UDC 621.355.6

DOI: 10.30977/VEIT.2024.26.0.3

Імітаційне моделювання зарядного контролера LTC4020 для літій-іонних акумуляторів

Багач Р.В.[1], Гнатов А.В.[1], Аргун Щ.В.[1],

[1]Харківський національний автмобільно-дорожній університет, Україна

Надійшла: 21.08.2024. Прийнято: 01.12.2024. Опубліковано: 12.12.2024. Відкритий доступ: CC BY 4.0.

Анотація. *У статті проаналізовано літій-іонні акумулятори, їхні характеристики та проблеми заряджання. Розглянуто використання комбінованого контролера LTC4020, який інтегрує функції підвищувального та знижувального перетворювача напруги, забезпечуючи точне регулювання струму й напруги. Виконано моделювання роботи контролера як підвищувального перетворювача, що підтверджує важливість оптимального налаштування параметрів для безпечного заряджання батарей. Отримані результати можуть бути застосовані для підвищення ефективності заряджання в електротранспорті, фотоелектричних системах та портативних пристроях.*

Ключові слова: *літій-іонні акумулятори, зарядний пристрій, контролер LTC4020, моделювання, енергоефективність, безпека заряджання.*

Вступ

Літій-іонні акумулятори стали широко використовуваними в різних сферах, таких як електромобілі, гібридні автомобілі, мобільні пристрої та фотоелектричні системи. Їх обирають завдяки високій щільності енергії, низькому рівню саморозряду та мінімальним вимогам до обслуговування. Однак літій-іонні акумулятори мають суворі експлуатаційні обмеження, вимагають складних схем захисту, є дорогими та схильні до деградації через старіння, навіть без активного використання. Для досягнення їхньої максимальної ефективності необхідні подальші дослідження в цій галузі [1-3].

Стає звичним, що все більше пристроїв, які працюють на акумуляторах, можуть заряджатися від різноманітних джерел і використовувати батареї різних хімічних типів з широким діапазоном струмів і напруг. Прикладом можуть бути автомобільні зарядні пристрої, які потребують все вищих напруг і струмів через використання нових схем збирання масивів великих акумуляторів [4,5].

Майже всі типи акумуляторних батарей чутливі до перезаряджання, тому потребують дотримання чітких правил під час експлуатації. Існуючі рішення на базі єдиної інтегральної схеми (IC) охоплюють лише частину можливих комбінацій вхідної напруги і струму заряду. Для вирішення інших завдань, які потребують складніших комбінацій і топологій, доводиться використовувати не оптимальні комбінації мікросхем та велику кількість дискретних елементів. Так було до того, як у 2011 році корпорація Linear Technology спростила цей сегмент ринку, створивши двомікросхемне рішення для зарядних пристроїв, включивши до нього мікросхему контролера заряджання акумулятора LTC4000 та сумісний DC/DC-перетворювач із зовнішньою компенсацією.

Аналіз публікацій

Технології літій-іонних акумуляторів (Li-ion). Літій-іонні акумулятори є одними з найпопулярніших джерел живлення для різних мобільних пристроїв та електромобілів через їх високу енергетичну щільність, низьку вагу та ефективність. Однак існують певні проблеми з їх зарядкою та експлуатацією, зокрема щодо уникнення надмірної зарядки чи розрядки, які можуть призвести до скорочення терміну служби батареї або навіть до

вибуху [6,7].

Контролери заряду та їх функції. Контролери заряду відіграють критичну роль у забезпеченні безпечної та ефективної зарядки Li-ion батарей. Вони здійснюють контроль струму та напруги під час процесу зарядки, використовуючи різні алгоритми для різних типів акумуляторів. Одним із найбільш універсальних рішень є контролери з функцією знижувального/підвищувального перетворення напруги, що дозволяє ефективно заряджати батареї з широким діапазоном вхідних параметрів.

Особливості LTC4020. У статтях, що розглядають контролери заряду, моделі на LTC4020 виділяються завдяки своїм характеристикам. LTC4020 є комбінованим контролером зарядки з підтримкою підвищувально/знижувального перетворювача напруги. Він дозволяє заряджати батареї різних типів та є сумісним з широким діапазоном вхідної напруги (4,5 В до 55 В). Особливою перевагою LTC4020 є точність регулювання струму та напруги, що дозволяє уникнути перезарядки та глибокого розряду, які негативно впливають на стан акумуляторів.

Алгоритми зарядки та оптимізація енергоефективності. Контролер LTC4020 використовує різні алгоритми заряджання, такі як CC/CV (постійний струм/постійна напруга) та алгоритм C/10 який має струм заряджання 100 мА, що оптимізує процес зарядки для різних хімічних складів акумуляторів (Li-ion, LiFePO4, суперконденсатори тощо). Це дозволяє мінімізувати втрати енергії та забезпечити ефективність зарядки на рівні понад 90%, а інколи до 97%, залежно від умов експлуатації.

Моделювання роботи контролера. Імітаційне моделювання, яке було проведено для дослідження роботи LTC4020, показало важливість вибору правильних параметрів для заряджання Li-ion батарей. Було встановлено, що розряд до 2,8 В і нижче призводить до швидкої деградації батареї, а перевищення напруги понад 4,2 В може спричинити витік електроліту та підвищений ризик вибуху. Моделювання дозволяє оптимізувати параметри зарядного процесу та підвищити безпеку використання акумуляторів.

Таким чином сучасні контролери, такі як LTC4020, забезпечують надійне та безпечне управління зарядом літій-іонних акумуляторів. Їх гнучкість у підтримці різних типів акумуляторів, ефективне регулювання струму та напруги, а також можливість роботи у широкому діапазоні вхідних напруг роблять їх важливими компонентами для сучасних зарядних пристроїв.

Мета та постановка задачі

Метою роботи є проведення аналізу і моделювання роботи контролера LTC4020 для заряджання літій-іонних акумуляторів, що дозволить оптимізувати параметри заряджання, забезпечити безпеку експлуатації та підвищити енергоефективність зарядних пристроїв.

