

Дослідження акумуляторних блоків електромобілів та зарядних станцій на основі активного трифазного випрямляча струму

Багач Р. В.¹

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна

Анотація. У статті розглядаються дослідження тягових акумуляторів і систем зарядки електромобілів. Наведено порівняльний аналіз характеристик Li-Ion, Li-Fe-PO₄ і Li-Ti акумуляторів. Як перетворювачі для зарядних станцій електромобілів у статті пропонується використовувати активні випрямлячі для джерел напруги та активні випрямлячі для джерел струму. З використанням Matlab/Simulink розроблено модель зарядної станції, що містить активний випрямляч для джерела струму з номінальною потужністю 240 кВт. Ця станція заряджає батарею ємністю 60 кВт/год, що містить накопичену енергію. У статті також окреслено перехідні процеси перетворювача та спектр вищих гармонік вхідного струму.

Ключові слова: зарядні станції для електромобілів, випрямляч джерела напруги, випрямлячі джерела струму, літій-іонні акумулятори, літій-залізо-фосфатні акумулятори, літій-титанові акумулятори.

Вступ

На тлі стрімкого зростання вартості бензину, а також зниження вартості літєвих тягових акумуляторних батарей, спостерігається подальша тенденція переходу автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння на електромобілі. В даний час кількість електромобілів становлять приблизно 12% від загальної кількості в Європі та 20% у Китаї, і їх кількість продовжує зростати, що підтверджує актуальність представленого дослідження [1, 2]. Для подальшого розвитку електромобілів актуальними є розробка та вдосконалення енергетичних показників акумуляторів електромобілів, а також перетворювачів зарядних станцій електромобілів, які забезпечують можливість забезпечення режиму швидкої зарядки. У кожному з цих напрямків спостерігається активний розвиток [3-6].

Аналіз публікацій

З ростом кількості електромобілів важливим питанням є створення енергоефективних зарядних станцій. До зарядних станцій електромобілів висуваються вимоги за наступни-

ми показниками: можливість режиму швидкої зарядки, ККД, коефіцієнт потужності, можливість двонаправленої передачі електроенергії, рівень емісії вищих гармонік та інші показники електромагнітної сумісності [7-9].

Задачею дослідників є створення зарядних станцій, які б дозволили забезпечити низький рівень втрат потужності в перетворювачі зарядної станції, забезпечили вимоги електромагнітної сумісності та змогли б при цьому забезпечити режим швидкого заряду. Таким чином питанням покращення параметрів енергоефективності перетворювачів зарядних станцій електромобілів, а саме підвищення ККД, зниження рівня вищих гармонік струмів та реалізація режиму швидкого заряду тягових акумуляторних батарей електромобілів є актуальним.

Вивченню питань, пов'язаних з якістю електричної енергії та енергоефективності зарядних станцій для електромобілів, присвячені роботи українських та закордонних науковців.

В роботі [10] запропоновано схему зарядної станції електромобілів, що працює від

трифазної електричної мережі змінного струму на базі трифазного трирівневого активного випрямляча напруги в режимі корекції коефіцієнту потужності. Варто зазначити, що перевагою запропонованого технічного рішення є можливість забезпечення режиму формування синусоїдальної форми вхідного струму з коефіцієнтом потужності близьким до одиниці. Проте суттєвим недоліком запропонованого рішення є необхідність використання схеми трирівневого активного випрямляча, яка вимагає збільшеної кількості силових транзисторів та діодів, що відповідно зумовлює більш високу вартість перетворювача зарядної станції та більші сумарні втрати потужності в перетворювачі.

В роботах [11, 12] представлено схожі дослідження бортових зарядних перетворювачів літій-іонних акумуляторів електромобілів, що живляться від трифазної електричної мережі на базі трифазного випрямляча з послідовним з'єднанням LLC резонансного перетворювача [11], або повномостового LLC резонансного перетворювача [12]. Представлені технічні рішення дозволяють забезпечити вимоги електромагнітної сумісності перетворювачів зарядних станцій та живлячих трифазних мереж, проте мають спільний суттєвий недолік, а саме необхідність багатоступінчатого перетворення електроенергії за принциповою схемою «активний випрямляч-високочастотний інвертор-високочастотний трансформатор-випрямляч». Недоліком такого технічного рішення є досить високі втрати потужності і досить низький ККД перетворювальної системи.

Перетворювач зарядної станції електромобілів також може бути реалізовано на базі трифазних діодних, або тиристорних випрямлячів. У такому випадку для поліпшення електромагнітної сумісності системи зарядної станції для електромобілів з суміжними електроустановками та підвищення якості енергії живлення зарядної станції для електромобілів можливе використання систем, як пасивної, так і активної фільтрації [13, 14]. Недоліком такого технічного рішення, є також необхідність застосування додаткового перетворювача, а саме паралельного тrefазного силового активного фільтра в складі зарядної станції, що підвищить якість електричної енергії, але збільшить втрати потужності та знизить ККД системи заряду.

В роботах [15-17] представлено дослі-

дження параметрів акумуляторних блоків електромобілів, виконаних на базі суперконденсаторів, літій-іонних батарей, свинцево-кислотний акумуляторів та паливних елементів. Недоліком даних досліджень є відсутність дослідження більш перспективних типів літійєвих акумуляторів, а саме літій-залізо-полімерних та літій-титанових акумуляторів, які мають значно більшу кількість циклів заряду-розряду, що суттєво збільшує їх довговічність та значно більші величини робочих струмів, ніж літій-іонні акумулятори, внаслідок чого на їх базі можна реалізувати режими надшвидкої зарядки.

