

**І. Є. Біляковський,**  
Національний університет “Львівська політехніка”  
кафедра електромехатроніки та комп’ютеризованих електромеханічних систем  
ihor.y.biliakovskiy@lpnu.ua

**О. О. Кузнєцов**  
Національний університет “Львівська політехніка”  
кафедра електромехатроніки та комп’ютеризованих електромеханічних систем  
oleksii.o.kuznietsov@lpnu.ua

**О. Б. Романчишин**  
Національний університет “Львівська політехніка”  
кафедра електромехатроніки та комп’ютеризованих електромеханічних систем  
oleh.romanchyshyn.ee.2019@lpnu.ua

**Т. Я. Дзьоба**  
Національний університет “Львівська політехніка”  
кафедра електромехатроніки та комп’ютеризованих електромеханічних систем  
taras.y.dzoba@lpnu.ua

## ЗАСТОСУВАННЯ БОРТОВОГО КОНДИЦІОНЕРА ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ В СИСТЕМІ ОХОЛОДЖЕННЯ БАТАРЕЙ

<http://doi.org/10.23939/>

© Біляковський І., Кузнєцов О., Романчишин О., Дзьоба Т.Я. 2023

Перегрів є однією з головних причин, яка прискорює швидкість розрядження батареї в електромобілях та призводить до погіршення її продуктивності з часом. Швидкі зарядження батареї не корисні для її довговічності, оскільки високі струми підвищують температуру та можуть не зворотно пошкодити внутрішню структуру акумулятора. За оптимальних температур доступність потужності розрядження прийом заряду під час рекуперативного гальмування та справність акумулятора є найкращими. Термін служби батареї, керованість електромобіля та економія палива погіршуються з підвищенням температури, тому система охолодження батареї має велике значення для електромобілів.

Електромобілі часто використовують просту та недорогу систему повітряного охолодження. Воно може бути реалізовано через циркуляцію повітря навколо батареї, що, однак, є менш ефективним методом. Щоб покращити охолодження, можна використовувати вентилятор для збільшення потоку повітря. Рідинне охолодження батареї, яке працює приблизно так само, як і охолодження двигуна внутрішнього згоряння, значно складніше і дорожче. Охолоджувальна рідина прокачується через канали передбачені в батареї, де нагрівається і подається для охолодження в теплообмінник. Але й тут ступінь охолодження рідини тим більший, що нижча температура зовнішнього повітря. Особливі незручності виникають за потреби швидко зарядити електромобіль в спекотний день, коли контролер електромобіля зменшує швидкість зарядження для зниження температури.

**Запропоновано застосування стандартної системи кондиціонування електромобіля для додаткового зниження температури охолоджувальної рідини в контурі акумуляторної батареї перед запланованим зарядженням та елементи методики, які дають змогу з достатньою для інженерної практики точністю розраховувати затрати енергії, потрібної на охолодження батареї до необхідної температури.**

**Ключові слова:** *електромобіль, Li-Ion елемент, система охолодження батареї, система кондиціонування, тепловий розрахунок.*

### **Постановка проблеми**

Двигуни внутрішнього згоряння виділяють стільки тепла, що якщо їх не охолодити належним чином, вони можуть досить швидко вийти з ладу. Хоча в електромобілів немає такої проблеми з двигуном внутрішнього згоряння, їхні акумуляторні батареї (АКБ) потрібно охолоджувати, щоб зберегти їх продуктивність і термін служби. Звичайні транспортні засоби для охолодження втягують повітря через решітку, якої багато електромобілів навіть не мають, а якщо й мають, то в основному декоративну. Її збереження для охолодження батареї може здатися доцільним, але так зазвичай не роблять. Тягова АКБ електромобіля, яка живить електродвигуни для обертання коліс є великою, а оптимальна температура становить близько 15—25°C [1 – 4]. За нижчих температур навколишнього середовища батарея не забезпечуватиме стільки енергії, а запас ходу автомобіля може знизитись на 20% за від'ємної температури навколишнього середовища. При нагріванні АКБ вона спочатку втрачає частину своєї потужності. Однак, якщо її внутрішня температура продовжуватиме зростати, її стан потенційно може погіршитися: так, АКБ може зазнати як часткового пошкодження так і повністю вийти з ладу, навіть спалахнути [5]. Для уникнення цього існують різні методи підтримки ідеальної температури акумулятора, відомі як керування температурою [6], які входять до ширшого поняття керування тепловим режимом електромобіля (thermal energy management) [1]. Навіть якщо для охолодження батареї електромобіля використовується повітря, розроблені способи його найкращої подачі до неї і до будь-яких інших компонентів, які нагріваються струмом, особливо під час швидкого зарядження. Повітряне охолодження є простим і відносно недорогим, проте рідинне, хоч і більш складне та дорожче, є значно ефективнішим.