Досягнення поставленої мети передбачає вирішення таких завдань:

– провести огляд та аналіз технологій літій-іонних акумуляторів, приділивши особливу увагу проблемам заряджання і розряджання, які спричиняють деградацію або пошкодження батарей;

– дослідити функціональні можливості контролера заряду LTC4020, включаючи точність регулювання струму та напруги, сумісність із різними джерелами живлення і підтримку трьох алгоритмів закінчення заряду;

– виконати імітаційне моделювання роботи контролера LTC4020 в конфігурації підвищувального перетворювача та оцінити його ефективність під час заряджання літій-іонних акумуляторів;

– визначити оптимальні параметри заряджання, які мінімізують ризики перезарядки та глибокого розряду, що дозволить уникнути деградації батарей і підвищити безпеку їх експлуатації;

– оцінити можливості використання LTC4020 для заряджання інших типів батарей і суперконденсаторів, враховуючи його універсальність і високу ефективність.

Літій-іонні акумулятори (Li-ion)

Li-ion акумулятори є одним із найпоширеніших типів сучасних джерел живлення завдяки їх високій енергетичній щільності, довговічності та універсальності. Вони широко використовуються у портативних пристроях, електромобілях, системах зберігання енергії та інших високотехнологічних галузях [8, 9].

Однією з ключових переваг Li-ion акумуляторів є їх висока енергетична щільність, що забезпечує тривалий час автономної роботи у порівняно компактних розмірах і вазі [10, 11]. Це робить їх незамінними у таких пристроях, як смартфони, ноутбуки, дрони, а також електромобілі. Ще однією важливою характеристикою є низький рівень саморозряду, що дозволяє зберігати заряд батареї

протягом тривалого часу без використання, рис. 1.

Рис. 1. Переваги і недоліки літій-іонних акумуляторів

Відсутність ефекту пам'яті, властивого іншим типам акумуляторів, зокрема нікель-кадмієвим, є ще однією суттєвою перевагою. Li-ion акумулятори не потребують повного розряджання перед зарядкою, що полегшує їх використання в повсякденному житті. Крім того, такі батареї працюють у широкому температурному діапазоні, забезпечуючи стабільну роботу навіть у складних умовах.

Енергоефективність літій-іонних батарей перевищує 90%, що дозволяє зменшити втрати енергії під час заряджання та розряджання. Відносна екологічність цих акумуляторів порівняно зі свинцево-кислотними чи нікель-кадмієвими також додає їм конкурентоспроможності, адже вони не містять токсичних важких металів.

Попри численні переваги, Li-ion акумулятори мають певні обмеження, які впливають на їх експлуатацію, рис. 1. Насамперед, вони є чутливими до умов заряджання та розряджання. Неправильна експлуатація, наприклад, перезарядка або глибока розрядка, може спричинити деградацію або навіть вихід батареї з ладу. Це вимагає застосування складних систем захисту, таких як контролери заряду.

Ще одним суттєвим обмеженням є природна деградація акумуляторів. Навіть за умов дотримання рекомендацій щодо експлуатації, літій-іонні батареї з часом втрачають ємність через хімічні процеси всередині. Типовий термін служби таких батарей становить 2-3 роки активного використання.

Додатково слід врахувати їх чутливість до екстремальних температур. Низькі температури зменшують ефективність роботи, а високі прискорюють деградацію. Також у разі пошкодження батареї або порушення умов експлуатації можливе перегрівання, що може призвести до займання чи вибуху. Це підвищує вимоги до їхньої безпеки.

Останнім аспектом є висока вартість виробництва, зумовлена складною технологією виготовлення та використанням дорогих матеріалів, таких як літій і кобальт.

Такий широкий спектр переваг та певні обмеження літій-іонних акумуляторів вимагає використання надійних та ефективних рішень для їх заряджання, одним із яких є комбіновані зарядні пристрої, що забезпечують оптимальні умови для роботи батарей.

Аналіз комбінованого зарядного пристрою

На початкових етапах створення зарядного пристрою розробники стикаються з низкою проблем. Це стосується вибору серед широкого спектра акумуляторів, роботи з батареями високої ємності та необхідності врахування вхідної напруги, яка може бути як вищою, так і нижчою за напругу акумулятора. Для цього потрібні складні комбіновані схеми. Додатково, ситуацію ускладнює відсутність простих і універсальних рішень на базі однієї мікросхеми для заряджання акумуляторів [12].

До основних проблем при створенні зарядного пристрою належать:

– різноманітність вхідних напруг для заряджання: деякі перевищують напругу акумулятора, а інші – нижчі;

– діапазон вхідної напруги, який може бути як вищим, так і нижчим за напругу акумулятора;

– високі вхідні напруги (понад 30 В).

Джерела вхідного живлення також дуже різноманітні: від мережевих адаптерів потужністю 5-19 В і більше, до систем із випрямленням на 24 В змінного струму, сонячних батарей із високим внутрішнім опором, а також автомобільних та вантажних акумуляторів. Це вимагає використання акумуляторів різних типів, таких як літій-іонні (Li-Ion, Li-Polymer, LiFePO4), свинцево-кислотні чи нікелеві, що ще більше ускладнює процес розробки.

Через такі виклики мікросхеми для зарядних пристроїв часто обмежуються знижувальними контролерами або більш складними топологіями, наприклад SEPIC. Якщо ж до цього додати необхідність заряджання від сонячних батарей, завдання стає ще складнішим. Жоден із наявних зарядних пристроїв на базі однієї мікросхеми поки не вирішує всі ці питання комплексно.

Одним із рішень цих проблем є використання компактних інтегрованих пристроїв. Зокрема, комбінований контролер заряджання LTC4020 дозволяє реалізувати знижувально/підвищувальну топологію на базі однієї мікросхеми, що значно спрощує розробку зарядних пристроїв [13].

Контролер заряджання акумулятора LTC4020

LTC4020 – це сучасний пристрій для керування високою напругою живлення та зарядом різних типів хімічних акумуляторів. Він розроблений для ефективної передачі потужності від різноманітних джерел у шину живлення системи та для заряджання акумулятора.

Пристрій забезпечує точне регулювання струму та напруги заряду в межах ±0,5 % та працює у широкому діапазоні вхідної напруги від 4,5 В до 55 В. Він сумісний із багатьма джерелами живлення, маючи вихідну напругу до 55 В, струм заряду до 20 А та можливість вибору трьох алгоритмів закінчення заряду. Це дозволяє використовувати LTC4020 для різних типів акумуляторів та хімічних батарей. Вбудований підвищувальний/знижувальний DC/DC-контролер дає можливість працювати з акумуляторами, напруга може бути як вищою, так і нижчою за вхідну (VIN).

