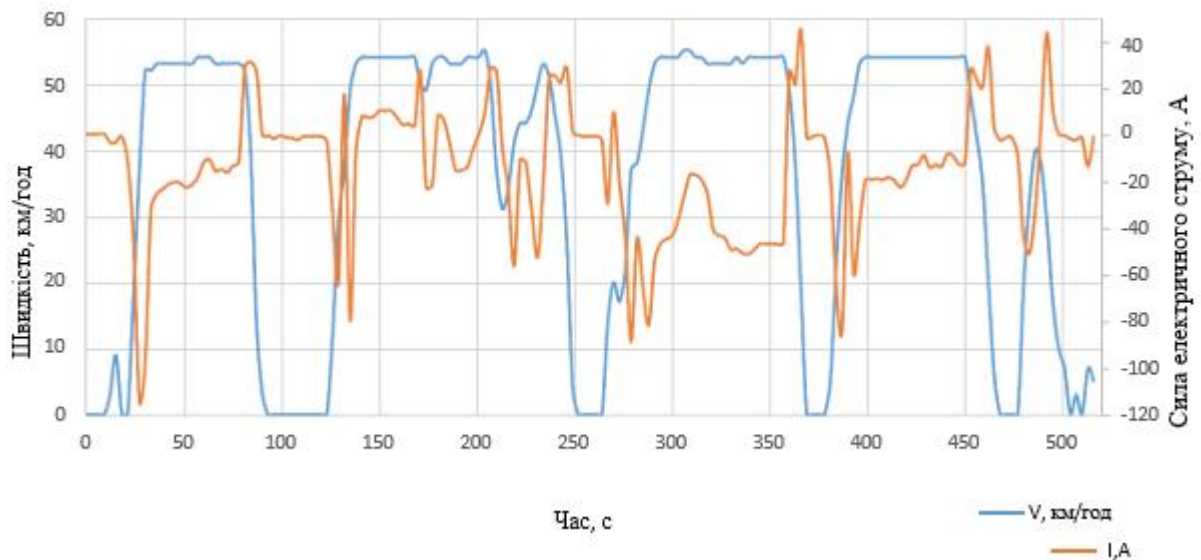


Рисунок 3.1 - Залежність розряду та заряду акумулятора від швидкості руху

Електромобіль має рекуперативну гальмівну систему (RBS), яка використовує отриману енергію гальмування для заряджання літій-іонного акумулятора. Під час гальмування RBS перетворює кінетичну енергію автомобіля на електричну, яка передається до акумулятора та використовується для силової установки автомобіля. Результати експериментального випробування, представлені на рисунку 3.1, дозволяють спостерігати, як ця система працює та впливає на продуктивність акумулятора. Під час руху електромобіля за заданим маршрутом з вимкненими пристроями зони комфорту на розряд акумулятора найбільше впливає положення педалі акселератора, тобто сила, що прикладається до силової установки. Коли автомобіль розганяється до швидкості 55 км/год, значення розряду досягає 114,5 А, а під час гальмування кількість виробленої електроенергії досягає 45 А. На зупинки автомобіля, що видно на графіку, впливали елементи керування потоком транспорту та перехрестям.

Статична ємність літій-іонного акумулятора показує теоретичний час, протягом якого акумулятор може розряджатися за допомогою постійного струму. Під час випробування акумулятор піддавався різним навантаженням,

тому, якщо побудувати графік статичної ємності акумулятора (рис. 3.2), то отримаємо, що при розгоні електромобіля напруга акумулятора падає до межі 377 В, а при уповільненні – підвищується до межі 387,5 В. Тим часом ємність акумулятора під час розряду постійна і досягає 68,3 Аг, а під час заряджання, тобто при уповільненні електромобіля, – 67,75 Аг.

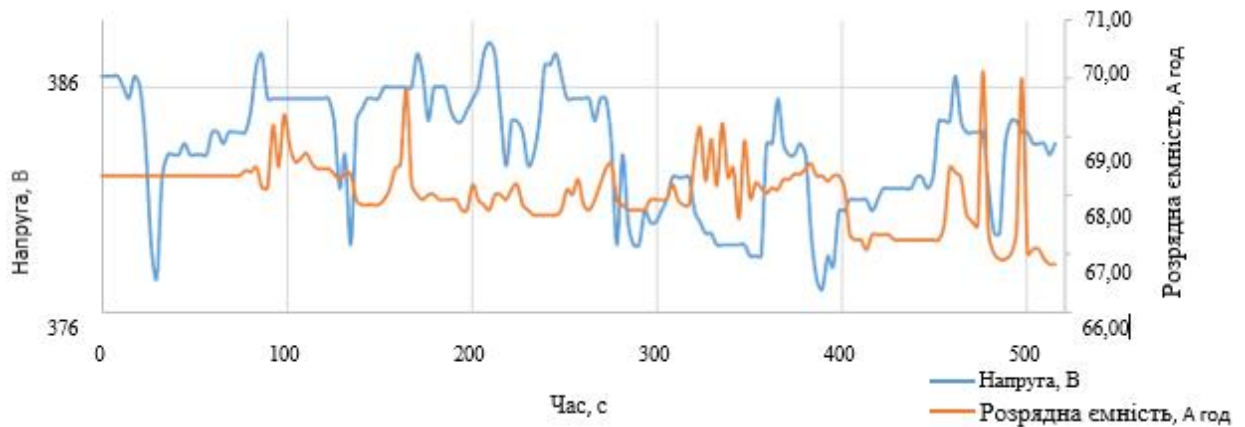


Рис. 3.2 - Статична ємність батареї

Симетрія кривих статичної ємності батареї вказує на те, що вона працює належним чином, але місцями спостерігаються деякі піки напруги. Зміна кривої напруги вказує на те, що акумулятор розряджається та відбуваються втрати. За нормальних умов втрати можуть сягати 10%.

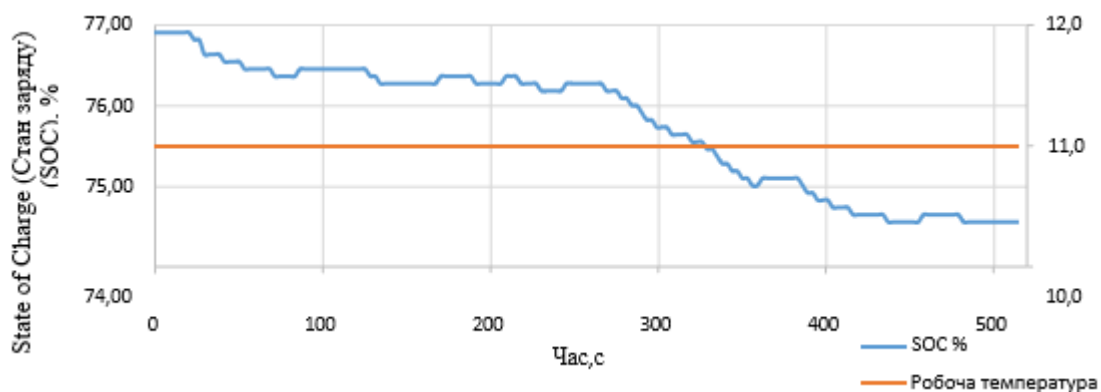


Рисунок 3.3 - Рівень заряду батареї в залежності від її робочої температури

На повноцінне використання акумулятора електромобіля значний вплив має робоча температура його елементів. Відомо, що батарея найкраще працює, коли робоча температура перебуває в межах від  $-10$  до  $20$  °С. Під час експерименту робоча температура становить  $11$  °С, а рівень заряду батареї зменшується на  $3\%$  через навантаження під час руху.

Під час роботи значення напруги елементів акумулятора змінюються по-різному, оскільки не всі елементи використовуються однаково. Було визначено, що мінімальна напруга елементів на початку випробування досягала  $4,01$  В, а максимальна межа становила  $4,03$  В (рис. 3.4). Зі зміною навантажень їх значення негайно реагують на зміни та змінюють свої параметри. Нарешті, після завершення випробування отримані параметри знизилися до меж  $3,99$  В та  $4,0$  В.

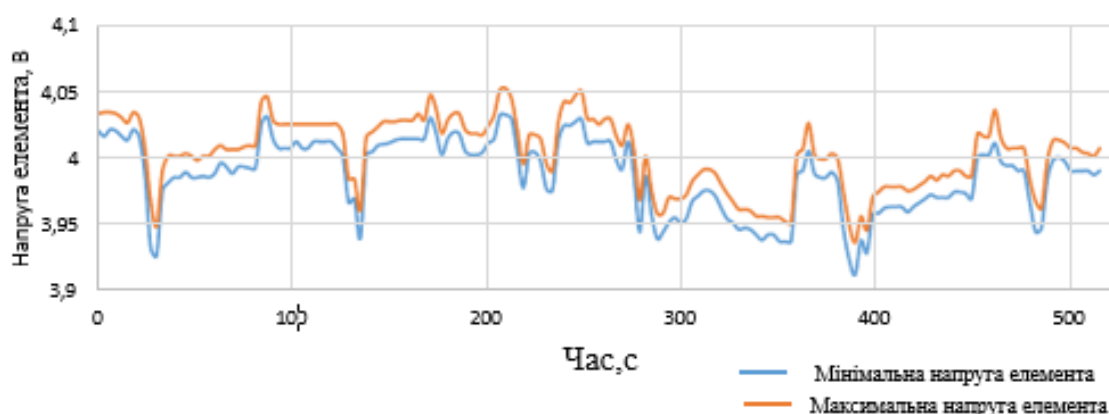


Рисунок 3.4 - Зміна заряду елементів акумулятора

Під час створення навантаження на силову установку електромобіля та під час розгону автомобіля витрати електричної енергії зростають. Тягова потужність, що створюється електродвигуном, не є прямо пропорційною обсягу споживаної енергії. Під час розгону електромобіля досягається потужність  $32$  кВт і споживання енергії становить  $25,2$  кВт·год, а під час уповільнення –  $14,5$  кВт, і споживання енергії зменшується до межі  $25$  кВт·год (рис. 3.5).

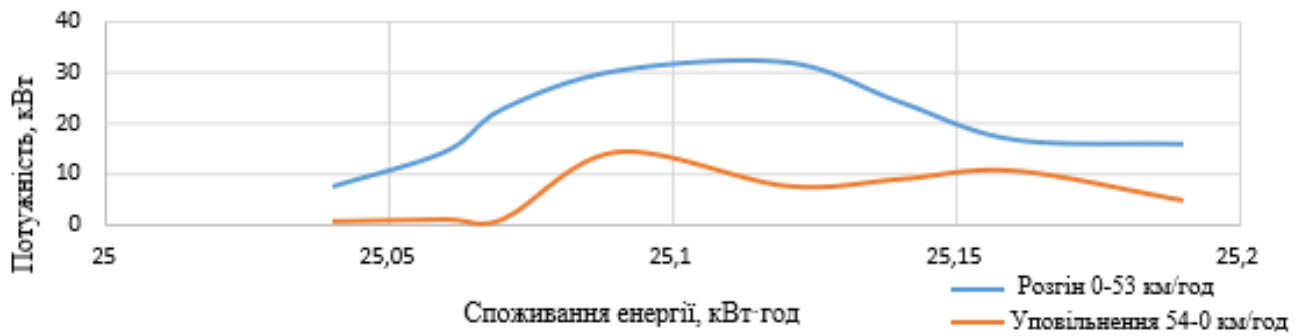


Рисунок 3.5 - Залежність потужності, що розвивається від споживання енергії

Щоб з'ясувати, чи впливає збільшення маси на результати експерименту, його повторили з пасажиром (вага пасажирів сягає 80 кг). Результати представлені на рисунках 3.6-3.10.

При повторенні тесту на тому ж маршруті, тільки цього разу з пасажиром, що сидить, розряд акумулятора дещо збільшується, порівняно з результатами, отриманими під час руху лише з водієм. При розгоні автомобіля до швидкості 55 км/год розряд досягає 134,5 А, а при гальмуванні кількість виробленої електроенергії досягає 27 А. На графіку видно, що автомобіль дещо сповільнювався через рух транспортного потоку та елементи керування перехрестям.

