

УДК 629.341

ВИЗНАЧЕННЯ НАЙБІЛЬШ ЕФЕКТИВНИХ ТЯГОВИХ ДЖЕРЕЛ СТРУМУ ДЛЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

Щ.В. Аргун, доц., к.т.н.,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Проведено аналіз сучасних накопичувачів енергії. Визначено, що для міського громадського електротранспорту як тягову акумуляторну батарею ефективніше використовувати ультраконденсатори, а для малолітражного міського електромобіля – літій-іонні акумулятори.

Ключові слова: тягова акумуляторна батарея, джерело струму, електромобіль.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАИБОЛЕЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ТЯГОВЫХ ИСТОЧНИКОВ ТОКА ДЛЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

Щ.В. Аргун, доц., к.т.н.,
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

Аннотация. Проведен анализ современных накопителей энергии. Определено, что для городского общественного электротранспорта в качестве тяговой аккумуляторной батареи эффективнее использовать ультраконденсаторы, а для малолитражного городского электромобіля – литий-ионные аккумуляторы.

Ключевые слова: тяговая аккумуляторная батарея, источник тока, электромобиль.

DETERMINATION OF THE MOST EFFECTIVE TRACTION SOURCES OF CURRENT FOR THE ELECTRIC VEHICLES

Shch. Arhun, PhD., Assoc. Prof.,
Kharkiv National Automobile and Highway University

Abstract. The analysis of the modern energy storage devices is carried out. It is established that when choosing a traction battery for an electric vehicle, it is necessary to determine the priority of characteristics by which the choice will be made, the operating conditions and what kind of consumer it is intended for. It has been determined that for urban public electric transport, the ultra capacitors should be used as the traction batteries, and for a small city electric vehicle the lithium-ion batteries are preferred.

Key words: traction battery, current source, electric vehicle.

Вступ

Сьогодні вимагає від автовиробників переходити на виробництво автомобілів на електричній тязі. Але важливою умовою цього переходу є збереження усіх технічних характеристик, що мають автомобілі з двигунами внутрішнього згорання (ДВЗ).

Однією з таких характеристик є відстань, яку може подолати авто без підзаряджання.

Тобто коли мова йде про електромобілі є важливою ємність джерела електричної енергії – акумуляторної батареї (АКБ).

Аналіз публікацій

Питання вибору АКБ для електричних і гібридних автомобілів як було актуальним раніше, так залишається й досі [1–3]. Це пов'язано з поширенням електротранспорту у всьому світі й постійною динамікою у розвитку накопичувачів енергії.

У найближчому майбутньому електромобілі, включаючи гібридні авто й інші «чисті» транспортні засоби, домінуватимуть на світовому авторинку [4–6].

На початку 1990-х років Міністерство енергетики США сформувало Розширений Консорціум (USABC) для прискорення розробки сучасних батарей для електромобілів. USABC передбачає галузеве партнерство між DOE, трьома автомобільними виробниками (Daimler-Chrysler, Ford і General Motors) і Дослідним інститутом електроенергетики [3].

Метою такого партнерства була розробка і виробництво АКБ, призначених для того, щоб електромобілі могли конкурувати з авто зі стандартними двигунами в ціні й дальності пробігу. Слід зазначити, що розробки USABC були спрямовані на свинцево-кислотні (Pb-acid), нікель-метал-гідридні (NiMH), літій-іонні (Li-ion) і літієво-полімерні (lithium-polymer) батареї. Було здійснено таке розподілення: Daimler-Chrysler, Ford і General Motors випускатимуть автомобілі, в яких мають використовуватися Pb-acid батареї; Honda і Toyota – NiMH, а Nissan – Li-ion акумулятори [3].

Вже сьогодні можна відмітити, що середньострокові цілі USABC, за винятком конкретної енергії й відпускної ціни, були досягнуті першим поколінням Ovonic Battery Company NiMH, який був встановлений на EV-1 [7].

Мета і постановка завдання

Метою роботи є визначення найбільш ефективних акумуляторних батарей для використання в якості тягових джерел струму для електромобілів.

Для досягнення поставленої мети необхідно: провести огляд існуючих акумуляторних батарей; зробити порівняльний аналіз технічних і експлуатаційних характеристик АКБ.

Вимоги до тягової акумуляторної батареї

Як відомо, вартість АКБ становить близько 40 % від загальної вартості електромобіля [8]. Тому правильний вибір АКБ і визначення оптимальних характеристик експлуатації дозволить найдовше зберегти джерело енергії, не погіршивши технічних характеристик автомобіля.

При виборі тягової АКБ для електромобіля є важливими такі характеристики:

- висока щільність енергії, яка може бути досягнута за одне зарядження – для забезпечення великої дальності пробігу;
- висока щільність енергії, що дозволяє досягти стабільної потужності з глибокими характеристиками розряду – для прискорення і збільшення потужності електромобіля;
- тривалий термін служби без обслуговування і складних захисних систем, вбудованих в акумулятор;
- можливість використання як вторинну батарею (екологічність).

Але, окрім цього, важливими характеристиками АКБ є масо-габаритні розміри, робоча температура та ціна.