Система рідинного охолодження АКБ електромобіля працює приблизно так само, як і система охолодження двигуна внутрішнього згоряння [7]. Охолоджувальна рідина прокачується через канали в батареї – зазвичай всередині пластин, які охоплюють батарею в цілому, або навколо самих елементів. Як і в системі охолодження бензинового двигуна, рідина нагрівається, коли вона охолоджує батарею, далі охолоджується в теплообміннику – невеликому радіаторі – і потім повертається в замкнутий цикл. Цей контур може включати охолодження інших електронних компонентів. Відпрацьоване тепло також може використовуватися для обігріву кабіни взимку. Але й тоді охолодження рідини є кращим за нижчої температури зовнішнього повітря. Особливо складно швидко заряджати електромобіль в спеку, коли швидкість зарядження електромобіля зменшується контролером для зниження температури батареї.

### **Актуальність дослідження**

Незважаючи на те, що електромобілі вимагають менше технічного обслуговування, ніж транспортні засоби з двигунами внутрішнього згоряння (насамперед тому, що не потребують заміни масла) вони можуть потребувати регулярної заміни охолоджувальної рідини. Оскільки інакше, як і у випадку зі звичайним радіатором, охолоджувальна рідина може з часом вийти з ладу, або канали можуть закупоритися накипом, що знизить ефективність системи [7, 8, 10, 13]. Окрім керування температурою під час руху, рідинна система також захищає акумулятор під час зарядження, особливо під час швидкого зарядження на зарядному пристрої постійного струму. Будь-яке зарядження створює тепло, але додаткове навантаження швидкого зарядження може значно збільшити його – включно з самим зарядним пристроєм, який може прокачувати власну охолоджувальну рідину через

зарядний кабель для регулювання температури. Під час заряджання контролер електромобіля стежить за температурою акумулятора. Якщо охолодження недостатнє, автомобіль зменшить швидкість заряджання, щоб знизити температуру, особливо якщо день спекотний. Акумулятор заряджатиметься довше, але він буде краще захищений [8]. Такі особливості заряджання електромобілів створюють додаткові незручності, особливо для власників бюджетних автомобілів. Тому дослідження способів додаткового охолодження батареї для забезпечення більш швидкого її заряджання є актуальним завданням.

### **Мета та завдання статті**

Метою статті є обґрунтування можливості застосування стандартної системи кондиціонування електромобіля для додаткового зниження температури охолоджувальної рідини в контурі АКБ перед запланованим заряджанням. Для цього необхідні елементи методики, які дають змогу з достатньою для інженерної практики точністю розраховувати затрати енергії, потрібної на охолодження батареї до необхідної температури.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Повітряне охолодження можна реалізувати простою циркуляцією повітря навколо елементів батареї, що є найменш ефективним, або за допомогою вентилятора для збільшення потоку повітря. У цьому випадку температура батареї буде коливатися разом з коливаннями температури назовні. У спекотні літні дні батареї також будуть нагріватися. Це знову ж таки проблема для застосування високої потужності, оскільки підвищується ризик перегріву акумулятора. Деякі системи в престижних, і, відповідно, дорогих електромобілях також можуть використовувати кондиціонер для охолодження повітря перед тим, як воно потрапить до акумулятора [6]. Повітряне охолодження в цілому простіше, ніж рідинне, а система важить і коштує менше, але воно неефективне. Небагато транспортних засобів використовують його, хоча серед них є такі популярні електромобілі як Honda Insight, Honda FitEV, Hyundai IONIQ, Nissan e-NV 200, Nissan Leaf, Renault Zoe, Toyota Prius Prime, хоча очікується, що майбутній Nissan Ariya EV використовуватиме рідинне охолодження [9].

У більшості систем низької та середньої потужності достатньо повітряного охолодження. Потужність, яка вимагається від трансмісії, не така висока, тому температура акумулятора залишається близькою до температури навколишнього середовища. Навіть якщо час від часу вимагається висока потужність, повітряного охолодження все одно буде достатньо, оскільки батареї матимуть більш ніж достатньо часу, щоб охолонути після короткого запиту високої потужності. Однак, коли необхідна потужність підвищиться, наприклад, під час швидкого заряджання, системи повітряного охолодження буде недостатньо [6, 9].