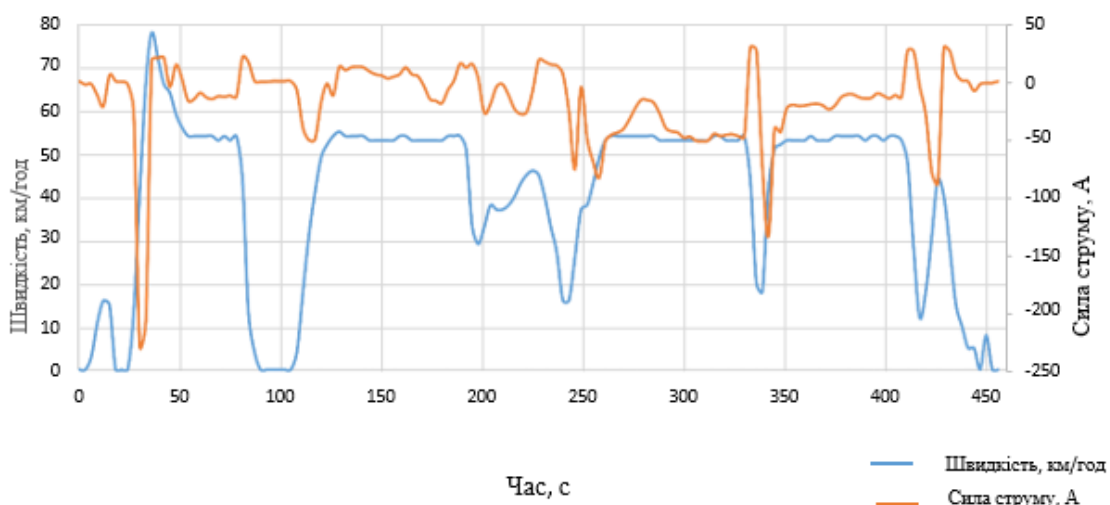


Рисунок 3.6 - Залежність розряду та заряду акумулятора від швидкості руху (випробування з пасажиром)

Під час випробування акумулятор піддавався різним навантаженням, тому при побудові графіка статичної ємності акумулятора (рисунок 3.7) виходить, що при розгоні електромобіля напруга акумулятора падає до межі 370 В, а при уповільненні – підвищується до межі 389,5 В. Тим часом ємність акумулятора під час розряду досягає 73,3 Аг, а під час заряджання, тобто коли електромобіль уповільнюється, – 68,25 Аг.

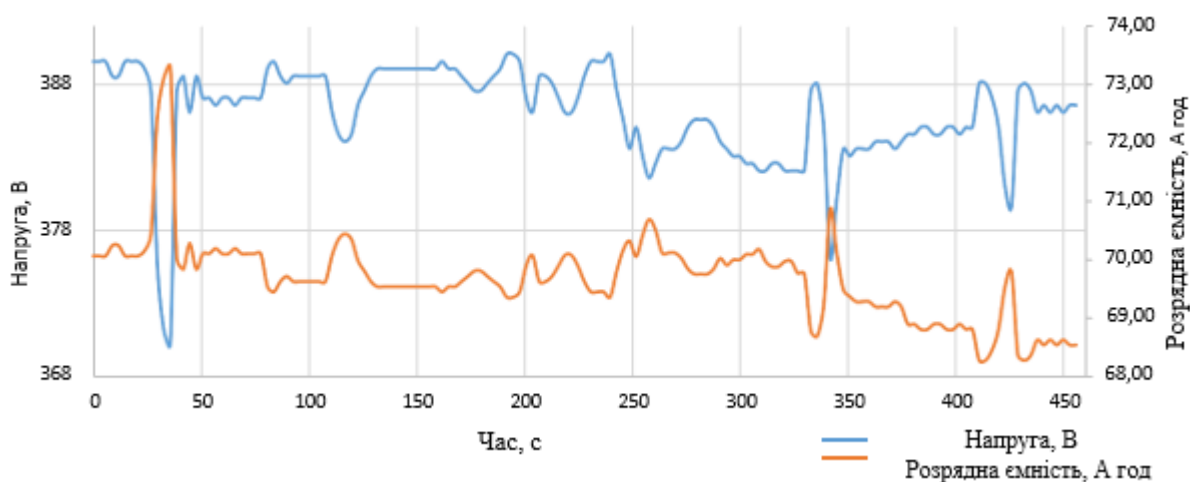


Рисунок 3.7 - Статична ємність акумулятора (випробування з пасажиром)

Під час експерименту робоча температура акумуляторів (рис. 3.8) досягає 10° С, а рівень заряду акумулятора знижується майже на 3% від дорожнього та кочового навантаження.

Під час експлуатації електромобіля, зі зміною дорожнього та кочового навантаження, розряд акумулятора також змінюється по-різному, і елементи акумулятора реагують на це. Мінімальна напруга елементів на початку випробування досягала 4,05 В, а максимальна межа становила 4,06 В (рис. 3.9). В кінці випробування отримані параметри знизилися до меж 4,02 В та 4,03 В.

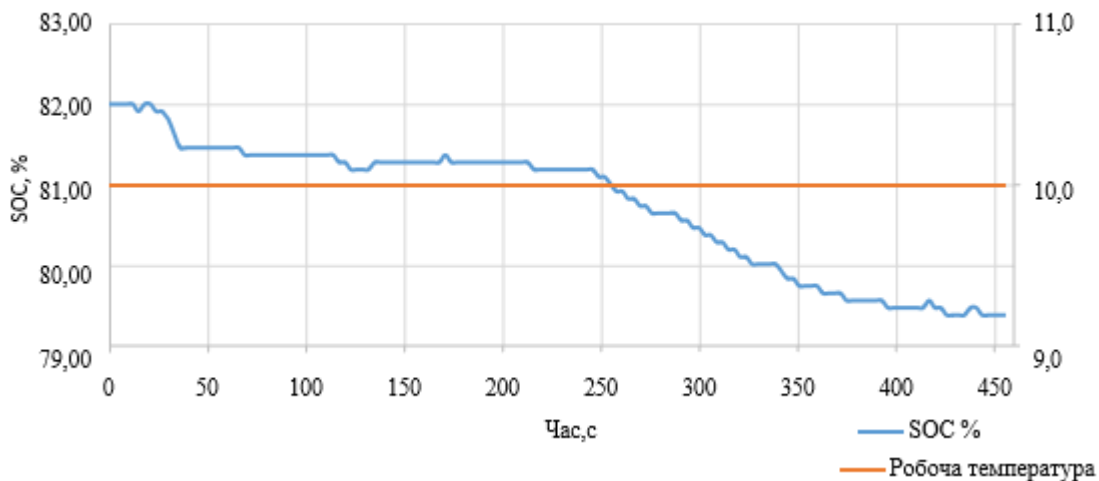


Рисунок 3.8 - Рівень заряду акумулятора в залежності від робочої температури акумулятора (випробування з пасажиром)

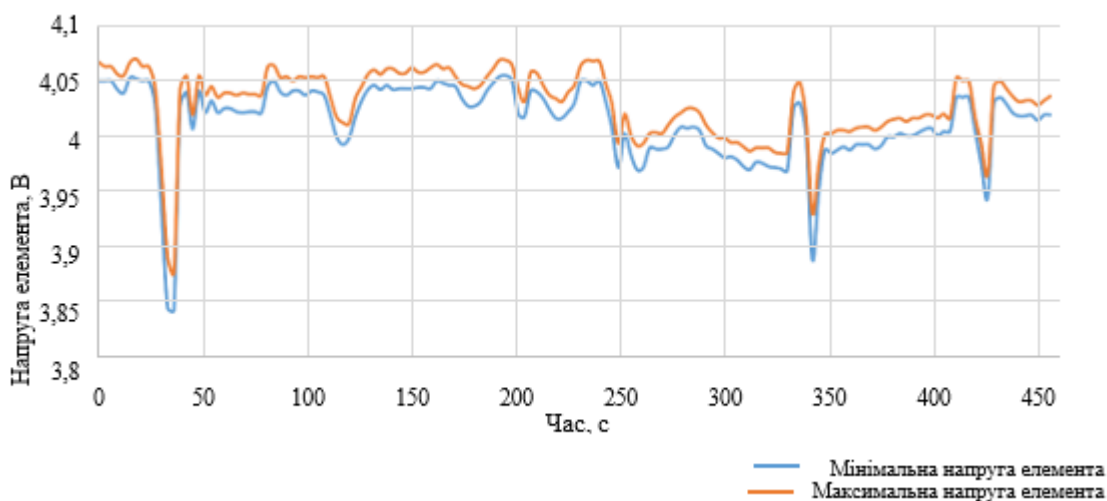


Рисунок 3.9 - Зміна заряду елементів акумулятора (випробування з пасажиром)

Під час створення навантаження на силову установку електромобіля та розгону автомобіля витрати електричної енергії зростають. Тягова потужність електродвигуна не є прямо пропорційною обсягу споживаної енергії. Під час розгону електромобіля досягається потужність 20 кВт, а споживання енергії становить 27,12 кВт·год, а під час уповільнення – 8,7 кВт, і споживання енергії зменшується до межі 27 кВт·год (рис. 3.10).

|      |      |          |        |      |
|------|------|----------|--------|------|
|      |      |          |        |      |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

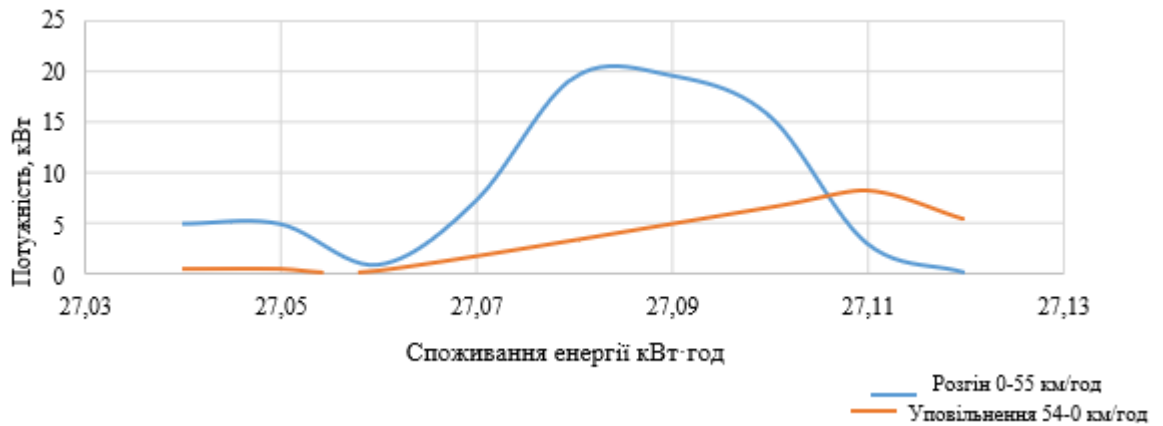


Рисунок 3.10 - Залежність потужності, яка розвивається від споживання енергії

Дані, отримані під час тестових прогонів, порівнюються та представлені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Порівняння результатів

|                                    | Все вимкнено - 1 особа |              | Все вимкнено - 2 особи |              |
|------------------------------------|------------------------|--------------|------------------------|--------------|
|                                    | Прискорення            | Уповільнення | Прискорення            | Уповільнення |
| Швидкість, км/год                  | 0-53                   | 54-0         | 0-55                   |              |
| Сила струму, А                     | 114.5                  | 45           | 134.5                  |              |
| Потужність, кВт                    | 31.9                   | 14.5         | 19.61                  |              |
| Споживання енергії, кВт·год        | 25.2                   | 25.05        | 27.12                  |              |
| Мін. напруга елемента, В           | 3.92                   | 4.03         | 3.84                   | 4.02         |
| Макс. напруга елемента, В          | 3.95                   | 4.05         | 3.88                   | 4.05         |
| Напруга акумулятора, В             | 377.5                  | 388          | 370                    | 388          |
| Ємність розряду, А·год             | 68.34                  | 67.75        | 73.30                  | 70.33        |
| Номінальний заряд, %               | 75                     |              | 80.5                   |              |
| Робоча температура акумулятора, °С | 11                     |              | 10                     |              |

Порівнюючи отримані дані, можна стверджувати, що вантажопідйомність маси автомобіля має більший вплив на швидкість

розряду літій-іонного акумулятора, ніж очікувалося. Під час розгону електромобіля швидкість розряду змінюється на 20 А, а енергія, що виробляється під час гальмування, змінюється вдвічі. Характеристики як акумулятора, так і елементів відрізняються дуже мало.

