

Оптимізована система управління бустерною літій-залізо-фосфатною акумуляторною батареєю

Аргун Щ.В.¹, Двадненко В.Я.¹, Гнатов А.В.¹

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна

Надійшла: 25.08.2024. Прийнято: 13.11.2024. Опубліковано: 12.12.2024. Відкритий доступ: СС BY 4.0.

Анотація. У дослідженні розроблено бустерну батарею на основі літій-залізо-фосфатних акумуляторів з оптимізованою системою управління батареями (BMS), яка забезпечує ефективний контроль процесів заряду та розряду. Вона демонструє високу надійність, швидке зарядження та тривалий термін служби порівняно зі свинцево-кислотними акумуляторами. Вдосконалена BMS оптимізує внутрішній опір і балансування акумуляторних елементів, що забезпечує стабільне енергопостачання навіть у складних умовах експлуатації. Результати дослідження мають практичне значення для підвищення енергоефективності та надійності в автомобільній і суміжних галузях.

Ключові слова: літій-залізо-фосфатні акумулятори; система управління батареями; оптимізація процесів зарядки та розрядки; надійність акумуляторних систем, стійке електропостачання.

Вступ

Бустерна батарея – це багатофункціональний пристрій, який використовують для полегшення запуску автомобільного двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ) в умовах низьких температур, а також при значному розряді автомобільного акумулятора [1,2]. Окрім того, бустерна батарея може слугувати джерелом живлення для різних електроприладів у ситуаціях, коли мережа змінного струму недоступна або відсутня.

Бустерні батареї, що складаються з послідовно з'єднаних елементів літій-залізо-фосфатних (LiFePO₄) акумуляторів, мають чудові енергетичні характеристики за питомою вагою та об'ємом, що забезпечує їх компактність і легкість [3,4]. Вони герметичні, мають високу кількість циклів заряд-розряд, відзначаються високою надійністю, низьким внутрішнім опором, підтримують швидку зарядку та дозволяють розряд великими струмами. Ці переваги роблять їх значно кращими у порівнянні зі свинцевими акумуляторами тієї ж ємності, а також зручними для транспортування, зберігання та використання в житлових приміщеннях.

Однак, як і всі літій-іонні акумулятори, бустерні батареї мають суворі вимоги щодо недопущення перезаряду та глибокого розряду. Особливо небезпечним є перерозряд із переполосовкою окремих елементів, коли повністю розряджений елемент починає заряджатися зворотною полярністю за рахунок струму від інших, ще не розряджених елементів. Крім того, зарядження літій-іонних акумуляторів при від'ємній температурі також неприпустиме. Ці особливості експлуатації потребують встановлення спеціальних електронних систем контролю, відомих як система управління батареєю (BMS – Battery Management System).

Аналіз публікацій

Останніми роками все більшу увагу приділяють розробці нових енергоефективних технологій, які поступово впроваджуються у різні сфери, зокрема в транспортну галузь [5]. Прогрес у цій галузі особливо помітний у сфері модернізації транспортних засобів, таких як автомобілі та залізничні системи, що дозволяє підвищити їхню ефективність та знизити вплив на довкілля [6]. Електромобілі стають одним із

основних напрямів розвитку, що вимагає удосконалення не тільки транспортної інфраструктури, а й систем електроприводу, електронних компонентів і акумуляторів.

Численні дослідження присвячені підвищенню продуктивності та надійності тягових електродвигунів. Наприклад, робота [7] розглядає методи діагностики електродвигунів електромобілів, тоді як дослідження [8] зосереджується на системах діагностики для гібридних транспортних засобів.

Окрім цього, важливим елементом розвитку є інфраструктурні рішення для зарядки електромобілів, а також системи, що забезпечують енергопостачання доріг та підвищують безпеку руху [9–11]. Не менш актуальними є виклики, пов'язані з кібербезпекою автомобільних систем, які можуть негативно вплинути на ефективність роботи автомобілів і загальну безпеку на дорогах [12].

Одним із найбільш затратних компонентів електромобілів є акумуляторні батареї, які можуть становити до третини загальної вартості транспортного засобу [13]. Літій-іонні та нікель-металогідридні батареї широко використовуються в електромобілях завдяки їхній довговічності, високій ефективності та щільності енергії [14]. Серед них популярними є літій-нікель-кобальт-оксид (NCA), літій-кобальт-оксид (LCO), літій-титанат-оксид (LTO), літій-манган-оксид (LMO), літій-нікель-оксид (LNO), літій-залізо-фосфатні (LFP) та літій-нікель-марганець-кобальт-оксид (NMC) [14].

Зокрема, літій-залізо-фосфатні (LFP) батареї вирізняються своєю компактністю, легкістю, герметичністю та великою кількістю циклів заряд-розряд [15]. Вони забезпечують можливість швидкої зарядки та здатні витримувати високі струми при розряді. Проте їх експлуатація вимагає суворого дотримання умов, таких як недопущення перезаряду або глибокого розряду окремих елементів. У таких випадках важливо використовувати систему управління батареєю (BMS), яка забезпечує моніторинг та захист елементів від перевантажень та перегріву [16].

У статті [17] проведено всебічний аналіз компонентів, архітектури та безпекових ризиків, пов'язаних із роботою BMS, представлено огляд технічних стандартів, які стосуються BMS, як частину ширших зусиль зі створення нового стандарту для цієї системи. В роботі підтверджується важливість дотримання цих стандартів. Зокрема, зазначено, що функціо-

нальна BMS повинна відповідати стандартам CSA, IEEE, UL, NEC та IEC для забезпечення валідації та дотримання вимог безпеки.

Таким чином, впровадження BMS дозволяє не тільки контролювати рівень заряду акумуляторів, але й продовжити термін їхньої служби, забезпечуючи надійну та ефективну роботу транспортних засобів.