Таким чином в дослідженнях було обрано напрямок вирішення проблеми підвищення енергоефективності системи зарядної станції електромобілів шляхом використання активних випрямлячів з режимами активної корекції коефіцієнта потужності та оптимального налаштування.

Данні дослідження проведені на кафедрі «Автомобільної електроніки» Харківського національного автомобільно-дорожнього університету відповідно до держбюджетної науково-дослідної роботи «Дослідження прогресивних технологій для автомобільного транспорту», виконаної у 2022-2023 рр. та науково-дослідної роботи «Розробка комбінованої енергетичної установки на базі пневмодвигуна з використанням поновлювальних джерел енергії для міського автотранспорту» (№ ДРН 0121U109611), 2022 р.

Мета та постановка задачі

Метою роботи є провести порівняльний аналіз різних типів тягових акумуляторних батарей для електромобілів на прикладі автомобілів TESLA: приводиться порівняльна характеристика літій-іонних, літій-залізо-фосфатних та літій-титанових акумуляторів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- теоретичне обґрунтування перспективності застосування літій-залізо-фосфатних та літій-титанових акумуляторів;
- перетворювачів зарядних станцій електромобілів, а саме трифазних активного випрямляча джерела напруги та активного випрямляча джерела струму;
- дослідження схеми чотириквadrантних випрямлячів зарядних станцій;
- моделювання зарядних станцій елект-

ромобілів на базі випрямляча джерела напруги та випрямляча джерела струму.

Літєві акумулятори електромобілів

Режими роботи перетворювачів зарядних станцій визначаються необхідними режимами зарядки тягових акумуляторів електромобілів. Більшість електромобілів використовують літій-іонні, літій-залізо-фосфатні та літій-титанатні акумулятори. Ці типи тягових

акумуляторів істотно відрізняються за кількістю циклів заряд-розряд, максимальним зарядним струмом і різним рівнем деградації ємності при мінусовій температурі. Порівняння характеристик тягових акумуляторів проводилось за такими типами акумуляторів: літій-іонний акумулятор NCR18650 [18], Li-Fe-PO₄ [19], Li-Ti [20]. Порівняльні характеристики цих літєвих акумуляторів представлені в таблиці 1.

Таблиця 1–Характеристики літєвих акумуляторів

Параметр	Li-Ion	Li-Fe-PO ₄	Li-Ti
Ємність одного акумулятора	3,35 А·год	1,6 А·год	40 А·год
Потужність одного акумулятора	12 Вт	5,12 Вт	112 Вт
Вага одного акумулятора	41 г	49 г	1кг
Кількість робочих циклів при деградації ємності до 80% від початкової	300	3900	30 000
Питома щільність енергії батареї до об'єму	676 Wh/L	220 Wh/L	176 Wh/L
Питома щільність енергії батареї до її маси	248 Wh/kg	124 Wh/kg	89 Wh/kg
Рекомендований струм заряду розряду	0,5С	1С	5С
Максимальний тривалий струм заряду	2С	1С	10С
Максимальний тривалий струм розряду	2С	3С	10С
Внутрішній опір однієї батареї	≤37 мОм	≤40 мОм	≤1 мОм
Деградація ємності батареї при температурі -20С	55% rated capacity	50% rated capacity	80% rated capacity

Крім того, різні типи літєвих акумуляторів мають різну інтенсивність падіння напруги при розряді. Зарядна характеристика Li-Ion, Li-Fe-PO₄ і Li-Ti акумуляторів представлена на рис. 1.

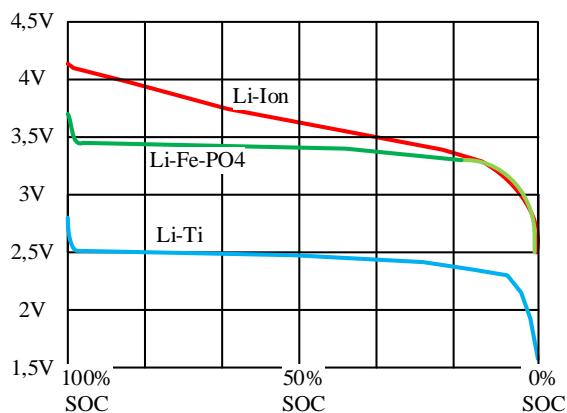


Рис. 1. Залежність напруги батареї від стану заряду (SOC)

Як видно з рис. 1, найбільш плоскі характеристики можна знайти у літій-залізо-

фосфатних і літій-титанатних акумуляторів, так що протягом години після розряду напруга на них буде знижуватися на нижчому рівні.

З порівняльного аналізу можна зробити наступні висновки:

- літій-іонні акумулятори мають найкращі показники питомої потужності, проте вони не мають можливості працювати з великими струмами більше 3С, мають досить погані показники деградації ємності при мінусових температурах та мають досить невелику кількість робочих циклів. Крім того під час їх розряду спостерігається стрімке зниження напруги. Крім того літій-іонні акумулятори мають дуже низькі показники внутрішнього опору, внаслідок чого внутрішні втрати потужності в них є найменшими;

- літій-титанатні акумулятори мають найкращі показники за величинами струмів заряду/розряду, які мають значення більше 10С та мають найкращі показники кількості робочих циклів які складають більше 30000;

– літій-залізо-фосфатні акумулятори мають проміжні показники, проте мають досить високу кількість циклів заряду-розряду, напруга на батареї під час розряду знижується не так стрімко, як у літій-іонних акумуляторів. При цьому вони є суттєво дешевшими за літій-титаннатні акумулятори і з урахування техніко-економічних показників є досить цікавими рішенням.