### 3.1.2 Кондиціонування повітря та радіо увімкнено

Випробування повторюються з використанням засобів комфорту, які зазвичай застосовуються кожним водієм у теплу пору року. Отримані результати обробляються та наведені на рисунку 3.11.

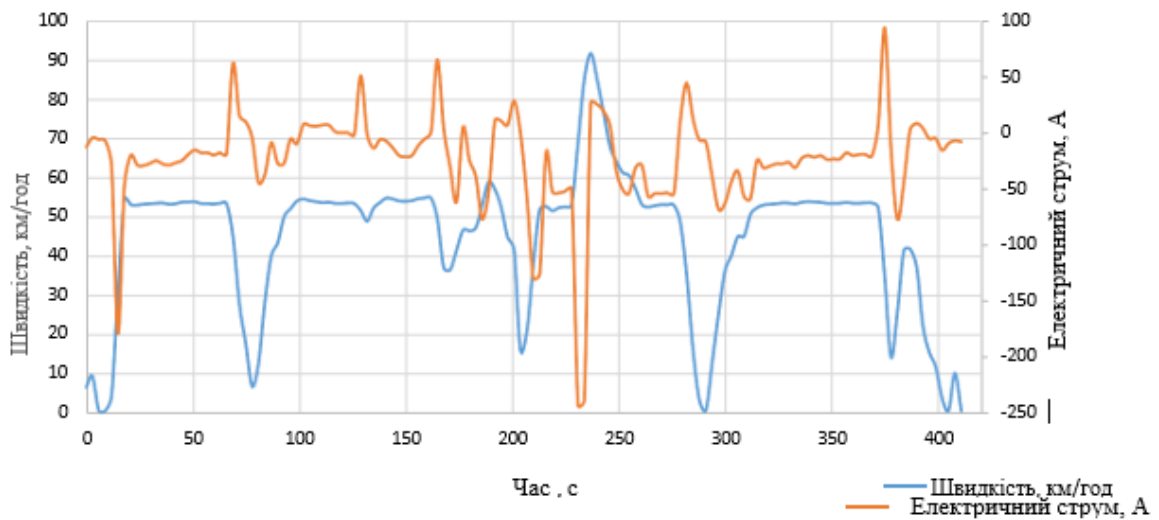


Рисунок 3.11 - Залежність розряду та заряду акумулятора від швидкості руху (кондиціонер та радіо увімкнені)

Під час випробування було здійснено одну зупинку на регульованому перехресті та одне гальмування в потоці руху. При розгоні автомобіля від 0 до 55 км/год досягнута сила розряду досягає 180,5 А, а при гальмуванні від 54 до 0 км/год значення генерованої електричної сили становить 45 А. Ми також бачимо, що при різкому гальмуванні електромобіля рекуперативна гальмівна система генерує більшу кількість енергії, ніж при зупинці автомобіля, тобто при гальмуванні електрична сила досягає значення 94,5 А.

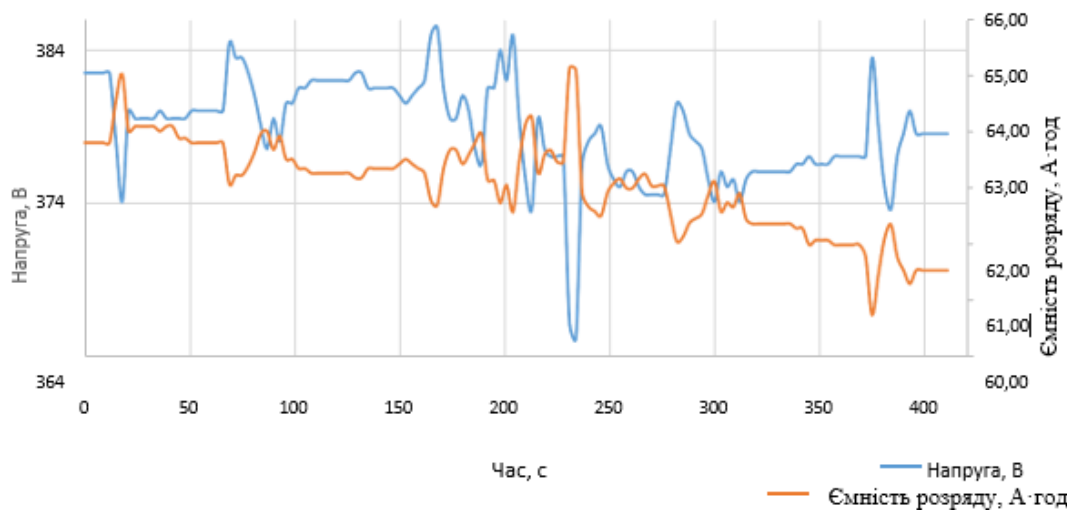


Рисунок 3.12 - Статична ємність акумулятора (кондиціонер та радіо увімкнені)

Коли акумулятор піддається навантаженням, будується графік статичної ємності акумулятора (рис. 3.12). Виявляється, що при розгоні електромобіля від 0 до 55 км/год напруга акумулятора падає до межі 365 В, а при уповільненні від 54 до 0 км/год вона підвищується до межі 383,5 В. Тим часом ємність акумулятора під час розряду досягає 65,1 Аг, а під час заряджання, тобто коли електромобіль уповільнюється, досягає 60,70 Аг.

Під час експерименту робоча температура акумуляторів (рис. 3.13) досягає 16°C, а рівень заряду акумулятора знижується майже на 3%.

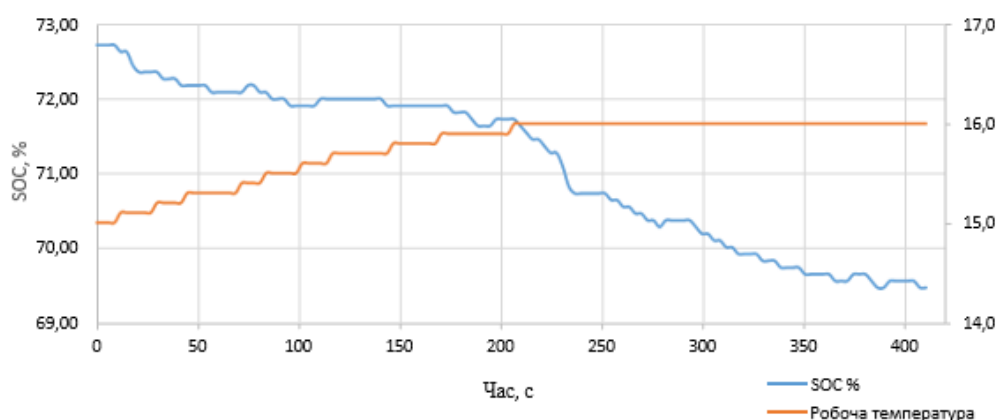


Рисунок 3.13 - Рівень заряду акумулятора в залежності від робочої температури акумулятора (кондиціонер та радіо увімкнені)

Під час експлуатації електромобіля, зі зміною дорожніх та кочових навантажень, розряд акумулятора також змінюється по-різному, і елементи акумулятора реагують на це. Мінімальна напруга елементів на початку випробування досягала 3,98 В, а максимальна межа – 3,99 В (рис. 3.14). В кінці випробування отримані параметри знизилися до меж 3,94 В та 3,96 В.



Рисунок 3.14 - Зміна заряду елементів акумулятора (кондиціонер та радіо увімкнені)

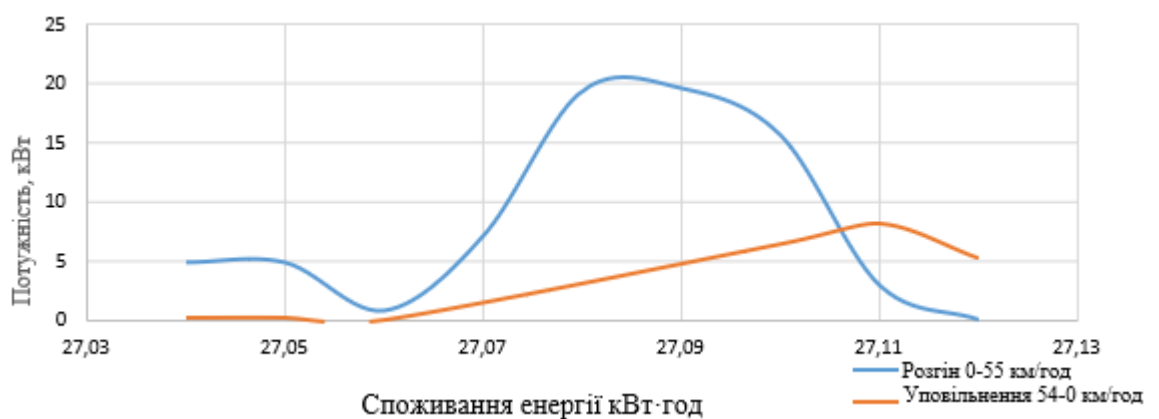


Рисунок 3.15 - Залежність потужності від споживання енергії (кондиціонер та радіо увімкнені)

Під час прискорення електромобіля витрати електроенергії зростають. Тягова потужність, створювана електродвигуном, не є прямо пропорційною обсягу споживаної енергії, тому під час розгону досягається потужність 20 кВт, а споживання енергії становить 27,12 кВт·год, тоді як під час гальмування — 8,7 кВт, а споживання енергії зменшується до межі 27 кВт·год (рис. 3.10).

Підсумовуючи результати, можна стверджувати, що використання електронних пристроїв має незначний вплив на розряд літій-іонного акумулятора, але їх повноцінне використання разом із силовою установкою призводить до великого розряду та суттєво змінює його характеристики.

