

РОЗРОБКА ОПТИМАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕХНІЧНИМ СТАНОМ АКУМУЛЯТОРА ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

Отримано 08 сер. 2024 р.; рекомендовано до публікації 16 вер. 2024 р.
Доступно онлайн 01 жов. 2024 р.

**Сорочинський Я. З.¹, Босак А. В.²,
Ткачук К. К.³, Кульбачна Н. М.⁴**

Автор для кореспонденції: Босак Алла,
e-mail: allabosak@gmail.com

Це дослідження фокусується на проблемі підвищення ефективності використання електричних транспортних засобів за рахунок розробки оптимальної системи керування технічним станом акумулятора електромобіля. Як інструмент оптимального керування технічним станом електромобіля розроблена система з квадратичним регулятором та виконано порівняння ЛКР-регулятора з ПІ-регулятором. Для розробленої систем управління була використана модель простору станів, що дозволило ефективно контролювати батарею, аналізувати важливі параметри та приймати оптимальні рішення щодо її заряджання, розряджання та балансування. Процес моделювання в середовищі MATLAB/Simulink дав змогу встановити параметри батареї та порівняти температурні, струмові й напругові параметри з застосуванням різних регуляторів. Унаслідок порівняльного аналізу досліджень виявлено, що LQR-регулятор показав кращі результати щодо стабільності температури, безпеки струму, контрольованого зростання стану заряду та підтримки стабільної напруги порівняно з ПІ-регулятором. Висновки підтверджують, що використання LQR-регулятора ефективніше контролює параметри батареї, сприяє попередженню перегріву, зменшенню ризику пошкодження батареї та підвищенню загальної безпеки й продуктивності роботи батареї в цілому.

Ключові слова: акумулятор електромобілів, квадратичний регулятор, рівень заряду, параметри батареї, технічний стан батареї.

¹ студент
<https://orcid.org/0009-0008-8056-520X>

² канд. техн. наук, доцент
<https://orcid.org/0000-0003-0545-9980>

³ д-р. техн. наук, професор
<https://orcid.org/0000-0001-5230-9980>

⁴ начальник науково-дослідної лабораторії
<https://orcid.org/0009-0000-3836-6268>

^{1,2,3} Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Навчально-науковий інститут енергозбереження та енергоменеджменту, м. Київ, Україна.

⁴ Науково-дослідний інститут воєнної розвідки.

DEVELOPMENT OF THE OPTIMAL SYSTEM OF CONTROL OF THE TECHNICAL CONDITION OF THE ELECTRIC CAR BATTERY

Received Aug. 08, 2024; accepted Sep. 16, 2024
Available online Oct. 01, 2024

**Sorochyns'kyi Y.¹, Bosak A.²,
Tkachuk K.³, Kulbachna N.⁴**

Author for correspondence: Alla Bosak,
e-mail: allabosak@iit.kpi.ua

This study focuses on the problem of increasing the efficiency of the use of electric vehicles by developing an optimal system for managing the technical condition of the battery of an electric vehicle. As a tool for optimal control of the technical condition of the electric vehicle, a system with a quadratic regulator was developed and a comparison of the LQR regulator with the PI

¹ Student
<https://orcid.org/0009-0008-8056-520X>

² Cand. of tech. Science, Assoc. Prof.
<https://orcid.org/0000-0003-0545-9980>

³ Dr. of tech. Science, Prof.
<https://orcid.org/0000-0001-5230-9980>

⁴ Head of the research laboratory
<https://orcid.org/0009-0000-3836-6268>

^{1,2,3} National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Educational and scientific institute of energy saving and energy management, Kyiv, Ukraine

⁴ Research Institute of Military Intelligence

regulator was made. A state space model was used for the developed control system, which made it possible to effectively control the battery, analyze important parameters and make optimal decisions regarding its charging, discharging and balancing. The modeling process in the MATLAB/Simulink environment made it possible to set the battery parameters and compare the temperature, current and voltage parameters using different regulators. As a result of the comparative analysis of the studies, it was found that the LQR-regulator showed better results in terms of temperature stability, current safety, controlled growth of the state of charge and maintenance of stable voltage compared to the PI-regulator. The findings confirm that the use of an LQR regulator more effectively controls battery parameters, helps prevent overheating, reduces the risk of battery damage, and improves the overall safety and performance of the battery.

Keywords: electric vehicle battery, quadratic controller, charge level, battery parameters, battery technical condition.

Перелік використаних позначень та скорочень

СКБ – система керування батареєю

СКТЗ – система керування транспортним засобом

СЗ – стан заряду

ПІ-регулятор – пропорційно-інтегральний регулятор

ТС – технічний стан

СП – стан потужності

ЛКР – лінійно-квадратичний регулятор

РЗ – рівень заряду

Вступ. Використання електротранспорту з акумуляторними батареями в сучасних умовах сприяє розвитку гнучкості енергосистеми шляхом стимулювання попиту на електричну енергію під час неактивних періодів заряджання, що дозволяє ефективніше використовувати виробничі потужності та забезпечує рівномірніше розподілення навантаження на електромережу, особливо в умовах обмеженого електропостачання. Ефективне використання акумуляторних технологій у транспорті сприятиме посиленню інтеграції відновлюваних джерел енергії та стане кроком до сталого розвитку сучасного енергетичного сектору [1–5]. Проте ефективне управління технічним станом акумуляторних батарей залишається складним завданням, що вимагає застосування новітніх технологій і підходів. З огляду на стрімкий розвиток ринку електромобілів виникає потреба в розробці нових методів діагностики й оптимізації роботи батарей, що дозволить покращити їх довговічність, безпеку і продуктивність та збільшить частку відновлюваних джерел енергії у складі електроенергетичної системи.