Свинцево-кислотний акумулятор – Pb-acid

Pb-acid винайдений у 1859 р. французьким фізиком Гастоном Планте. Основними сферами застосування є: акумуляторні батареї стартерів у транспортних засобах, аварійні джерела електроенергії, резервні джерела енергії [8].

Pb-acid бувають такими, що обслуговуються і не обслуговуються. Ті, що обслуговуються, вимагають у процесі експлуатації догляду, тобто необхідно контролювати рівень і щільність електроліту. Ті Pb-acid, що не обслуговуються, є герметичними, працюють у будь-якому положенні й не вимагають догляду [9].

Основні типи Pb-acid:

- стартерні – вимагають обслуговування і вентиляції. Мають високий саморозряд;
- герметизовані (AGM) – не обслуговуються, не вимагають вентиляційного приміщення для установки (рис. 1). Працюють у буферному режимі, тобто в режимі зарядження. У такому режимі служать до 10–15 років. Якщо ж їх використати в циклічному режимі (тобто постійно заряджати-розряджати хоч би на 30 % від ємності), то їх термін служби істотно скорочується. AGM батареї використовуються у безперебійних системах та пристроях;
- гелієві батареї (GEL) – краще витримують циклічні режими зарядження-розрядження, краще витримують морози. Зниження ємності за зниження температури акумуляторів є меншим, ніж у інших типів Pb-acid. Їх застосовують у системах автономного електропо-

стачання, коли батареї працюють у циклічних режимах (заряджаються і розряджаються щодня) і немає можливості підтримувати температуру акумуляторів в оптимальних межах. Гелієві батареї є дорожчими за AGM та стартерні [9];

– тягові – призначені для циклічних режимів. Більше підходять для автономних систем енергопостачання. Вони є значно дорожчими за стартерні й гелієві, зазвичай мають рідкий електроліт, вимагають обслуговування і вентильованого приміщення для експлуатації;

– «сонячні» – спеціально розроблені для «важких» циклічних режимів. Ці Pb-acid спроектовані для використання в системах автономного електропостачання. «Сонячні» батареї поки не дуже поширені, коштують вони набагато дорожче. Вони мають знижене газовиділення. Допускають багато циклів заряджання-розряджання (до 60 % від номінальної ємності без ушкодження і значного скорочення терміну служби).



Рис. 1. Свинцево-кислотний акумулятор (AGM)

Час заряджання Pb-acid становить від 12–16 год до 36–48 год для великих стаціонарних батарей. За більш високих струмів заряджання і методах багатоступінчастого заряджання час заряджання може бути зменшений до 8–10 год, але не до повного заряджання. Свинцева кислота є «в'ялою» і аку-

мулятор не може заряджатися так само швидко, як інші акумуляторні системи [10].

Pb-acid слід заряджати у три етапи [10–12]:

- заряджання постійним струмом – поставляє велику частину енергії й займає приблизно половину необхідного часу заряджання;
- дозаряджання – триває при нижчому заряді й забезпечує насичення;
- плаваючий заряд – компенсує втрати, викликані саморозрядженням.

Pb-acid застосовуються для запуску автомобілів, освітлення і запалювання; у великих резервних джерелах живлення для телефонних і комп'ютерних центрів, зберігання енергії в мережах і позамережевих побутових електричних системах; для аварійного освітлення і в силових насосах у разі збою живлення; як тягові батареї у візках для гольфу та інших електричних автомобілях (фірми). Великі Pb-acid використовуються для живлення електродвигунів на дизель-електричних підводних човнах під час занурення у воду, а також як аварійна потужність на атомних підводних човнах. Pb-acid використовуються в резервних джерелах живлення для сигналізації й невеликих комп'ютерних систем (зокрема для джерел безперебійного живлення) і електричних скутерів, електричних інвалідних візків, електрифікованих велосипедів тощо. Тож, огляд основних типів Pb-acid показав, що AGM і GEL акумулятори здаються найбільш прийнятними для використання в електромобілі як тягові джерела енергії.

Порівняння основних характеристик AGM і GEL Pb-acid подано у табл. 1 [9].

Таблиця 1 Порівняння основних характеристик AGM і GEL акумуляторів

Показник	AGM	GEL
Ресурс, циклів	близько 300	600–900
Заряд	перевищення напруги під час заряджання може призвести до кипіння і здуття батареї	вимогливі до точності заряду – перевищення може призвести до спучення батареї
Саморозряд	інтенсивніший, ніж у GEL	невеликий
Перегрів	не такий критичний, як у GEL, але теж небезпечний	може викликати вибух батареї
Глибокий розряд	бажана експлуатація за глибини розряду не більше 30 %	добре витримують глибокий розряд
Пусковий і максимальний струм	пускові струми більші, ніж у GEL	не здатні дати великі струми, особливо стартові (є високий внутрішній опір)
Чутливість до короткого замикання	менш чутливі, ніж GEL	дуже чутливі
Експлуатація	у будь-якому положенні, окрім «догори дном»	

Як показав більш детальний аналіз, AGM і GEL акумулятори мають загальні недоліки: мала кількість циклів заряджання-розряджання, є чутливими до перевищення напруги і до перегріву. Це заважає їх поширеному використанню як тягових джерел струму для електромобілів.