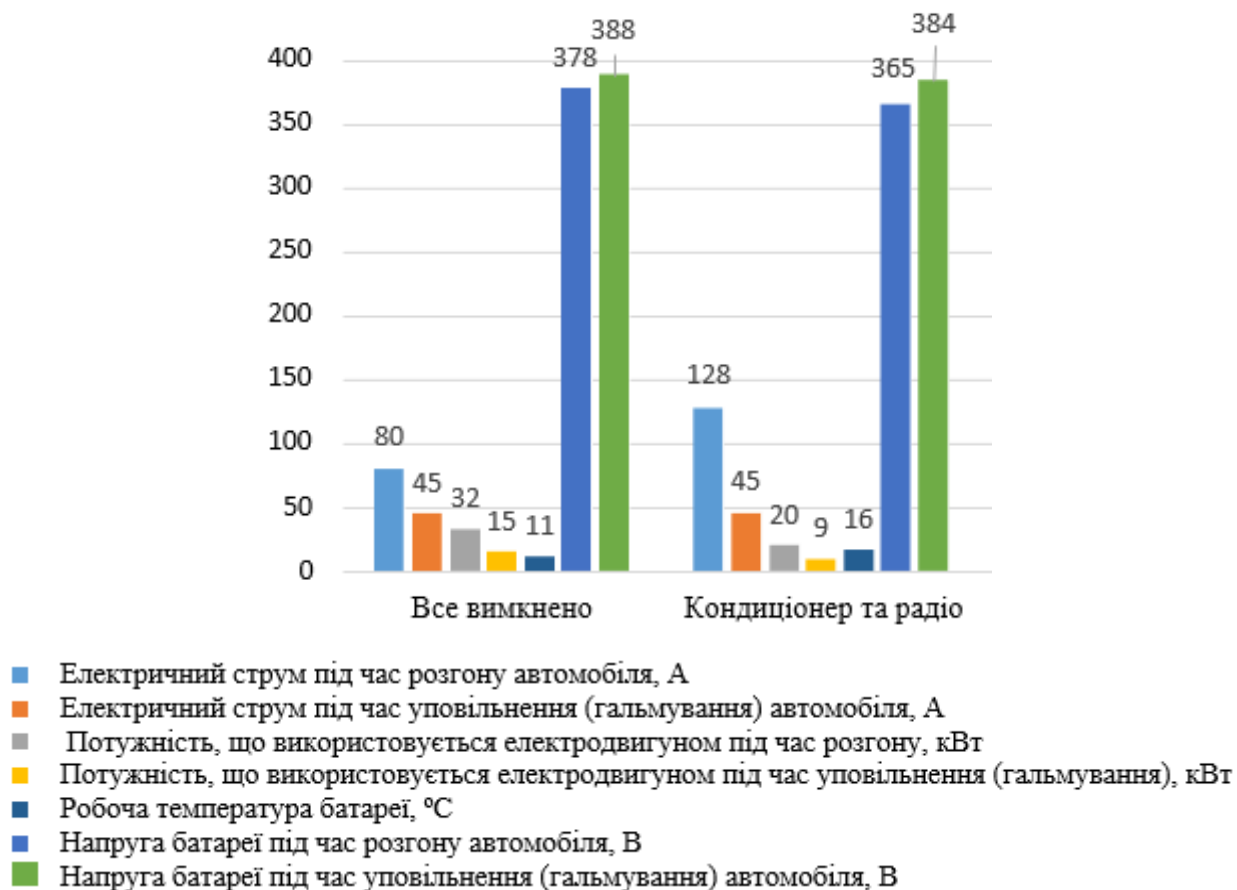
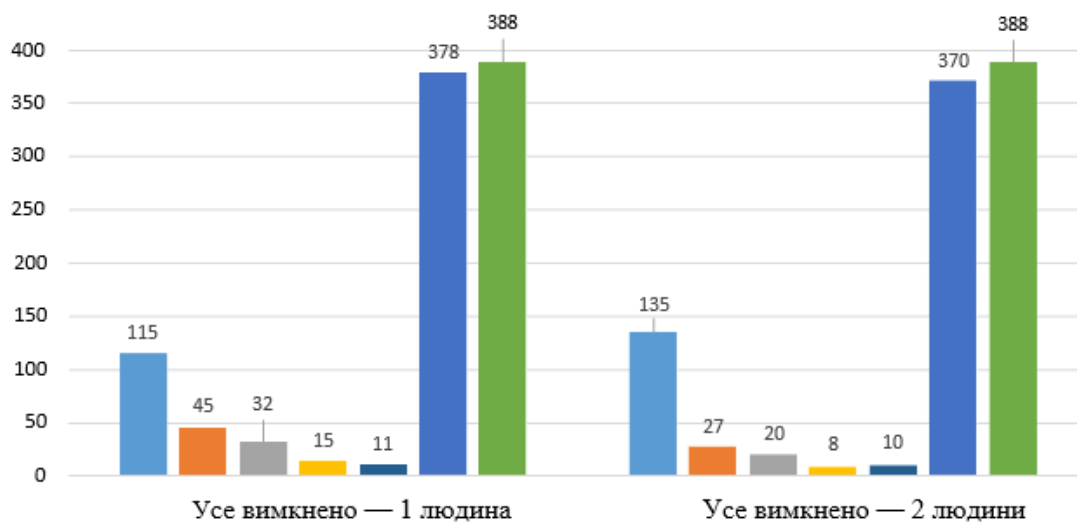


Рисунок 3.16 - Порівняння результатів

Згідно з отриманими результатами, ми бачимо, що найбільший вплив на розряд акумулятора має використання всіх електричних пристроїв. Отримані результати показують, що увімкнений кондиціонер та радіо споживають більше енергії, ніж в режимі ЕСО, і у всіх випадках, коли використовувалися електричні пристрої зони комфорту, струм розряду досягав  $\sim 100$  А. Споживання енергії варіюється від 25 до 29 кВт·год, зміна результатів відрізняється лише залежно від типу навантаження, оскільки під час випробувань докладалося зусиль для підтримки постійної швидкості електромобіля на ділянці. Зміна робочої температури акумулятора при зміні характеру навантаження буде змінюватися від 11 до 16° С. Згідно з отриманими даними, передбачається, що потужність, яка використовується електродвигуном під час розгону та уповільнення автомобіля, суттєво залежить від характеру старту, а також від керування педалями акселератора та гальма. Під час експериментального випробування також оцінювався вплив маси електромобіля на розряд акумулятора електромобіля. Результати, отримані згідно з таблицею 4.1, показують, що під час розгону автомобіля струм розряду відрізняється лише на 20 А від випробування ненавантаженого автомобіля, тоді як величина струму рекуперованої енергії для навантаженого автомобіля зменшується вдвічі, оскільки під час гальмування для зупинки потрібна більша гальмівна сила. Інші важливі параметри акумулятора порівнюються на діаграмі на рисунку 3.17.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MP.AT-73.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 55   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |



- Електричний струм під час прискорення автомобіля, А
- Електричний струм під час уповільнення автомобіля, А
- Потужність, яку споживає електродвигун під час прискорення, кВт
- Потужність, яку споживає електродвигун під час уповільнення, кВт
- Робоча температура батареї, °С
- Напруга батареї під час прискорення автомобіля, В
- Напруга батареї під час уповільнення автомобіля, В

Рисунок 3.18 - Порівняння характеристик батареї

Під час випробування робоча температура акумулятора залишалася практично постійною під час роботи електромобіля, змінюючись лише на 1° С. Коли автомобіль сповільнювався, напруга акумулятора досягала рівномірної межі в 388 В, а коли автомобіль розганявся, результат змінювався на 8 В.

#### 4 ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА

Зі зменшенням запасів викопного палива ціна на видобуті види палива зростає. Це дуже важливий фактор для власників транспортних засобів, для яких зростання ціни спричиняє додаткові витрати не лише на пройдену відстань, але й на зростання цін на товари та послуги у повсякденному середовищі. Використовуючи відновлювані ресурси, можна створювати електричну енергію, вартість якої є відносно низькою.

Середня витрата енергії електромобілем на відстань 100 км досягає 16 кВт·год. Під час заряджання акумуляторна батарея втрачає близько 10-13% енергії, тому електромобілю вже потрібно 18 кВт·год енергії з розетки. Електромобіль Nissan Leaf, який використовувався в експериментальному дослідженні, споживає в середньому до 12 кВт·год енергії, але після оцінки втрат енергії споживання становить 13,2 кВт·год. Середні витрати на паливо для легкового автомобіля на відстань 100 км представлені в таблиці 5.1 та порівнюються з витратами на електромобіль.

Таблиця 4.1- Витрати на пальне для транспортних засобів

| Тип палива              | Характеристики витрати палива легкових автомобілів |                            |                    |
|-------------------------|--|----------------------------|--------------------|
|                         | Ціна палива, €/л або €/кВт·год                     | Середня витрата [л/100 км] | Вартість, €/100 км |
| Дизель                  | 55,9   | 5.3                        | 296,27             |
| Бензин                  | 58,7   | 7.7                        | 452                |
| Зріджений нафтовий газ  | 34,3   | 9                          | 309                |
| Складова електроенергії | 4,32   | 13.2                       | 57                 |

Виходячи з середнього споживання палива та цін, згідно зі складеною таблицею даних, ми бачимо, що електромобіль залишається найдешевшим засобом транспорту. Порівняно з іншими видами палива, відстань 100 км,

подолана на електроенергії, у 5,2 раза дешевша, ніж у автомобіля з дизельним двигуном, ~7,9 раза дешевша, ніж у автомобіля з бензиновим двигуном, та в 5,4 раи дешевша, ніж у транспортного засобу, що використовує зріджений газ.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MP.AT-73.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 58   |

## ВИСНОВКИ

Проведено дослідження впливу експлуатаційних факторів на розряд літій-іонного акумулятора електромобіля, метою яких було визначення значень робочих розрядів та інших характеристик батареї під час експлуатації на тестовому маршруті.

1. Було визначено, що найбільший вплив на розряд акумулятора має використання електричних пристроїв комфортної зони під час експлуатації. При розгоні автомобіля від 0 до 55 км/год максимальна сила електричного струму досягає 127,5 А. При уповільненні електромобіля величина електричного струму, що генерується RBS під час гальмування, становить 45 А. Під час розгону досягається потужність 31,9 кВт, а кількість споживаної енергії досягає 26 кВт·год.

2. Масова вантажопідйомність електромобіля має великий вплив на розряд літій-іонного акумулятора. При розгоні автомобіля значення розряду відрізняється на 20 А, а енергія, що генерується під час гальмування, відрізняється вдвічі.

3. Було помічено, що в 4 з 5 випадків використання електричних пристроїв під час роботи електромобіля значення струму досягало приблизно 100 А, а значення напруги елементів акумулятора відрізнялися до 3% при зміні прикладених навантажень. Робоча температура акумуляторів не впливає на їх розряд, оскільки значення температури знаходиться в межах робочої зони.

4. Максимальний струм розряду акумулятора під час руху за потоком транспорту на підйомі досягає 152 А, коли всі системи вимкнені, а швидкість електромобіля становить 50 км/год. Зі збільшенням та зменшенням швидкості від цієї межі струм розряду зменшується, але залишається постійним протягом тривалішого часу. Кількість енергії, що генерується під час кочення за потоком та гальмування транспортним засобом, залежить від швидкості кочення та сили, що створюється гальмівними елементами, тобто

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MP.AT-73.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 59   |

під час кочення зі швидкістю 20 км/год - електричний струм досягає 19 А, а під час кочення зі швидкістю 40 км/год - 28,5 А.

5. Після аналізу витрат на паливо транспортних засобів та втрат на зарядку електромобіля було помічено, що подолання відстані 100 кілометрів повністю електричним транспортним засобом є найдешевшим, тобто вартість споживання електроенергії досягає ~1,50 грн. Це більш ніж удвічі дешевший спосіб пересування порівняно з іншими видами палива.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MP.AT-73.00.00.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 60   |

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Огляд різновидів електромобілів <https://www.power-sonic.com/types-of-electric-vehicles/> (дата звернення: 21.10.2025).
2. Electric car Nissan LEAF performance and technical characteristics (Nissan Europe Norrdic LTD OY), <https://www.cinch.co.uk/guides/electric-cars/nissan-leaf-performance> (дата звернення: 21.10.2025).
3. Міністерство інфраструктури України <https://mtu.gov.ua/news/28167.html> (дата звернення: (дата звернення: 21.10.2025).
4. Different Types of EV Batteries <https://www.greencars.com/greencars-101/different-types-of-ev-batteries> (дата звернення: 21.10.2025).
5. Fazel Mohammadi Saif , A comprehensive overview of electric vehicle batteries market, e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy Volume 3, March 2023, 100127
6. Grand View Research Inc. "Battery market size, share, industry research report, 2024," May 1, 2016.
7. Professional qualification training material "LEAF technical introduction training" <https://www.leaf-vre.org/docs/training/> (дата звернення: 21.10.2025).
8. Веб-сайт представника діагностичного обладнання Consult III Plus <https://icarpc.com.ua/uk/avtodiagnostika-obd-ii-ua/dilerskie-skanery-ua/nissan-consult3-plus-ua>
9. H.Wang, Y. Liu, H. Fu and G. Li. Static capacity test of electric vehicle batteries, 2013, [accessed 2017-05-05]
10. JAV Energijos Departamento, Aidaho Nacionalinės laboratorijos tyrimas „ Elektromobilio statinio talpumo tyrimas“, 2016
11. US Department of Energy, Idaho National Laboratory study "The Impact of Outdoor Temperature on Electric Vehicle Driving Efficiency", 2016

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MP.AT-73.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 61   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

12. Independent Research Consortium Blog, D. Reichmuth "Can an Electric Car Drive in Cold Weather? Facts and..." <http://blog.ucsusa.org/davereichmuth/electric-cars-cold-weather-temperatures> (дата звернення: 21.10.2025).