*Рідинне охолодження* є найпоширенішим способом охолодження АКБ. Рідкі теплоносії мають високу швидкість конвекційного відведення тепла завдяки більшій щільності та теплоємності порівняно з повітрям, рідинна система охолодження компактніша за повітряну і можна заощадити до 40% частки електроенергії, необхідної для вентиляторів повітряного охолодження [9]. Серед популярних електромобілів з рідинним охолодженням батареї є такі як Audi R8 e-Tron, Ford Focus, GM Chevrolet Bolt і Chevrolet Volt, Tesla Model X, Model S, Model 3, Toyota – iQ, Volvo XC90T8 та інші. Рідинна система охолодження складається з набагато більшої кількості компонентів, ніж, наприклад, система повітряного охолодження [6], що дає змогу покращувати її ефективність шляхом оновлення компонентів. Такі виробники електромобілів як Tesla та Audi використовують окрему систему рідинного охолодження для АКБ, а двигун і контролер охолоджуються іншою системою рідинного охолодження через різницю температур між компонентами. Температура АКБ повинна бути нижче 60°C, а температура охолоджувальної рідини має залишатися якомога нижчою. Температура двигуна та контролера може досягати 140°C. Коли ці три компоненти використовують одну систему охолодження, АКБ буде нагріватися двигуном і контролером. Тому необхідна окрема система охолодження для акумулятора. Рідинне охолодження є оптимальним майже для кожного

аккумулятора, бо має багато переваг, незалежно від того, чи йдеться про застосування з низькою чи високою потужністю. У випадках із низьким енергоспоживанням АКБ можна охолоджувати так, щоб вона завжди працювала при правильній температурі. При застосуванні високої потужності АКБ можна максимально охолодити. Температура системи охолодження повинна бути якомога нижчою, щоб забезпечити максимальну потужність протягом якомога довшого часу. Крім усіх цих переваг охолодження, АКБ також можна нагрівати, додавши нагрівальний елемент у систему охолодження. Як було сказано раніше, систему охолодження АКБ та систему охолодження двигуна та контролера розділяють. Ці дві системи охолодження іноді можна комбінувати для нагріву АКБ, коли це необхідно двигуну та контролеру. Наприклад, Тесла використовує цей метод, коли АКБ нагрівають теплом, що виділяється двигуном і контролером. Це дуже корисно в холодні зимові дні, однак дуже дорого [12].

Ще можна використовувати відведення тепла від АКБ теплопровідними матеріалами, такими як теплові трубки [8]. Це повільніший спосіб охолодження батареї, ніж при використанні рідинного охолодження. Крім того, теплопровідними матеріалами є лише такі метали, як алюміній та мідь і такий спосіб охолодження може бути лише частиною системи охолодження. При використанні цієї системи як єдиної системи охолодження об'єм теплопровідного матеріалу мав би бути дуже великим. Теплопровідний матеріал має певну теплоємність. Це кількість тепла, яку матеріал може поглинути на вагу матеріалу. Для значного відведення тепла від акумуляторної батареї теплопровідний матеріал повинен бути масивним. Це означає, що цей спосіб охолодження потрібно буде поєднувати з іншою системою охолодження, як-от дві системи, згадані раніше. Теплопровідний матеріал направлятиме тепло до іншої системи охолодження.

Інший спосіб охолодження АКБ за допомогою рідини – занурення всієї батареї в охолоджувальну рідину [8, 13]. Така технологія вже використовується у світі суперкомп'ютерів, однак цей спосіб дуже дорогий. Ще одним мінусом є те, що використовувана рідина має певну теплоємність і занурений повністю акумуляторний блок у рідину може охолоджуватися лише настільки, наскільки це дозволяє теплоємність. Іншими словами, рідина нагрівається разом з акумулятором. Рідина лише сповільнює цей процес. У системах високої потужності цей метод охолодження необхідно поєднувати з іншими типами систем охолодження. Наприклад, корпус можна зробити з алюмінію, який дуже добре проводить тепло. Коли повітря проходить поряд із цим корпусом, АКБ та рідина всередині можуть охолоджуватися.

### **Виклад основного матеріалу**

Основними джерелами тепла в АКБ є елементи, хоча шини, які з'єднують елементи та модулі, також можуть сильно нагріватися. Це нагрівання має переважно омичний характер, що виникає внаслідок опору струму, що протікає через провідники. Таким чином, виступи комірок і точки підключення в системі шин можуть стати гарячими точками. Електрохімічні процеси всередині елементів також є джерелами тепла, хоча за нормальної роботи це відносно невелика кількість. Однак у тепловому режимі вони можуть генерувати набагато більше, і дуже швидко, а також можуть вивільняти леткі хімічні речовини з електроліту разом із киснем. Тому швидке, надійне виявлення та швидка реакція системи охолодження є важливими. Типовий циліндричний елемент у форматі 21700, наприклад, має потужність розсіювання близько 5% при роботі з низьким навантаженням, але може значно перевищувати цю цифру при більших навантаженнях. АКБ ємністю 100 кВт·год може генерувати близько 5 кВт тепла, тому лише ефективна система рідинного охолодження може досить швидко відвести стільки з елементів, щоб підтримувати їх стабільну температуру в оптимальному діапазоні [7].

