

Голові спеціалізованої вченої ради
доктору технічних наук, професору
Леонтьєву Дмитру Миколайовичу
Харківського національного
автомобільно-дорожнього університету
вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків,
61002

Відгук

офіційного опонента кандидат технічних наук, доцент, (спеціальність 05.22.02 – автомобілі та трактори) доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій Луцького національного технічного університету Дембіцького Валерія Миколайовича на дисертаційну роботу **Багача Руслана Володимировича** на тему «Підвищення ефективності експлуатації автомобільного електротранспорту з використанням зарядних станцій постійного струму», подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 27 - Транспорт за спеціальністю 274 - Автомобільний транспорт.

Актуальність обраної теми дисертаційного дослідження

Електрифікація автомобільного транспорту в даний час є одним з основних трендів розвитку світової автомобільної галузі. Розробці електромобілів та зарядних станцій приділяється значна увага дослідниками та виробниками. Одним з ключових елементів, що визначає перспективи розвитку електромобілів, є тенденція зниження вартості акумуляторних батарей. Саме від техніко-економічних параметрів акумуляторної батареї в найбільшій мірі залежить, з одного боку, потенційна дальність пересування електромобілів на одній зарядці, з іншого боку – різниця в ціні з традиційними автомобілями з ДВЗ. До недавнього часу значним недоліком електромобілів була висока вартість літій-іонних батарей. Проте існує тенденція зменшення вартості літій-іонних батарей.

З ростом кількості електромобілів важливим питанням є створення енергоефективних зарядних станцій та систем зарядних станцій електромобілів, до яких пред'являються вимоги високого ККД, коефіцієнта потужності близького до одиниці, вимоги до показників електромагнітної сумісності та низького рівня емісії вищих гармонік, а також можливість реалізації режиму швидкого заряду електромобілів. В існуючих зарядних пристроях електромобілів виникає ряд технічних питань: великі втрати потужності, високий рівень емісії вищих гармонік до живлячої мережі та проблеми з реалізацією режиму швидкого заряду. Тому є актуальним питанням покращення показників енергоефективності зарядних станцій, а саме зниження втрат потужності, зниження рівня емісії вищих гармонічних спожитого струму,

забезпечення високого коефіцієнта потужності зарядної станції, а також можливості працювати в режимі регульованого джерела струму та регульованого джерела напруги для забезпечення швидкого режиму заряду. В дисертаційних дослідженнях розглядається напрямок вирішення проблеми підвищення енергоефективності системи зарядної станції електромобілів шляхом використання активних випрямлячів з режимами активної корекції коефіцієнта потужності.

Ступінь новизни, обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій

У дисертаційній роботі Багача Р.В. отримані такі нові наукові результати:

- вперше запропонована структура зарядних станцій для електромобілів на базі дворівневого активного чотириквadrантного випрямляча, яка дозволяє реалізувати заряд літєвих батарей в режимі «постійний струм-постійна напруга» (CC-CV), що на відміну від існуючих аналогів дозволить підвищити показники ККД системи зарядної станції та забезпечити вимоги електромагнітної сумісності згідно міжнародних стандартів IEEE-519, IEC 61000-3-2, IEC 61000-4-3, а також двонаправлену передачу електричної енергії;

- розроблений аналітичний метод, що описує зарядно-розрядні характеристики літій-іонних тягових акумуляторних батарей для електромобілів, який на відміну від існуючих, враховує залежність напруги, струму та температури батареї від величини її розряду.

- удосконалено метод синтезу регуляторів вихідного струму та вихідної напруги зарядної станції електромобілів з активними чотириквadrантними випрямлячами, що на відміну від існуючих дозволяє підвищити швидкодію регулювання вихідної напруги та струму.

- набув подальшого розвитку аналітичний метод визначення інтегрального значення ККД процесу передачі електроенергії при заряді батареї способом CC-CV, що на відміну існуючих дозволяє визначити ККД циклу заряду.