13. E. Kim, K. G. Shin and J. Lee, "Realistic control of electric vehicle charging and discharging during hybrid energy storage".

14. A. Pesaran, "Ultracapacitors implementation and evaluation in hybrid vehicles"

15. O. Tremblay and L.A. Dessaint, "Experimental study of battery power reliability", *World Electric Vehicle Journal (WEVJ)* June 2009(1):1-10

16. M. Durr, A. Cruden, S. Gair and J.R. Mc-Donald "A Dynamic Battery Model and its Application in Electric Power Plant Cells", <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775306000401>

17. O. Tremblay, L. Dessaint, A. Dekkiche, "A Generic Battery Model for the Dynamic Studies in Hybrid Power Plants", [https://www.researchgate.net/publication/4342930\\_A\\_Generic\\_Battery\\_Model\\_for\\_the\\_Dynamic\\_Simulation\\_of\\_Hybrid\\_Electric\\_Vehicles](https://www.researchgate.net/publication/4342930_A_Generic_Battery_Model_for_the_Dynamic_Simulation_of_Hybrid_Electric_Vehicles)

18. R. Rynkiewicz "A Charge and Discharge Model for Battery Cells", [accessed 2017-05-06], available online at Internet: [https://www.researchgate.net/publication/3789696\\_Discharge\\_and\\_charge\\_modeling\\_of\\_lead\\_acid\\_batteries/](https://www.researchgate.net/publication/3789696_Discharge_and_charge_modeling_of_lead_acid_batteries/)

19. E. Faggioli, P.Rena, V.Danel, X. Andrieu, R. Mallant and H. Kahlen "Supercapacitors in Electric Vehicle Energy Management Systems", 1999, pp. 261-269.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MP.AT-73.00.00.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 62   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

# **Комплект ілюстративного матеріалу до захисту магістерської роботи**

студента групи АТ<sub>м</sub>-24-2

*Буратчука Віталія Івановича*

**АНАЛІЗ ВПЛИВУ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ УМОВ НА ПРОЦЕС  
РОЗРЯДУ ЛІТІЙ-ІОННОЇ БАТАРЕЇ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ.**

Науковий керівник: доц. Гнип М.М.

Івано-Франківськ  
2025р.

## **Актуальність.**

Актуальність. Використання електромобілів у країнах Європейського Союзу зростає, оскільки зростають прагнення країн ЄС збільшити відновлювані ресурси та зменшити використання викопного палива та забруднення навколишнього середовища. Найбільшим викликом залишається просування та розширення розробки та створення електромобілів у повністю незалежних країнах.

Електромобілі поступово займають все більшу частку автомобільного ринку, тому їх технічні характеристики також важливі. Метою цієї роботи є дослідження того, як змінюється розряд літій-іонних акумуляторів у різних режимах роботи з різними комбінованими варіаціями використання електронних пристроїв.

**Метою роботи** є дослідження впливу експлуатаційних факторів на розряд літій-іонних акумуляторів в електромобілях.

## **Завдання дослідження:**

1. Провести огляд літератури та наукових статей, пов'язаних з електромобілями;
2. Визначити значення розрядів та інші характеристики, що впливають на літій-іонні акумулятори під час експериментальних випробувань;
3. Оцінити та проаналізувати отримані дані за змінних умов експлуатації.

# МЕТА і ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

**Об'єкт дослідження** – літій-іонна батарея електромобіля Nissan Leaf як основне джерело електричної енергії, що забезпечує роботу силової установки транспортного засобу.

**Предмет дослідження** – експлуатаційні фактори, що впливають на розряд літій-іонних акумуляторів в електромобілях.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає у наступному:

1. Проведено огляд літератури та наукових статей, пов'язаних з електромобілями (EV);.
2. Визначено значення розрядів літій-іонних батарей та інші їх характеристики;.
3. Проведено аналіз витрат на паливо транспортних засобів та втрат під час заряджання електромобіля.

**Наукова новизна.** Проведені дослідження впливу експлуатаційних факторів на розряд літій-іонного акумулятора електромобіля.

**Методи дослідження.** У роботі використано методи аналізу науково-технічної інформації, теоретичні та експериментальні дослідження впливу експлуатаційних факторів на розряд літій-іонного акумулятора електромобіля.

**Особистий внесок автора.** Автором визначено основні завдання роботи, обрано та опановано методи їх вирішення, визначено, що найбільший вплив на розряд акумулятора має використання електричних пристроїв комфортної зони під час експлуатації.

## Огляд різновидів електромобілів

| Гібридні транспортні засоби (HEV)  | Плагін-гібриди (PHEV)  | Гібриди з подовженим запасом ходу (REX)  | Повністю електричні транспортні засоби (BEV)   |
|--|--|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Автомобіль працює як від двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ), так і від електродвигуна;</li> <li>• Акумулятори заряджаються шляхом гальмування (рекуперативне гальмування);</li> <li>• Може долати короткі відстані виключно на електротязі.</li> <li>• Toyota Prius</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Автомобіль живиться як від ДВЗ, так і від електродвигуна (працюючи паралельно або в інших режимах);</li> <li>• Акумулятори можна заряджати від мережі;</li> <li>• Відстань, яку можна подолати лише на електродвигуні: 40-60 км.</li> <li>• Volvo V70 PHEV</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Автомобіль працює від електродвигуна; ДВЗ лише заряджає акумулятор;</li> <li>• Акумулятори можна заряджати від мережі;</li> <li>• Відстань, яку можна подолати лише на електродвигуні: 40-80 км.</li> <li>• Chevrolet Volt</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Автомобіль працює виключно на електриці;</li> <li>• Максимальна ємність акумулятора;</li> <li>• Акумулятори заряджаються від мережі;</li> <li>• Запас ходу: 100-300 км.</li> <li>• Nissan Leaf</li> </ul> |
|   |   |    |   |

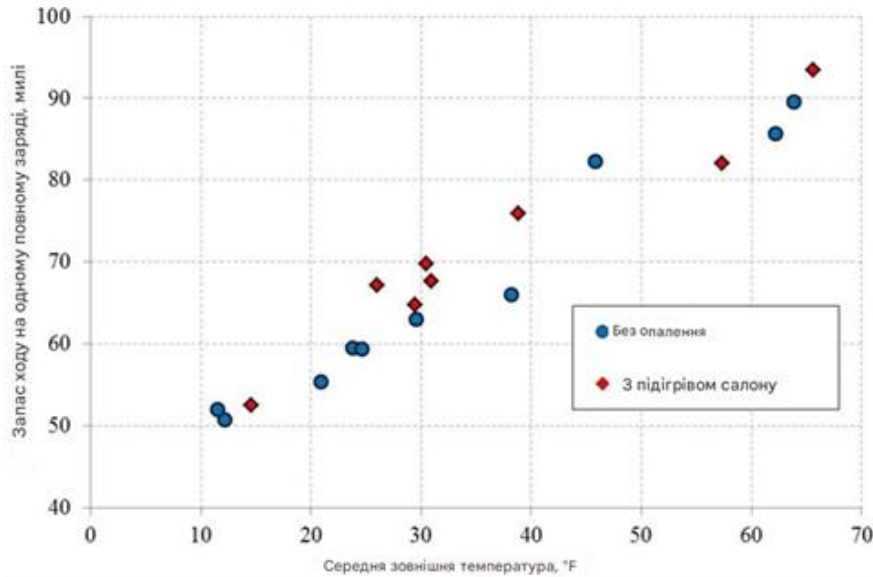


Рисунок 1 - Залежність пройденої відстані від температури навколишнього середовища [11]

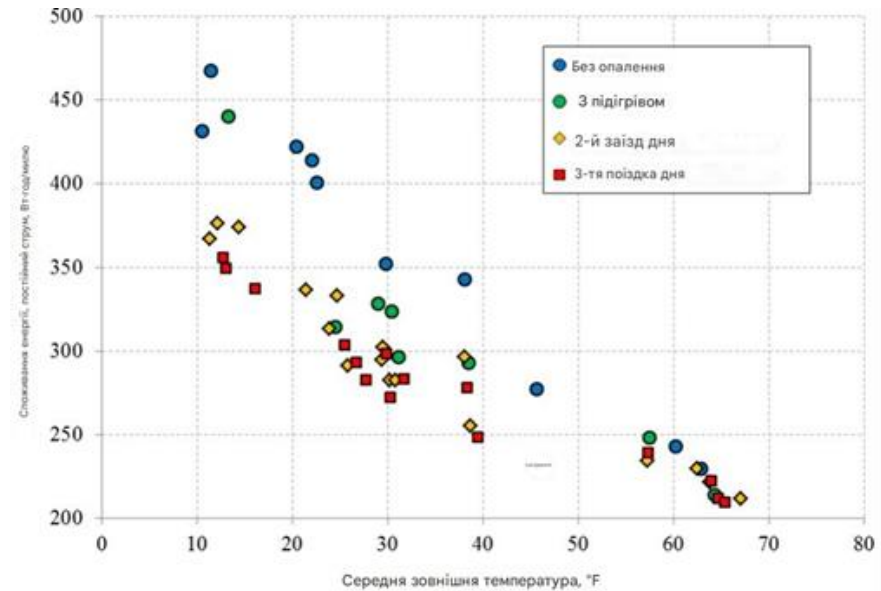


Рисунок 2 - Залежність споживання енергії від температури навколишнього середовища [11]

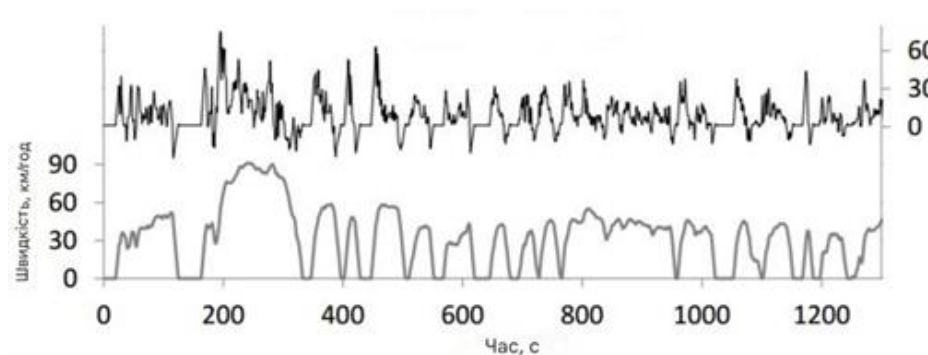


Рисунок 3 - Залежність струму живлення електромобіля від швидкості руху

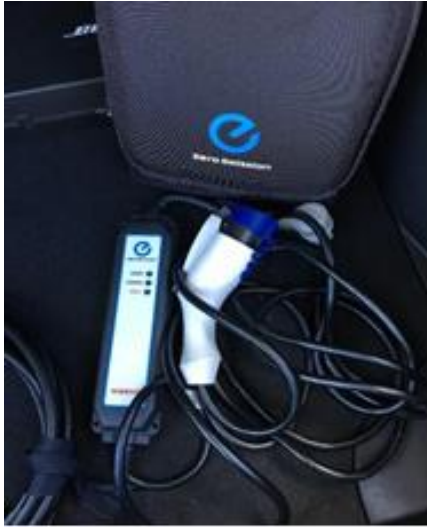


Рисунок 4 - Зарядний кабель Nissan Evse



Рисунок 5 - Станція швидкої зарядки та кабель



Рисунок 6 - Однофазний тип 16А та трифазний тип Mode 3 з кабелем 32А з роз'ємами Type та Type2 [4]