Стосовно багатьох бюджетних електромобілів, оснащених пасивною рідинною системою охолодження, все ще проблемною залишається можливість швидкого заряджання батареї, якщо її попередньо достатньо не охолодити [6 – 8]. Щоб забезпечити таке охолодження перед запланованим заряджанням електромобіля, можна використати стандартну систему кондиціонування. Така активна

рідинна система охолодження буде ефективна навіть тоді, коли температура навколишнього середовища вища за температуру акумулятора або коли різниця температур надто мала. Система активного рідинного охолодження складається з двох контурів. Первинний контур аналогічний системі звичайного рідинного охолодження. Вторинний контур слід помістити в контур кондиціонера, який складається з двох теплообмінників, які працюють відповідно як випарники та конденсатори. Охолоджувальна здатність штатного кондиціонера може виявитись недостатньою для утримання температури батареї в допустимих межах під час швидкого заряджання, як це передбачено у дорогих електромобілях з просунутою повністю активною системою охолодження з окремою потужною тепловою помпою [8]. Але її цілком достатньо для зниження температури батареї за деякий час перед запланованим швидким заряджанням. У цьому випадку охолоджувач випарника кондиціонера, який використовується для охолодження салону, служитиме й для охолодження акумулятора, а система матиме такі режими:

- Кондиціонер використовується лише для охолодження салону, коли увімкнений вентилятор подачі повітря. Акумулятор охолоджується пасивно вторинним контуром.
- Кондиціонер охолоджує лише АКБ, знижуючи температуру рідини у вторинному контурі.
- Кондиціонер одночасно охолоджує акумулятор і салон.

Для цієї системи охолодження також є додатковий режим. Використовується, коли в холодну пору року акумулятор сильно нагрівається і надлишок тепла переноситься в салон електромобіля. Для підвищення ефективності системи в контур також можна встановити електронагрівач, який зможе обігрівати батарею і салон взимку.

Під час заряджання електромобіля батареї нагріваються тим швидше, чим швидше відбувається цей процес, що призводить до зменшення подачі електроенергії від зарядної станції. Щоб вирішити цю проблему, можна передчасно охолодити акумулятор до низьких температур. Це дозволяє швидше заряджати батарею, тому що процес зарядки відбувається більшим струмом. Прискорена зарядка призводить до нагрівання батарей, які не встигають віддавати тепло в навколишнє середовище, що може призвести до перегріву. З цього можна зробити висновок, що швидкість заряджання тим вища, що нижче початкове значення температури батареї.

Для обґрунтування доцільності попереднього охолодження батареї перед запланованим її швидким заряджанням, було проведено ряд розрахунків. Для прикладу було використано літій-іонний акумулятор моделі Panasonic NCR 18650, який призначений для електромобіля Tesla Model S. Батарейний відсік складається з 7104 окремих елементів, які групуються в 16 блоків. Кожен блок містить 6 елементів, що з'єднані послідовно та містять по 74 елементи, які в свою чергу з'єднані паралельно. Попередньо, для моделі дослідження процесів нагрівання блоку акумуляторів електромобіля прийнято ряд допущень:

- Блок акумуляторів електромобіля складається з елементів одного типу.
- Внутрішній опір всіх елементів однаковий і не змінний в процесі заряджання.
- Нагрівання всіх елементів акумулятора відбувається однаковим струмом заряджання, який протікає через внутрішній опір кожного елемента акумулятора.
- Виділення теплоти на електронних компонентах захисту, вирівнювання напруг елементів тощо, розташованих в околі елементів акумулятора, не враховуємо, або відносимо до самого елемента.
- Основні електронні компоненти електромобіля винесені за межі блоку акумуляторів та не впливають на відповідні теплові процеси в батареї.
- Температура всіх елементів змінюється рівномірно за однаковим законом.
- Частку тепла, яка віддається в навколишнє середовище, вважаємо незначною в процесі швидкого заряджання, внаслідок дуже короткої тривалості (15-20 хв) і за потреби враховуємо відповідними коефіцієнтами.
- Параметри теплових процесів під час попереднього охолодження та швидкого заряджання знаходимо на одиницю маси блоку акумуляторів.

На основі наявних даних та прийнятих допущень були створені елементи моделі системи попереднього охолодження акумуляторів від кондиціонера електромобіля перед плановим їх заряджанням, реалізовані в середовищі MathCad. Внаслідок недостатньої інформації про інтегральну теплоємність елементів, які застосовують у блоках акумуляторів та деякі інші їх параметри, такі дані отримані частково з експериментів (визначення внутрішнього опору типових акумуляторних елементів [14]), а частково з відкритих джерел. Зокрема, це дані про вміст матеріалів в акумуляторних елементах типу Panasonic NCR 18650 та їхню масу [15, 16].

За використання створеної моделі було розраховано параметри теплових процесів для ряду батарей з елементів різних брендів типу NCR 18650, дані для яких були доступні. Це в основному значення внутрішнього опору, маси самого елемента і всіх його складових, а також питомі теплоємності матеріалів, які він містить.

На основі вхідних даних, як видно з прикладу розрахунків нижче, визначається питома теплоємність акумулятора, ступінь нагрівання акумулятора за швидкого заряджання без попереднього охолодження із застосуванням кондиціонера та частка ємності на нагрівання умовного 1 кг акумулятора за 15 хвилин (0,25 год) заряджання, наприклад, від 15% до 80%.