Мета та постановка задачі

Метою роботи є розробка оптимальних електронних блоків, що контролюють режими заряду та розряду літій залізофосфатних акумуляторних батарей, що дозволить спростити та знизити собівартість зарядного пристрою та BMS, скоротити час заряду та балансування, забезпечити тривалий термін служби та високу надійність акумуляторної батареї.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести аналіз технічних вимог щодо експлуатації літій-залізо-фосфатних акумуляторів, зокрема визначити критичні параметри для заряду та розряду, такі як напруга, струм та температура;
- розробити електронні блоки системи управління батареями (BMS), що контролюють режими заряду та розряду акумуляторних батарей, з урахуванням особливостей LiFePO_4 акумуляторів;
- створити експериментальну модель зарядного пристрою, яка забезпечує оптимізацію процесів заряду та балансування акумуляторів з метою скорочення часу зарядки та підвищення ефективності роботи системи;
- дослідити вплив внутрішнього опору акумуляторів на порогові напруги завершення процесів заряду та розряду, розробити підходи до балансування акумуляторних банок для підвищення їх надійності;
- провести експериментальні випробування розробленої системи управління батареями з метою підтвердження її ефективності, надійності та можливості тривалого використання в реальних умовах експлуатації.

Технічні вимоги при експлуатації LiFePO_4 акумуляторів

Експлуатація LiFePO_4 акумуляторів потребує дотримання кількох важливих технічних вимог для забезпечення їхньої надійної роботи

та тривалого терміну служби:

- максимальна напруга при заряді не повинна перевищувати 3,65 В на елемент, а напруга при розряді не повинна падати нижче 2,5 В. Це критичні параметри, недотримання яких може призвести до пошкодження елементів акумулятора;

- граничні значення струмів заряду і розряду задаються у вигляді коефіцієнта, який визначається відносно ємності акумулятора і зазвичай вказується у [А·год]. Ці значення залежать від конструктивних особливостей акумуляторних елементів і можуть варіюватися в залежності від специфікацій конкретної моделі. Важливо також враховувати тривалість дії зарядних і розрядних струмів: при збільшенні струму тривалість його дії повинна зменшуватися, щоб уникнути перегріву;

- температурний контроль є важливим параметром під час експлуатації, оскільки при її перевищенні слід знижувати струм заряду. В умовах великих розрядних струмів, особливо в електромобілях, також важливо обмежувати струм розряду при надмірному нагріві елементів. У деяких випадках для охолодження акумуляторів використовують примусову систему охолодження;

- для забезпечення безпечної роботи акумуляторів за низьких температур, перед початком заряду необхідно здійснювати попередній підігрів елементів до позитивної температури за допомогою електричних нагрівачів. Це особливо актуально для автомобільних акумуляторів, які експлуатуються у складних кліматичних умовах.

Дотримання цих технічних вимог є ключовим для забезпечення безпечної експлуатації LiFePO₄ акумуляторів, продовження їхнього терміну служби та запобігання пошкодженням під час роботи.

Вибір та обґрунтування вимог до схемотехніки бустера

Вибір акумулятора здійснюється з урахуванням:

- стартового струму автомобіля (який, як правило, є короткочасним, менше 6 с);
- ваги (для зручності транспортування);
- запасу електричної енергії (якщо використовується для освітлення житлових приміщень або живлення побутових електроприладів).

Для легкового автомобіля з бортовою мережею на 12 В достатньо послідовно з'єднати 4 банки (або 4 паралельні збірки) літій-залізо-фосфатних банок. Стартовий струм під час запуску (< 6 с) для бензинового легкового автомобіля (100–160 А) забезпечать чотири паралельні збірки з чотирьох банок LiFePO₄, типорозміру 32700, ємністю 6 А·год, з загальною ємністю 24 А·год.

Для тривалого живлення побутових приладів, таких як настільні комп'ютери, підходять LiFePO₄ акумулятори ємністю 60–100 А·год [18].

Для досягнення поставленої мети треба проаналізувати часові характеристики заряду та розряду, розглянути вольт-амперні характеристики, функціональні залежності впливу внутрішнього опору елементів батареї під час заряду та розряду.

Зарядна характеристика елемента LiFePO₄ типорозміру 32700 ємністю 6 А·год наведена на рис. 1. По осі абсцис зазначено час заряду (год, хв, с), по осі ординат зліва – напруга, справа – струм заряду елемента. Червона лінія показує залежність струму заряду, синя – напругу елемента. Як видно з рисунку, заряд виконується струмом 0,5С, який підтримується до досягнення граничної напруги заряду 3,65 В. Після цього напруга стабілізується, а струм починає знижуватися. Електричний заряд Q , переданий акумулятору, можна записати у вигляді виразу:

$$Q = \int_{t_2}^{t_1} I(t) dt, \quad (1)$$

де t_1 і t_2 – час початку та кінця зарядки відповідно; $I(t)$ – зарядний струм, що залежить від часу.

Накопичену енергію, нехтуючи втратами, оскільки ККД LiFePO₄ акумулятора перевищує 97%, можна записати як:

$$W = \int_{t_1}^{t_2} I(t)U(t) dt, \quad (2)$$

де $U(t)$ – напруга акумулятора, що залежить від часу.