Нікель-кадмієвий акумулятор – NiCd

NiCd акумулятор, якій подано на рис. 2, досягає оптимальної продуктивності після декількох циклів заряджання-розряджання, що є частиною нормальної експлуатації. Пік енерговіддачі припадає на діапазон між 100 і 300 циклами, після чого продуктивність акумулятора починає поступово падати. Більшість елементів, що перезаряджаються, включають захисний клапан, який випускає надмірний тиск при неправильному заряджанні. Скидання тиску через вентиль, що закривається, не викликає ніяких ушкоджень, проте під час вентиляції може виділятися деяка частина електроліту [11].

Виявлення повного заряджання герметичних NiCd є складнішим, ніж Pb-acid та Li-ion. Недорогі зарядні пристрої часто використовують вимірювання температури, щоб перервати процес швидкого заряджання, що є неточним способом. Виробники зарядних пристроїв використовують 50 °C як температуру такого вимкнення [11]. Будь-яка тривала температура вище 45 °C несприятливо позначається на терміні служби акумулятора.



Рис. 2. Нікель-кадмієвий акумулятор

Метод базується на визначенні напруги, забезпечує більш точне виявлення повного заряду АКБ, ніж методи, що ґрунтуються на температурних показниках. Для отримання необхідної напруги струм заряду має бути 0,5C і вище. За швидкості заряду 1C ефективність заряджання звичайного NiCd становить близько 90 %, а час заряджання – близько 1 год.

Ефективність на повільному зарядному пристрої падає до 71 %. За швидкості заряду 0,1C час заряджання становить близько 14 год. Впродовж перших 70 % заряду ККД NiCd є близькою до 100 % (батарея поглинає майже усю енергію і залишається не нагрітою). Також можливе ультрашвидке заряджання АКБ до 70 % впродовж декількох хвилин, проте повне заряджання в цьому випадку має здійснюватися пониженим струмом.

Нікель-метал-гідридний акумулятор – NiMH

Під час експлуатації NiMH акумулятора алгоритм заряду схожий з методом заряду NiCd. NiMH подано на рис. 3.



Рис. 3. Нікель-метал-гідридний акумулятор

Деякі сучасні зарядні системи застосовують первинний заряд при струмі 1C. Досягши певного порогу за напругою, відбувається витримка часу протягом декількох хвилин за відсутності заряду, що дозволяє батареї знаходитися в оптимальному температурному діапазоні. Далі заряджання вже триває за нижчого значення струму при періодичному повторенні цих циклів до повного заряджання. Цей метод відомий як «крок диференціального заряджання». Він добре працює для усіх АКБ на основі нікелю. Зарядні пристрої, що використовують покроковий диференціал або інші агресивні методи заряджання, дозволяють скоротити загальний час заряджання батареї, проте надмірний заряд разом з високими струмами неодмінно має негативний ефект, що полягає у скороченні терміну служби батареї. Замість досягнення очікуваних 1000 циклів обслуговування, швидкісні способи заряджання можуть вичерпати ресурс батареї вже після 400 циклів [8, 11].

Літій-іонні акумулятори – Li-ion

Літійові джерела струму поділяються на декілька типів відповідно до використаних мате-

ріалів у їх виробництві й технологій, що реалізуються [13, 14]. Літій-іонні акумулятори подано на рис. 4.



Рис. 4. Літій-іонні акумулятори

Технології Li-іон акумуляторів, катодне виконання яких базується на застосуванні кобальту, нікелю, марганцю або алюмінію, як правило, відрізняє номінальне значення напруги акумулятора 3,7 В. Проте відносно питомих характеристик, терміну служби і робочої температури різні технології показують себе по-різному.

Розглянемо детальніше найбільш поширені типи Li-іон акумуляторів.

Літій-кобальтовий – LiCoO_2

LiCoO_2 – традиційні літій-іонні акумулятори, що широко застосовуються для живлення цифрових фотокамер, відеокамер, у батареях для ноутбуків, ліхтарів та на транспорті [13].

Як катод використовується графіт, як анод – оксид літію з кобальтом. Як і усі види літійових акумуляторів, мають дуже малу вагу. Здатні віддавати струм до 2С, але рекомендований тривалий струм розряду не повинен перевищувати 1С. Зберігати рекомендується за температури близько 5 °С зарядженими до 40 %. Схильні до старіння із втратою ємності навіть коли не використовуються. Середній термін зберігання і використання становить 5 років [13].

За низьких негативних температур (нижче – 20 °С) незворотно втрачають ємність. Становлять небезпеку займання або вибуху під час перезаряджання або перегрівання, тому завжди забезпечуються облаштуванням захисту. Глибокий розряд призводить до повної непрацездатності акумулятора.

Літій-марганцевий – LiMnO_2

В аноді LiMnO_2 використовується марганець, а іони літію розташовані щільніше один до

одного. За рахунок цих особливостей ці акумулятори безпечніші, стійкіші до швидкого заряду великими струмами і здатні віддавати струми до 5С. Використовуються в обладнанні, що споживає великий струм: потужні ліхтарі, керовані радіомоделі.