З огляду розглянутих характеристик, для застосування в блоках електромобілів літій-іонні акумулятори мають занадто малу кількість циклів заряду-розряду, яка не дає змоги реалізації бажаного терміну експлуатації електромобіля 10-12 років. Таким чином батарейний відсік літій-іонного акумулятора за цей термін треба буде міняти 3-4 рази. Цей тип акумуляторів застосовується в Tesla Model S.

Літій-залізо-фосфатні акумулятори мають більше 3900 циклів заряду-розряду, що дасть змогу працювати електромобілю з цим типом акумуляторів близько 10 років (при умові розряду батареї за одну добу). У той же час вони дають можливість досить швидкого режиму заряду батареї (повний заряд до 20 хв).

Найкращим типом тягових акумуляторів з погляду мінімізації часу заряду електромобіля (до 10 хв) та найбільшої кількості циклів заряду батареї є літій-титаннатні акумулятори. Також вони підходять для застосування, що зумовлено десятиліттям роботи батарей.

Зазначені характеристики літєвих акумуляторів є досить різними, проте у той же час принципово для цих типів тягових акумуляторних батарей використовуються однотипний тип заряду «постійний струм – постійна напруга».

Режим заряду постійний «постійний струм – постійна напруга» зумовлює алгоритм, при якому батарея спочатку заряджається постійним струмом. В ході заряду напруга на батарейному блоці зростає. Після досягнення напруги батареї її зарядженого значення, перетворювач переходить в режим джерела постійної напруги, під час якого струм заряду прямує до нуля, що зображено на рис. 2.

Таким чином зарядний перетворювач повинен мати можливість регулювання вихідного струму та можливість підтримання постійної напруги.

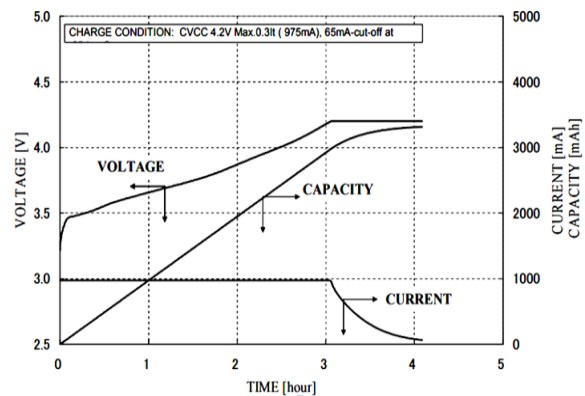


Рис. 2. Режим заряду «постійний струм – постійна напруга»

Активний опір блоку акумуляторних батарей

Розглянемо опір навантаження блоку літій-іонних акумуляторів на прикладі блоку акумуляторних батарей Tesla Model S та літій-залізо-фосфатних батарей Tesla Model S

Батарейний відсік в автомобілі Tesla Model S має ємність 85 кВт·год та складається з 7104 елементів літій-іонних батарей виробництва компанії Panasonic типу NCR18650b. Схему заміщення блоку акумуляторних батарей електромобіля Tesla Model S зображено на рис. 3.

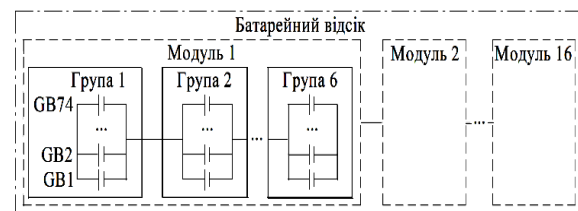


Рис. 3. Схема заміщення блоку акумуляторних батарей електромобіля Tesla Model S

У батарейному відсіку 74 окремі батареї типу NCR-18650b з'єднуються паралельно у групи, 6 послідовних груп з'єднані в модулі, а 16 послідовних модулів і складають повний батарейний відсік електромобіля. Виходячи з того, що внутрішній середній опір одного акумулятора $R_{NCR} = 37 \text{ мОм}$ еквівалентний опору батарейного відсіку $R_{bat} = 48 \text{ мОм}$.

Відповідно при застосування літій-залізо-фосфатних чи літій-титаннатних батарей, активний опір батарейного відсіку буде ще меншим.

Таким чином блок літій-іонних акумуляторів може бути змодельованим, як протиповний ЕРС напруги батареї, яка залежить від величини заряду, та активного опору навантаження. При чому напруга блоку акумулятор-

них батарей в зарядженому режимі складає 400 В, а в повністю розрядженому 240 В.

Варто зазначити, що навіть в одній партії тягові акумуляторні батареї можуть мати досить суттєвий розкид параметрів. Таким чином за умови наявності в батарейному відсіку великої кількості окремих акумуляторів необхідно застосування системи балансування напруг в окремих батареї та їх групах [21, 22].

Схеми чотириквadrантних випрямлячів зарядних станцій

Запропоновано реалізацію режиму заряду акумуляторного блоку «постійний струм-постійна напруга» за схемами трифазного дворівневого активного випрямляча джерела напруги та трифазного дворівневого активного випрямляча джерела струму, схеми яких представлені на рис. 4.