Рисунок 7 - Запас ходу електромобіля Nissan LEAF у різних режимах роботи [3]



|                                |                          |
|--------------------------------|--------------------------|
| Номинальна напруга, В          | 397                      |
| Номинальна ємність, кВт·год    | 30                       |
| Кількість елементів у батареї  | 48                       |
| Розташування елементів батареї | (4 – 4 – 2 – 2)х2<br>+24 |
| Габаритні розміри              | 1547 x 1188 x 264        |
| Вага, кг                       | 275.0                    |
| Створювана потужність, кВт     | >80                      |

Рисунок 8 - Характеристики літій-іонного акумулятора електромобіля



|                                       |                              |
|---------------------------------------|------------------------------|
| Двигун                                | Повністю електричний при     |
| Максимальний крутний момент, Н·м      | 254 [3008-1000 грп]          |
| Привідні колеса                       | Передні                      |
| Максимальна швидкість, км/год         | 144                          |
| Прискорення до 100 км/год, с          | 11.5                         |
| Маса автомобіля, кг                   | 1570                         |
| Габаритні розміри, мм                 | 4445 – 1770 – 15 [база 2700] |
| Середнє споживання на 100 км, кВт·год | 12                           |

Рисунок 9 – Технічні характеристики електромобіля

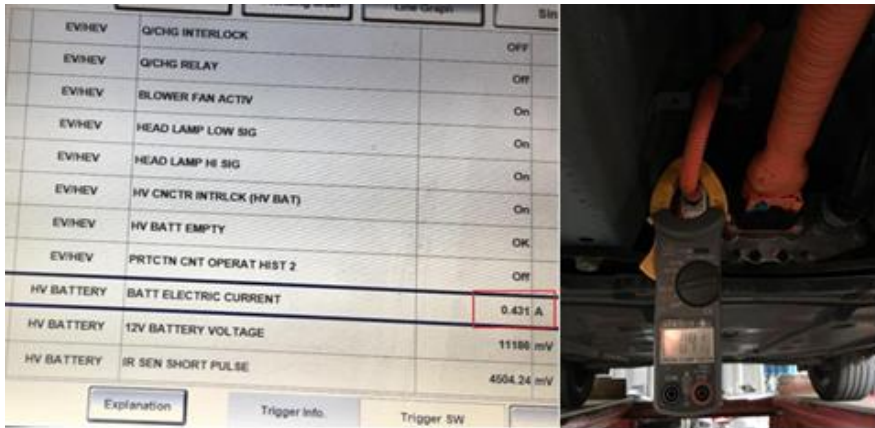