За рахунок низького внутрішнього опору менше нагріваються при використанні, безпечніші. Зазвичай не оснащуються вбудованою захисною електронікою. При перезаряджанні елемент LiMnO_2 має здатність протікати або він просто псується, без додаткових небажаних (вибух, загорання) ефектів є обов'язковою наявністю захисної електроніки в зарядному пристрої. Термін служби та інші характеристики LiMnO_2 АКБ схожі з LiCoO_2 .

Перевагами такого акумулятора є: здатність переносити великі струми заряду/розряду, безпека, великий термін служби (більше 500 циклів), є зручними для збирання батарей з декількох елементів.

Недоліками є: відносно низька ємність, ще більша чутливість до низьких температур (охолоджувати нижче –10 °С не рекомендується). LiMnO_2 використовується для електроінструментів, медичних інструментів, а також в гібридних і електричних транспортних засобах.

Літій-залізофосфатний – LiFePO_4

LiFePO_4 акумулятори почали масово вироблятися лише після 2003 р. За своїми властивостями дуже схожі на LiMnO_2 , мають схожі сфери застосування. Відмінності полягають у пониженої ємності, здатності працювати під ще більшими навантаженнями (струм до 10С), у нижчій вартості комплектуючих. Так само поліпшено безпеку і збільшено термін служби. Ці елементи створені таким чином, що навіть за критичних навантажень не відбувається утворення кисню, отже не зростає тиск усередині елемента. Термін служби може перевищувати 3000 циклів.

LiFePO_4 акумулятори є настільки безпечними, що можуть переносити навіть потрапляння у воду, як це показано на рис. 5. Акумулятор живить світлодіод, будучи повністю зануреним у воду [13, 14]. Робоча напруга – від 2,0 до 3,3 В. Перезаряджання нижче 2 В є згубним, невелике перезаряджання – допустиме. Майже не чутливі до негативних температур.

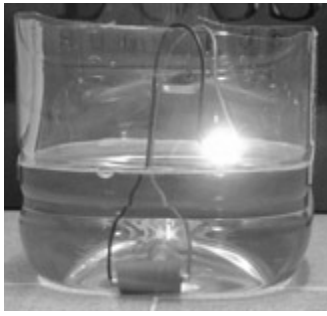


Рис. 5. Літій-залізофосфатний акумулятор в ємності з водою

Перевагами таких акумуляторів є: стійкість до низьких температур, безпека, довгий термін служби, непримхливість, здатність переносити великі струми заряду/розряду.

Недоліками є: мала ємність.

Літій-полімерний – Li-pol

Li-pol вже майже повністю витіснили літій-іонні зі стільникових телефонів, знайшли широке застосування в радіокерованих моделях і деяких сучасних електромобілях [15]. Як електроліт використовується полімерний матеріал. Зазвичай Li-ion акумулятори мають циліндричну форму, Li-pol дають інженерам велику свободу вибору (рис. 6). Мінімальна товщина досягає 1 мм. Можна виготовляти мініатюрні моделі різної форми. Зазвичай побутові акумулятори призначені для пристроїв з низьким енергоспоживанням, але існують промислові моделі й моделі, здатні віддавати струм до 45С. Інші характеристики схожі з характеристиками звичайних LiCoO₂ моделей. Термін служби – 300–500 циклів, є чутливими до низьких температур, старіють, вибухонебезпечні за перевантажень, часто мають вбудовану електроніку захисту.

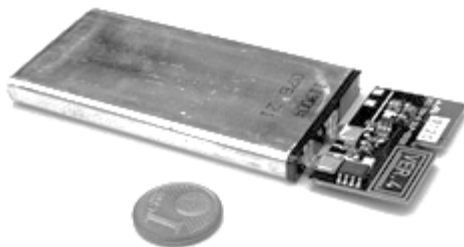


Рис. 6. Літій-полімерний акумулятор

Перевагами літій-полімерних акумуляторів є: моделі різних форм і розмірів, у тому числі гнучкі моделі; деякі модифікації здатні віддавати дуже великий струм; мала вага, вели-

ка щільність запасеної енергії, відсутність «ефекту пам'яті», низький саморозряд.

Недоліками є: втрата ємності за низьких температур, вибухонебезпека при перезарядженні/перевищенні допустимого навантаження, схильні до старіння.

Літій-титанатний – LT

LT (рис. 7) використовує нанокристали літій-титанату на поверхні свого аноду замість вуглецю. Це дає аноду площу поверхні близько 100 м²/г, в порівнянні з 3 м²/г для вуглецю, що забезпечує швидке перезарядження і високі струми – за необхідності [5]. LT мають щільність енергії до 177 Вт/л [16].

Недоліком LT є те, що вони мають нижчу внутрішню напругу (2,4 В), що призводить до нижчої питомої енергії (близько 30–110 Вт/кг) [16], ніж звичайні технології літій-іонних батарей (які мають власну напругу 3,7 В) [14].



Рис. 7. Літій-титанатний акумулятор

Переваги LT є значними, і вони включають ряд економічних і екологічних аспектів, які є важливими для майбутнього, обумовленого поновлюваними джерелами зеленої енергії. Технологія літію титанату ідеально підходить для мобільного зберігання енергії. LT має життєвий цикл до 20 000 циклів, у порівнянні з 2 000 циклів у стандартних літійових батареях. Крім того, LT має найвище співвідношення енергії й ваги, яке є зараз доступним, створюючи можливості застосування для пристроїв, яким потрібна батарея з низькою вагою, наприклад, легкі автомобілі, електромобілі й автотранспортні засоби.