Якщо робочий діапазон температур АКБ прийняти в межах від  $-20^{\circ}\text{C}$  до  $+60^{\circ}\text{C}$ , ККД, наприклад, 90%, то отримане з прикладу розрахунку перевищення температури за прийнятих допущень складає понад  $70^{\circ}\text{C}$ , і при початковій температурі до швидкого заряджання  $t_{\text{поч}} = 20^{\circ}\text{C}$  акумулятор нагрівається до  $90^{\circ}\text{C}$ . Тобто швидке заряджання батарей за таких умов неприпустиме без попереднього охолодження.

Також визначається частка ємності основного акумулятора, необхідна для відбору кондиціонером теплоти від батареї, достатньої для зниження її температури до заданого значення.

При перегріванні в межах  $40 - 75^{\circ}\text{C}$ , припускаємо, достатньо понизити температуру АКБ на  $20^{\circ}\text{C}$ . Знаходимо зміну ємності основного акумулятора, яка в нашому прикладі свідчить про те, що кондиціонер при цьому розрядить акумулятор менше ніж на 1%.

Слід зауважити, що тут не враховані втрати енергії на роботу циркуляційної помпи, які, однак, незначні.

*Приклад розрахунку параметрів процесу нагрівання блоку акумуляторів електромобіля під час швидкого заряджання*

Питома теплоємність акумулятора може бути визначеною за формулою:

$$c_{\text{АКБ}} = k \times \sum c_i, \quad (1)$$

де  $k = 1,1$  – коефіцієнт, що враховує теплоємність електроліту та охолоджувальної рідини (в даному розрахунку його прийнято досить приблизно, виходячи із параметрів конкретного типу АБ його можна уточнити);  $c_i$  – питомі теплоємності складових акумулятора. Підставляючи в (1) параметри складових із Таблиці 1, отримаємо

$c_{\text{АКБ}} = k \times (m_{\text{Cu}} \times c_{\text{Cu}} + m_{\text{Al}} \times c_{\text{Al}} + m_{\text{Fe}} \times c_{\text{Fe}} + m_{\text{Li}} \times c_{\text{Li}} + m_{\text{C}} \times c_{\text{C}}) / m_{\text{АКБ}}$ ,  
для параметрів, наведених у Таблиці 1, питома теплоємність складає  $938,01 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ .

Таблиця 1

**Вхідні дані для варіанту з акумулятором типу NCR 18650**

Величина	Позначення	Параметр	Розмірність
Номинальна напруга	$U$	3,6	В
Номинальна ємність	$C$	3,2	А·год
Середній внутрішній опір	$r$	0,028	Ом
Маса одного елемента	$m_{\text{АКБ}}$	44	г
Маса міді	$m_{\text{Cu}}$	9	г
Питома теплоємність міді	$c_{\text{Cu}}$	400	Дж/(кг·К)
Маса алюмінію	$m_{\text{Al}}$	11	г

Застосування бортового кондиціонера електромобіля в системі охолодження батарей

Питома теплоємність алюмінію	$c_{Al}$	920	Дж/(кг·К)
Маса заліза	$m_{Fe}$	10	г
Питома теплоємність заліза	$c_{Fe}$	460	Дж/(кг·К)
Маса електроліту	$m_e$	14	г
Маса літію	$m_{Li}$	5	г
Питома теплоємність літію	$c_{Li}$	3390	Дж/(кг·К)
Маса вуглецю	$m_C$	3	г
Питома теплоємність вуглецю	$c_C$	750	Дж/(кг·К)
Маса екзотичних матеріалів	$m_{rest}$	6	г
ККД блоку АКБ	$\eta$	90	%

Розрахуємо нагрів акумулятора при швидкому заряджанні без використання кондиціонера. Для цього спочатку проводимо розрахунок необхідної сталої ємності, для забезпечення заряджання 1 кг акумулятора протягом 15 хвилин (0,25 год) від 15% до 80%:

$$C_{15хв} = k \times \frac{m_{1кг}}{m_{АКБ}} \times C \times \Delta\%, \quad (2)$$

де  $\Delta\%$  – різниця в ємності 1 кг акумулятора до і після швидкого заряджання, для нашого випадку це значення складає  $C_{15хв} = 52$  А·год.

Оскільки 10% від ємності АКБ йде на нагрівання (при  $\eta = 90\%$ ), то:

$$C_{нагрів} = 0.1 \times C_{15хв}, \quad (3)$$

що складатиме 5,2 А·год.

Кількість теплоти, яка необхідна для нагріву 1 кг маси акумулятора:

$$Q_{нагрів} = U \times C_{нагрів}, \quad (4)$$

що складатиме 18,72 Вт·год.