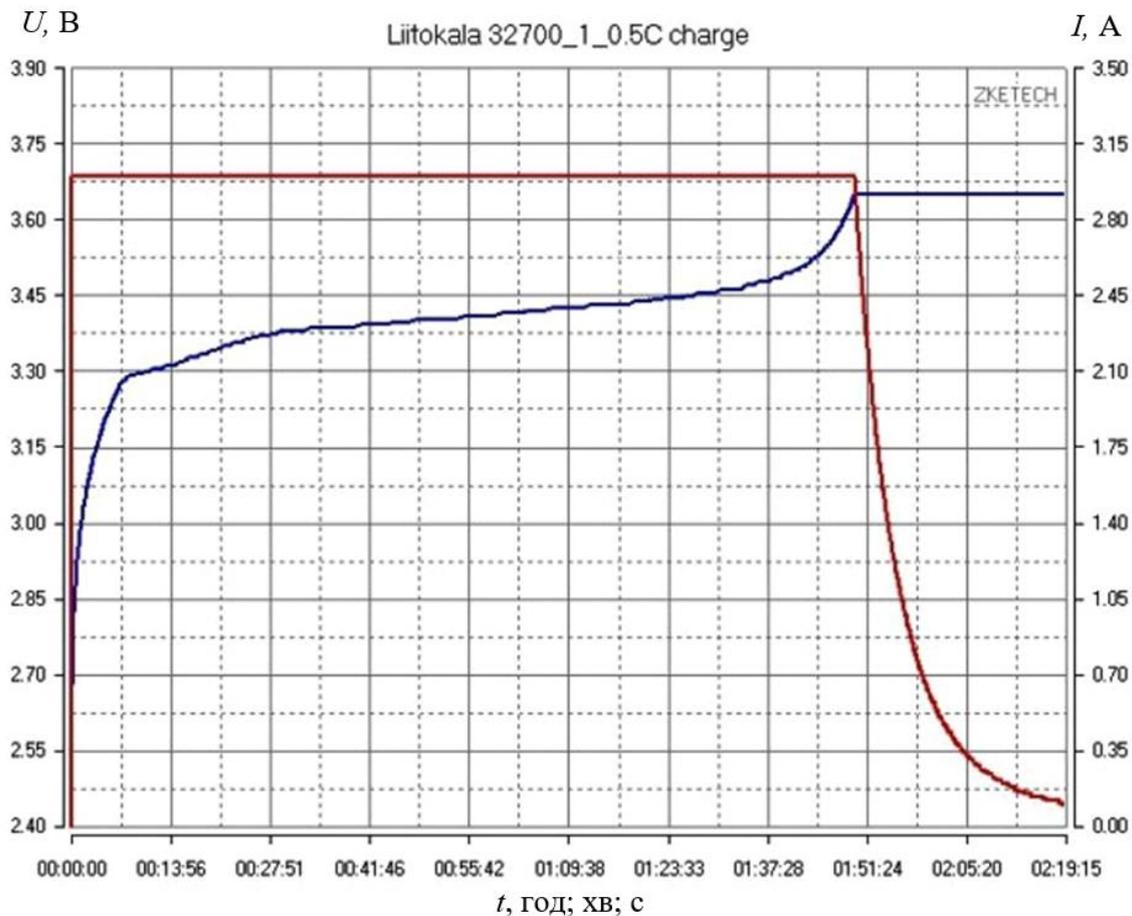


Рис. 1. Зарядка банки акумулятора

Таким чином, як видно з (1), площа під кривою струму в залежності від часу показує заряд акумулятора, який можна виміряти в кулонах $[A \cdot c]$ або ампер-годинах $[A \cdot год]$. Легко обчислити заряд, отриманий акумулятором під час стабілізації струму та напруги за рис. 1. Після досягнення граничної напруги заряд можна збільшити менше ніж на 9% при подальшому заряді зі стабілізованою напругою, але це збільшує час заряду більше ніж на 25%. Оскільки всі виробники рекомендують підтримувати глибину розряду (DOD) нижче 100% і не заряджати акумулятор на всі 100%, можна спростити зарядний пристрій, відмовившись від дозарядки зі стабілізацією напруги. Найкраще дотримуватися рівня розряду до 80% або менше. Простіше кажучи, чим менший рівень розряду (DOD), тим більше циклів "заряд-розряд" можна виконати. При 50% DOD елементи $LiFePO_4$ можуть витримати понад 5000 циклів. Однак важливо підтримувати DOD у середньому діапазоні ємності, тобто не розряджати і не заряджати акумулятор на всі

100%, інакше кількість циклів "заряд-розряд" може зменшитися.

Розглянемо розрядну характеристику, наведену на рис. 2.

Розряд проводився стабілізованим струмом 2 A і завершився після зниження напруги акумулятора до 2,5 V. Для цієї залежності проведено оцінку, використовуючи формулу (2), енергії, отриманої під час розряду акумулятора. Оцінювалась енергія (у джоулях або в $kWh \cdot год$) графічно, виходячи з того, що площа під кривою напруги на рис. 2 прямо пропорційна енергії розряду. Видно, що падіння напруги прискорюється наприкінці розряду, через що 90% енергії розряду отримується до того, як напруга акумулятора знизиться до 3,1 V, тобто менш ніж на 5%. Ця особливість $LiFePO_4$ акумулятора є сприятливою для споживачів, оскільки забезпечує невеликі зміни потужності навіть при майже повному розряді (до 10%) і дозволяє надійно завершувати процес розряду, не завдаючи шкоди акумулятору.