Постановка завдання. Мета дослідження полягає у підвищенні ефективності використання електричних транспортних засобів за рахунок розробки оптимальної системи керування технічним станом акумулятора електромобіля.

Виклад основного матеріалу. На сьогодні існує чимало досліджень, присвячених управлінню технічним станом акумуляторних батарей. Зокрема це методи на основі моделювання, методи, засновані на даних, та комбіновані підходи [6–10]. Однак багато аспектів цієї проблеми залишаються недостатньо дослідженими, особливо в контексті інтеграції різних методів для досягнення оптимального результату.

Основним завданням системи керування батареєю (СКБ) є забезпечення оптимального управління енергією під час руху та під час операцій заряджання / розряджання

[11]. СКБ також слід уникати неправильного використання батареї під час її роботи; це досягається шляхом моніторингу та контролю акумуляторної батареї електромобіля під час підключення або під час водіння. СКБ працює в межах архітектури системи керування транспортним засобом (СКТЗ), зображеної на рис. 1.

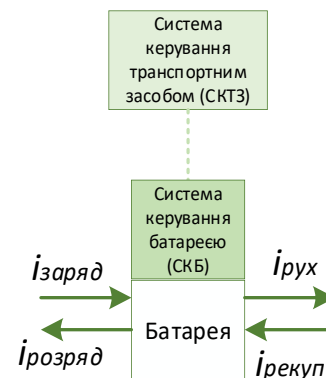


Рис. 1. Система керування батареєю

Fig. 1. Battery control system

На рис. 1 позначено: $i_{\text{заряд}}$ – струм заряду батареї; $i_{\text{розряд}}$ – струм розряду батареї; $i_{\text{рух}}$ – струм, що використовується для руху; $i_{\text{рекуп}}$ – струм для поточного рекупративного гальмування.

Для забезпечення безпечної та ефективної експлуатації акумуляторів важливо постійно контролювати кілька параметрів. Серед них: напруга, яка має важливе значення для запобігання перезаряду та надмірного розряду; струм, що контролюється для уникнення перевантажень; температура, яка впливає на продуктивність і термін служби батареї; стан заряду, оцінюваний на основі даних про напругу, струм і температуру; й технічний стан, який враховує загальний стан акумулятора та його ефективність. Цей постійний моніторинг допомагає

підтримувати акумулятори в оптимальному робочому стані й забезпечує їх тривалу та безпечну роботу.

Забезпечуючи безпеку, надійність і ефективність, СКБ може успішно контролювати та обробляти функцію акумулятора, постійно відстежуючи ці параметри.

Оцінка стану заряду. Оцінка стану заряду (C3) батареї автомобіля [12] визначається як відношення залишку заряду батареї $Q_{remaining}$ до максимального заряду Q_{max} , який може забезпечити батарея:

$$SOC(t) = \frac{Q_{remaining}}{Q_{max}} \cdot 100\%. \quad (1)$$

C3 безпосередньо впливає на функціональну безпеку, ефективність і термін служби батареї, тому важливо розуміти цю концепцію. За допомогою точної оцінки C3 користувачі можуть оптимізувати свої методи управління живленням і запобігти таким сценаріям, як надмірний розряд або перезаряд, що можуть пошкодити акумулятор.

На сьогодні існує значна кількість досліджень, що присвячені управлінню технічним станом акумуляторних батарей в електричних транспортних засобах, включно з методами на основі моделювання, методами, заснованими на даних, та комбінованими підходами.

Проте оцінка C3 пов'язана з кількома проблемами. Наприклад, оцінка C3 стає складнішою, оскільки поведінка акумулятора може змінюватися з часом через старіння та використання. Крім того, на продуктивність батареї впливають численні фактори навколишнього середовища, як-от температура та вологість, що ще більше ускладнює оцінку C3.