Перевищення температури акумулятора після заряджання:

$$\Delta t = \frac{Q_{нагрів}}{c_{АКБ}}, \quad (5)$$

що буде рівним 71,72°C.

Діапазон робочих температур акумулятора становить від -20°C до +60°C, отже отримане перевищення температури недопустиме. Якщо акумуляторний блок має ККД не 90%, а, наприклад, 95% [7], і  $\Delta t \approx 40^\circ\text{C}$ , то при температурі  $t_{поч} = 25^\circ\text{C}$ , акумулятор нагрівається до 65°C. Тобто швидке заряджання за цих умов без попереднього охолодження неприпустиме.

Наступним кроком проводимо розрахунок потужності, яку необхідно використати для роботи кондиціонера. Для початку потрібно знайти зміну ємності акумулятора від 15% до 80%, при швидкому заряджанні тривалістю 15 хвилин за номінальної ємності АКБ 50 кВт·год.

$$\frac{C_{АКБ}}{\Delta C} = \frac{100\%}{\Delta\%}, \quad (6)$$

звідки

$$\Delta C = \frac{C_{АКБ} \times \Delta\%}{100\%} = 32.5 \text{ кВт·год.}$$

Оскільки на нагрівання АКБ піде 10% ємності, потрібно:

$$C_{нагрів} = 0.1 \times \Delta C = 3.25 \text{ кВт·год.}$$

При перегріванні в діапазоні від 40 до 75°C, припускається, що достатньо охолодити акумуляторну батарею на 20°C або на 50...25% від різниці в температурі. Це означає, що необхідно відібрати від батареї певну кількість енергії.

$$C_{конд} = (0.25 \dots 0.5) \times C_{нагрів} = 0.813 \dots 1.625 \text{ кВт·год} \quad (7)$$

При значенні коефіцієнта передачі кондиціонера 250...300%, акумуляторна батарея розрядиться на:

$$C_{розр} = \frac{C_{конд}}{250} \times 100\% = 0.325 \dots 0.65 \text{ Вт·год}, \quad (8)$$

тобто менш ніж на 1% своєї максимальної ємності.

### **Висновки та перспективи подальших досліджень**

За останні два десятиліття було розроблено ряд методів ефективного охолодження акумуляторів в електромобілях. Система повітряного охолодження проста, але швидкість відведення тепла низька і навпаки, охолодження зануренням відбувається швидко, але може призвести до короткого замикання або корозії і домінуючим стає рідинне охолодження.

Умови експлуатації та навколишнього середовища, безпека, АКБ, охолоджувальна рідина, режим охолодження (примусове або природне) і тепловий інтерфейс є ключовими параметрами систем управління температурою батареї, оптимальну конфігурацію якої може допомогти згенерувати відповідне моделювання, результати якого можуть бути використані для розробки алгоритмів керування з метою збільшення терміну служби батареї.

Стосовно багатьох бюджетних електромобілів, оснащених пасивною рідинною системою охолодження, все ще проблемною залишається можливість швидкого заряджання батареї, якщо її попередньо достатньо не охолодити. Щоб забезпечити таке охолодження перед запланованим заряджанням електромобіля, запропоновано використати стандартну систему кондиціонування.

Наведені елементи методики дають змогу з достатньою для інженерної практики точністю розраховувати затрати енергії, потрібної на охолодження батареї до необхідної температури, а результати таких розрахунків дозволяють стверджувати, що застосування стандартної системи кондиціонування електромобіля для додаткового зниження температури охолоджувальної рідини в контурі акумуляторної батареї перед запланованим заряджанням доцільне.

Допущення про те, що енергія на нагрівання батареї за час швидкого заряджання витрачається на збільшення температури з врахуванням власної теплоємності батарейного відсіку без впливу охолоджувального середовища, тобто батарея практично не встигає віддавати тепло в навколишнє середовище, в перспективі передбачається уточнити розрахунком з використання відповідних методик, наприклад [17].

Також в подальшому для уточнення розрахунків попереднього охолодження АБ варто врахувати час попереднього охолодження АКБ і оцінити, наскільки зменшиться цей час, якщо охолодження буде здійснюватися одночасно із швидким заряджанням АКБ.