Основні застосування LTC4020 включають портативне промислове та медичне обладнання, системи з сонячними батареями, військову техніку та вбудовані автомобільні системи з робочою напругою від 12 В до 24 В. Однією з ключових особливостей LTC4020 є інтелектуальна схема PowerPath (рис. 2), яка звужує діапазон напруг, необхідний для наступних компонентів системи. Ця схема також забезпечує систему потужністю навіть за повністю розрядженого акумулятора [14,15].

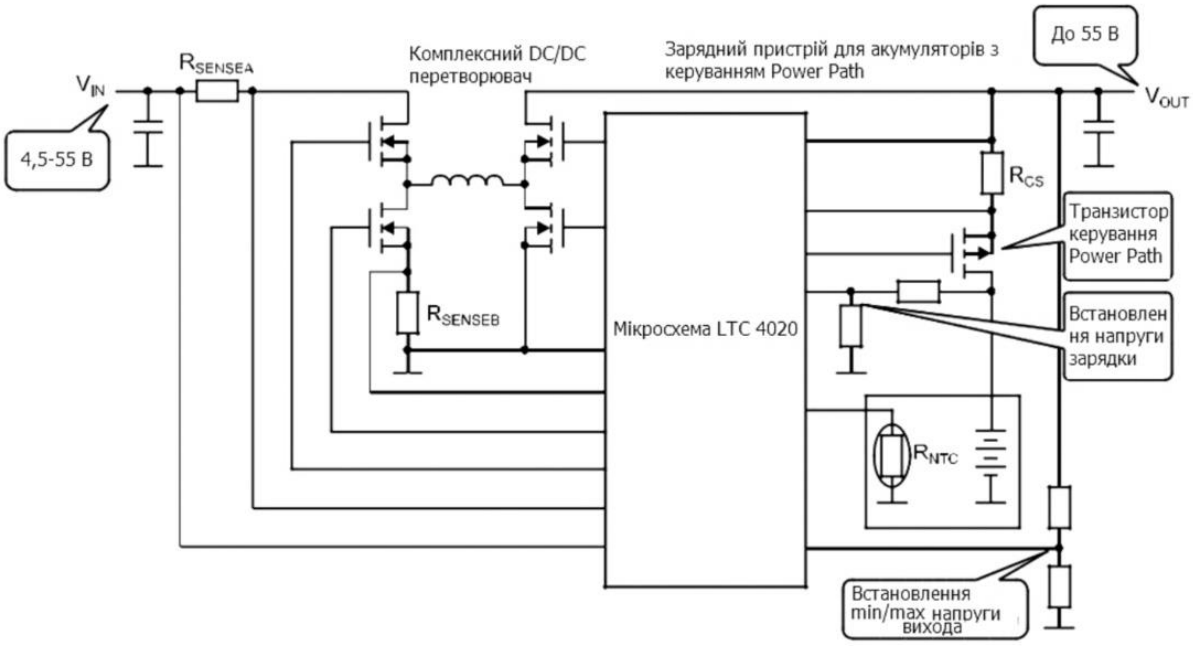

Рис. 2. Типова схема застосування контролера LTC4020

Контур регулювання вхідної напруги у функції контролю точки оптимальної потужності (MPPC) керує струмом заряду для утримання вхідної напруги на оптимальному рівні. Це корисно для джерел із високим імпедансом, таких як сонячні батареї. За відсутності вхідного живлення струм розряду акумулятора знижується до 10 мкА, що підтримує максимальну збережену ємність.

LTC4020 підтримує три методи заряджання, оптимізовані для різних типів акумуляторів. Заряд може відбуватися за принципом постійного струму/постійної напруги (CC/CV), алгоритмом C/10 або за допомогою

таймера для літієвих акумуляторів, включаючи Li-Ion, Li-Polymer та LiFePO4. Крім того, функція заряджання постійним струмом із таймером може бути застосована для ультраконденсаторів та нікелевих акумуляторів [16,17].

Ефективність пристрою може досягати понад 90 %, а в деяких випадках – до 97 %, залежно від вхідної напруги та рівня потужності (рис. 3).

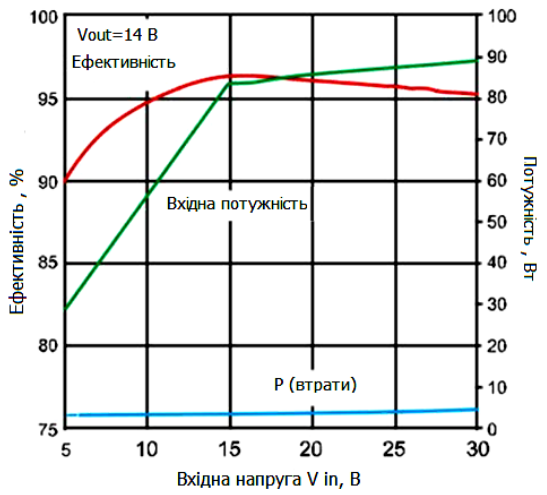

Рис. 3. Характеристика ефективності заряджання при максимальній вихідній потужності залежно від вхідної напруги

Імітаційне моделювання літій-іонного акумулятора з контролером LTC4020

Для дослідження роботи контролера заряду LTC4020 з топологією підвищувального перетворювача було виконано імітаційне моделювання за допомогою програмного забезпечення LTSpice. Основною метою моделювання є оцінка ефективності контролера та визначення оптимальних параметрів для заряджання літій-іонного акумулятора.

Для моделювання літій-іонного акумулятора в середовищі LTSpice була використана модель, яка відображає залежність стану заряду (SoC) від вихідної напруги батареї. Структура моделі складається з двох основних підсхем, що представляють позитивний і негативний електроди акумулятора.

У літературі [18,19] наведено різні моделі літій-іонних акумуляторів, такі як модель Rint, модель RC, модель Thevenin, модель PNGV та модель DP. У даному дослідженні застосовано модель Thevenin, оскільки вона забезпечує оптимальний баланс між простотою реалізації, властивою моделі Rint, і високою точністю, характерною для моделі DP. Цей підхід дозволяє ефективно моделювати поведінку літій-іонного акумулятора у процесі заряджання та розряджання.