Оцінка технічного стану батареї. Оцінка технічного стану (TC) батареї вказує на її загальний стан і продуктивність у порівнянні з початковими характеристиками, коли вона була новою. Вона визначає, наскільки батарея ефективна у своїй роботі порівняно з новою, де 100 % відповідає абсолютно справному стану без втрат ємності. З часом TC акумулятора зменшується через такі фактори, як старіння, використання, умови навколишнього середовища та цикли зарядки. Оцінка TC є ключовою для прогнозування залишкового терміну служби батареї, інформує про можливі потреби в обслуговуванні, заміні та оптимальному використанні. Успішне управління акумуляторами залежить від правильного розуміння TC, що своєю чергою сприяє підвищенню надійності системи, зниженню вартості та уникненню непередбачених вибухів батарей. Оцінка технічного стану батареї визначається як відношення максимального заряду Q_{max} до номінальної ємності батареї $C_{nominal}$:

$$SOH(t) = \frac{Q_{max}}{C_{nominal}} \cdot 100\%. \quad (2)$$

Оцінка TC батареї проводиться за допомогою таких методів, як порівняння ємності, оцінка на основі моделі,

методи машинного навчання та вимірювання опору, які дозволяють отримати інформацію про стан батареї та приймати рішення щодо обслуговування чи заміни на основі результатів аналізу її продуктивності й характеристик з часом.

Оцінка стану потужності батареї. Стан потужності (СП) батареї визначає її здатність постачати або поглинати певну потужність в конкретний момент, що є функцією розмірів акумулятора, його технічного стану та умов експлуатації (як-от температура і струм), і виражається як співвідношення пікової потужності P_{max} і номінальної потужності $P_{nominal}$, що відображає доступність миттєвої електроенергії; знання цього показника має критичне значення для ефективного управління енергоспоживанням у додатках, де потрібна велика швидкість навантаження, наприклад в електричних транспортних засобах або системах зберігання даних.

$$SOP(t) = \frac{P_{max}}{P_{nominal}} \cdot 100\%. \quad (3)$$

Оцінку СП батареї можна проводити за допомогою різних методів, таких як метод на основі напруги, метод підрахунку Кулона, моделі електричних еквівалентних схем, методи машинного навчання, які забезпечують точні показники для оптимального управління енергоспоживанням систем.

Точна оцінка СП є важливою для забезпечення оптимальної продуктивності систем, розподілу потужності між підсистемами в електромобілі, запобігання непередбаченим дефіцитам енергії та підвищення ефективності енергозберігаючих програм, що врешті-решт допомагає подовжити термін служби батареї та поліпшити загальний користувацький досвід.

Методи виявлення несправностей. Розглядаючи методи виявлення несправностей в акумуляторах, можна виділити три основні підходи: пряме вимірювання фізичних величин, методи на основі математичних моделей та методи, що використовують дані та алгоритми машинного навчання й статистичні методи [13]. При цьому для імітації динаміки акумуляторів також використовують моделі еквівалентних схем [14–16]. Ці моделі дозволяють імітувати електричну реакцію батареї за допомогою електричних компонентів, таких як резистори, конденсатори і джерела напруги. Моделі еквівалентних схем застосовують у таких сферах, як системи керування батареями, системи керування електромобілем, моделювання систем живлення та конструкція зарядних пристроїв для акумуляторів.

Під час математичного моделювання фізичну систему простору станів представляють за допомогою набору диференціальних рівнянь першого порядку, що спрощує розрахунки порівняно з визначальними диференціальними рівняннями вищих порядків. Перетворення еквівалентних схем у форму простору станів у контексті моделювання акумуляторів є ефективним методом аналізу динаміки системи. Для цього потрібно вивести

математичні відношення, які описують взаємодію різних компонентів (резисторів, конденсаторів, джерел напруги тощо) у схемі, зокрема використовуючи правила струму і напруги Кірхгофа. Наприклад, розглянемо еквівалентну схему (рис. 2), що складається з резистора і конденсатора, які з'єднані послідовно:

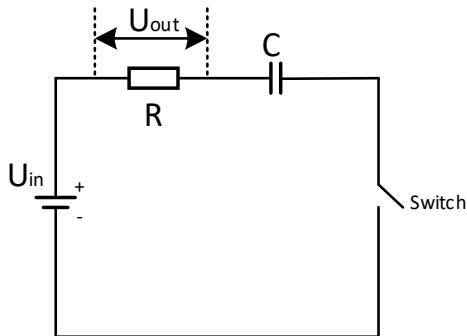


Рис. 2. Проста схема RC

Fig. 2. Simple RC scheme

В електронних схемах кількість енергетичних накопичувачів (конденсаторів і індуктивностей) відповідає числу рівнянь стану системи. Оскільки маємо лише один конденсатор, для отримання рівняння напруги для нього в цьому разі застосовуємо правила Кірхгофа:

$$\frac{dU_C}{dt} = \frac{1}{RC}(U_{in} - U_C). \quad (3)$$

Вхідне рівняння, яке ми вибираємо, є напругою резистора:

$$U_{out} = U_{in} - RC \frac{dU_C}{dt}, \quad (4)$$

де U_{in} – вхідна напруга; U_{out} – вихідна напруга; C – ємність; U_C – напруга на конденсаторі (також відома як «змінна стану»); R – опір.

Рівняння (4) можна виразити в матричній формі:

$$\frac{dx}{dt} = Ax + BU; Y = CX + DU, \quad (5)$$

де x представляє вектор стану $[U_C]$, U – вхідний вектор $[U_{in}]$, Y – вихідний вектор $[U_{out}]$, а A , B , C і D – матриці, отримані з пасивних компонентів моделі еквівалентної схеми. Ці вектори містять кілька вхідних, вихідних і змінних стану в складніших системах.