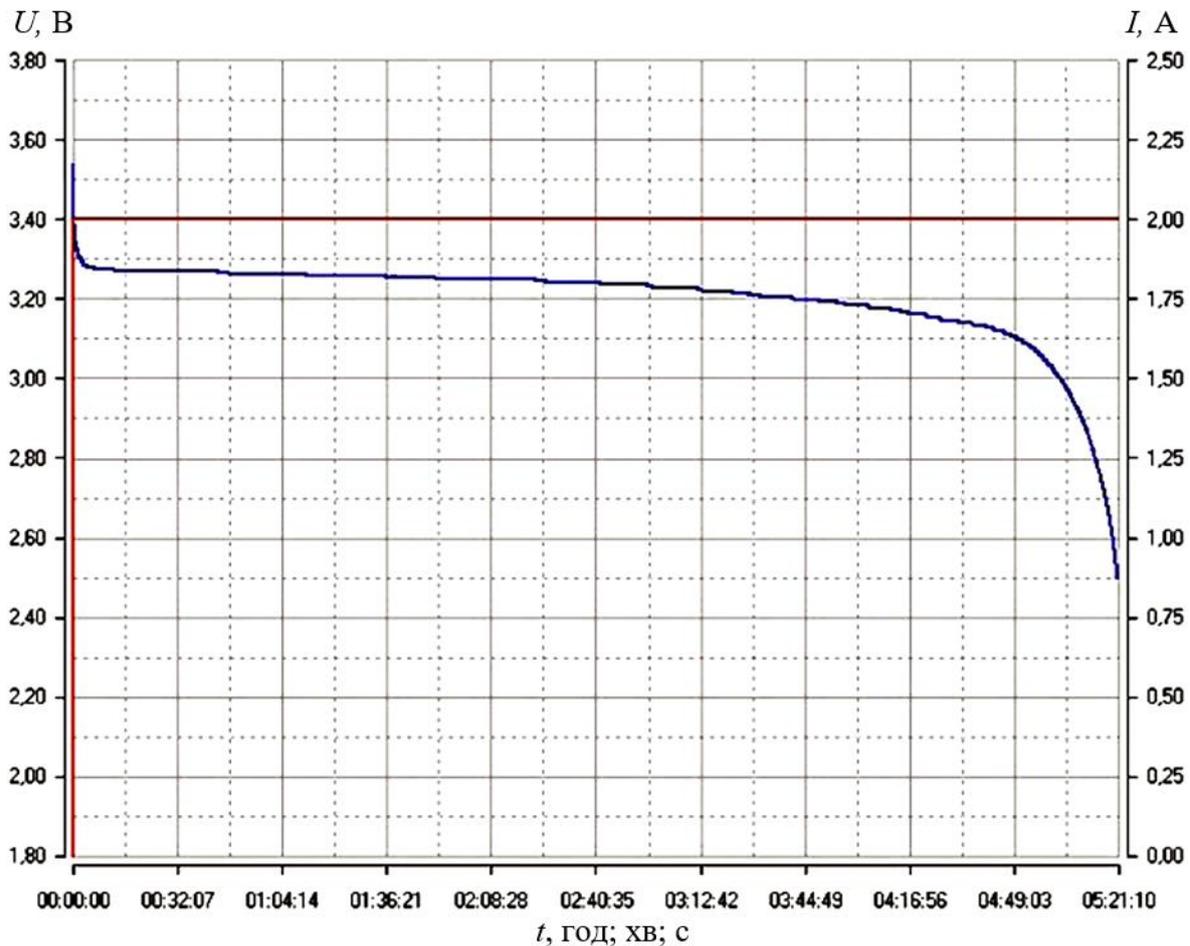


Рис. 2. Розрядна характеристика акумулятора

Зупинимось на виборі порогових напруг для завершення процесів заряду та розряду та впливі внутрішнього опору акумулятора на ці пороги. Реальна напруга завершення заряду U_{ech} буде:

$$U_{ech} = 3,65 - I_{ch} \cdot r, \quad (3)$$

де I_{ch} – струм зарядки; r – внутрішній опір акумулятора.

Оскільки:

$$I_{ch} = \frac{U_1 - U_2}{r + R},$$

де U_1 – напруга зарядного пристрою; U_2 – напруга акумулятора; R – внутрішній опір зарядного пристрою плюс опір ланцюга зарядки.

Як результат маємо:

$$U_{ech} = 3,65 - \frac{(U_1 - U_2) \cdot R}{r + R}.$$

Напруга зарядного пристрою U_1 для акумуляторної батареї, що складається з n банок, може бути обраною як 3,65n В, але її можна вибрати трохи більшою, тоді наприкінці зарядки зниження зарядного струму буде меншим, а процес зарядки прискориться.

Для порогової напруги завершення розряду однієї банки акумулятора маємо:

$$U_{ech} = 2.5 + I_d r. \quad (4)$$

Через високу швидкість зміни напруги наприкінці заряду і розряду, незначні відхилення порогової напруги у менший бік під час заряду та у більший під час розряду мало впливають на надійність відключення заряду або розряду акумулятора. Такі відхилення, викликані падінням напруги на внутрішньому опорі акумулятора при великих або малих

струмах заряду чи розряду, не створюють проблем для експлуатації акумулятора.

Внутрішній опір акумулятора невеликий і змінюється незначно під час роботи, лише наприкінці розряду він починає збільшуватись. Наприклад, експериментально вимірний внутрішній опір LiFePO_4 акумулятора типорозміру AA (14500) ємністю $0,7 \text{ А}\cdot\text{год}$ під час розряду до напруги $2,5 \text{ В}$ зріс до $0,525 \text{ Ом}$, тоді як протягом основного часу розряду він становив близько $0,38 \text{ Ом}$. Таке збільшення внутрішнього опору LiFePO_4 акумулятора також прискорює відключення навантаження системою BMS наприкінці розряду батареї.

Тепер розглянемо оптимальний, на нашу думку, підхід до балансування LiFePO_4 акумуляторних батарей. Обов'язковою вимогою є те, щоб електронні схеми BMS контролювали граничні напруги заряду та розряду кожного елемента батареї з подальшим відключенням струму заряду або розряду. Це призводить до того, що ємність батареї стає рівною ємності найменшого за ємністю елемента. Це пояснюється тим, що через всі елементи послідовно з'єднаної батареї проходить однаковий струм, і час заряду або розряду для всіх елементів однаковий. У традиційних, найбільш поширених пасивних BMS балансування здійснюється шляхом повного заряду кожного елемента батареї. Це досягається або підключенням розрядного резистора паралельно елементам, які раніше досягають повного заряду, або окремою дозарядкою елементів, що відстають.

Однак така повністю заряджена батарея при розряді може віддати тільки ту кількість електроенергії, яку здатен віддати найменший за ємністю елемент, що визначається за формулою (2), де $U(t)$ – напруга всієї батареї, а t_1 і t_2 визначаються часом роботи найменшого за ємністю елемента. Розряд до відключення при повному розряді найменшого за ємністю елемента забезпечить однакову кількість електроенергії для всіх банок батареї, оскільки через усі банки протікає однаковий струм протягом однакового часу. Після будь-якого розряду, у всіх банках буде однаковий обсяг вільного простору для заряду. Під час заряду через всі банки також протікає однаковий зарядний струм, і всі банки заряджаються одночасно під керуванням BMS.