Ультраконденсатор (іоністор)

Ультраконденсатор (УК), що також називається суперконденсатором та іоністором, є електричним компонентом, що може утри-

мувати в сотні разів більше електричного заряду, ніж стандартний конденсатор (рис. 8). Ця характеристика робить УК корисними в пристроях, які вимагають відносно невеликого струму і низької напруги. У деяких ситуаціях УК може замінити низьковольтну електрорімічну АКБ.

УК здатні працювати за температур, значно нижчих за нуль.

Звичайний конденсатор містить дві електропровідні поверхні, розділені ізолюючим шаром, що називається діелектриком [3, 17]. Його ємність збільшується у міру збільшення площі поверхні провідників. Також ємність зростає за зменшення відстані між поверхнями і за збільшення діелектричної проникності проміжного ізолятора. Проте існує практична межа відносно ємності, що наявна у цій конструкції. УК принципово відрізняється своєю внутрішньою структурою. Замість двох електродів, розділених ізолюючим шаром, УК використовує пористе середовище, яке створює ефект пари пластин з велетенською площею поверхні, розділених тільки декількома нанометрами. У результаті ультраконденсатор має набагато більшу ємність, ніж будь-який звичайний високоємний компонент (такий як електролітичний або танталовий конденсатор).

Основним недоліком УК, у порівнянні зі старими конструкціями конденсаторів, є те, що УК не витримує високої напруги. Тоді як електролітичний конденсатор може бути розрахований на декілька сотень вольт постійного струму, УК мають максимальні номінальні значення всього близько 5 В постійного струму. Щоб використати УК за більш високої напруги, декілька компонентів мають бути з'єднані послідовно – їх номінальні напруги складаються так само, як напруга батареї додається при послідовному з'єднанні. Проте коли декілька конденсаторів будь-якого типу з'єднані послідовно, потрібні спеціальні запобіжні заходи для вирівнювання напруги по окремих компонентах.

До переваг УК відносяться: висока швидкість заряду-розряду, стійкість до сотень тисяч циклів перезарядження, порівняно з акумуляторами, мала вага, порівняно з електро-

літичними конденсаторами, низький рівень токсичності, допустимість розряду до нуля.

Використання УК: використовуються в умовах, що вимагають багато швидких циклів зарядки/розрядки, а не в довгостроковому компактному зберіганні енергії: в автомобілях, автобусах, потягах, кранах і ліфтах, для рекуперативного гальмування, короткочасного накопичення енергії або подання живлення в імпульсних режимах. Також вони використовуються як резервна копія пам'яті для статичної пам'яті з довільним доступом (SRAM).



Рис. 8. Ультраконденсатори

Слід відмітити, що УК розділяються на [17]:
 – двошарові конденсатори для резервного копіювання пам'яті (ДУК);
 – УК для силових застосувань (СУК);
 – псевдо- і гібридні конденсатори (літій-іонні конденсатори) (ГУК).

Порівняння АКБ різних типів

Перед проведенням порівняльного аналізу необхідно звернути увагу на світових виробників електрокарів з точки зору використання ними акумуляторних батарей (табл. 1).

З табл. 1 видно, що передові позиції займають Li-ion та NiMH акумулятори [4]. Але чомусь зовсім не використовують ультраконденсаторів і літій-титанатних акумуляторів.

Щоб зрозуміти цю тенденцію, треба подивитися на характеристики АКБ, подані в табл. 2.

Проведений аналіз накопичувачів енергії дозволив звести основні технічні характеристики, на які необхідно орієнтуватися при виборі накопичувача енергії, у табл. 2.

Таблиця 1 Батареї, що використовуються в електромобілях обраних автовиробників

Виробник	Країна	Модель авто	Тип АКБ
GM	США	Chevy-Volt; Chevy-Bolt	Li-ion
		Saturn Vue Hybrid	NiMH
Ford	США	Escape, Fusion, MKZ HEV, Focus Electric	NiMH Li-ion
		Escape PHEV	Li-ion
Honda	Японія	Civic, Insight	NiMH
Hyundai	Південна Корея	Sonata, IONIQ Electric	Li-ion (Li-pol)
Chrysler	США	Chrysler 200C EV	Li-ion
BMW	Німеччина	X6	NiMH
		Mini E (2012) i3; i8	Li-ion
BYD	Китай	E6	Li-ion
Daimler Benz	Німеччина	ML450, S400	NiMH
		Smart EV (2010) Mercedes B-Class Electric Drive	Li-ion
Mitsubishi	Японія	iMiEV (2010)	Li-ion
Nissan	Японія	Altima	NiMH
		Leaf EV (2010), e-NV200	Li-ion
Tesla	США	Roadster (2009), Model S (2012), Model X (2015)	Li-ion
Think	Норвегія	Think EV	Li-ion, Sodium/Metal Chloride
Toyota	Японія	Prius, Lexus	NiMH
KIA	Південна Корея	Soul EV	Li-ion (Li-pol)
Volkswagen	Німеччина	e-Golf	Li-ion
Renault	Франція	Zoe, Kangoo, Fluence ZE, Twizy	Li-ion
Citroen	Франція	Berlingo Electric (Electricite)	Li-ion