На рис. 4 представлено схему моделі Thevenin, яка була реалізована для симуляцій у LTSpice. Такий підхід дозволяє врахувати ключові параметри акумулятора, необхідні для коректної оцінки ефективності контролера LTC4020.

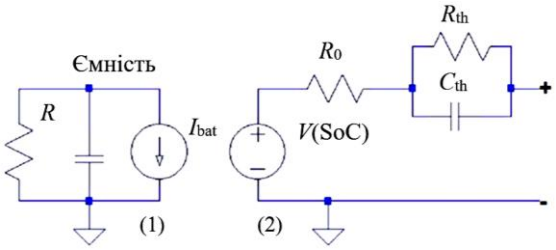

Рис. 4. Еквівалентна схема літій-іонного акумулятора (модель Thevenin)

Модель літій-іонного акумулятора складається з двох основних підсхем, позначених як (1) та (2). Підсхема (1), розташована ліворуч, включає три ключові компоненти: конденсатор, паралельний резистор і джерело струму. Конденсатор виконує роль моделювання ємності акумулятора у [А·год]. Напруга, що відповідає стану заряду (SoC), змінюється в діапазоні від 0 В до 1 В і визначається різницею потенціалів на його клемах. Таким чином, ємність акумулятора у моделі може бути виражена у фарадах [Ф], що еквівалентно [А·с/В], якщо врахувати, що максимальна напруга дорівнює 1 В. Резистор, у свою чергу, використовується для імітації струмів розряду, але для коректної симуляції слід задати його велике значення. Струм I_{bat} у цій частині моделі представляє зарядний струм акумулятора.

У підсхемі (2), яка зображена праворуч, знаходиться джерело напруги, залежне від стану заряду (SoC). Напруга цього джерела змінюється відповідно до кривих заряджання батареї, наданих виробником.

Детальний метод розрахунку параметрів резисторів R_0, R_{th} та ємності C_{th}, необхідних для побудови цієї моделі, описано у роботі [18].

Результати моделювання літій-іонної батареї за допомогою LTSpice

На рис. 5 представлені результати симуляції роботи літій-іонного акумулятора при різних значеннях зарядного струму.

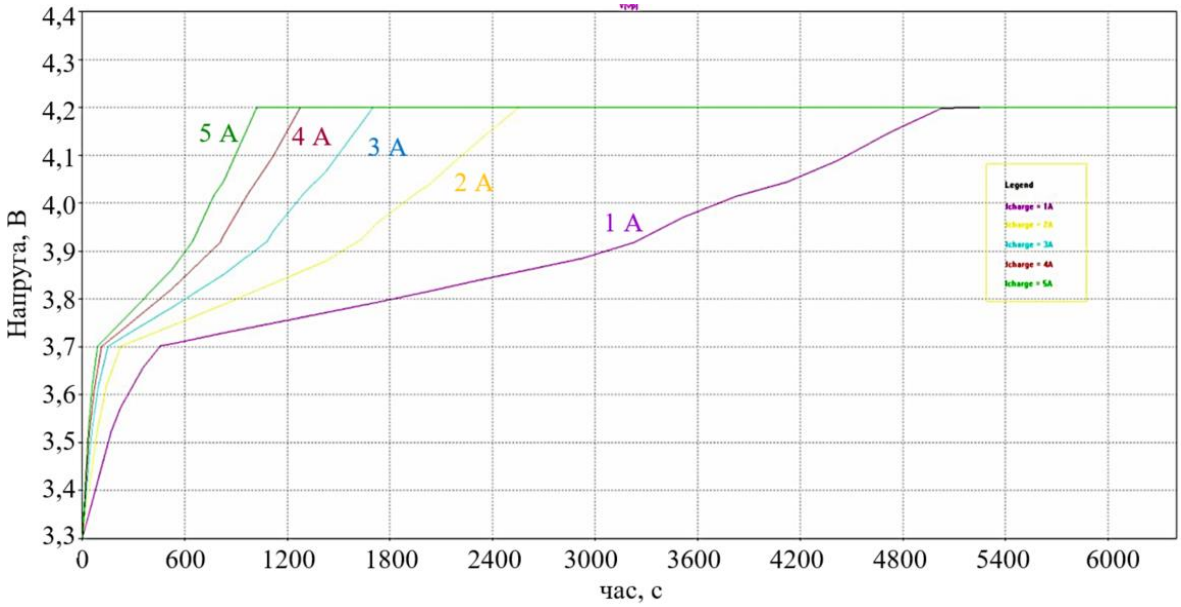

Рис. 5. Криві процесу зарядки літій-іонного акумулятора для різних значень струму

Встановлено, що напруга акумулятора змінюється в межах від 2,8 В до 4,2 В. Розряд до напруги нижче 2,8 В можливий, однак це може спричинити деградацію батареї. Повний розряд до 0 В вважається небезпечним, оскільки хімічна структура акумулятора в такому випадку стає нестабільною, що унеможливлює його подальше використання.

Перевищення напруги понад 4,2 В також є небезпечним, оскільки це може призвести до витікання електроліту або навіть до вибуху акумулятора.

Таким чином, результати моделювання підкреслюють важливість дотримання рекомендованих меж напруги під час експлуатації літій-іонних батарей.

Результати моделювання LTC4020 з літій-іонним елементом

Режим роботи зарядного пристрою заснований на алгоритмі постійного струму-постійної напруги (CC-CV). На першому етапі заряджання акумулятора подається постійний струм для швидкого досягнення максимальної напруги (плаваючої напруги). Після досягнення цього значення струм поступово зменшується в геометричній прогресії, поки не знизиться до значення, яке вдесятеро менше початкового. Це дозволяє підтримувати стабільну напругу на батареї.

Зарядний пристрій може бути налаштований як понижуючий перетворювач, що знижує вхідну напругу для відповідності напрузі акумулятора. У процесі моделювання використовувався літій-іонний елемент із максимальною напругою 4,2 В. Робота понижуючого перетворювача забезпечується перемикачем та індуктивною котушкою, якими керує контролер LTC4020.

Частота перемикання встановлена на рівні 250 кГц, а робочий цикл налаштовано на 25%, що дозволяє адаптувати вихідну напругу батареї до вхідної напруги, яка становила близько 14 В.