Таким чином, максимальну ємність батареї з різною ємністю елементів можна досяг-

ти без балансування, достатньо мати BMS з функцією відключення заряду та розряду при досягненні граничних значень напруги.

При тривалому зберіганні батареї без зарядки може спостерігатися різний рівень саморозряду елементів, що призведе до видимого зниження ємності батареї, оскільки елементи з меншим саморозрядом будуть заряджатися раніше, і через це в них буде менше місця для заряду, ніж у елементів із більшим саморозрядом. Тому після тривалого зберігання, наприклад більше одного року, необхідно кожен елемент окремо або зарядити до максимальної допустимої напруги, або розрядити до мінімально допустимої напруги. Однак через те, що саморозряд у LiFePO_4 акумуляторів дуже малий, цей процес не спричиняє значних проблем.

Зазначений принцип розробки BMS спрощує її конструкцію порівняно з традиційними пасивними системами BMS. Активне балансування значно ускладнює систему BMS, підвищує її вартість і призводить до більш глибокого розряду всіх банок батареї, що зрештою скорочує термін її служби.

Практична реалізація електронного блока для бустерної батареї на основі LiFePO_4 акумуляторів

Розглянутий підхід до оптимізації BMS для LiFePO_4 акумуляторних батарей був застосований для створення електронного блока, який контролює режими заряду та розряду у бустерній батареї на основі LiFePO_4 акумуляторів. Такий бустер, що складається з чотирьох банок WB-LYP90AH ємністю $90 \text{ А}\cdot\text{год}$, підходить як для запуску бензинових і дизельних ДВЗ, так і для живлення побутових приладів під час тривалих відключень централізованого електропостачання. Враховувалось, що після повного заряду акумулятора його енергетичний запас становить $1,188 \text{ кВт}\cdot\text{год}$, тому необхідно оцінювати потужність навантаження та час його роботи.

Для підвищення надійності, захисту від перешкод та точності рекомендується вимірювати напругу кожної банки акумулятора окремо, а не розраховувати на основі напруг від загального проводу. Блок для визначення напруги на кожній банці має бути простим і містити мінімум компонентів.

На рис. 3 показана структурна схема з'єд-

нань блоків бустера:

Блок 1 – блок контролю однієї банки акумулятора;

Блок 2 – блок відключення батареї;

Блок 3 – мережевий зарядний пристрій для автомобільного акумулятора з вихідною стабілізованою напругою 14,4 В;

Інвертор, блок перетворення постійної напруги на змінну (Tataliken 12V 2500W із

синусоїдальною вихідною напругою 220 В), на рис. 3 не показаний, оскільки його вхід безпосередньо під'єднується до акумулятора короткими проводами великого перерізу за допомогою потужних затискачів.

Під час використання пристрою для запуску автомобіля інвертор і зарядний пристрій від'єднуються від бустера.

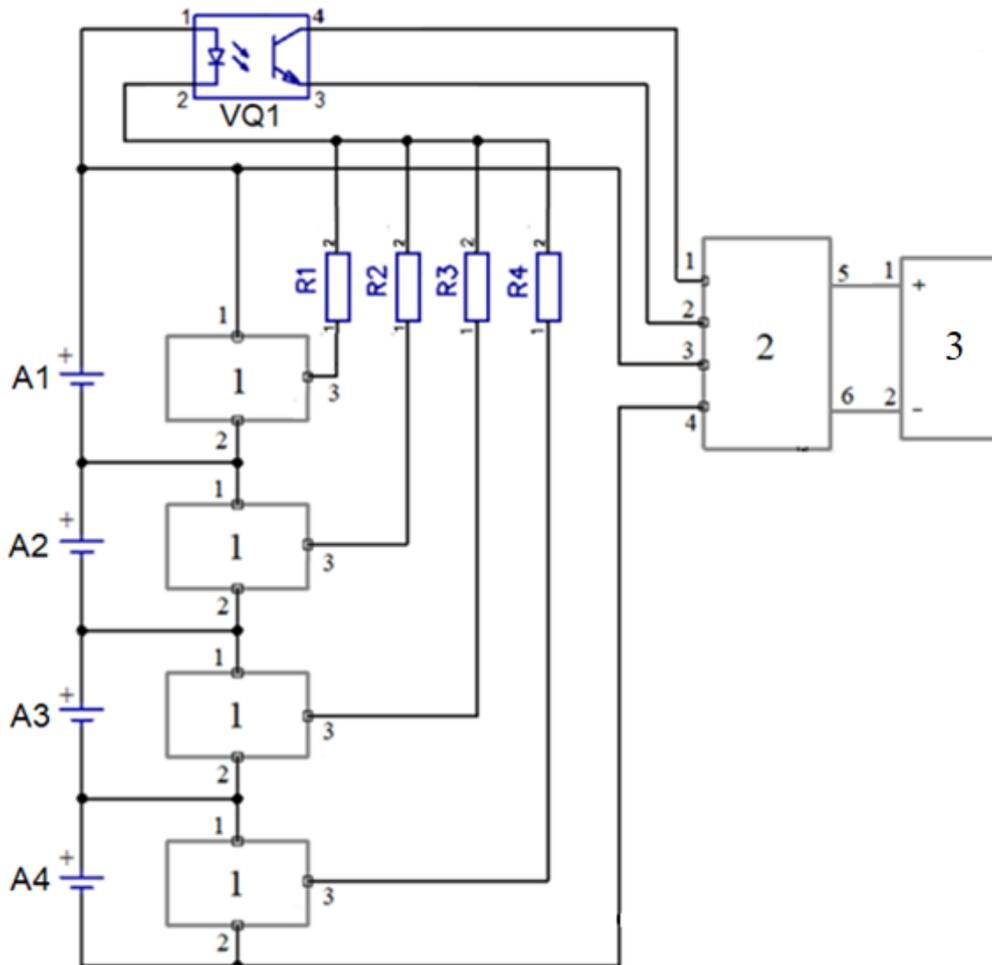


Рис. 3. Структурна схема блоків бустера

Робота пристрою в режимі зарядки акумулятора, який складається з чотирьох банок A1 – A4 (рис. 3).