### **Список використаних літературних джерел**

1. Dinçer I., Hamut H. S., Javani N. Thermal management of electric vehicle battery systems. John Wiley & Sons, 2016. 480 p.
2. Murugan, M., et al. Thermal management system of lithium-ion battery packs for electric vehicles: An insight based on bibliometric study. Journal of Energy Storage. 2022. Vol. 52, Part A. Article ID 104723. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104723>
3. Zhao G., et al. An up-to-date review on the design improvement and optimization of the liquid-cooling battery thermal management system for electric vehicles. Applied Thermal Engineering. 2022. Vol. 219, Part B. Article ID 119626. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119626>
4. Lemort V., Olivier G., de Pelsemaeker G. Thermal Energy Management in Vehicles. John Wiley & Sons, 2023. 320 p.
5. Chen, Z., et al. Temperature rise prediction of lithium-ion battery suffering external short circuit for all-climate electric vehicles application. Applied Energy. 2018. Vol. 213. Pp. 375-383. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.01.068>
6. Lu, M., et al. Research progress on power battery cooling technology for electric vehicles. Journal of Energy Storage. 2020. Vol. 27. Article ID 101155. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101155>
7. Donaldson P. Battery cooling. E-Mobility Engineering. 2021. Iss. 009. Pp. 64-74. URL: <https://www.emobility-engineering.com/ev-battery-cooling/> (дата звернення 05.07.2023)
8. Thakur A.K., et al. A state of art review and future viewpoint on advance cooling techniques for Lithium-ion battery system of electric vehicles. Journal of Energy Storage. 2020. Vol. 32. Article ID 101771. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101771>



## *Застосування бортового кондиціонера електромобіля в системі охолодження батарей*

9. Battery Cooling Techniques in Electric Vehicle. URL: <https://cfdflowengineering.com/battery-cooling-techniques-in-electric-vehicle/> (дата звернення 05.07.2023)
10. Xia G., Cao L., Bi G. A review on battery thermal management in electric vehicle application. *Journal of power sources*. 2017. Vol. 367. Pp. 90-105. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.09.046>
11. EV Battery Cooling System. URL: <https://www.mathworks.com/help/hydro/ug/ev-battery-cooling.html> (дата звернення 05.07.2023)
12. EV Battery Cooling: Challenges and Solutions. URL: <https://www.laserax.com/blog/ev-battery-cooling> (дата звернення 05.07.2023)
13. Kim J., Oh J., Lee H. Review on battery thermal management system for electric vehicles. *Applied Thermal Engineering*. 2019. Vol. 149. Pp. 192-212. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.12.020>
14. Щур І. З., Біляковський І. Є., Харчишин Б. М. Формування та дослідження низьковольтних модулів акумуляторних батарей та суперконденсаторів для автономних систем електричного живлення. *Електроенергетичні та електромеханічні системи*. 2022. № 1(4). с. 88-102. DOI: <https://doi.org/10.23939/sepes2022.01.088>
15. Sobianowska-Turek A., et al. The Necessity of Recycling of Waste Li-Ion Batteries Used in Electric Vehicles as Objects Posing a Threat to Human Health and the Environment. *Recycling*. 2021. Vol. 6, Iss. 2. 35. <https://doi.org/10.3390/recycling6020035>
16. Afroze S., et al. Emerging and Recycling of Li-Ion Batteries to Aid in Energy Storage, A Review. *Recycling*. 2023. Vol. 8, Iss. 3. Article ID 48. <https://doi.org/10.3390/recycling8030048>
17. Біляковський І.Є., Ткачук В.І., Каша Л.В., Хай М.В., Елементи методики оцінки теплового стану компонентів електромеханічного перетворювача вентиляного двигуна з явнополюсним статором і постійними магнітами на зовнішньому роторі. *Електроенергетичні та електромеханічні системи*. 2021. №1(3). С. 8-16. DOI: <https://doi.org/10.23939/sepes2021.01.008>

### ***References***

1. Dinçer, I., Hamut H. S., Javani N. *Thermal management of electric vehicle battery systems*. John Wiley & Sons, 2016. 480 p.
2. Murugan, M., et al. Thermal management system of lithium-ion battery packs for electric vehicles: An insight based on bibliometric study. *Journal of Energy Storage*. 2022. Vol. 52, Part A. Article ID 104723. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104723>
3. Zhao, G., et al. An up-to-date review on the design improvement and optimization of the liquid-cooling battery thermal management system for electric vehicles. *Applied Thermal Engineering*. 2022. Vol. 219, Part B. Article ID 119626. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119626>
4. Lemort V., Olivier G., de Pelsemaeker G. *Thermal Energy Management in Vehicles*. John Wiley & Sons, 2023. 320 p.
5. Chen, Z., et al. Temperature rise prediction of lithium-ion battery suffering external short circuit for all-climate electric vehicles application. *Applied Energy*. 2018. Vol. 213. Pp. 375-383. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.01.068>
6. Lu, M., et al. Research progress on power battery cooling technology for electric vehicles. *Journal of Energy Storage*. 2020. Vol. 27. Article ID 101155. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101155>
7. Donaldson P. Battery cooling. *E-Mobility Engineering*. 2021. Iss. 009. Pp. 64-74. URL: <https://www.emobility-engineering.com/ev-battery-cooling/> (Accessed 05.07.2023)
8. Thakur A.K., et al. A state of art review and future viewpoint on advance cooling techniques for Lithium-ion battery system of electric vehicles. *Journal of Energy Storage*. 2020. Vol. 32. Article ID 101771. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101771>
9. Battery Cooling Techniques in Electric Vehicle. URL: <https://cfdflowengineering.com/battery-cooling-techniques-in-electric-vehicle/> (Accessed 05.07.2023)
10. Xia G., Cao L., Bi G. A review on battery thermal management in electric vehicle application. *Journal of power sources*. 2017. Vol. 367. Pp. 90-105. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.09.046>
11. EV Battery Cooling System. URL: <https://www.mathworks.com/help/hydro/ug/ev-battery-cooling.html> (Accessed 05.07.2023)
12. EV Battery Cooling: Challenges and Solutions. URL: <https://www.laserax.com/blog/ev-battery-cooling> (дата звернення 05.07.2023)