На рис. 6 наведено графіки струму та напруги, які подаються на акумулятор зарядним пристроєм. На них чітко видно характеристики процесу заряджання за алгоритмом CC-CV. У початковій фазі струм залишається постійним, поки акумулятор не досягне плаваючої напруги (максимальної). Після цього струм поступово зменшується до значення, яке в десять разів менше початкового, щоб підтримувати стабільну напругу.

У кінці циклу заряджання піковий струм, що спостерігається, генерується завдяки конденсатору, який є частиною моделі акумулятора. Для керування струмом використовується ключовий компонент – MOSFET. Напруга батареї, яка позначена червоним кольором, поступово підвищується до рівня 4,2 В, що чітко відображено на рис. 6.

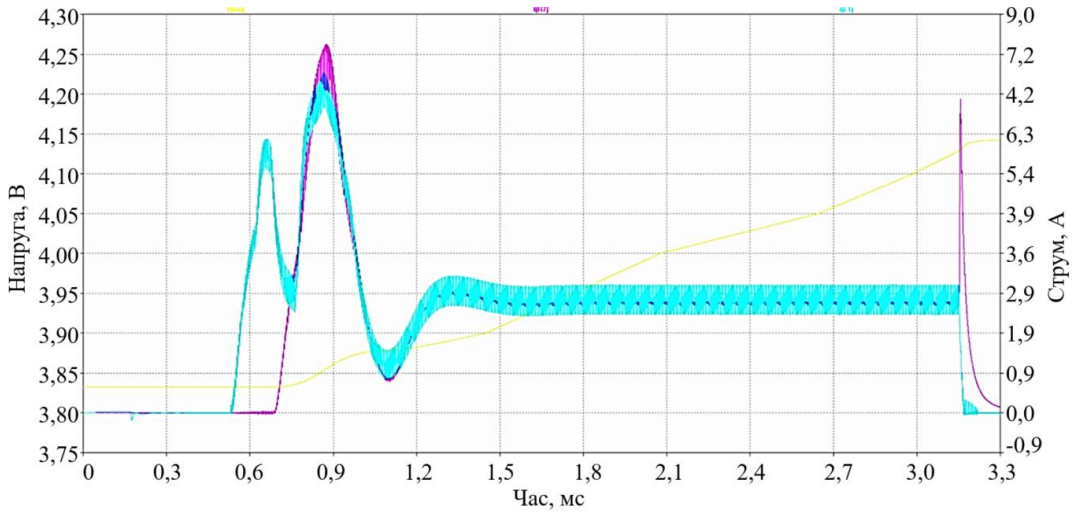

Рис. 6. Струм заряду та напруга, що подається на батарею за допомогою LTC4020

Результати вимірювань та моделювання зарядного пристрою з літій-іонним акумулятором

Для проведення вимірювань було використано джерело постійного струму, підключене до електромережі, з налаштованою силою струму на рівні 1 А. На рис. 7 представлено зміну напруги батареї в процесі заряджання. Графік демонструє чотири ключові стадії.

На першій стадії напруга повільно зростає до 2,9 В при мінімальному струмі, що відповідає режиму попереднього заряджання. Після досягнення цього значення встановлюється постійний струм у 1 А, і напруга збільшується до 3,6 В, де швидкість її зростання значно сповільнюється. Цей етап характеризується режимом постійного струму. Потім напруга поступово підвищується до 3,8 В, а далі експоненційно зростає до максимальної величини 4,2 В, після чого підтримується постійною. Ця остання стадія відповідає режиму постійної напруги.

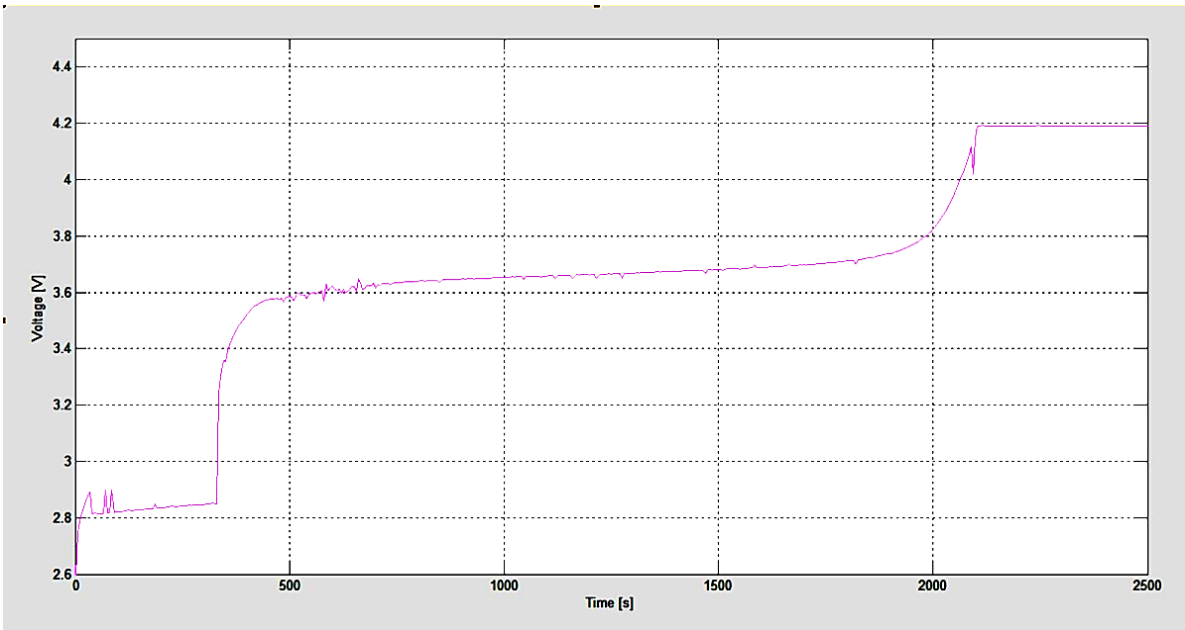

Рис. 7. Напруга літій-іонного акумулятора під час процесу заряду

На рис. 8 показано зміну зарядного струму під час цього процесу. На початку заряджання струм залишається низьким, оскільки батарея перебуває в режимі попереднього заряду. Коли напруга досягає 2,9 В, зарядний струм встановлюється на рівні 1 А і підтримується до досягнення максимальної напруги 4,2 В. Після цього струм поступово зменшується до значення 0,1 А, що вдесятеро менше початкового.