Отримання представлення простору станів у розробці систем керування та алгоритмів оцінки для батарей має вирішальне значення. Ця модель дозволяє ефективно керувати батареями, оцінювати їхні критичні параметри та приймати оптимальні рішення щодо заряджання, розряджання та балансування. З використанням моделей простору станів можна точно визначити внутрішній стан батареї та оптимізувати її роботу, підвищуючи безпеку, тривалість служби й продуктивність акумуляторів. Ці

моделі також відкривають можливості для моделювання динаміки батарей у різних умовах та проведення комплексного аналізу їх продуктивності, допомагаючи інженерам розуміти та удосконалювати роботу батарей за різних обставин.

Розробка ЛКР-регулятора. Розробка ЛКР-регулятора спрямована на мінімізацію помилок в оцінюванні рівня заряду та забезпечить не лише підвищення ефективності й продуктивності електромобілів шляхом точного контролю рівня заряду, але й сприятиме збереженню довговічності батарей через запобігання надмірному розряду. Крім того, впровадження регулятора у систему діагностики акумуляторів електромобілів сприятиме досягненню енергоефективності, зменшенню викидів та технологічному прогресу в цій галузі [17].

Цільова функція критерію мінімізації помилки оцінювання рівня заряду ($P3$) може бути виражена у вигляді квадратичної функції помилки.

Таким чином, критерій якості для мінімізації помилки оцінювання $P3$ може мати такий вигляд:

$$J = \int_0^T (P3_{передб}(t) - P3_{вим}(t))^2 dt, \quad (6)$$

де J – значення критерію якості (цільової функції); $P3_{передб}(t)$ – передбачений рівень заряду в момент часу t ; $P3_{вим}(t)$ – фактично виміряний рівень заряду в момент часу t ; T – загальний час діагностики.

Квадратична функція вартості для ЛКР-регулятора описується рівнянням:

$$J = \int_0^\infty (x^T Q x + u^T R u) dt. \quad (7)$$

Оптимальний закон керування можна записати у вигляді:

$$u = Kx, \quad (8)$$

де K – це матриця коефіцієнтів зворотного зв'язку, що обчислюється як

$$K = R^{-1}B^T P, \quad (9)$$

де P – це розв'язок рівняння Ріккати:

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = C. \quad (10)$$

Для забезпечення належної роботи ЛКР-регулятора в середовищі MATLAB/Simulink виконано симуляцію з налаштуванням параметрів:

Матриця A . Зміна значень в матриці A може змінити стабільність та динаміку системи. Наприклад, збільшення елементів на діагоналі матриці A може привести до більш швидкого або повільного переходу системи до стану рівноваги.

Матриця B . Зміна значень у матриці B може змінити вплив керуючого сигналу на систему. Наприклад, збільшення значень матриці B може збільшити вплив керуючого сигналу на систему, що може спричинитися до швидшого реагування.

Матриці Q та R .

Матриці Q і R є ваговими матрицями для станів і керуючих сигналів відповідно. Вони визначають, як сильно регулятор штрафуватиме відхилення станів і керуючих сигналів.

а) Матриця Q:

- 1) Збільшення значень у матриці Q призведе до того, що регулятор буде більше штрафувати відхилення станів від бажаних значень. Це може зробити систему стабільнішою, але може також зробити її менш чутливою до змін.

2) Зменшення значень у матриці Q приведе до меншого штрафування відхилення станів, що може зробити систему менш стабільною, але чутливішою.

б) Матриця R:

1) Збільшення значень у матриці R приведе до того, що регулятор буде більше штрафувати великі керуючі сигнали. Це може спричинитися до більш плавного керування, але менш ефективного регулювання станів.

2) Зменшення значень в матриці R приведе до меншого штрафування керуючих сигналів, що може зробити систему чутливішою, але також може призвести до більш різкого керування.

Визначення системних матриць.

A = [-0.01]; B = [0.1]; C = [1]; D = [0];

Визначення вагових матриць $Q = [1]$; $R = [1]$;

Обчислення матриці $K = \text{ЛКР}(A, B, Q, R)$; $K = 0,9050$.

Запропонована система керування зарядом батареї з ЛКР-регулятором була реалізована в середовищі MATLAB/Simulink (рис. 3). Параметри досліджуваної батареї наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Параметри батареї

Table 1. Battery parameters

Вибраний тип батареї	Lithium-Ion
Номінальна напруга (В)	24
Номінальна ємність (А·год)	50
Початковий стан заряду (%)	45
Час відгуку батареї (с)	1