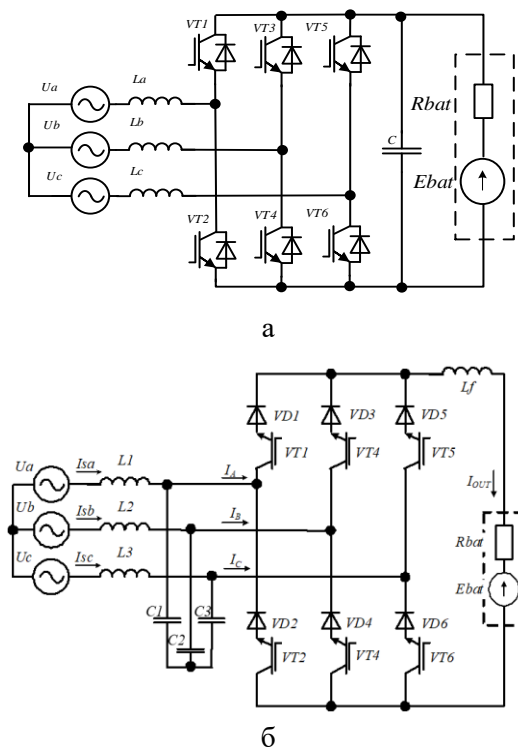


Рис. 4. Схеми перетворювачів зарядних станцій електромобілів: а – активний випрямляч джерела напруги; б – активний випрямляч джерела струму

В активному випрямлячі джерела струму при умові невеликого рівня напруги в ланці постійного струму, яка для деяких моделей зарядних станцій електромобілів складає 400 В (Tesla supercharger V3), діоди в схемі

можуть не застосовуватись.

Перевагою цих перетворювачів у порівнянні з класичними тиристорними випрямлячами є можливість роботи з коефіцієнтом потужності близьким до одиниці, формування синусоїдального вхідного струму, що відповідає вимогам електромагнітної сумісності, а саме рівня емісії вищих гармонік вхідного струму, а також можливість реалізації двосторонньої передачі електроенергії [23-24]. Завдяки даному функціоналу перетворювачі зарядних станцій можуть передавати енергію від акумуляторних батарей до трифазної електричної мережі, що відповідає тенденції створення інтелектуальних систем електропостачання [23].

Активний випрямляч – джерело напруги

Активний випрямляч джерела напруги є підвищуючим випрямлячем. Тобто для реалізації режиму корекції потужності та формування синусоїдального вхідного струму амплітуда вхідної лінійної напруги перетворювача має бути нижчою за вихідну напругу перетворювача [24]. Таким чином, при умові, що напруга розрядженого блоку акумуляторних батарей складає 240 В і під час заряду зростає до величини 400 В, величина середньоквадратичного значення вхідної фазної напруги активного випрямляча напруги має складати 100 В. Таким чином для випрямляча джерела напруги в застосуванні зарядного перетворювача обов'язковим є застосування вхідного понижуючого трансформатора.

Таким чином, вимогою для активного випрямляча джерела напруги є необхідність живлення досить низьким рівнем вхідної напруги і відповідно досить високої величини вхідного струму, що зумовлює велике навантаження на мережу та великі втрати потужності в силових транзисторах.

Активний випрямляч - джерело струму

Активний випрямляч джерела струму є понижуючим перетворювачем, що зумовлює можливість живлення перетворювача більш високою напругою і відповідно меншими споживаними з мережі струмами [25]. Крім цього випрямлячі струму та випрямлячі напруги мають суттєві різниці при побудові систем керування та алгоритмів просторово-векторної модуляції.

Алгоритми розрахунку просторових век-

торів в просторово-векторній модуляції є дія та можливі комутаційні стани є різними. Вектори напруги та просторові значення векторів активного випрямляча напруги та активного випрямляча струму представлені на рис. 5.

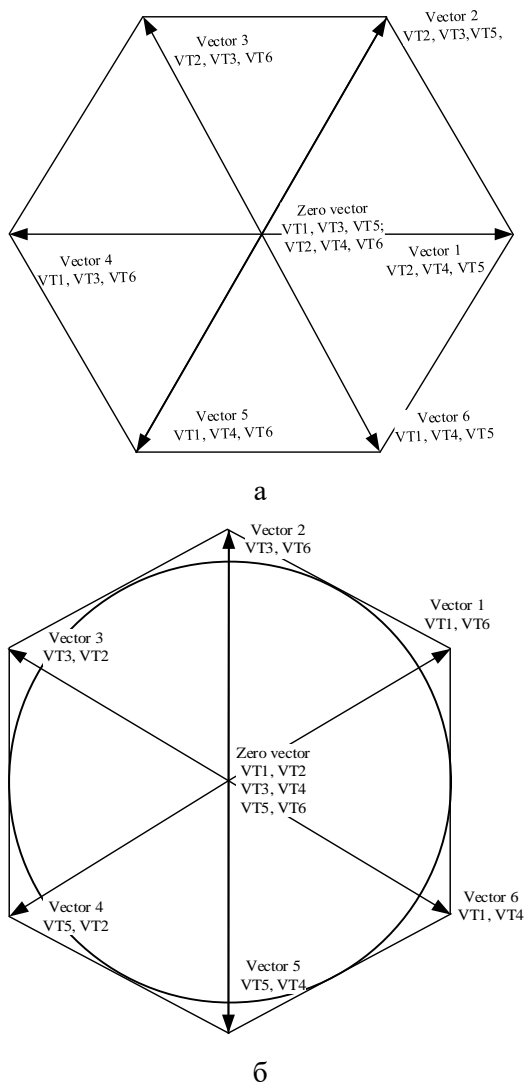


Рис. 5. Базові просторові вектори в системі керування перетворювачів: а – активний трифазний випрямляч джерело напруги; б – активний трифазний випрямляч джерело струму

Як видно з рис. 5, вектори просторово-векторної модуляції зумовлюють різні комутаційні стани силових транзисторів активних випрямлячів. Це пов'язано з тим, що, на відміну від випрямляча джерела активної напруги, випрямляч джерела активного струму дозволяє включати тільки два силових транзистора на кожен вектор, що може призвести до менших втрат потужності.