Дисертаційна робота має практичне значення, оскільки результати проведених наукових досліджень можуть бути використанні при розробці нових та модернізації існуючих зарядних станцій електромобілів з метою підвищення якості електричної енергії та ККД. До таких результатів можна віднести розроблені електричні схеми, алгоритми систем керування, аналітичні співвідношення, що визначають втрати потужності в силових транзисторах перетворювача зарядної станції та комп'ютерні імітаційні моделі зарядних станцій.

Практична значимість підтверджується підприємствами в які було впроваджено результати дисертаційної роботи:

- у навчальний процес ХНАДУ при підготовці бакалаврів та магістрів за освітньо-професійними програмами «Електромобілі та автомобільна електроніка» та «Електромобілі та енергозберігаючі технології»
- у підприємстві «Elcars» з метою створення нових силових перетворювачів для зарядних станцій електромобілів з підвищеним ККД.
- у офіційного дилера Volkswagen у Харкові ТОВ «АВТОДОМ ХАРКІВ», що дозволить провести побудову зарядних станцій для електромобілів на базі дворівневого активного чотириквadrантного випрямляча. Це забезпечить дотримання вимог електромагнітної сумісності згідно міжнародних стандартів і двонаправлену передачу електричної енергії в зарядній станції.
- у ТОВ «АКУТЕК» при розробці джерела безперебійного живлення ІБП60К, що містить літій-іонні накопичувачі та має систему автоматичного заряду.

Основні результати досліджень Багача Р.В. достатньою мірою обґрунтовані. Їх наукова достовірність не викликає сумнівів, оскільки вони отримані в результаті теоретичних та експериментальних досліджень, які базуються на загальнонаукових методах системного аналізу, фізичних та математичних методах дослідження та комп'ютерного моделювання за допомогою програмного середовища Matlab / Simulink. При цьому була використана широка інформаційна база за темою дисертації, в т.ч численні наукові публікації вітчизняних та зарубіжних вчених, монографії, технічні регламенти, інтернет – джерела.

Структура та зміст дисертаційного дослідження

Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації складає 179 сторінок, у тому числі 2 додатків на 7 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації становить 131 сторінок. Робота ілюстрована 78 рисунками та містить 16 таблиць. Список використаних джерел нараховує 95 найменувань на 13 сторінках.

Зміст *анотації* є узагальненим коротким викладом основного змісту дисертації та висвітлює її основні наукові положення, висновки і рекомендації. Анотацію подано державною та англійською мовами. В анотації стисло представлені основні результати дослідження із зазначенням наукової новизни та практичного значення.

У *вступі* наведено обґрунтування актуальності дисертаційної роботи, описано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, визначено мету і завдання наукових досліджень, наукову новизну і практичне значення результатів роботи, особистий внесок здобувача, інформацію щодо апробації результатів дослідження.

У *першому розділі* розглянуті вимоги міжнародних стандартів, щодо класифікації зарядних станцій за потужністю. Виділено і класифіковано чотири

типи зарядних станцій, з яких перший тип описує процес заряду електромобіля, безпосередньо, від однофазної мережі живлення; другий тип відрізняється від першого наявністю електричного захисту; третій тип – заряд електромобіля трифазною напругою змінного струму; четвертий тип – заряд постійним струмом та великою потужністю, що дозволяє швидше проводити процес заряду

Проаналізовано вимоги вітчизняних та міжнародних стандартів щодо електромагнітної сумісності, а саме норми емісії вищих гармонік струмів, спожитих зарядними станціями. Проведено огляд технічних характеристик акумуляторних батарей, особливості алгоритму їх заряджання, що висувують вимогу автоматичного регулювання вихідної напруги та вихідного струму зарядної станції. Представлено класифікацію електромобілів і проведено огляд технічних характеристик акумуляторних батарей та їх систем заряду. Найбільш перспективними є літій-іонні акумулятори. Можна виділити такі переваги: високі ККД в процесі заряду-розряду та щільність електричної енергії (кВт·год/кг). Проведено аналіз схем напівпровідникових перетворювачів зарядних станцій, який показав, що питання покращення енергоефективності зарядних станцій електромобілів є актуальним і потребує подальшого вдосконалення.