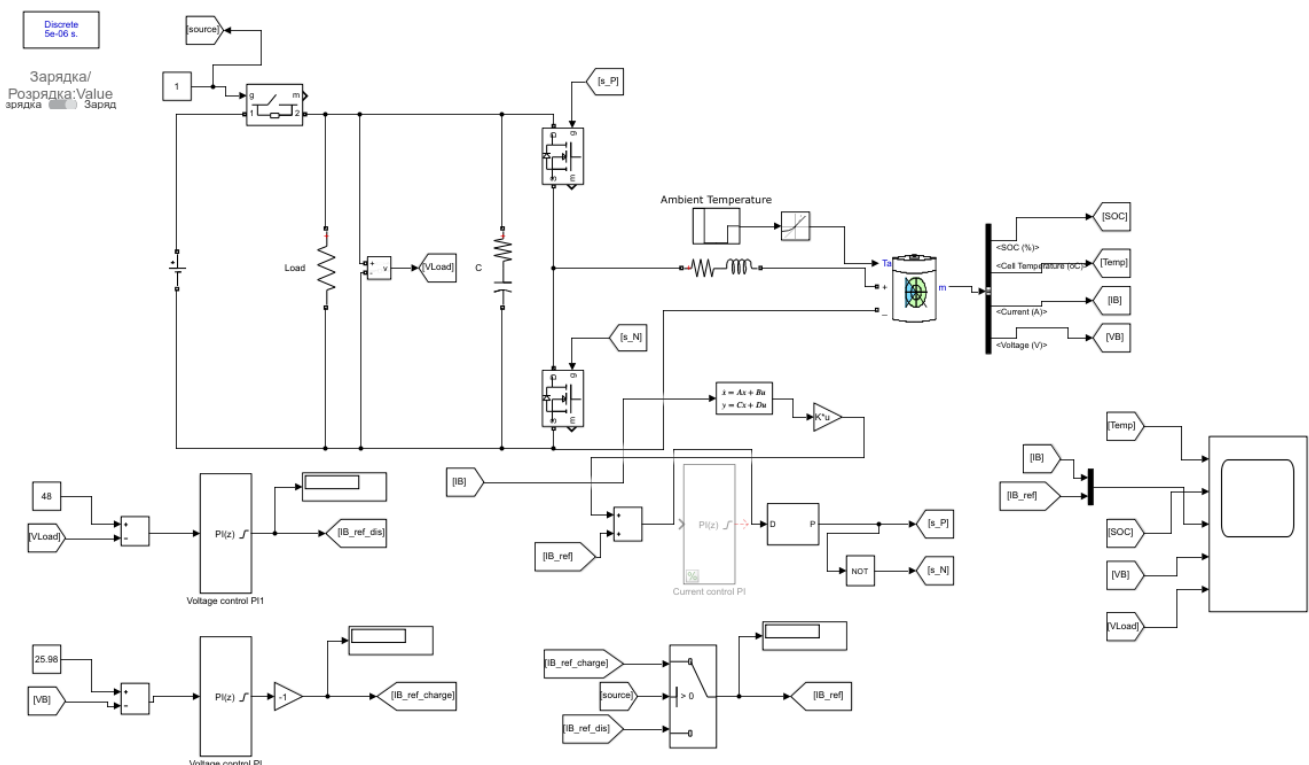


Рис. 3. Система керування зарядом батареї з ЛКР-регулятором

Fig. 3. Battery charge control system with LQR-regulator

Аналіз результатів моделювання. В цьому розділі було виконано порівняння ПІ-регулятора з розробле-

ним ЛКР-регулятором. Рис. 4 показує результати моделювання з використанням ПІ-регулятора [18].