Моделювання зарядних станцій електромобілів на базі випрямляча джерела напруги та випрямляча джерела струму

Для визначення характеристик перетворювачів зарядних станцій електромобілів на основі активного випрямляча струму та активного випрямляча напруги було розроблено моделі відповідних перетворювачів в Matlab / Simulink.

Розроблені моделі відповідають потужності зарядних станцій електромобілів Tesla Supercharger V3 з потужністю 240 кВт та вихідною напругою в режимі постійна напруга 400 В. Параметри моделі наведено у таблиці 2, а сама модель представлена на рис. 6.

Matlab модель зарядної станції електромобілів складається з наступних елементів:

- субмодель трифазної мережі електропостачання 380В;
- блоку вимірювачів миттєвих значень вхідних струмів та напруг перетворювача зарядної станції;
- вхідного LC-фільтру перетворювача зарядної станції;
- трифазного мостового активного випрямляча струму;
- вихідного індуктивного фільтру;
- еквівалентного навантаження зарядної станції;
- активного опору блоку акумуляторних батарей та напруги заряду батарей, яка залежить від поточного значення заряду;
- системи керування перетворювача зарядної станції;
- субблоку розрахунку коефіцієнта потужності зарядної станції та коефіцієнта гармонійних спотворень вхідного струму.

Таблиця 2 – Параметри моделі Matlab зарядної станції електромобіля

Параметр	Значення
Вхідна напруга (змінна)	3x380 В
Індуктивність вхідного фільтра	1 мГн
Ємність вхідного фільтра	500 мкФ
Частота ШІМ	1000 Гц
Індуктивність вихідного фільтра	2 мГн
Опір навантажень	20 мОм
Ємність акумулятора	60 кВт·год
Потужність швидкої зарядки	240 кВт
Номінальна напруга акумулятора	340 В
Максимальна напруга акумулятора	400 В

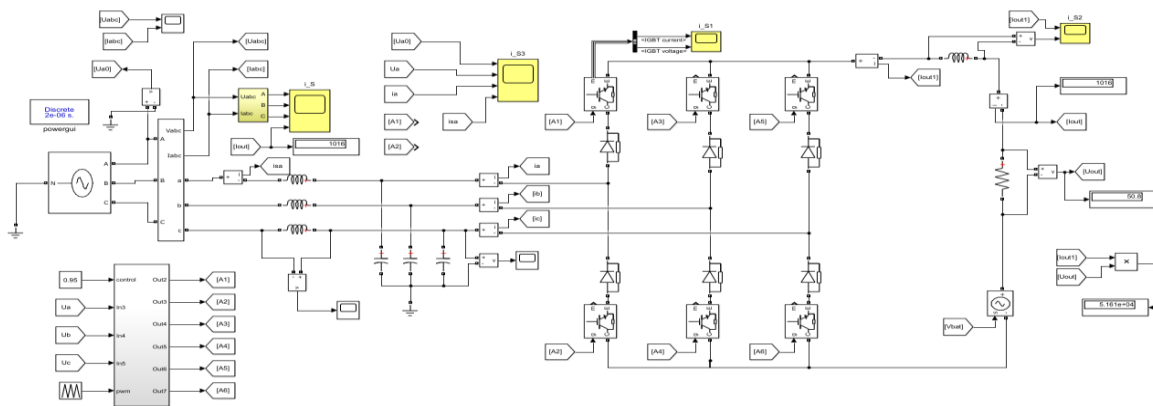


Рис. 6. Matlab модель зарядної станції електромобілів на базі трифазного активного випрямляча джерела струму

Субмодель тягової акумуляторної батареї «активний опір та напруга батареї, що залежить від заряду»

Подальшим напрямом досліджень є порівняльний аналіз втрат потужності випрямляча джерела струму та випрямляча і джерела напруги. Крім цього, цікавими є дослідження, що спрямовані на створення силового активного фільтра на базі активного випрямляча джерела струму. Форма вхідного струму та вхідної напруги зарядної станції в трьох фазах та форма вихідного струму під час заряду представлена на рис. 7.

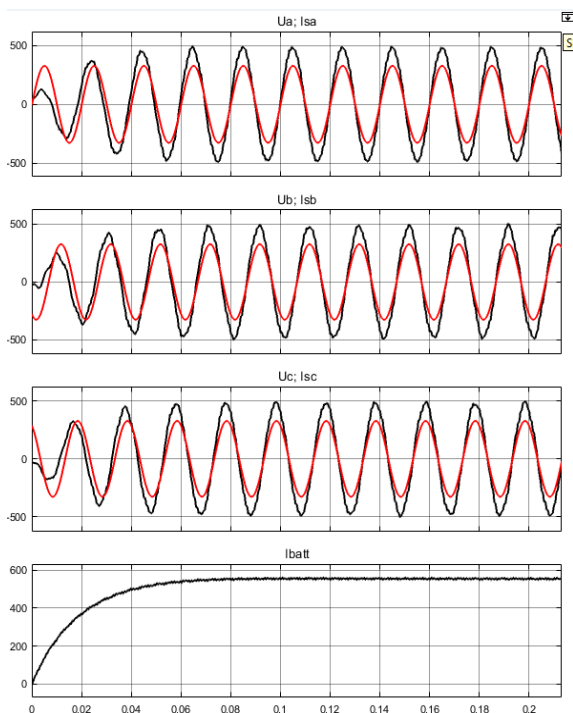


Рис. 7. Форма вхідного струму та вхідної напруги зарядної станції в трьох фазах та форма вихідного струму під час заряду

Повний процес заряду тягової акумуляторної батареї складає 15 хв. Перехідний процес повного заряду представлено на рис. 8.