Схема блока контролю однієї банки наведена на рис. 4. Ця схема забезпечує короткочасне увімкнення струму через світлодіод оптрона (VQ1 на рис. 3), як при завершенні заряду, так і при завершенні розряду.

На схемі блока 2 (рис. 5) транзистори Q1 та Q2 утворюють засувку, яку потрібно активувати натисканням на кнопку S1 перед зарядкою або розрядкою. Після цього через

обмотку реле K1 починає проходити струм. При цьому нормально розімкнуті контакти реле K1.1 замикаються, і таким чином виводи 5 і 3 блока 2 – замкнуті. Через них буде проходити струм зарядки акумулятора (рис. 3).

Перед завершенням зарядки напруга на банці досягає 3,6 – 3,65 В, а через дільник на R5, R6, R7 (рис. 4) напруга досягає рівня пробою червоного світлодіода D2, який працює як стабілітрон. Це призводить до відкриття транзистора Q3.

Струм транзистора Q3 через гальванічну

розв'язку на оптроні VQ1 передає сигнал на блок 2 (рис. 3), де через відкритий транзистор оптрона проходить струм, що відкриває транзистор Q1 (рис. 5). Транзистор Q1 шун-

тує емітерний перехід транзистора Q2, що призводить до знеструмлення обмотки реле і відключення зарядки.

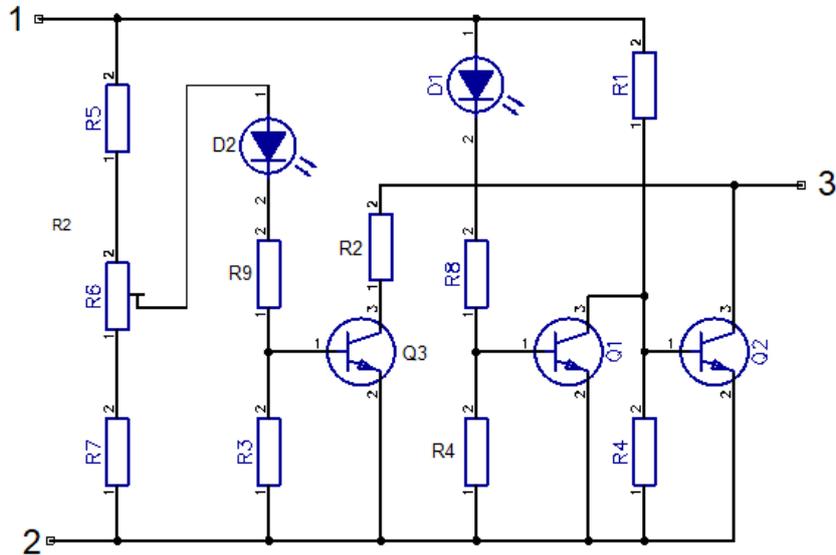


Рис. 4. Блок контролю однієї банки акумулятора: U1 – TL431; R1 – 2 кОм; R2 – 55-220 Ом; R3 = R4 – 10 кОм; R5 – 3 кОм; R6 – 5 кОм; R7 – 4,7 кОм; R8=R9 – 10 кОм; D1, D2 – червоний світлодіод

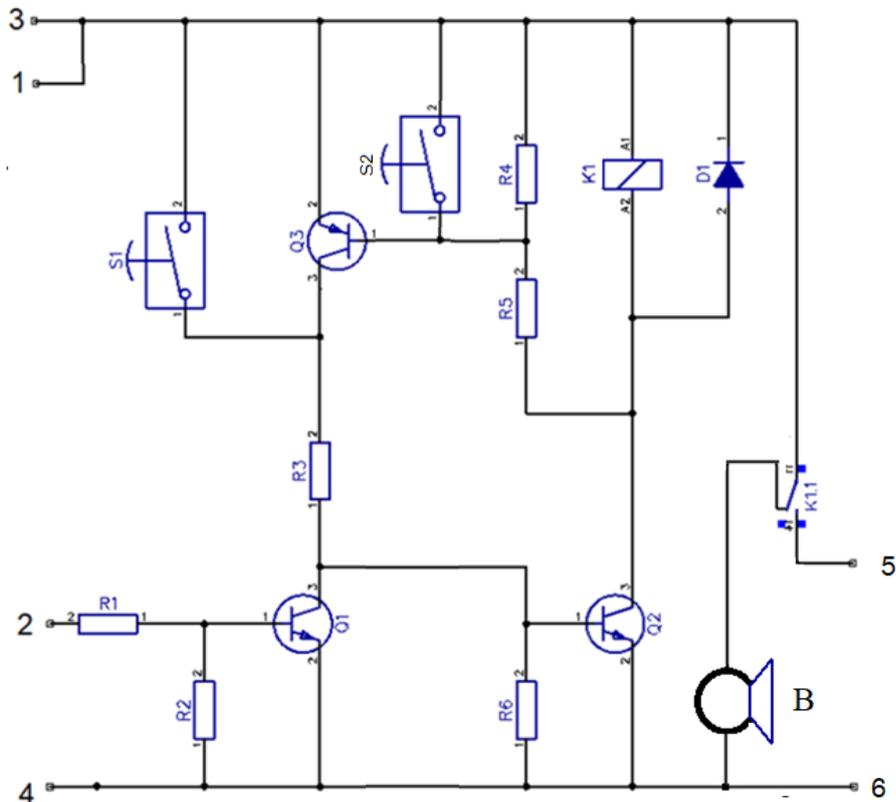


Рис. 5. Блок вимикання батареї. Q1 – BC 547C; Q2 – BC 547C; Q3 – BC 557C; R1 – 10 кОм; R2 – 10 кОм; R3 – 2 кОм; R4 – 2 кОм; R5 – 2 кОм; R6 – 2 кОм; K1 – реле 12В,10А; D1 – 1N4007; S1 – кнопка set; S2 – кнопка reset; B – буюер 12 В