13. Kim J., Oh J., Lee H. Review on battery thermal management system for electric vehicles. *Applied Thermal Engineering*. 2019. Vol. 149. Pp. 192-212. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.12.020>

14. Shchur I., Biliakovskiy I., Kharchyshyn B. Formation and research of low voltage modules of batteries and supercapacitors for autonomous power supply systems. *Electrical Power and Electromechanical Systems*. 2022. No. 1(4). pp. 88-102. DOI: <https://doi.org/10.23939/sepes2022.01.088> (Ukr)

15. Sobianowska-Turek A., et al. The Necessity of Recycling of Waste Li-Ion Batteries Used in Electric Vehicles as Objects Posing a Threat to Human Health and the Environment. *Recycling*. 2021. Vol. 6, Iss. 2. 35. <https://doi.org/10.3390/recycling6020035>

16. Afroze S., et al. Emerging and Recycling of Li-Ion Batteries to Aid in Energy Storage, A Review. *Recycling*. 2023. Vol. 8, Iss. 3. Article ID 48. <https://doi.org/10.3390/recycling8030048>

17. Biliakovskiy I., Tkachuk V., Kasha L., Khai M., Elements of thermal calculus of components in electromechanical brushless converter with open-pole stator and external rotor with permanent magnets. *Electrical Power and Electromechanical Systems*. 2021. No. 1(3). pp. 8-16. DOI: <https://doi.org/10.23939/sepes2021.01.008> (Ukr)

I. Bilyakovskyy  
Lviv Polytechnic National University,  
Department of Electric Mechatronics and Computerized Electromechanical Systems,  
[ihor.y.biliakovskiy@lpnu.ua](mailto:ihor.y.biliakovskiy@lpnu.ua)

O. Kuznyetsov  
Lviv Polytechnic National University,  
Department of Electric Mechatronics and Computerized Electromechanical Systems,  
[oleksii.o.kuznietsov@lpnu.ua](mailto:oleksii.o.kuznietsov@lpnu.ua)

O. Romanchyshyn  
Lviv Polytechnic National University,  
Department of Electric Mechatronics and Computerized Electromechanical Systems,  
[oleh.romanchyshyn.ee.2019@lpnu.ua](mailto:oleh.romanchyshyn.ee.2019@lpnu.ua)

T. Dzoba  
Lviv Polytechnic National University,  
Department of Electric Mechatronics and Computerized Electromechanical Systems,  
[taras.y.dzoba@lpnu.ua](mailto:taras.y.dzoba@lpnu.ua)

## **APPLICATION OF AN ON-BOARD ELECTRIC VEHICLE AIR CONDITIONER IN THE BATTERY COOLING SYSTEM**

© *Biliakovskiy I., Kuznyetsov O., Romanchyshyn O., Dzoba T. 2023*

**Overheating is one of the main reasons that accelerates the rate of battery discharge in electric vehicles and leads to the deterioration of its performance over time. Rapid charging of the battery is not beneficial for its longevity, as high currents increase the temperature and can irreversibly damage the internal structure of the battery. At optimal temperatures, the availability of discharge power, charge reception during regenerative braking and battery health are at the best level. Battery life, electric vehicle (EV) drivability, and fuel economy deteriorate as temperatures rise, so the battery cooling system is of great importance for EVs.**

**Air cooling, which is used in many electric vehicles, is relatively simple and, accordingly, inexpensive. Air cooling can be implemented by simply circulating air around the battery cells, which is the least efficient, or by using a fan to increase airflow. Liquid cooling of the battery, which operates**

similarly to cooling of the internal combustion engine, is much more complicated and expensive. The coolant is pumped through the channels provided in the battery, where it is heated and fed to the heat exchanger for cooling. But even here, the degree of cooling of the liquid is greater, the lower the temperature of the outside air. Particular inconveniences arise when it is necessary to quickly charge an electric car on a hot day, when the EV controller reduces the charging speed to reduce the temperature.

We propose the use of a standard air conditioning system of an electric car to additionally reduce the temperature of the coolant in the battery circuit before the planned charging. For those purposes, we also propose the elements of the methodology that enable the calculations of the energy required to cool the battery to the required temperature with the sufficient accuracy for engineering practice.

**Key words:** electric car, Li-Ion cell, battery cooling system, air conditioning system, thermal calculation.