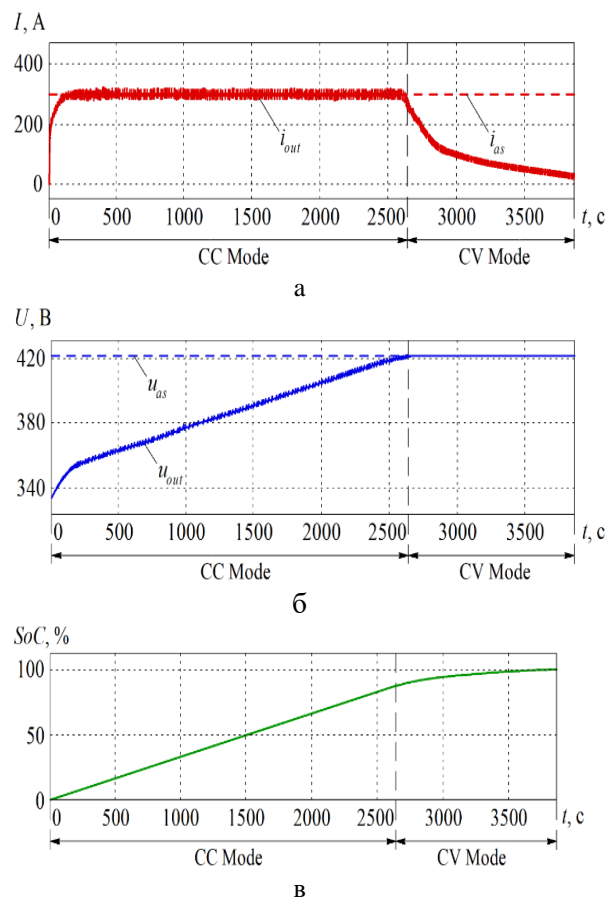


Рис. 8. Перехідні процеси заряду тягової акумуляторної батареї: а – струм заряду батареї; б – напруга на батареї; в – ємність батареї

На рис. 9 представлена форма та гармонічний склад вхідного струму активного випрямляча.

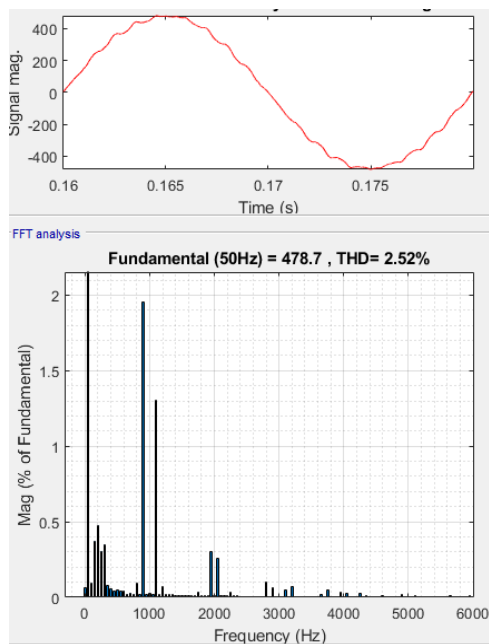


Рис. 9. Форма та гармонійний склад вхідного струму активного випрямляча

Частота найбільшої гармоніки вхідного струму активного випрямляча відповідає частоті широтно-імпульсної модуляції (1кГц) а її відносно амплітуда складає менше ніж 2 відсотки від амплітуди основної (першої гармоніки).

Як видно з рис. 9, коефіцієнт гармонійних спотворень форми вхідного струму зарядної станції та електромобіля становить 2,52%, що відповідає вимогам стандартів електромагнітної сумісності щодо випромінювання вищих гармонік в мережу електропостачання від потужних перетворювачів.

Висновки

У статті досліджено характеристики тягових акумуляторних батарей електромобілів та проведено порівняльний аналіз літій-іонних, літій-залізо-фосфатних і літій-титанатних акумуляторів. У висновку підкреслюється потенціал для використання літій-залізо-фосфатних і літій-титанатних батарей. Пропоновані схеми перетворювачів для зарядних станцій електромобілів включають трифазні випрямлячі джерел активної напруги та випрямлячі активних джерел струму. Деталізовано силові схеми цих перетворювачів і просторово-векторні комутаційні стани силових транзисторів. У статті робиться висновок, що випрямляч активного струму може запропонувати більш перспективну топологію.

Модель зарядної станції, розроблена за допомогою програми Matlab/Simulink і заснована на випрямлячі активного струму, поєднує характеристики, зарядною станцією Tesla Superchargers. Прототип зарядного блоку моделі розроблений на базі зарядного пристрою Tesla Model S ємністю 60 кВт/год.

У рамках моделі визначено перехідні процеси роботи перетворювача та порядок зарядки акумуляторного блоку ємністю 60 кВт/год. Примітно, що випрямляч активного струму визначено як такий, що сприяє регулюванню зарядного струму акумулятора, досягає коефіцієнта потужності, що наближається до одиниці, і підтримує мінімальний рівень випромінювання вищих гармонік, про що свідчить коефіцієнт гармонійних спотворень 2,52%.