У разі необхідності підключення інвертора його приєднують безпосередньо до клем акумулятора і лише після цього вмикають інвертор його штатним вимикачем. Така процедура потрібна, оскільки клеми інвертора на 12 В з'єднані з конденсаторами великої ємності, які не комутуються вимикачем інвертора. Це зроблено для того, щоб запобігти високому струмовому навантаженню при зарядці конденсаторів від акумулятора з низьким внутрішнім опором, яке може перевищити допустимий струм для контактів вимикача.

Під час розряду акумулятора в блоці контролю однієї банки напруга поступово знижується. Коли струм через червоний світлодіод D1, який використовується як стабілітрон, і емітерний перехід транзистора Q1 починає різко зменшуватися, транзистор Q1 перестає шунтувати емітерний перехід транзистора Q2. Транзистор Q2 починає проводити струм через один із резисторів R1 – R4 (рис. 3) через світлодіод оптрона VQ1. Опір резисторів R1 – R4 (рис. 3) вибрано таким чином, щоб струм був приблизно 20 мА. Враховано, що струм через конкретний резистор залежить від кількості банок із напругою 2,5 В, які забезпечують цей струм. Для того, щоб струм через світлодіод оптрона VQ1 був близько 20 мА, і для забезпечення відключення зарядки при напрузі банок приблизно 3,6 В, вибирається резистор R2 у блоці контролю однієї банки акумулятора (рис. 4).

При граничному розряді однієї з банок акумуляторної батареї струм через світлодіод оптрона VQ1 також призводить до переключення контактів реле K1.1 і подачі звукового сигналу бузером В (рис. 5). Цей сигнал вказує на необхідність відключення розряду батареї. Звуковий сигнал відключають натисканням на кнопку S2 (рис. 5).

Висновки

У ході виконання поставлених задач було розроблено та протестовано систему управління літій-залізо-фосфатними (LiFePO₄) акумуляторними батареями, яка дозволяє ефективно контролювати режими заряду та розряду, зберігаючи надійність та тривалий термін служби батарей. Було проаналізовано критичні параметри експлуатації акумуляторів, такі як напруга, струм і температура, що

дозволило запобігти пошкодженням батарей та забезпечити їхню безпечну роботу.

Розроблена система управління батареями (BMS) оптимізує процеси заряду і балансування акумуляторних банок, що сприяло значному скороченню часу заряду і підвищенню ефективності роботи системи. Особливо досліджено вплив внутрішнього опору акумуляторів на процеси заряду та розряду, що дозволило вдосконалити алгоритми балансування батарей для підвищення їхньої надійності та продовження терміну служби.

Експериментальні випробування підтвердили ефективність розробленої системи, зокрема її здатність забезпечувати стабільну роботу акумуляторів навіть в умовах значних навантажень. Це свідчить про те, що запропонована система управління батареями має високий потенціал для впровадження в практичних застосуваннях, особливо в умовах, що потребують надійного і швидкого живлення.

Таким чином, розроблена система управління літій-залізо-фосфатними акумуляторами забезпечує не тільки покращену ефективність і надійність, але й може стати основою для подальшого вдосконалення енергетичних систем у транспортній галузі та інших сферах, що використовують подібні джерела живлення.

Конфлікт інтересів

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

Література

1. Uchendu, I., Xiao, T., Lu, Y., Zhu, B., Yan, M., Simon, J., Bennice, M., Fu, C., Ma, C., & Jiao, J. (2023). Jump-start reinforcement learning. *International Conference on Machine Learning*, 34556–34583. <https://proceedings.mlr.press/v202/uchendu23a.html>
2. Prudius, T. Y., Gutsol, A. V., Gutsol, N. V., & Mysenko, O. O. (2021). Globigen Jump Start usage as a replacer for blood plasma in prestarter feed for piglets. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Agricultural Sciences*, 23(94), 111–116. doi: 10.32718/nvlvet-a9420
3. Torrealba, J. (2020). *Autonomous cell-based LiFePO₄ battery management system for solar photovoltaic applications*. <https://islandscholar.ca/islandora/object/ir%3A23559/datastream/PDF/view>