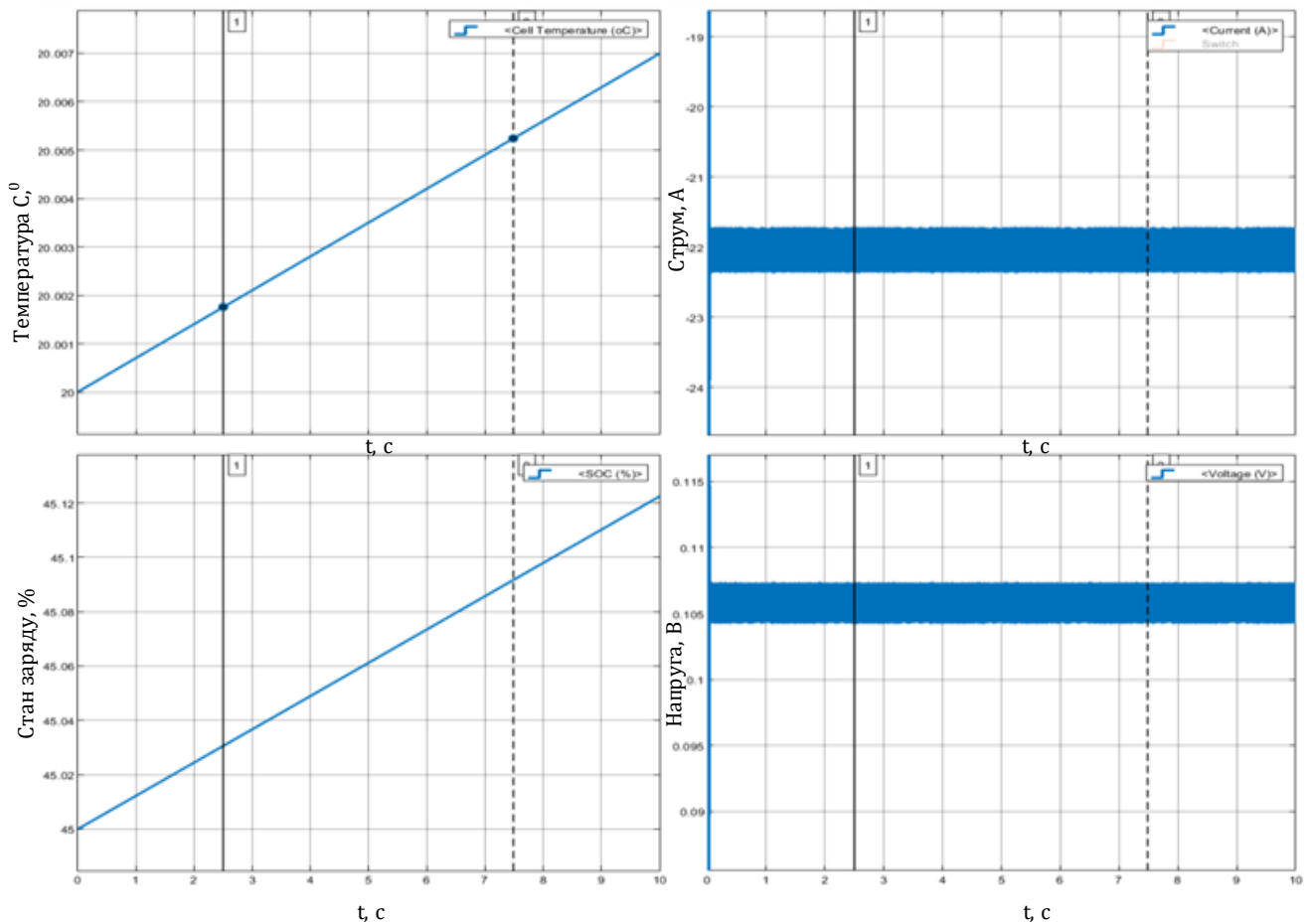


Рис. 4. Результати моделювання зарядки батареї з ПІ-регулятором

Fig. 4. Results of simulation of battery charging with PI regulator

Як ми можемо побачити, графік демонструє стійке лінійне зростання температури елемента протягом 10 с, паралельно зі сталою величиною струму приблизно -22 А та стабільним рівнем напруги, вказуючи на нормальний процес нагрівання елемента, стабільну роботу системи під заданим навантаженням, що відповідає контролю заряду та сприяє ефективності і безпеці в роботі елемента. Стан заряду збільшується лінійно з 45 до приблизно 45,12 % за 10 с.

Рис. 5 показує результати моделювання з використанням ЛКР-регулятора.

Як ми можемо побачити, під час моделювання було виявлено, що температура елемента залишалася стабільною, на рівні 20 °С, протягом всього періоду спостереження, що свідчить про успішне керування температурою з використанням регулятора. Крім того, струм підтримував стабільний рівень, близько -3 А, протягом усієї симуляції, що свідчить про ефективне керування струмом для

збереження енергії батареї. Стан заряду батареї збільшувався лінійно, вказуючи на стабільність і контрольованість процесу заряджання, що сприяє надійності системи. Напруга залишалася сталою, на рівні близько 1,48812 V, протягом усієї симуляції, що свідчить про ефективне регулювання для підтримання постійного рівня напруги під час заряджання, важливого для безпечної та ефективної роботи батареї.

Висновки. Порівнюючи два регулятори, ПІ і ЛКР, можна визначити, що ЛКР-регулятор виявився кращим у багатьох аспектах. Використання ЛКР сприяє стабільності температури, безпеці струму, більш контрольованому зростанню стану заряду та підтримці стабільної напруги. ЛКР-регулятор ефективніше контролює параметри батареї, що веде до запобігання перегріву, зменшення ризику пошкодження батареї та підвищення загальної безпеки й продуктивності роботи батареї в цілому.