Література

1. Грома, Я. В., & Глущенко, Я. І. (2019). Порівняльний аналіз ринку електромобілів в Україні та світі. Економічний вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», (16). Hroma, Ya. V., & Hlushchenko, Ya. I. (2019). Porivnialnyi analiz rynku elektromobiliv v Ukraini ta sviti. [Comparative analysis of the electric car market in Ukraine and the world.] Ekonomichnyi visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy «Kyivskiy politekhnichnyi instytut», (16). [in Ukrainian].
2. Олішевська, В. Є., & Олішевський, Г. С. (2023). Потенціал і конкурентоспроможність електромобілів. Olishevska, V. Ye., & Olishevskiy, H. S. (2023). Potentsial i konkurentospromozhnist elektromobiliv. [Potential and competitiveness of electric vehicles] [in Ukrainian].
3. Гончар, І. А., & Пальян, З. О. (2018). Статистичний аналіз розвитку ринку електроавтомобілів в Україні: проблеми, шляхи вирішення. Статистика України, (2), 13-21. Honchar, I. A., & Palian, Z. O. (2018). Statystychnyi analiz rozvytku rynku elektroavtomobiliv v Ukraini: problemy, shliakhy vyrishennia. [Statistical analysis of the development of the electric car market in Ukraine: problems, solutions] Statystyka Ukrainy, (2), 13-21. [in Ukrainian].
4. Borodenko, Y., Arhun, S., Hnatov, A., Kunicina, N., Bisenieks, M., Migal, V., & Hnatova, H. (2023). Diagnostics of electric drive Electric vehicle with Valve Motor. Przegląd Elektrotechniczny, 99(6).
5. Patlins, A., Hnatov, A., Arhun, S., Hnatova, H., & Saraiev, O. (2022, May). Features of converting a car with an internal combustion engine into an electric car. In 2022 IEEE 7th International Energy Conference (ENERGYCON) (pp. 1-6). IEEE.

6. Hnatov, A., Patlins, A., Arhun, S., Kunicina, N., Hnatova, H., Ulianets, O., & Romanovs, A. (2020, September). Development of an unified energy-efficient system for urban transport. In 2020 6th IEEE International Energy Conference (ENERGYCon) (pp. 248-253). IEEE.
7. Нерубацький, В. П., Плахтій, О. А., Машура, А. В., & Гордієнко, Д. А. (2019). Аналіз технічних характеристик акумуляторних батарей і систем заряджання електромобілів. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, 24(6), 11-19. Nerubatskyi, V. P., Plakhtii, O. A., Mashura, A. V., & Hordiienko, D. A. (2019). Analiz tekhnichnykh kharakterystyk akumuliatornykh batarei i system zariadzhannia elektromobiliv. [Analysis of technical characteristics of accumulator batteries and electric car charging systems] Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti, 24(6), 11-19. [in Ukrainian].
8. Будько, В. І. (2016). Аналіз доцільності впровадження зарядних станцій електромобілів на основі відновлюваних джерел енергії в Україні. Відновлювана енергетика, (4), 32-41. Budko, V. I. (2016). Analiz dotsilnosti vprovadzhennia zariadnykh stantsii elektromobiliv na osnovi vidnovliuvanykh dzherel enerhii v Ukraini. [Analysis of the feasibility of introducing charging stations for electric vehicles based on renewable energy sources in Ukraine] Vidnovliuvana enerhetyka, (4), 32-41. [in Ukrainian].
9. Будько, В. І. (2017). Аналіз особливостей роботи та специфіки зарядних режимів нікель-металогідридних та літійєвих акумуляторних батарей. Budko, V. I. (2017). Analiz osoblyvostei roboty ta spetsyfyky zariadnykh rezhymiv nikel-metalohidrydnykh ta litiievnykh akumuliatornykh batarei. [Analysis of features of operation and specifics of charging modes of nickel-metal hydride and lithium storage batteries] [in Ukrainian]
10. Plakhtii, O., Nerubatskyi, V., Mashura, A., Hordiienko, D., & Khoruzhevskiy, H. (2020). Improving energy indicators of the charging station for electric vehicles based on a three-level active rectifier. East European Journal of Advanced Technologies, 3(8-105), 46-55.
11. RB, A. S., & Sindhu, M. R. (2022, November). On-Board EV Charging with VIENNA Rectifier and LLC Resonant Converter. In 2022 IEEE 19th India Council International Conference (INDICON) (pp. 1-6). IEEE.
12. Chaurasiya, S., & Singh, B. (2021, November). A 7.2 kW Off-Board EV Charger Based on Vienna Rectifier and FB-LLC Resonating Converter. In 2021 IEEE 8th Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON) (pp. 1-6). IEEE.
13. Plakhtii, O., Nerubatskyi, V., Scherbak, Y., Mashura, A., & Khomenko, I. (2020, October). Energy efficiency criterion of power active filter in a three-phase network. In 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek) (pp. 165-170). IEEE.
14. Bayhan, S., & Komurcugil, H. (2022, October). A T-Type converter-based Electric Vehicle Charger with Active Power Filter Functionality. In IECON 2022–48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (pp. 1-6). IEEE.
15. Hnatov, A., & Arhun, S. (2017). Energy saving technologies for urban bus transport. International journal of automotive and mechanical engineering, 14(4), 4649-4664.
16. Plakhtii, O., Nerubatskyi, V., Mashura, A., & Hordiienko, D. (2020, April). The analysis of mathematical models of charge-discharge characteristics in lithium-ion batteries. In 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO) (pp. 635-640). IEEE.
17. Smagin, D. I., Trofimov, A. A., Napreenko, K. S., & Neveshkina, A. R. (2020). Mathematical model of lithium-ion battery cell and battery (Lib) on its basis. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 714, No. 1, p. 012027). IOP Publishing.
18. Корнющенко, Г. С., Наталіч, В. В., Нагорний, В. В., Парфененко, Ю. В., Мокренко, О. А., & Шевченко, С. Т. (2021). Закономірності формування нанопористих ZnO, C, C/ZnO і ZnO/NiO для потенційного застосування у якості електродів літій-іонних акумуляторів. Сумський державний університет. Korniyushchenko, H. S., Natalich, V. V., Nahornyi, V. V., Parfenenko, Yu. V., Mokrenko, O. A., & Shevchenko, S. T. (2021). Zakonomirnosti formuvannia nanoporystykh ZnO, C, S/ZnO i ZnO/NiO dlia potentsiinoho zastosuvannia u yakosti elektrodov litiu-ionnykh akumuliatoriv. [Patterns of formation of nanoporous ZnO, C, C/ZnO and ZnO/NiO for potential use as electrodes of lithium-ion batteries]. Sumskiy derzhavnyi universytet. [in Ukrainian]
19. Copy rights belongs to Antbatt Co. Ltd. 2019. www.antbatt.com. <https://www.antbatt.com/wp-content/uploads/2019/09/18650-3.2V-1600mAh-datasheet.pdf>
20. GWL a.s. Průmyslová 11, 102 00 Prague 10 Czech Republic, European Union. www.gwl.eu. https://files.gwl.eu/inc/doc/attach/StoItem/6991/LTO-40AH-CY_datasheet.pdf
21. Plakhtii, O., Nerubatskyi, V., Karpenko, N., Ananieva, O., Khoruzhevskiy, H., & Kavun, V. (2019). In the cells of a modular six-level inverter. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(8), 102.