Для визначення найбільш прийнятної типу накопичувача енергії в якості тягового джерела енергії були обрані такі характеристики:

- компактність – порівняльна характеристика, що визначає ваго-габаритні властивості;
- швидкий процес заряджання – можливість батареї заряджатися максимальними для неї струмами;
- простота утилізації – складності технологічного процесу, пов'язані з утилізацією або неможливістю відновлення корисних хімічних елементів;
- ефект пам'яті – оборотна втрата ємності, що має місце в деяких типах електричних акумуляторів при порушенні рекомендованого режиму заряду, зокрема при заряджанні акумулятора, що не повністю розрядився;
- допустиме перезаряджання – кількісне свідчення, що визначає допустиме значення при заряджанні акумулятора понад 100 %;

- глибина розряду (DOD) – реальна кількість (від заявленої) енергії, яку АКБ може віддати без збільшення температури.

Проведений аналіз зарядних характеристик з кількісним і якісним порівнянням показників накопичувачів енергії різних видів показав, що в якості тягових джерел енергії більше усього підходять: Li-pol акумулятори, LT акумулятори і УК.

Усі вони мають:

- високі показники питомих характеристик;
- високі значення допустимих зарядних і розрядних струмів;
- можливість швидкого заряджання;
- відсутність необхідності обслуговування; максимальний термін служби; низькі показники саморозряджання;
- відсутність «ефекту пам'яті».

Таблиця 2 Порівняння характеристик АКБ та УК різних типів

Параметр/тип АБ	Pb-acid	NiCd	NiMH	Літій-іонні акумулятори					УК		
				LiCoO ₂	LiMnO ₂	LiFePO ₄	Li-pol	LT	ДУК	СУК	ГУК
Номінальна напруга, В	2	1,2	1,2	3,6	3,8	3,3	3,6	2,4	1,2–3,3	2,2–3,3	2,2–3,8
Питома енергоємність, Вт·год/кг	20–40	40–60	30–80	150–190	100–135	90–120		30–110	1,5–3,9	4–9	10–15
Питома потужність, Вт/кг	100–300	150	250–1000	800–3000			800–900	3000–7000	2·10 ³ –10·10 ³	3·10 ³ –10·10 ³	3·10 ³ –14·10 ³
Середній час заряджання, годин	більше 10	8	6	2–4	≤1		2	0,1–0,17	секунди-хвилини		
Кількість циклів розряду/заряду (термін служби)	500–800	2000	800	500–1000	500–1000	1000–3000	300–500	20000	10 ⁵ –10 ⁶	10 ⁵ –10 ⁶	2·10 ⁴ –10 ⁵
Середній саморозряд за місяць, %	4	10	30	менше ніж 10			5 %				
Середня вартість за кВт·год, \$	50–120	400–800	250	400–670				1000–2000	100		
Компактність	–	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Швидкий процес заряджання	–	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Простота утилізації	–	–	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Термін зберігання більше 3 років	+	+	–	+	+	+	+	+	+	+	+
Ефект пам'яті	–	+	+	–	–	–	–	–	–	–	–
Допустимий перезаряд	високий	середній	низький	низький							
Глибина розряду (DOD)	50 %	50–80 %	50–85 %	80 %				85 %	100 %		
Обслуговування	передбачене			не передбачене							

Отже, кожен із трьох вище зазначених типів накопичувачів енергії має свої особливі недоліки і переваги, а тому вибір конкретного типу в подальшому буде залежати від умов експлуатації та інших факторів.

Тож перед вибором накопичувача енергії в якості тягового джерела струму необхідно відповісти на такі питання:

- для якого споживача, з фінансової точки зору, розробляється електромобіль, бо у вартості зазначених АКБ є великі розбіжності, а вартість джерела струму становить майже половину вартості всього авто;
- для яких цілей буде використовуватися електрокар – поїздки на невеликі відстані у міському режимі експлуатації чи міжміські;
- для особистих потреб чи для загального використання;
- для роботи в яких кліматичних умовах (максимальні й мінімальні температури);

– використання для особистих потреб чи для комерційних перевезень (окупність) тощо.

Тільки після отримання відповідей на ці питання можна буде чітко визначити, який тип накопичувача енергії необхідно використовувати.

Наприклад для міського громадського транспорту (електробусів, тролейбусів з автономним ходом) як тяговий накопичувач енергії краще всього використовувати УК, бо вони здатні без особливої шкоди для себе миттєво сприймати дуже великі струми, що робить їх незамінними, наприклад, при різкому уповільненні транспортного засобу. До того ж УК можуть дуже швидко заряджатися (наприклад, під час посадки/висадки пасажирів) і мають найбільший термін служби (кількість зарядів/розрядів при правильній експлуатації може досягати мільйона). Але треба відміти-

ти і те, що для безперебійної й надійної роботи такого виду транспорту необхідно налаштувати інфраструктуру – встановити на зупинках зарядні станції, що потребує додаткових матеріальних вкладень.