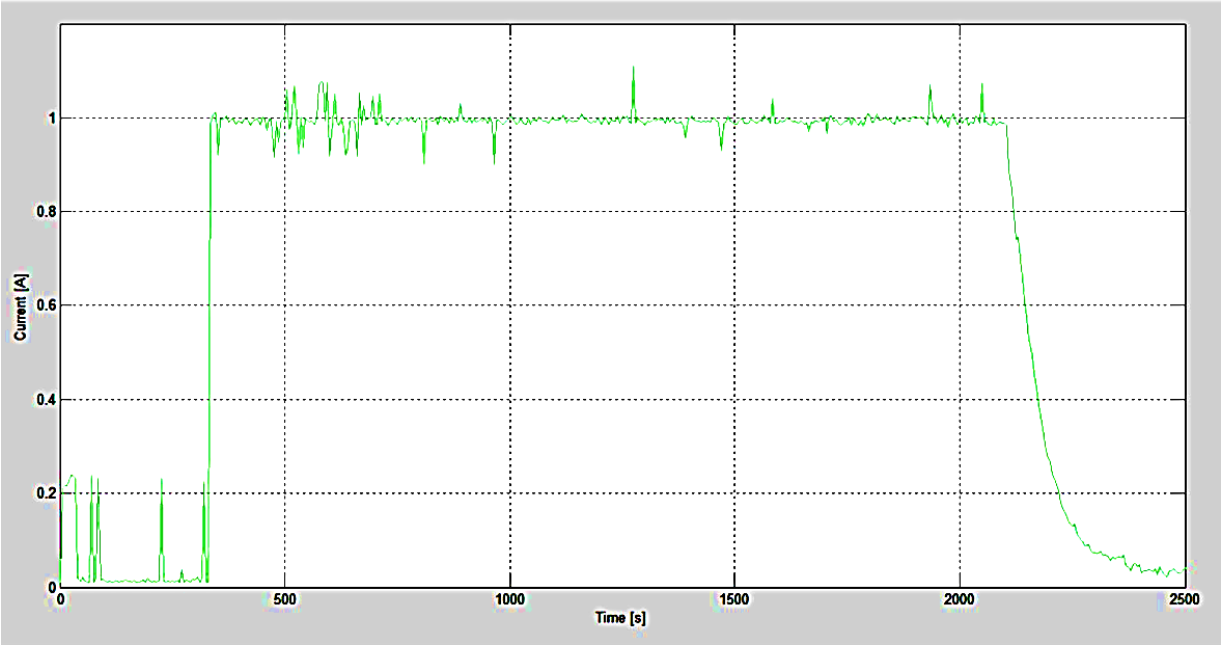

Рис. 8. Зарядний струм, що подається зарядним пристроєм

Результати моделювання для різних зарядних струмів показують зменшення часу заряджання за рахунок оптимізації параметрів. Дані про співвідношення VOC (відкритої напруги) і SoC (стану заряду) відповідають характеристикам, наведеним у літературі [19]. Інші параметри моделі, використані для симуляцій, узгоджуються з даними [18].

На рис. 6 відображено результати моделювання зарядного пристрою. Контролер LTC4020 використовує широтно-імпульсний перетворювач із двома перемикачами, чотирма ключовими компонентами MOSFET і котушкою, які дозволяють адаптувати вхідну напругу для заряджання батареї. Сигнал, який керує верхнім затвором одного з MOSFET-компонентів, адаптує напругу джерела до батареї. Період перемикання становить 4 мкс, що відповідає частоті 250 кГц, як вказано у специфікації компонентів.

Рис. 7 демонструє зміну напруги та струму акумулятора під час заряджання. Спочатку струм залишається постійним, допоки батарея не досягає максимальної напруги, після чого струм поступово зменшується для підтримання стабільної напруги. Використана модель акумулятора включає масштабовану ємність (1,4 мА/год), що дозволило провести моделювання у відповідних часових рамках. Поведінка моделі повністю узгоджується з теоретичними характеристиками, описаними в літературі [21].

Таким чином, результати підтверджують точність роботи контролера LTC4020 за алгоритмом CC-CV, а також демонструють його здатність забезпечувати стабільне заряджання акумулятора з дотриманням заданих параметрів.

Висновки

У статті проведено детальний аналіз роботи контролера LTC4020 для заряджання літій-іонних акумуляторів із застосуванням топологій підвищувального та знижувального перетворювача напруги. Використання даного контролера забезпечує високу точність регулювання струму та напруги, що мінімізує ризики перезаряджання та глибокого розряду акумуляторів.

Виконане імітаційне моделювання підтвердило ефективність алгоритму заряджання CC-CV (постійний струм – постійна напруга) та його здатність оптимізувати параметри зарядного процесу. Встановлено, що контролер LTC4020 може ефективно працювати з широким діапазоном вхідних напруг (4,5 В–55 В), що робить його універсальним рішенням для різних типів батарей.

Результати моделювання показали, що перевищення рекомендованих меж напруги (2,8–4,2 В) може спричинити деградацію батареї або навіть її пошкодження. Це підтверджує важливість точного налаштування параметрів зарядного пристрою для забезпечення довговічності акумуляторів.

Модель літій-іонного акумулятора, розроблена на основі моделі Thevenin, забезпечує адекватну точність при оптимальному рівні складності, що дозволяє ефективно дослі-

джувати поведінку батарей під час заряджання та розряджання.

Контролер LTC4020 демонструє високий рівень енергоефективності, досягаючи 90–97%, залежно від умов експлуатації. Його універсальність дозволяє застосовувати даний контролер у фотоелектричних системах, електротранспорті, медичному обладнанні та інших галузях.

Отримані результати можуть бути використані для розробки сучасних зарядних пристроїв, що відповідають вимогам безпеки, ефективності та надійності, сприяючи подальшому впровадженню енергоефективних технологій у різних сферах.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо публікації цієї статті.