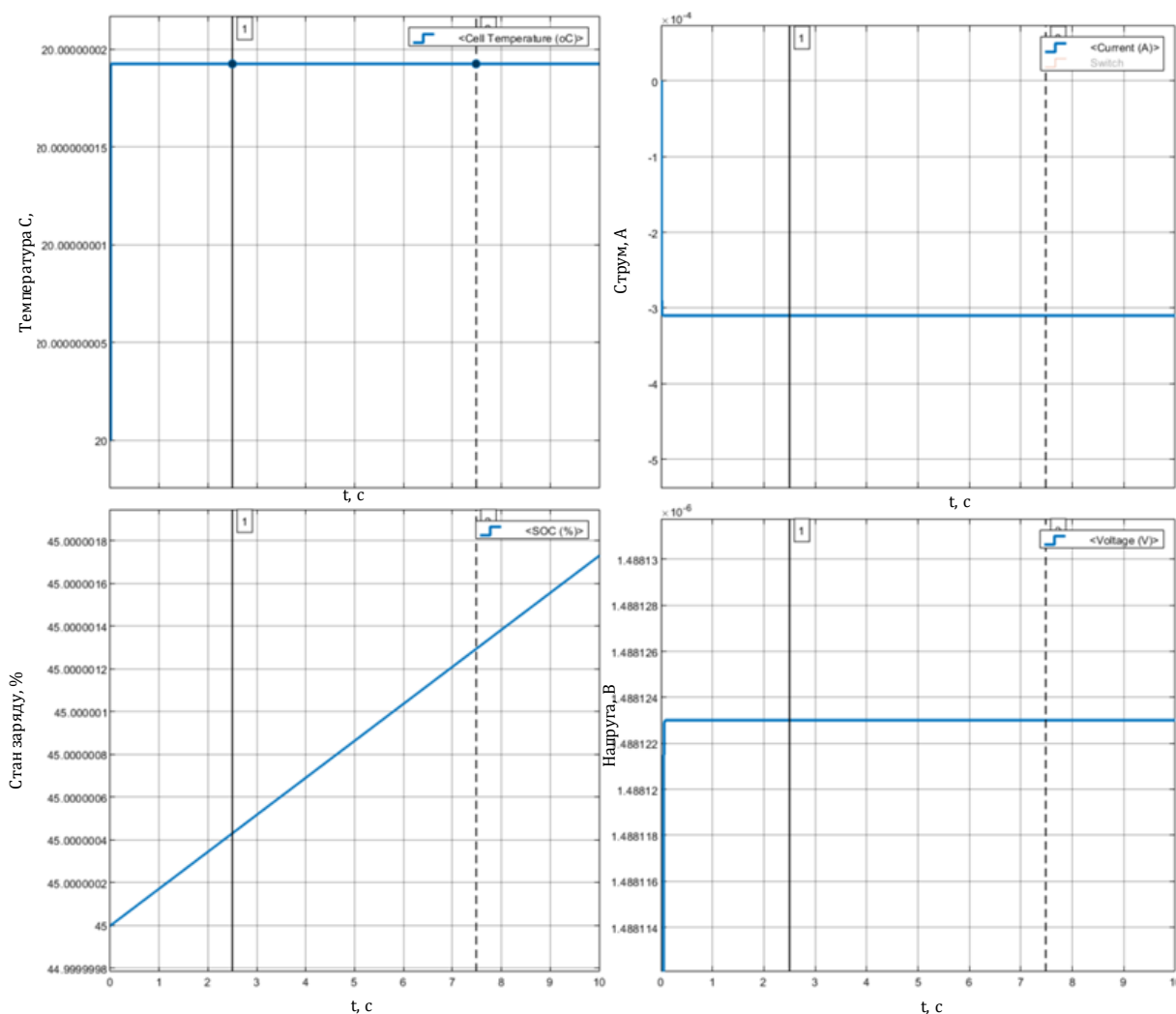


Рис. 5. Результати моделювання зарядки батареї з ЛКР-регулятором

Fig. 5. Results of simulation of battery charging with LQR-regulator

ПОСИЛАННЯ

- Кузнецов М. Моделювання балансу енергетики в об'єднаній системі з відновлюваною енергією. Відновлювана енергетика. 2021. № 2(65). С. 6–18. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.2\(65\).6-18](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.2(65).6-18).
- Кузнецов М., Мельник О., Смертюк В. Вплив параметрів накопичення електроенергії на балансування об'єднаної електросистеми. Відновлювана енергетика. 2021. № 1(64). С. 6–17. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.1\(64\).6-17](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.1(64).6-17).
- Alvarez. R. A., Pacala S. W. "Potential for battery-powered vehicles to reduce US oil consumption." *Nature Energy*. 2017. No. 2(9). Pp. 1–7.
- Ribeiro J., Duic N., Leal V. M., Igreja J., Silva V. "Environmental impact of electric vehicles versus internal combustion vehicles: A life cycle assessment." *Energy*. 2020. 199, 117418.
- Checkel J. M. "The effects of electric vehicles on greenhouse gas emissions." *Global Environmental Change*. 2019. 59, 101986.
- Ling Z. et al. "Remaining useful life prediction of lithium-ion batteries based on deep convolutional neural network and LSTM." *Journal of Power Sources*. 2021.
- Hua S. et al. "A comprehensive review on battery accelerator test methods for electric vehicles: Application in battery management system." *Applied Energy*. 2021.
- Zhang J. et al. "Battery health-informed battery charging for lithium-ion batteries in electric vehicles." *Journal of Power Sources*. 2020.
- Wang Y. et al. "Battery remaining useful life prediction based on deep transfer learning." *Journal of Energy Storage*. 2021.
- Chong, P., et al. "A review of prognostics and health management for lithium-ion battery in electric vehicles." *Applied Energy*. 2021.
- Offer Gregory J. et al. "Module design and fault diagnosis in electric vehicle batteries." *Journal of Power Sources*. 2012. Vol. 206. Pp. 383–392.