Рисунок 10 - Виміряні значення розряду



Рисунок 11 - Діагностичне обладнання з програмним забезпеченням Consult III Plus



Рисунок 12 – Струмові вимірювальні кліщі KT203 AC/DC

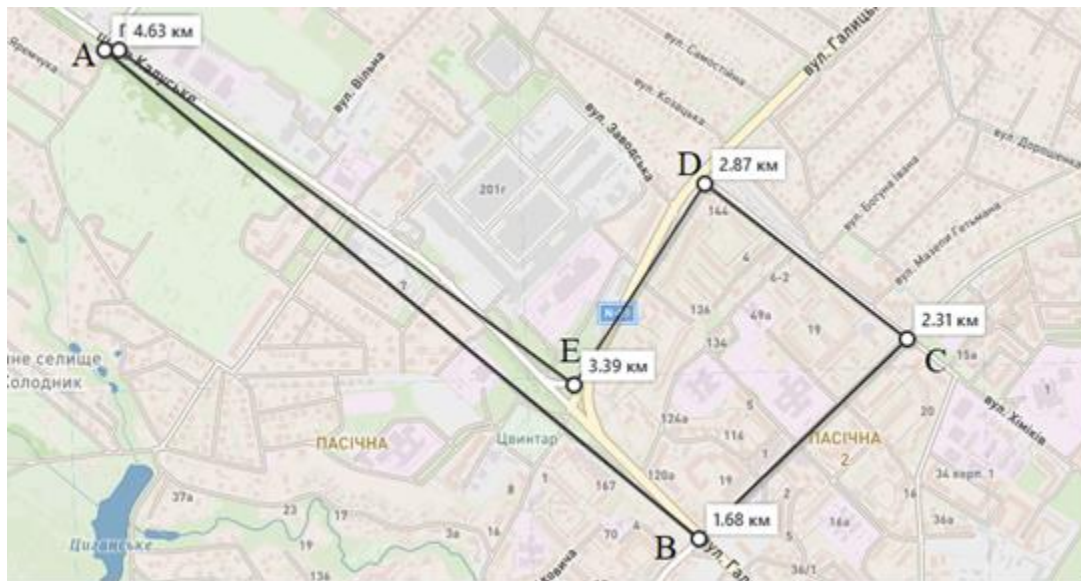


Рисунок 13 - Маршрут дослідження в місті Івано-Франківськ

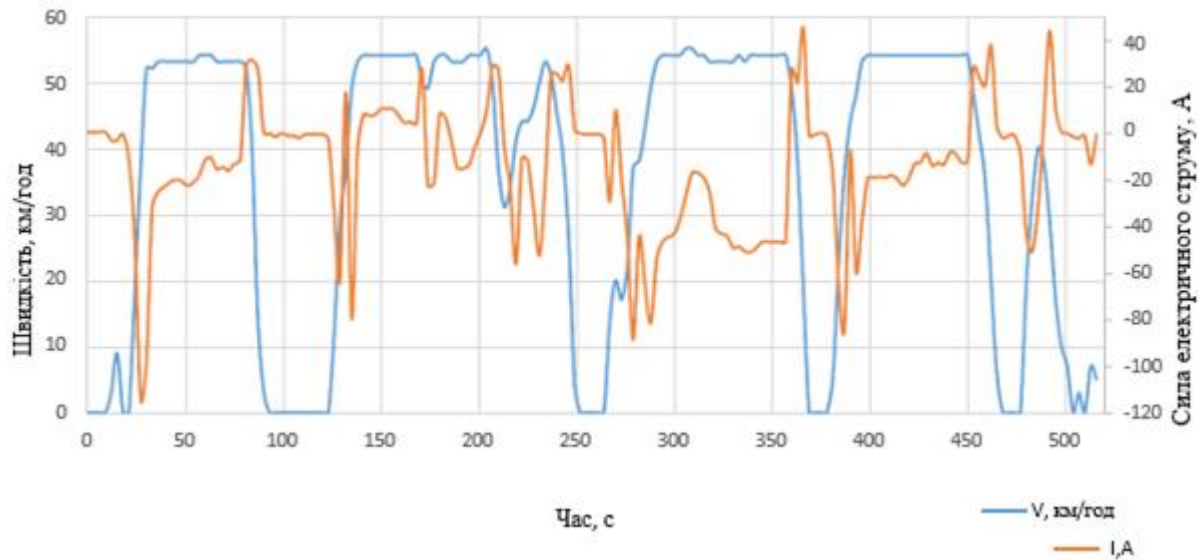


Рисунок 14 - Залежність розряду та заряду акумулятора від швидкості руху

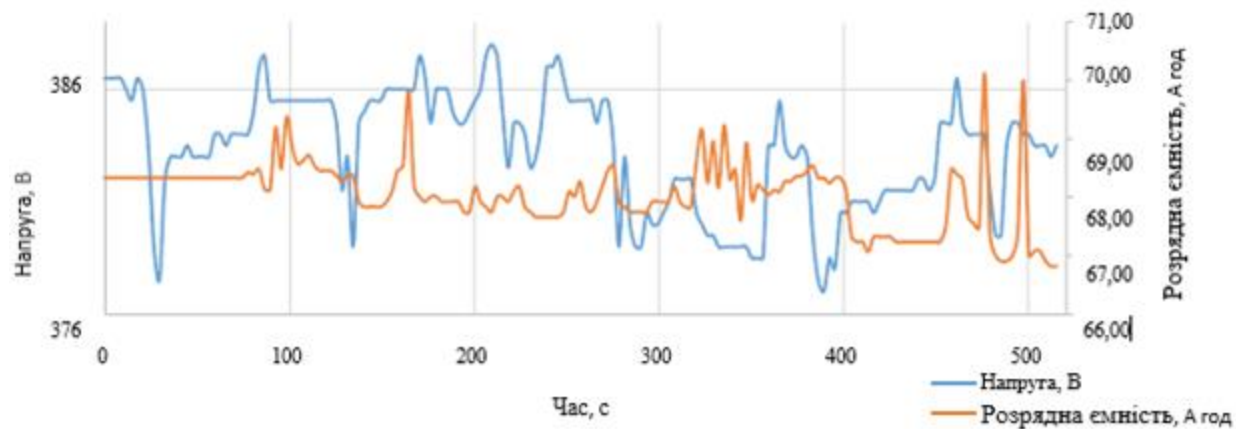


Рисунок 15 - Статична ємність батареї

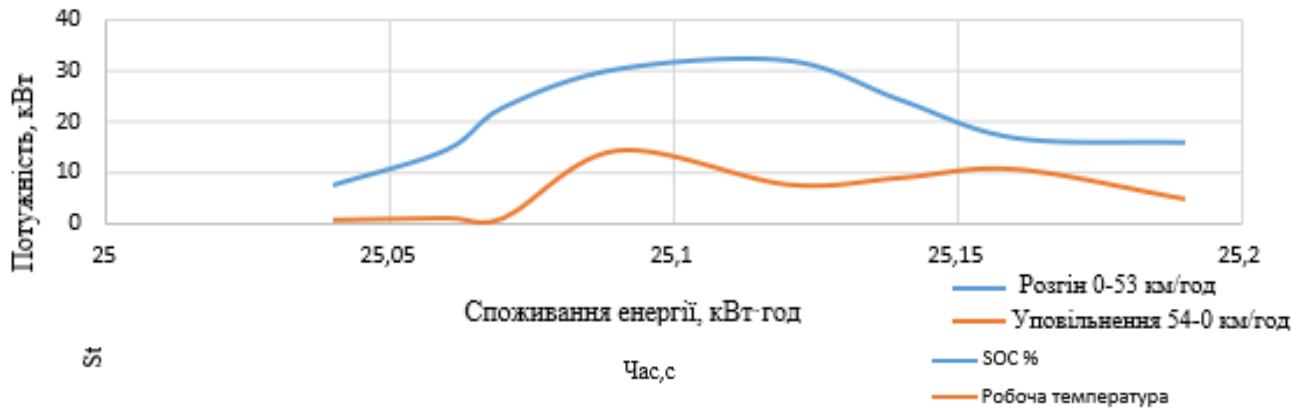


Рисунок 16 - Рівень заряду батареї в залежності від її робочої температури

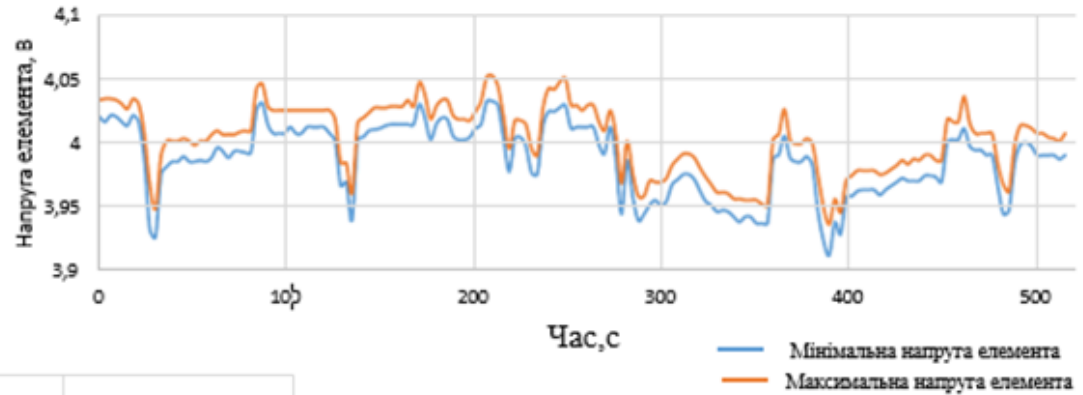


Рисунок 17 - Зміна заряду елементів акумулятора

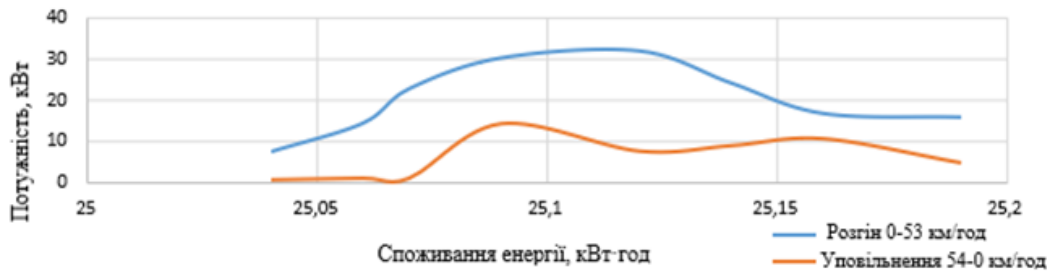


Рисунок 18 - Залежність потужності, що розвивається від споживання енергії

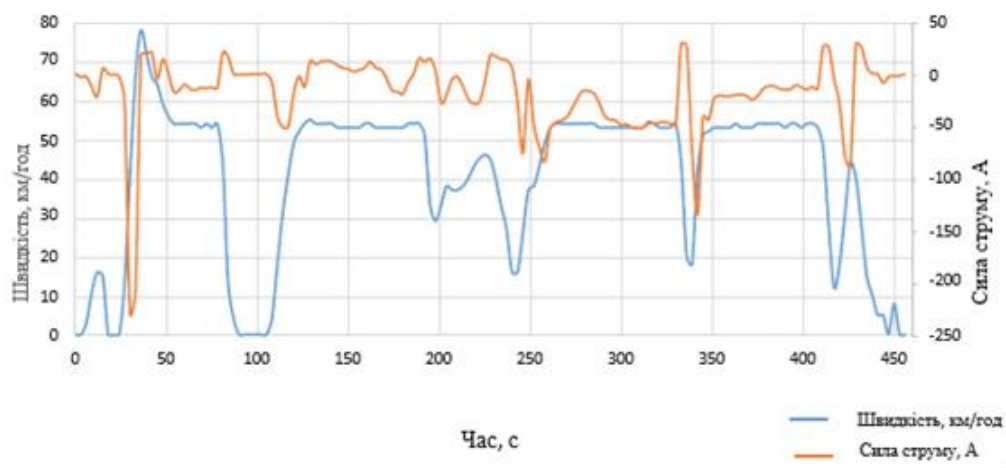


Рисунок 19 - Залежність розряду та заряду акумулятора від швидкості руху (випробування з пасажиром)

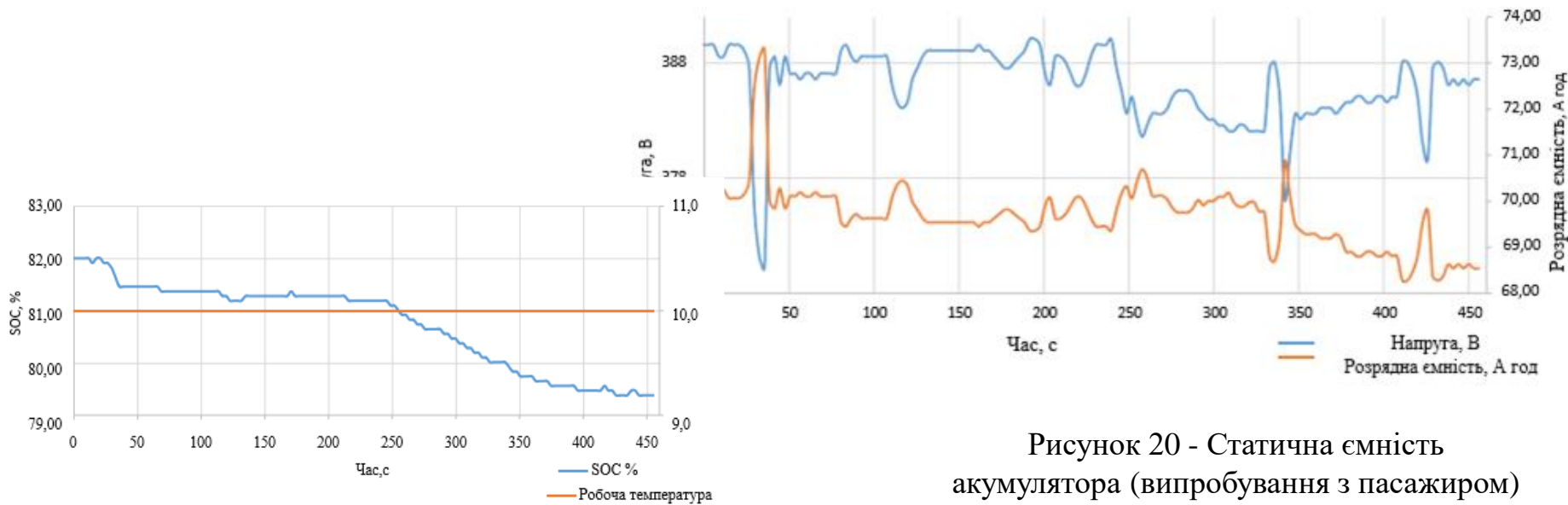


Рисунок 20 - Статична ємність акумулятора (випробування з пасажиром)

Рисунок 21 - Рівень заряду акумулятора в залежності від робочої температури акумулятора (випробування з пасажиром)

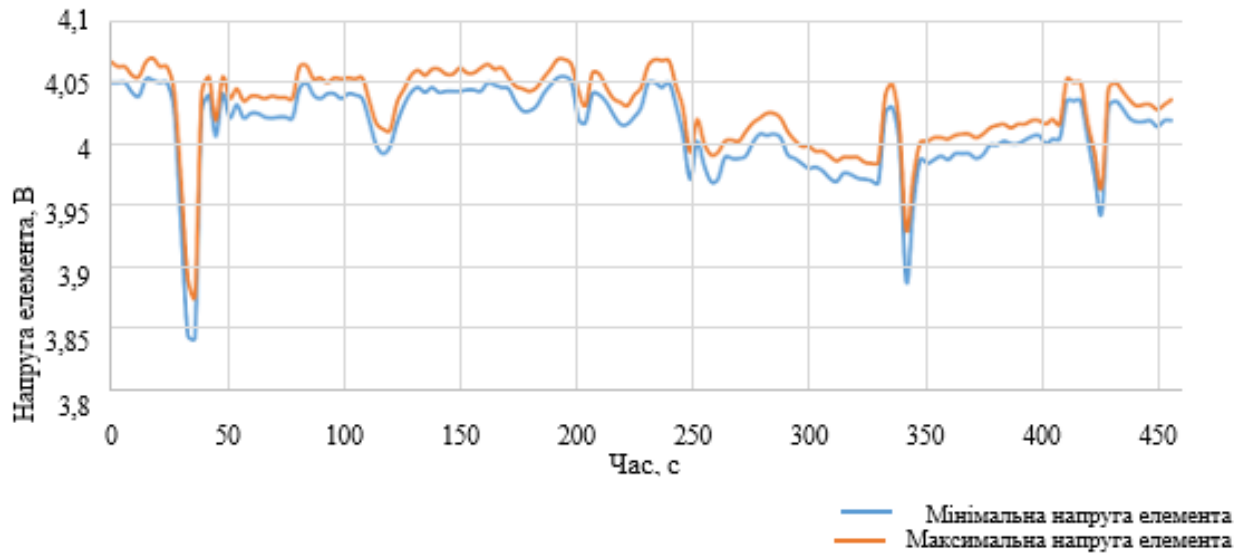


Рисунок 26 – Зміна заряду елементів акумулятора (випробування з пасажиром)

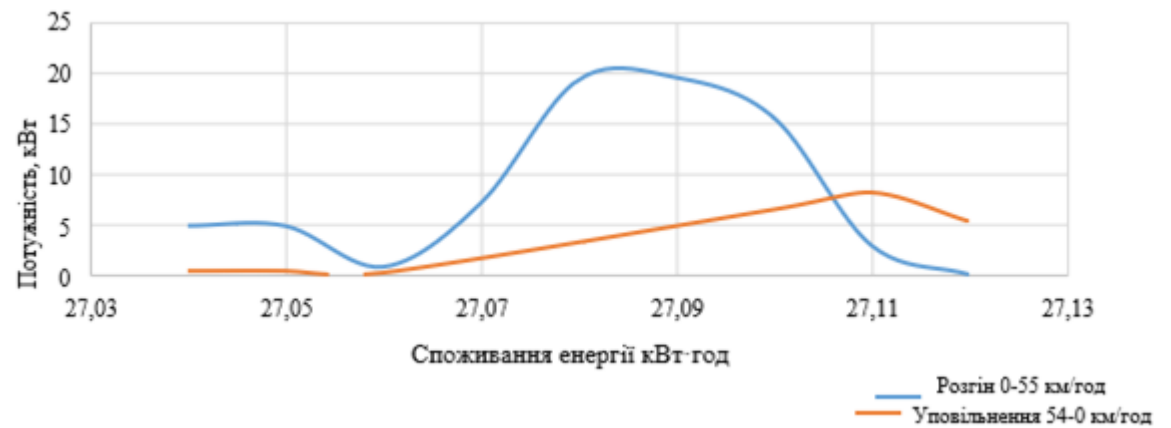


Рисунок 27 - Залежність потужності, яка розвивається від споживання енергії

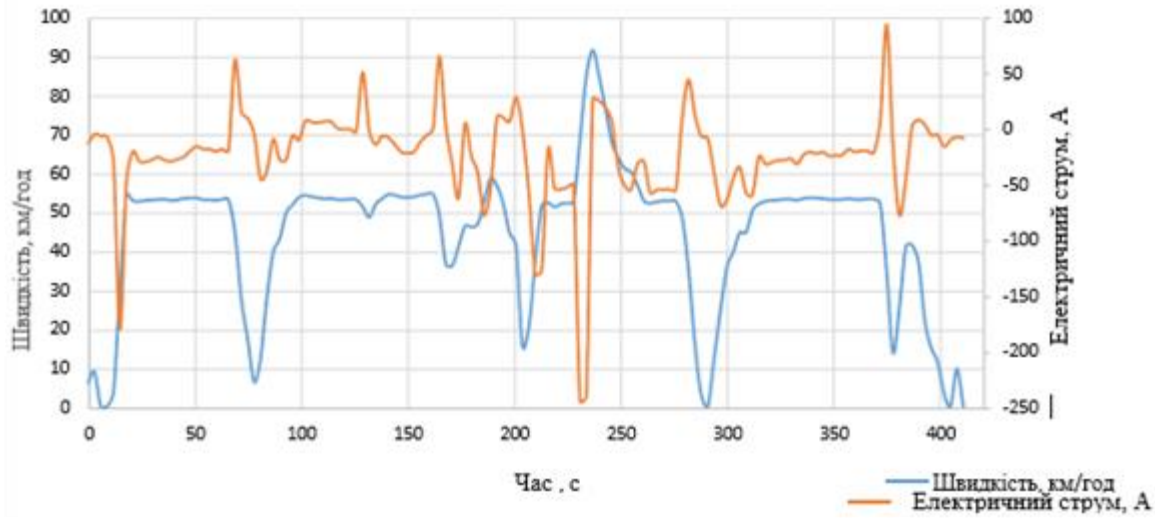


Рисунок 28 - Залежність розряду та заряду акумулятора від швидкості руху (кондиціонер та радіо увімкнені)