Література

1. Гнатов, А. В., Аргун, Щ. В., & Ул'янець, О. А. (2017). Електромобілі–майбутнє, яке вже настало. Автомобіль і електроніка. Сучасні технології, (11), 24-28. Hnatov, A. V., Arhun, Sh. V., & Ulyanets, O. A. (2017). Elektromobili–maibutnie, yake vzhe nastalo. [Electric cars are the future that has already arrived.] Avtomobil i elektronika. Suchasni tekhnolohii, (11), 24-28. [in Ukrainian].
2. Гнатов, А. В., Аргун, Щ. В., & Ульянец, О. А. (2016). Енергозберігаючі технології на транспорті. Наукові нотатки, (55), 80-86. Hnatov, A. V., Arhun, Sh. V., & Ulyanets, O. A. (2016). Enerhozberihaiuchi tekhnolohii na transporti. [Energy-saving technologies in transport.] Naukovi notatky, (55), 80-86. [in Ukrainian].
3. Багач, Р.В., & Кальченко, О.О. (2023). Перспективи та розвиток літієвих акумуляторів в Україні. Світові тенденції ресурсозбереження на електричному транспорті: матеріали Всеукр. наук.-практ. конф., Харків, 25–27 жовт. 2023 р. (с. 31–34). Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова. Bahach, R. V., & Kalchenko, O. O. (2023). Perspektyvy ta rozvytok litiievykh akumuliatoriv v Ukraini. [Prospects and development of lithium batteries in Ukraine.] Svitovi tendentsii resursozberezhennia na elektrychnomu transporti: materialy Vseukr. nauk.-prakt. konf., Kharkiv, 25–27 zhovt. 2023 r. (pp. 31–34). Kharkiv: KhNUMH im. O. M. Beketova [in Ukrainian].
4. Багач, Р.В. (2023). Використання зарядних станцій для електромобілів у Харківській області. Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування СЕУТТОО-2023: 14-а Міжнародна науково-практична конференція (с. 323–327). Херсон: Херсонська державна морська академія. Bahach, R. V. (2023). Vykorystannia zaryadnykh stantsii dlia elektromobiliv u Kharkivskii oblasti. [Use of charging stations for electric vehicles in Kharkiv region.] Suchasni enerhetychni ustanovky na transporti, tekhnolohii ta obladnannia dlia yikh obsluhovuvannia SEUTTO-2023: 14-a Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia (pp. 323–327). Kherson: Khersonska derzhavna morska akademiia [in Ukrainian].
5. Багач, Р. В. (2024). Підвищення ефективності експлуатації автомобільного електротранспорту з використанням зарядних станцій постійного струму (Докторська дисертація, Харківський національний автомобільно-дорожній університет). Bahach, R. V. (2024). Pidvyshchennia efektyvnosti ekspluatatsii avtomobilnoho elektrotransportu z vykorystanniam zaryadnykh stantsii postijnoho strumu. [Improving the efficiency of electric vehicle operation using DC charging stations.] (Doctoral dissertation, Kharkivskyi natsionalnyi avtomobilno-dorozhnii universytet). https://dspace.khadi.kharkov.ua/handle/123456789/20343 [in Ukrainian].
6. Багач, Р.В. (2021). Перспективи подальшого вдосконалення акумуляторних батарей для електромобілів. Міжнародна науково-практична конференція присвячена 90-річчю Харківського автомобільно-дорожнього університету та 90-річчю автомобільного факультету "Новітні технології в автомобілебудуванні, транспорті та при підготовці фахівців" (pp. 346-349). Харків: ХНАДУ. Bahach, R. V. (2021). Perspektyvy podalshoho vdoskonalennia akumuliatornykh batarei dlia elektromobiliv. [Prospects for further improvement of batteries for electric vehicles.] Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia, prysviachena 90-richchiu Kharkivskoho avtomobilno-dorozhnoho universytetu ta 90-richchiu avtomobilnoho fakultetu "Novitni tekhnolohii v avtomobiliebuduvanni, transporti ta pry pidhotovtsi fakhivtsiv" (pp. 346–349). Kharkiv: KhNADU [in Ukrainian].
7. Багач, Р.В. (2024) Перспективні технології твердотільних акумуляторів. Збірник тез та доповідей міжнародної конференції "Енергетичні установки та альтернативні джерела енергії". 11–12 березня 2024 року – Харків: ФОП Бровін О.В., 2024. – 424 с. Bahach, R. V. (2024). Perspektyvni tekhnolohii tverdotilnykh akumuliatoriv. [Promising technologies of solid-state batteries.] Zbirnyk tez ta dopovidei mizhnarodnoi konferentsii "Enerhetychni ustanovky ta alternatyvni dzherela enerhii". 11–12 bereznia 2024 roku – Kharkiv: FOP Brovin O.