12. Davydenko L., Davydenko N., Bosak A., Bosak A., Deja A., & Dzhuguryan T. (2022). Smart Sustainable Freight Transport for a City Multi-Floor Manufacturing Cluster: A Framework of the Energy Efficiency Monitoring of Electric Vehicle Fleet Charging. *Energies*, 15(10), 3780. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15103780>.
13. Shan C., Chin C. S.; Mohan V., Zhang C. Review of Various Machine Learning Approaches for Predicting Parameters of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles. *Batteries* 2024, 10, 181. <https://doi.org/10.3390/batteries10060181>.
14. Zou Yuan et al. "State-space model with non-integer order derivatives for lithium-ion battery." *Applied energy* 161 (2016): 330-336.
15. Hariharan V., Krishnan S. Senthil Kumar. "A nonlinear equivalent circuit model for lithium ion cells." *Journal of power sources* 222 (2013): 210-217.
16. Wu Hongjie, Shifei Yuan, Chengliang Yin. "A lithium-ion battery fractional order state space model and its time domain system identification." *Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress: Volume 4: Future Automotive Powertrains (II)*. Springer Berlin Heidelberg, 2013.
17. Song Dafeng, Sun Chuqi, Zeng Xiaohua, Yang Nannan. LQR Based Battery Charge Sustaining Strategy for Hybrid Electric Vehicle [Електронний ресурс] / IFAC-PapersOnLine. 2018. Vol. 51. Issue 31. Pp. 601–605, ISSN 2405-8963. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.10.144>
18. SASA Poussin (2024). Battery Controller Design - Bidirectional DC-DC converter (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/92458-battery-controller-design-bidirectional-dc-dc-converter>), MATLAB Central File Exchange. Retrieved August 4, 2024.
6. Ling Z. et al. "Remaining useful life prediction of lithium-ion batteries based on deep convolutional neural network and LSTM." *Journal of Power Sources*. 2021.
7. Hua S. et al. "A comprehensive review on battery accelerator test methods for electric vehicles: Application in battery management system." *Applied Energy*. 2021.
8. Zhang J. et al. "Battery health-informed battery charging for lithium-ion batteries in electric vehicles." *Journal of Power Sources*. 2020.
9. Wang Y. et al. "Battery remaining useful life prediction based on deep transfer learning." *Journal of Energy Storage*. 2021.
10. Chong, P., et al. "A review of prognostics and health management for lithium-ion battery in electric vehicles." *Applied Energy*, 2021.
11. Offer Gregory J. et al. "Module design and fault diagnosis in electric vehicle batteries." *Journal of Power Sources*. 2012. Vol. 206. Pp. 383–392.
12. Davydenko L., Davydenko N., Bosak A., Bosak A., Deja A., & Dzhuguryan T. Smart Sustainable Freight Transport for a City Multi-Floor Manufacturing Cluster: A Framework of the Energy Efficiency Monitoring of Electric Vehicle Fleet Charging. *Energies*. 2022. 15(10), 3780. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15103780>.
13. Shan C., Chin C. S., Mohan V., Zhang C. Review of Various Machine Learning Approaches for Predicting Parameters of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles. *Batteries* 2024, 10, 181. <https://doi.org/10.3390/batteries10060181>.
14. Zou Yuan et al. "State-space model with non-integer order derivatives for lithium-ion battery." *Applied energy* 161 (2016): 330-336.
15. Hariharan S., Krishnan V. Senthil Kumar. "A nonlinear equivalent circuit model for lithium ion cells." *Journal of power sources* 222 (2013): 210-217.
16. Wu Hongjie, Shifei Yuan, Chengliang Yin. "A lithium-ion battery fractional order state space model and its time domain system identification." *Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress: Volume 4: Future Automotive Powertrains (II)*. Springer Berlin Heidelberg, 2013.
17. Song Dafeng, Sun Chuqi, Zeng Xiaohua, Yang Nannan. LQR Based Battery Charge Sustaining Strategy for Hybrid Electric Vehicle [Електронний ресурс] / IFAC-PapersOnLine. 2018. Vol. 51. Issue 31. Pp. 601–605, ISSN 2405-8963. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.10.144>
18. SASA Poussin (2024). Battery Controller Design - Bidirectional DC-DC converter (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/92458-battery-controller-design-bidirectional-dc-dc-converter>), MATLAB Central File Exchange. Retrieved August 4, 2024.

REFERENCES

1. Kuznetsov M. (2021). Modeling of the energy balance in the combined system with renewable energy. *Renewable energy*. 2021. No. 2(65). Pp 6–18. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.2\(65\).6-18](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.2(65).6-18). (in Ukrainian)
2. Kuznetsov M., Melnyk O., Smertyuk V. The influence of electricity storage parameters on the balance of the combined electrical system. *Renewable energy*. 2021. No. 1(64). Pp. 6–17. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.1\(64\).6-17](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.1(64).6-17). (in Ukrainian)
3. Alvarez R. A., Pacala S. W. "Potential for battery-powered vehicles to reduce US oil consumption." *Nature Energy*. 2017. No. 2(9). Pp. 1–7.
4. Ribeiro J., Duic N., Leal V. M., Igreja J., Silva V. "Environmental impact of electric vehicles versus internal combustion vehicles: A life cycle assessment." *Energy*. 2020. 199, 117418.
5. Checkel J. M. "The effects of electric vehicles on greenhouse gas emissions." *Global Environmental Change*. 2019. 59, 101986.