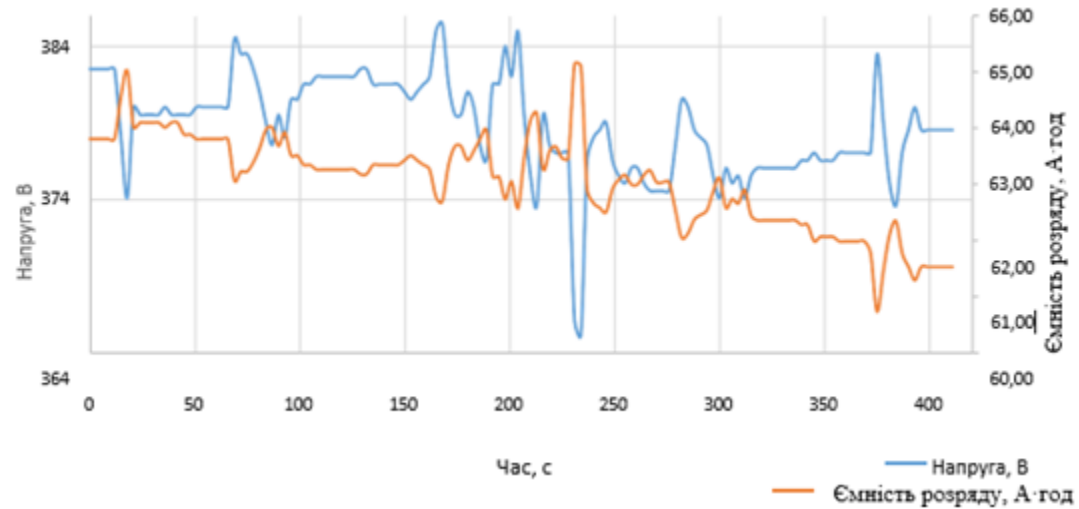


Рисунок 29 - Статична ємність акумулятора (кондиціонер та радіо увімкнені)

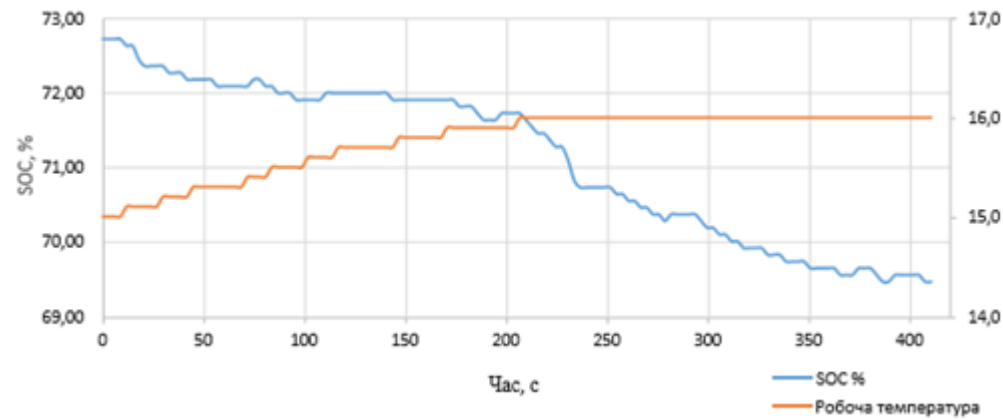


Рисунок 30 - Рівень заряду акумулятора в залежності від робочої температури акумулятора (кондиціонер та радіо увімкнені)

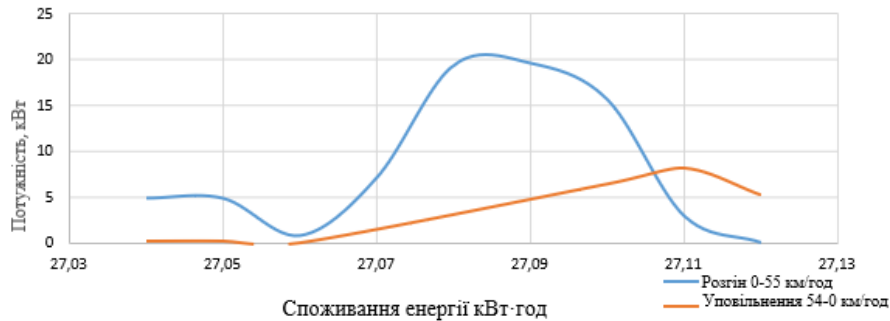


Рисунок 32 - Залежність потужності від споживання енергії (кондиціонер та радіо увімкнені)

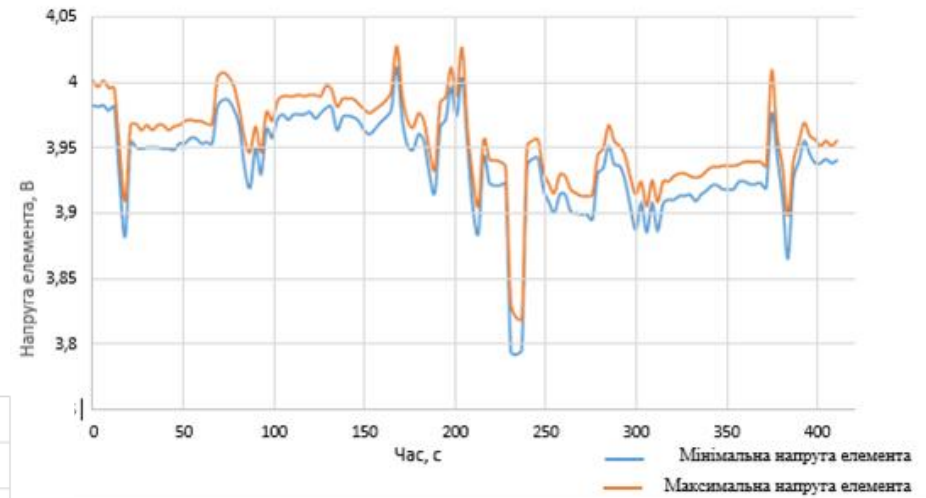
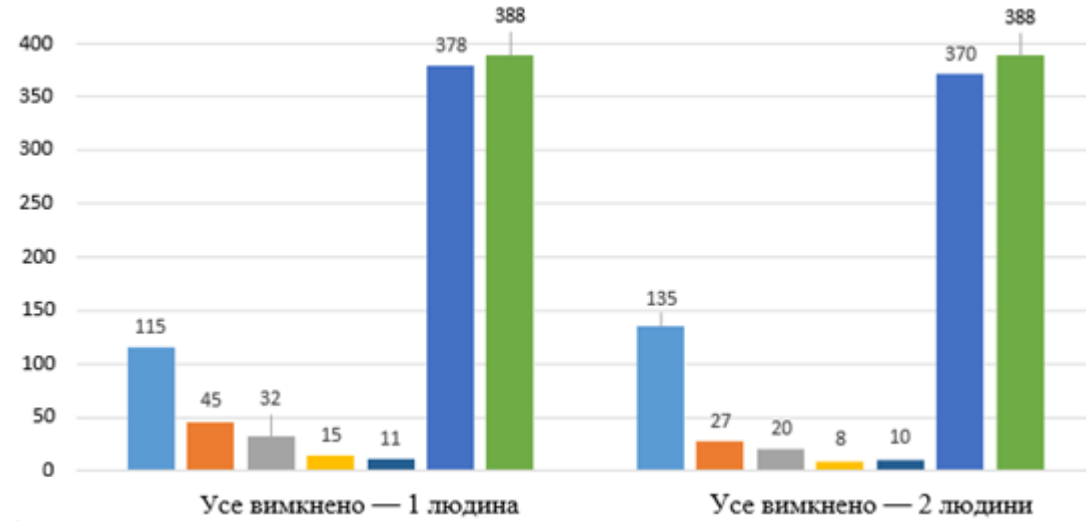
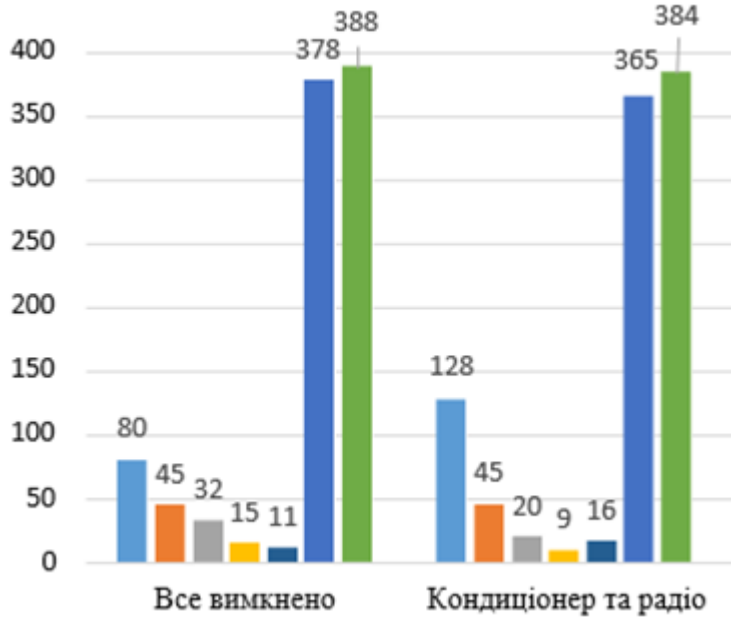


Рисунок 31 - Зміна заряду елементів акумулятора (кондиціонер та радіо увімкнені)



- Електричний струм під час розгону автомобіля, А
- Електричний струм під час уповільнення (гальмування) автомобіля, А
- Потужність, що використовується електродвигуном під час розгону, кВт
- Потужність, що використовується електродвигуном під час уповільнення, кВт
- Робоча температура батареї, °C
- Напруга батареї під час розгону автомобіля, В
- Напруга батареї під час уповільнення (гальмування) автомобіля, В

- Електричний струм під час прискорення автомобіля, А
- Електричний струм під час уповільнення автомобіля, А
- Потужність, яку споживає електродвигун під час прискорення, кВт
- Потужність, яку споживає електродвигун під час уповільнення, кВт
- Робоча температура батареї, °C
- Напруга батареї під час прискорення автомобіля, В
- Напруга батареї під час уповільнення автомобіля, В

## ВИСНОВКИ

Проведено дослідження впливу експлуатаційних факторів на розряд літій-іонного акумулятора електромобіля, метою яких було визначення значень робочих розрядів та інших характеристик батареї під час експлуатації на тестовому маршруті.

Визначено, що найбільший вплив на розряд акумулятора має використання електричних пристроїв комфортної зони під час експлуатації. При розгоні автомобіля від 0 до 55 км/год максимальна сила електричного струму досягає 127,5 А. При уповільненні електромобіля величина електричного струму, що генерується RBS під час гальмування, становить 45 А. Під час розгону досягається потужність 31,9 кВт, а кількість споживаної енергії досягає 26 кВт·год.

Масова вантажопідйомність електромобіля має великий вплив на розряд літій-іонного акумулятора. При розгоні автомобіля значення розряду відрізняється на 20 А, а енергія, що генерується під час гальмування, відрізняється вдвічі.

Поомічено, що в 4 з 5 випадків використання електричних пристроїв під час роботи електромобіля значення струму досягало приблизно 100 А, а значення напруги елементів акумулятора відрізнялися до 3% при зміні прикладених навантажень. Робоча температура акумуляторів не впливає на їх розряд, оскільки значення температури знаходиться в межах робочої зони.

Максимальний струм розряду акумулятора під час руху за потоком транспорту на підйомі досягає 152 А, коли всі системи вимкнені, а швидкість електромобіля становить 50 км/год. Зі збільшенням та зменшенням швидкості від цієї межі струм розряду зменшується, але залишається постійним протягом тривалішого часу. Кількість енергії, що генерується під час кочення за потоком та гальмування транспортним засобом, залежить від швидкості кочення та сили, що створюється гальмівними елементами, тобто під час кочення зі швидкістю 20 км/год - електричний струм досягає 19 А, а під час кочення зі швидкістю 40 км/год - 28,5 А.

Після аналізу витрат на паливо транспортних засобів та втрат на зарядку електромобіля було помічено, що подолання відстані 100 кілометрів повністю електричним транспортним засобом є найдешевшим, тобто вартість споживання електроенергії досягає ~1,50 грн. Це більш ніж удвічі дешевший спосіб пересування порівняно з іншими видами палива.