V., 2024. ISBN 978-617-8238-51-3 [in Ukrainian].
8. Латвинський ,В.Д., & Багач, Р.В. (2024). Дослідження літій-іонних батарей для експлуатації електромобілями при різних температурних умовах. ISSN 2074-2630 Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Електротехніка і енергетика» №1(30)'2024. Latvynskyi, V. D., & Bahach, R. V. (2024). Doslidzhennia litii-ionnykh batarei dlia ekspluatatsii elektromobiliamy pry riznykh temperaturnykh umovakh. [Study of lithium-ion batteries for electric vehicle operation under different temperature conditions.] ISSN 2074-2630 Naukovi pratsi DonNTU. Seriia: «Elektrotekhni-ka i enerhetyka» №1(30)'2024. doi: 10.31474/2074-2630-2024-1-58-64 [in Ukrainian].
9. Plakhtii, O., Prokhorova, V., Bagach, R., Zhuchenko, O., Yermilova, N., & Perets, K. (2023). Research of Accumulator Blocks of Electric Vehicles and Charging Station Based on Current Source Rectifier. 2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology,KhPIWeek, 1-6. doi:10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312968
10. Снєгірєв, В. О. (2018). Пристрій для дослідження впливу заряду асиметричним струмом на ємність акумуляторних батарей (Магістерська дисертація). Київ. Sniehirov, V. O. (2018). Prystrii dlia doslidzhennia vplyvu zaryadu asymetrychnym strumom na yiemnist akumuliatornykh batarei. [Device for studying the impact of asymmetric current charging on the capacity of battery packs.] (Master's thesis). Kyiv [in Ukrainian].
11. Nitta, N., Wu, F., Lee, J. T., & Yushin, G. (2015). Li-ion battery materials: present and future. Materials Today, 18(5), 252-264. doi: 10.1016/ j.mattod.2014.10.040
12. Багач, Р. (2024). Підвищення електромагнітної сумісності і енергоефективності зарядної станції електромобілів. Автомобіль і електроніка. Сучасні технології, (25), 53–62. Bahach, R. (2024). Pidvyshchennia elektromahnitnoi sumisnosti i enerhoefektyvnosti zaryadnoi stantsii elektromobiliv. [Improving electromagnetic compatibility and energy efficiency of electric vehicle charging stations.] Avtomobil i elektronika. Suchasni tekhnolohii, (25), 53–62. doi: 10.30977/VEIT.2024.25.0.6 [Ukrainian].
13. Adkins, W. S. (2015). Автоматичний контролер PMG для малих додатків (Магістерська робота, Державний університет Райта).
14. Копецький, М. М. (2023). Універсальний зарядний пристрій з мікроконтролерним керуванням. Kopetskyi, M. M. (2023). Universalnyi zaryadnyi pristrii z mikrokontrolernym keruvanniam. [Universal charging device with microcontroller control.] [in Ukrainian].
15. Храпко, Д. О. (2023). Інтелектуальний зарядний пристрій для акумуляторів (Бакалаврська робота, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя). Khrapko, D. O. (2023). Intelektualnyi zaryadnyi pristrii dlia akumuliatoriv. [Intelligent battery charging device.] (Bachelor's thesis, Ternopil National Technical University named after Ivan Puluj) [in Ukrainian].
16. Кирилюк, Д. О. (2022). Розробка системи контролю рівня заряду батареї. Kyryliuk, D. O. (2022). Rozrobka systemy kontroliu rivnia zaryadu batarei. [Development of a battery charge level monitoring system.] [in Ukrainian].
17. Ліпко, Д. О. (2020). Прилад для контролю параметрів акумуляторної батареї (Магістерська дисертація, КПІ ім. Ігоря Сікорського). Lipko, D. O. (2020). Prylad dlia kontroliu parametriv akumuliatornoi batarei. [Device for monitoring the parameters of a battery pack.] (Master's thesis, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute) [in Ukrainian].
18. Gonzalez-Castellanos, A. J., Pozo, D., & Bischi, A. (2019). Non-ideal linear operation model for li-ion batteries. IEEE Transactions on Power Systems, 35(1), 672-682. doi: 10.48550/arXiv. 1901.04260
19. Trinasolar. (n.d.). https://www.trinasolar.com/us/product/residential
20. Amin, N., Lam, Z. Y., & Sopian, K. (2009). Microcontroller based smart charge controller for stand-alone solar photovoltaic power systems. У Проц. IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). doi: 10.1109/PVSC.2009.5411210
21. Battery Space. (n.d.). https://www.batteryspace.com/
22. Sandeep, M., & Deepika, A. (2019). Charging algorithms of lithium-ion batteries: an overview. У International Conference on Innovative Research in Rfi.
23. Orobchuk, B., Sysak, I., Buniak, O., Babiuk, S., & Koval, V. (2023). Development of the reactive power compensation laboratory bench and its integration into the training simulator of dispatch control system. У The 3rd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied.

Багач Руслан Володимирович[1], доцент кафедри автомобільної електроніки,
тел. +38 0507255660, +38 0935761042,
e-mail: bagach.ruslan@gmail.com,
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0157-5933

Гнатов Андрій Вікторович[1], д.т.н., проф., завідувач каф. автомобільної електроніки,
тел. +38 0667430887, kalifus76@gmail.com,
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0932-8849

Аргун Щасяна Валіковна[1], д.т.н., проф. каф. автомобільної електроніки, тел. +38 0993780451,
shasyana@gmail.com,
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6098-8661

[1]Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

Simulation modeling of the LTC4020 charging controller for lithium-ion batteries

Abstract. Problem. *Modern lithium-ion batteries are widely used in electric vehicles, medical devices, photovoltaic systems, and other fields due to their high energy density and efficiency. However, they require complex charging management to ensure safety, prevent degradation, and extend lifespan. Existing charging devices often have limitations in supporting a wide range of voltages and currents, as well as versatility in working with different types of batteries.* ***Goal.*** *To analyze and simulate the operation of the combined LTC4020 controller to optimize the charging process for lithium-ion batteries while ensuring high efficiency and safety.* ***Methodology.*** *The research utilized LTSpice software for the simulation of the LTC4020 controller. A lithium-ion battery model based on the Thevenin equivalent circuit was developed to balance accuracy and model complexity. The study focused on the controller's operation in the constant current-constant voltage (CC-CV) charging mode.* ***Results.*** *Simulations confirmed the effectiveness of the LTC4020 controller in providing precise regulation of current and voltage. The device demonstrated efficient charging of lithium-ion batteries across a wide range of input voltages (4.5 V–55 V), achieving energy efficiency of 90–97%. It was shown that maintaining the voltage range of 2.8–4.2 V is critical to preventing battery degradation.* ***Originality.*** *The study proposed an optimized charging process based on the simulation of the LTC4020 controller using the Thevenin model for lithium-ion batteries. This research highlights the impact of charging device parameters on battery performance and durability, which has not been thoroughly addressed in previous studies.* ***Practical value.*** *The obtained results can be applied to the development of modern charging devices that provide high efficiency, versatility, and safety. This will promote the adoption of energy-efficient technologies in electric transportation, renewable energy, and portable electronics sectors.*

Key words: *Lithium-ion batteries, charging device, LTC4020 controller, simulation, energy efficiency, charging safety.*

Bahach Ruslan[1], associate professor of the automotive electronics department,
tel. +38 0507255660, +38 0935761042,
e-mail: bagach.ruslan@gmail.com,
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0157-5933

Hnatov Andrii[1], professor, Doct. of Science, Head of Vehicle Electronics Department,
tel. +38 0667430887, kalifus76@gmail.com,
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0932-8849

Arhun Shchasiana[1], professor, Doct. of Science, Vehicle Electronics Department,
tel. +38 0993780451, shasyana@gmail.com,
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6098-8661

[1]Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.