Якщо мова йде про розробку малолітражного електромобіля для городянина, то задля здешевлення як АКБ більше підходять літій-іонні акумулятори. Серед них особливо виділяється своїми перевагами літій-титанатний акумулятор. До цих переваг належать: час заряджання – 10–15 хв; кількість циклів розряду/заряду досягає 20000, що в 10 разів більше, ніж у звичайних АКБ; він безпечний в експлуатації; добре переносить низькі температури. Але на сьогодні LT акумулятор має серйозний «недолік» – це його вартість, що більша в 2–2,5 рази за вартість інших Li-ion акумуляторів.

Слід відмітити, з кожним роком ціна АКБ неупинно зменшується. Передбачається, що їх майбутнє здешевлення може відбуватися навіть швидше, ніж це прогнозується сьогодні [7], а це відкриває нові можливості для розвитку і популяризації електромобілів у світі.

Варто відмітити, що після вибору типу АКБ необхідно провести аналіз чинників, які впливають на її ресурс, щоб в подальшому мати змогу обрати оптимальний режим експлуатації джерела струму.

Відомо, що одним з таких чинників є саморозряд, бо усі основні накопичувачі енергії схильні до саморозряду. Цьому сприяють і витрати енергії на системи захисту АКБ від перезаряджання. Окрім цього, на процеси саморозряджання впливають такі механізми: розкладання електроліту на електроді; спонтанне потрапляння літію в об'єм позитивного електроду; розчинення матеріалу електроду [13].

Крім того, на ресурс АКБ впливають:

- процеси деградації в Li-ion;
- глибина розряду;
- зарядні-розрядні струми;
- температура тощо.

У подальших роботах планується проведення детального аналізу всіх вище зазначених чинників, з метою винайдення способів зменшення їх впливу на життєвий цикл АКБ.

Висновки

Проведено огляд і аналіз сучасних накопичувачів енергії, який показав, що при виборі тягової АКБ для електромобіля треба визначити пріоритетність характеристик, за якими буде здійснюватися вибір.

Вибір АКБ залежить від майбутніх умов експлуатації електромобіля і його кінцевої вартості.

Для міського громадського транспорту (електробусів, тролейбусів з автономним ходом) як тяговий накопичувач енергії краще всього використовувати УК.

Для малолітражного міського електромобіля у якості тягової АКБ більше підходять літій-іонні акумулятори. Серед них особливо виділяється своїми перевагами літій-титанатний акумулятор.

На ресурс АКБ впливає цілий ряд чинників: глибина розряду, температура акумулятора, зарядно-розрядні струми.

У подальших дослідженнях необхідно провести більш глибокий аналіз чинників, що впливають на зменшення ресурсу АКБ.

Література

1. Флоренцев С.Н. Экономичный экологичный городской гибридный автобус / С.Н. Флоренцев // Электронные компоненты. – 2008. – №. 12. – С. 24–39.
2. Dhameja S. Electric vehicle battery systems / Dhameja S. – Newnes, 2001. – 230 с.
3. Khaligh A. Battery, ultracapacitor, fuel cell, and hybrid energy storage systems for electric, hybrid electric, fuel cell, and plug-in hybrid electric vehicles: State of the art / A. Khaligh, Z. Li // IEEE transactions on Vehicular Technology. – 2010. – Т. 59. – №. 6. – С. 2806–2814.
4. Young K. Electric vehicle battery technologies / K. Young // Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks. – Springer New York, 2013. – С. 15–56.
5. Howell D. Annual progress report for energy storage R&D, Vehicle Technologies Program, Energy Efficiency and Renewable Energy / D. Howell // US Department of Energy, Washington, DC. – 2010.
6. Boulanger A. G. Vehicle electrification: Status and issues / A. G. Boulanger // Pro-

- ceedings of the IEEE. – 2011. – Т. 99. – №. 6. – С. 1116–1138.
7. Гнатов А.В. Ретроспектива основных этапов развития электромобилей. Часть 2 / А.В. Гнатов, Щ.В. Аргун // Вестник ХНАДУ: сб. науч. тр. – 2016. – Вып. 78. – С. 116–124.
 8. Оспанбеков Б.К. Оптимизация ресурсоопределяющих эксплуатационных режимов тяговых аккумуляторных батарей электромобилей: дисс. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Оспанбеков Бауржан Кенесович. – М., 2017. – 170 с.
 9. Аккумуляторы гелевые, мультигелевые и AGM – в чем разница? / Материалы сайта. – 2015. – Режим доступа: <https://lantorg.com/article/akkumulyatory-gelevye-multigelevye-i-agm-v-chem-raznitsa>.
 10. BU-403: Charging Lead Acid. / Материалы сайта – 2017. – Режим доступа: http://batteryuniversity.com/learn/article/charging_the_lead_acid_battery.
 11. Дослідження методів заряду акумуляторних батарей. / Материалы сайта. – 2017. – Режим доступа: <http://ukrbukva.net/page,9,88865-Issledovanie-metodov-zaryada-akkumulyatornyh-batareiy.html>.
 12. Graham-Rowe Duncan Charge a battery in just six minutes. / Материалы сайта. – 2017. – Режим доступа: <https://www.newscientist.com/article/dn7081-charge-a-battery-in-just-six-minutes/>.
 13. Каневский Л.С. Деградация литий-ионного аккумулятора и методы борьбы с ней / Л.С. Каневский, В.С. Дубасова // Электрохимия. – 2005. – Т. 41, №1. – С. 3–19.
 14. Toshiba Developing 3.0 Ah High Power SCiB Li-Ion Cell for HEV Applications. / Материалы сайта. – 2008. – Режим доступа: <http://www.greencarcongress.com/2008/05/toshiba-develop.html>.
 15. Типы аккумуляторов мобильных телефонов и их технические характеристики. / Материалы сайта. – 2017. – Режим доступа: <https://www.wescom.kharkov.ua/articles/6-tipy-akkumulyatorov-mobilnyh-telefonov-i-ix-technicheskie-karakteristiki>.
 16. All About Batteries, Part 12: Lithium Titanate (LTO). / Материалы сайта. – 2015. – Режим доступа: https://www.eetimes.com/author.asp?doc_id=1325358.
 17. Burke, Andrew. Ultracapacitors: Why, How, and Where is the Technology. Institute of Transportation Studies. UC Davis: Institute of Transportation Studies (UCD) / Материалы сайта. – 2000. – Режим доступа: <http://escholarship.org/uc/item/9n905017>.