19. Xu, D., Wang, L., & Yang, J. (2010, June). Research on li-ion battery management system. In 2010 International conference on electrical and control engineering (pp. 4106-4109). IEEE.
20. Rodríguez, J. R., Dixon, J. W., Espinoza, J. R., Pontt, J., & Lezana, P. (2005). PWM regenerative rectifiers: State of the art. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 52(1), 5-22.
21. Lu, D., Wang, X., & Blaabjerg, F. (2018, June). Investigation on the AC/DC interactions in voltage-source rectifiers and current-source rectifiers. In 2018 IEEE 19th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL) (pp. 1-6). IEEE.
22. Li, Y. W., Pande, M., Zargari, N., & Wu, B. (2009). Power-factor compensation for PWM CSR–CSI-fed high-power drive system using flux adjustment. IEEE Transactions on Power Electronics, 24(12), 3014-3019.
23. Nerubatskyi, V., Plakhtii, O., Ananieva, O., & Zinchenko, O. (2019). Analysis of the Smart Grid concept for DC power supply systems. Industry 4.0, 4(4), 179-193.
24. Zhemerov, G., Plakhtii, O., & Mashura, A. (2020, September). Efficiency analysis of charging station for electric vehicles using the active rectifier in microgrid system. In 2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS) (pp. 37-42). IEEE.
25. Rodríguez, J. R., Pontt, J., Silva, C., Wiechmann, E. P., Hammond, P. W., Santucci, F. W., & Lezana, P. (2005). Large current rectifiers: State of the art and future trends. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 52(3), 738-746.
26. Zhang, Y., & Li, Y. W. (2015). Grid harmonics compensation using high-power PWM converters based on combination approach. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 4(1), 186-197.

Багач Руслан Володимирович¹, аспірант кафедри автомобільної електроніки, тел. +38 0507255660, +38 0935761042, e-mail: bagach.ruslan@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0157-5933>

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

Research of battery units of electric vehicles and charging stations based on current.

Abstract. Problem. The proliferation of electric vehicles has underscored the need for the development of energy-efficient charging stations and systems. These systems must deliver high efficiency, maintain a power factor close to unity, adhere to electromagnetic compatibility standards, emit low levels of higher harmonics, and enable fast charging capabilities. Current electric vehicle

charging devices encounter issues such as significant power losses, high harmonic emissions to the power grid, and challenges in implementing fast charging modes. Consequently, enhancing the energy efficiency of charging stations – by reducing power losses, minimizing harmonic emissions, ensuring a high power factor, and supporting modes for regulated current and voltage sources for fast charging – is a pressing concern. **Goal.** The aim of this work is to perform a comparative analysis of different types of batteries for electric vehicles, exemplified by TESLA cars, presenting comparative characteristics of lithium-ion, lithium-iron-phosphate, and lithium-titanate batteries. **Methodology.** The study showcases an evaluation of battery units for electric vehicles and outlines a comparative assessment of lithium-ion, lithium-iron-phosphate, and lithium-titanate batteries. The research focuses on enhancing the energy efficiency of electric vehicle charging station systems through the use of active rectifiers, with modes for active power factor correction and optimal configuration. **Results.** An examination of the quality of converters for electric vehicle charging stations was conducted, proposing schemes for a three-phase active voltage source rectifier and an active current source rectifier. Power circuitry and space-vector switching states for power transistors are introduced. Analysis concludes that an active current rectifier may be a more promising topology. **Originality.** A model of a charging station based on an active current source rectifier was developed using Matlab/Simulink. Transient processes of the converter's operation and the charging of a 60 kWh battery pack were examined. It was found that the active rectifier facilitates regulation of the battery charging current, achieves a power factor close to unity, and maintains a low level of higher harmonic emissions with a harmonic distortion factor of 2.52%. **Practical value.** The advancement of electric vehicles necessitates the ongoing development and enhancement of the energy indicators for electric vehicle batteries and the converters of charging stations, especially those that enable fast charging. Active progress is being made in each of these areas.

Key words: charging stations for electric vehicles, voltage source rectifier, current source rectifiers, lithium-ion batteries, lithium-iron-phosphate batteries, lithium-titanium batteries.

Bahach Ruslan¹, postgraduate, Vehicle Electronics Department, tel. +38 0507255660, +38 0935761042, e-mail: bagach.ruslan@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0157-5933>

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