Другий розділ присвячений запропонованій схемі перетворювача зарядної станції електромобіля на базі активного чотириквadrантного випрямляча напруги, що дає змогу проводити заряд електромобілів від трифазної електричної мережі в режимі CC-CV, що забезпечує можливість роботи з коефіцієнтом потужності близьким до одиниці. Представлено математичну модель трифазного ШІМ - перетворювача джерела напруги змінного струму в постійний для симетричних та несиметричних робочих умов. На основі поліноміальної апроксимації зарядно - розрядних характеристик літій-іонних акумуляторів, розроблені математичні моделі, що описують процеси заряду розряду та визначають взаємозв'язок поточної ємності акумуляторних батарей, поточної напруги батареї та миттєвого значення струму батареї. В повному діапазоні заряду/розряду запропонована модель дає максимальну похибку 6%, що дає суттєво кращі показники точності ніж базова модель в бібліотеці Matlab / Simulink. Представлено еквівалентні схеми літій-іонних акумуляторів. Проведено аналіз математичних моделей еквівалентних схем різних типів літій-іонних батарей. Проведено фізичне моделювання процесів заряду/розряду батареї NCR-18650b для підтвердження її параметрів, яка буде використовуватися в якості навантаження при моделюванні перетворювача для системи заряду електромобіля. Визначено параметри блоку батарейному відсіку електромобіля Tesla Model S, який буде навантаженням.

Третій розділ присвячений теоретичним дослідженням. Представлено систему прямого керування потужністю активного випрямляча з ковзним регулятором і спостерігачем величини вихідної напруги. Визначено параметри ковзного регулятора для регулювання виходу, активної та реактивної потужності

з електричної мережі. Знайдено параметри спостерігача напруги мережі з алгоритмом компенсації. Проведено імітаційне моделювання системи керування регулятора активного випрямляча у програмному середовищі Matlab / Simulink. Отримані результати показують, що активний випрямляч забезпечує кращі показники якості електричної енергії з малим значенням коефіцієнта гармонічних спотворень та коефіцієнтом потужності близьким до одиниці.

До того ж, виконані така роботи:

- розглянуто схему АВН напруги з широтно-імпульсною модуляцією. Відповідно до схеми заміщення, наведено систему диференціальних рівнянь, що описують електромагнітні процеси у вхідній електричній мережі;

- визначено параметри системи прямого керування потужністю активного випрямляча напруги на основі ковзного режиму. Для наведеної структурної схеми трифазного активного випрямляча з ковзним регулятором та спостерігачем величини вихідної напруги керування потужністю відсутня необхідність у таблиці перемикання ключами, тим самим зменшується складність такого керування. Ковзний регулятор в розглянутій структурі виконує функції регулювання вихідної напруги, а також регулювання величини активної та реактивної складових потужності, що споживається з електричної мережі;

- представлено роботу системи керування регулятора активного випрямляча, заснованого на реалізації ковзного режиму при зміні опору навантаження та зі спостерігачем навантаження. Спостерігач напруги мережі з урахуванням ковзного режиму разом з алгоритмом компенсації забезпечує точні результати з мінімальним коливанням, на відміну від одного фільтра нижчих частот. Активний випрямляч забезпечує кращі показники якості електричної енергії зі значенням THD менше 5 % та коефіцієнтом потужності близьким до одиниці.

Четвертий розділ присвячений експериментальним дослідженням енергетичних характеристик запропонованих систем зарядної станції в комп'ютерному моделюванні. У цьому розділі була запропонована структура зарядної станції електромобілів, яка складається з таких компонентів: вхідний трансформатор, трирівневий активний випрямляч, навантаження (еквівалентної моделі блоку літій-іонних батарей електромобіля TeslaModel S), що забезпечує відносно відомих технічних рішень зарядних станцій покращення параметрів ККД, коефіцієнта потужності та коефіцієнта гармонічних спотворень. Отримані результати пояснюються тим, що запропонована зарядна станція реалізує одноетапне перетворення електроенергії в активному випрямлячі з корекцією коефіцієнта потужності. Приведена методика і проведено розрахунок ККД процесу заряду розглянутої системи. При різних параметрах струму заряду та частоти комутації, враховуючи втрати потужності в батареї електромобіля, ККД зарядної станції лежить в межах від 91,3 % до 95,6 %. На основі поліноміального наближення енергетичних залежностей IGBT-модулів створено математичну модель розраховувача статичних та динамічних втрат енергії. Проведено аналіз