References

1. Florentsev C. N. *Ekonomichnyi ekologichnyi gorodskoi gibridnyi avtobus* [Economic environmentally friendly urban hybrid bus]. *Elektronnye komponenty*, 2008, no. 12, pp. 24–39.
2. Dhameja S. *Electric vehicle battery systems*. Newnes, 2001, 230 с.
3. Khaligh A., Li Z. Battery, ultracapacitor, fuel cell, and hybrid energy storage systems for electric, hybrid electric, fuel cell, and plug-in hybrid electric vehicles: State of the art. *IEEE transactions on Vehicular Technology*, 2010, vol. 59, no. 6, pp. 2806–2814.
4. Young K. et al. *Electric vehicle battery technologies. Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks*, Springer New York, 2013, pp. 15–56.
5. Howell D. Annual progress report for energy storage R&D, Vehicle Technologies Program. Energy Efficiency and Renewable Energy. US Department of Energy, Washington, DC. – 2010.
6. Boulanger A.G. Vehicle electrification: Status and issues. *Proceedings of the IEEE*, 2011, vol. 99, no. 6, pp. 1116–1138.
7. Gnatov A. V., Arhun Shch. V. *Retrospektyva osnovnyh etapiv rozvytku elektromobiliv. Chastyna 2* [Retrospective of the main stages of the development of electric vehicles. Part 2]. *Visnyk HNADU*, 2016, no 78, pp. 116–124.
8. Ospanbekov B.K. *Optimizacija resursoopredeljajushih jekspluatacionnyh rezhimov tjagovyh akkumuljatornyh batarej jelektromobilej* [Optimization of resource-dependent operational modes of traction batteries of electric vehicles]. Cand. tech. sci. diss.]. Moscow, 2017. 170 p.
9. Akkumulyatory gelevye, mul'tigelevye i AGM – v chem raznitsa? [Battery gel, multigel and AGM – what's the difference?] Available at: <https://lantorg.com/article/akkumulyatory-gelevye-multigelevye-i-agm-v-chem-raznitsa> (accessed 20 September 2017).
10. BU-403: Charging Lead Acid. Available at: http://batteryuniversity.com/learn/article/charging_the_lead_acid_battery.

- cle/charging_the_lead_acid_battery (accessed 5 August 2017).
11. *Doslidzhennja metodiv zarjadu akumuljatornyh batarej* [Investigation of battery charging methods]. Available at: <http://ukrbukva.net/page,9,88865-Issledovanie-metodov-zaryada-akkumulyatornyh-batarey.html> (accessed 20 September 2017).
 12. Graham-Rowe Duncan Charge a battery in just six minutes. Available at: <https://www.newscientist.com/article/dn7081-charge-a-battery-in-just-six-minutes/> (accessed 20 September 2017).
 13. *Doslidzhennja metodiv zarjadu akumuljatornyh batarej* [The degradation of a lithium-ion battery and the methods of combating it]. *Jelektrohimiya*, 2005, vol. 41, no. 1, pp. 3–19.
 14. Toshiba Developing 3.0 Ah High Power SCiB Li-Ion Cell for HEV Applications. Available at: <http://www.greencarcongress.com/2008/05/toshiba-develop.html> (accessed 20 September 2017).
 15. *Tipy akkumulatorov mobil'nykh telefonov i ikh tekhnicheskie kharakteristiki* [Types of mobile phone batteries and their technical characteristics]. Available at: <https://www.wescom.kharkov.ua/articles/6-tipy-akkumulyatorov-mobilnyx-telefonov-i-ix-tekhnicheskie-xarakteristiki> (accessed 5 August 2017).
 16. All About Batteries, Part 12: Lithium Titanate (LTO). Available at: https://www.eetimes.com/author.asp?doc_id=1325358 (accessed 20 September 2017).
 17. Burke, Andrew. Ultracapacitors: Why, How, and Where is the Technology. Institute of Transportation Studies. UC Davis: Institute of Transportation Studies (UCD). Available at: <http://escholarship.org/uc/item/9n905017> (accessed 20 September 2017).

Рецензент: А.В. Гнатов, профессор, д.т.н., ХНАДУ.