4. Roviato, E., Khairunnisa, B. W. L., Fardan, M. F., Harsito, C., & Prasetyo, A. (2024). Balancing the charge: The evolution of battery active equalizers in shaping a sustainable energy storage future. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, 15(3), 1687–1710.
 5. Arhun, S., Hnatov, A., Hnatova, H., Patlins, A., & Kunicina, N. (2020). *Problems that have arisen in universities in connection with COVID-19 on the example of the Double Degree Master's Program "Electric Vehicles and Energy-Saving Technologies."* 1–6. <https://doi.org/10.1109/RTUCON51174.2020.9316601>
 6. Bogajevskiy, A., Arhun, S., Hnatov, A., Dvadnenko, V., Kunicina, N., & Patlins, A. (2019, October 7). Selection of Methods for Modernizing the Regulator of the Rotation Frequency of Locomotive Diesels. *2019 IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*. <https://doi.org/10.1109/RTUCON48111.2019.8982347>
 7. Arhun, S., Borodenko, Y., Hnatov, A., Popova, A., Hnatova, H., Kunicina, N., Ziravecka, A., Zabasta, A., & Ribickis, L. (2020). Choice of Parameters for the Electrodrive Diagnostic System of Hybrid Vehicle Traction. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 57(4), 3–11. <https://doi.org/10.2478/lpts-2020-0017>
 8. Borodenko, Y., Ribickis, L., Zabasta, A., Arhun, S., Kunicina, N., Zhiravetska, A., Hnatova, H., Hnatov, A., Patlins, A., & Kunicins, K. (2020). Using the method of the spectral analysis in diagnostics of electrical process of propulsion systems power supply in electric car. *Przeglad Elektrotechniczny*, 96(10), 47–50. <https://doi.org/10.15199/48.2020.10.08>
 9. Hnatov, A., Arhun, S., Dziubenko, O., & Ponikarovska, S. (2018). Choice of electric engines connection circuits in electric machine unit of electric power generation device. *Majlesi Journal of Electrical Engineering*, 12(4), 85–93.
 10. Hnatov, A., Patlins, A., Arhun, S., Kunicina, N., Hnatova, H., Ulianets, O., & Romanovs, A. (2020). Development of an unified energy-efficient system for urban transport. *2020 6th IEEE International Energy Conference (ENERGYCon)*, 248–253. <https://doi.org/10.1109/ENERGYCon48941.2020.9236606>
 11. Patlins, A., Hnatov, A., & Arhun, S. (2018). *Using of green energy from sustainable pavement plates for lighting bikeways. 2018-Octob-3–5*, 574–579. <https://ortus.rtu.lv/science/en/publications/27845>
 12. Klets, D., Gritsuk, I. V., Makovetskyi, A., Bulgakov, N., Podrigalo, M., Kyrychenko, I., Volska, O., & Kyzminec, N. (2018). Information Security Risk Management of Vehicles. *SAE Technical Papers*, 2018-April. Scopus. <https://doi.org/10.4271/2018-01-0015>
 13. König, A., Nicoletti, L., Schröder, D., Wolff, S., Waclaw, A., & Lienkamp, M. (2021). An Overview of Parameter and Cost for Battery Electric Vehicles. *World Electric Vehicle Journal*, 12(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/wevj12010021>
 14. Thangavel, S., Mohanraj, D., Girijaprasanna, T., Raju, S., Dhanamjayulu, C., & Muyeen, S. M. (2023). A Comprehensive Review on Electric Vehicle: Battery Management System, Charging Station, Traction Motors. *IEEE Access*, 11, 20994–21019. IEEE Access. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3250221>
 15. Tran, M.-K., DaCosta, A., Mevawalla, A., Panchal, S., & Fowler, M. (2021). Comparative study of equivalent circuit models performance in four common lithium-ion batteries: LFP, NMC, LMO, NCA. *Batteries*, 7(3), 51. doi: 10.3390/batteries7030051
 16. Wang, Y., Tian, J., Sun, Z., Wang, L., Xu, R., Li, M., & Chen, Z. (2020). A comprehensive review of battery modeling and state estimation approaches for advanced battery management systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131, 110015.
 17. Gabbar, H. A., Othman, A. M., & Abdussami, M. R. (2021). Review of battery management systems (BMS) development and industrial standards. *Technologies*, 9(2), 28.
 18. *Приспій для автомобіля PowerMe Jump Starter (PWM-JS1000)—BERI.UA. Інтернет-магазин.* (2024, June 5). Prystrii dlia avtomobilia PowerMe Jump Starter (PWM-JS1000)—BERI.UA [Device for the car PowerMe Jump Starter (PWM-JS1000)—BERI.UA]. Internet-mahazyn. (2024, June 5). <https://beri.ua/puskovoe-ustroistvo-dlia-avtomobilya-powerme-jump-starter-pwm-js1000/> [in Ukrainian]
- 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>
- Двадненко Владимир Яковлевич**¹, д.т.н., проф. каф. автомобільної електроніки, тел. +38 067-733-04-41, dvadnenkovladimir@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6634-343>
- Гнатів 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>
- ¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

Optimized control system for a booster lithium-iron-phosphate battery

Abstract. Problem. Conventional lead-acid batteries suffer from significant limitations such as low energy density, reduced reliability over time, and inefficiency under challenging conditions like low temperatures and deep discharge. These limitations highlight the necessity of more efficient, lightweight, and durable alternatives for applications like starting internal combustion engines (ICE) and providing backup power. **Methodology.** This research focuses on designing and testing an optimized battery management system (BMS) for lithium-iron-phosphate (LiFePO₄) batteries. Key performance parameters, including voltage, current, and temperature, were analyzed. An advanced electronic control unit was developed to regulate charging and discharging processes, with a focus on internal resistance management and cell balancing. Experimental validation was performed under various conditions, including low temperatures and heavy loads, to ensure robust performance. **Results.** The developed system demonstrated superior reliability, reduced charging times, and longer lifespan compared to conventional batteries. The optimized BMS ensured stable energy output, effectively balancing the charge and managing internal resistance. This system provided consistent performance even under extreme conditions, making it more cost-effective and durable. **Originality.** This study introduces a novel approach to controlling LiFePO₄ battery systems using advanced BMS technology, addressing specific challenges in ICE startups and auxiliary power applications. It

integrates enhanced temperature management, internal resistance monitoring, and charge balancing, providing a tailored solution for demanding environments. **Practical value.** The findings have practical implications for improving energy efficiency and reliability in automotive and other industries. The enhanced performance and extended lifespan of LiFePO₄ batteries make them ideal for critical applications, such as renewable energy storage and backup power systems, supporting the broader adoption of sustainable energy technologies.

Key words: lithium-iron-phosphate batteries; battery management system; optimization of charging and discharging processes; reliability of battery systems, stable power supply.

Arhun Shchasiana¹, professor, Doct. of Science, Vehicle Electronics Department, tel. +38 0993780451, shasyana@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6098-8661>

Dvadnenko Vladimir¹, professor, Doct. of Science, Vehicle Electronics Department, e-mail: dvadnenkovladimir@gmail.com, tel. +38 067-733-04-41, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6634-3431>

Hnatov Andrii¹, professor, Doct. of Science, Head of Vehicle Electronics Department, tel. +38 0667430887, kalifus76@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0932-8849>

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