параметрів якості електроенергії, складових втрат енергії та ККД зарядної станції на інтервалі повного заряду акумулятора при різних струмах заряду та частоті ШІМ. В програмному середовищі Matlab розроблено імітаційну модель запропонованої зарядної станції. Проведені дослідження енергетичних показників зарядної станції на базі трирівневого активного випрямляча показали, що коефіцієнт потужності (PF) зарядної станції лежить в межах від 98,5 % до 99,3%. Коефіцієнт гармонічних спотворень (THD) в процесі заряду лежить в межах від 2,5 % до 11,8 %. Максимальна ефективність системи досягається в режимі мінімального струму заряду. У той же час зменшення струму заряду призводить до збільшення часу процесу заряду, а також до незначного погіршення параметрів якості електроенергії.

Повнота викладу в наукових публікаціях, зарахованих за темою дисертації

Основні положення дисертаційної роботи опубліковані у 19 наукових роботах, у тому числі: 1 монографія ; 5 статей у наукових фахових виданнях України та інших держав (з них 1 – у виданнях, що включені до наукометричної бази Scopus (Quartiles – Q2)); 13 тез доповідей у збірниках доповідей на наукових конференціях.

Виконання положень академічної доброчесності

На підставі вивчення тексту дисертації здобувача, наукових праць здобувача та протоколу контролю оригінальності (перевірку наявності текстових запозичень виконано в антиплагіатній системі Unicheck) встановлено, що дисертаційна робота виконана самостійно, текст дисертації не містить плагіату, а дисертація відповідає вимогам академічної доброчесності.

Недоліки та зауваження

1. У першому розділі не розглянуто схемотехнічні рішення вбудованих зарядних перетворювачів електромобілів
2. У другому розділі не зрозуміло з якою метою був проведений фізичний дослід визначення зарядно-розрядної характеристики літій-іонного акумулятора NCR-18650b.
3. Крім цього в розрахунку схеми заміщення акумуляторів в батарейному відсіку не враховано опір з'єднуючих провідників, також не враховано індуктивності на схемі заміщення.
4. У третьому розділі на рис 3.7 і 3.13 показано миттєві значення сигналів завдання активної та реактивної потужності та їх фактичні значення. Незрозуміло, чи завжди (в усіх режимах роботи) спостерігається, що реактивна потужність дорівнює нулю.

5. Незрозуміло яким чином у зарядній станції вимірюється активна та реактивна потужність.

6. У четвертому розділі на рис.4.18 є помилка – зображені вхідна напруга та струм, а на рисунку приведено індекси $u_{\text{вих}}$, $i_{\text{вих}}$.

7. Також, при визначенні ККД системи заряду не враховано магнітні втрати живлячого трансформатора.

Наведені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертації.

Загальні висновки за дисертаційним дослідженням

Дисертація є завершеною науково-дослідницькою роботою, в якій наведено нові наукові результати та обраний напрямок вирішення проблеми підвищення енергоефективності системи зарядної станції електромобілів шляхом використання активних випрямлячів з режимами активної корекції коефіцієнта потужності.

Вважаю, що за актуальністю обраної теми, обсягом і рівнем виконаних теоретичних та експериментальних досліджень, обґрунтованістю висновків і їх достовірністю, науковою новизною дослідження та значенням отриманих результатів для науки і техніки дисертаційна робота відповідає вимогам «Порядку присудження ступеню доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. №44. Дисертація оформлена згідно з вимогами освітньо-наукової програми автомобільний транспорт, яка реалізовується в Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті і не суперечить вимогам Наказу МОН України від 17.01.2017 року №40, а її автор Багач Руслан Володимирович заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 27 - Транспорт за спеціальністю 274 - Автомобільний транспорт.

Офіційний опонент:

кандидат технічних наук,

доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій

Львівського національного технічного університету

Валерій ДЕМБИЦЬКИЙ

