

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСІВ ЗАРЯДЖАННЯ АКУМУЛЯТОРНОЇ БАТАРЕЇ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ ВІД БЕЗДРОТОВОГО ЗАРЯДНОГО ПРИСТРОЮ

А.Ф. Жаркін*, академік НАН України, **О.Д. Подольцев****, докт.техн.наук,

В.Б. Павлов***, докт.техн.наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна

e-mail: zhark@ied.org.ua, mobil99@ukr.net

У роботі шляхом комп'ютерного моделювання досліджено процес заряджання літій-іонної акумуляторної батареї для електромобіля від бездротового зарядного пристрою індуктивно-резонансного типу. Показано, що у процесі моделювання необхідно враховувати одночасне протікання двох різномасштабних у часі та пов'язаних між собою процесів, а саме короткотривалого високочастотного процесу в інверторі зарядного пристрою із характерним часом 10^{-5} с та довготривалого процесу заряджання акумулятора із характерним часом 10^4 с. Прямий чисельний розрахунок одночасно цих двох процесів потребує значних комп'ютерних ресурсів. Задля вирішення цієї задачі в роботі запропоновано та реалізовано в пакеті Matlab/Simulink комп'ютерну модель та алгоритм розрахунку, згідно з яким на першому етапі у процесі аналізу високочастотних процесів в інверторі знаходяться модифіковані еквіваленти Тевеніна та Нортон для пристрою бездротової зарядки із врахуванням сумарних внутрішніх втрат в цьому пристрої, а на другому етапі розраховується довготривалий процес заряджання акумуляторної батареї. Зазначений розрахунок проводиться спочатку в режимі джерела постійного струму, використовуючи при цьому побудований еквівалент Нортон, а потім в режимі джерела напруги, використовуючи побудований еквівалент Тевеніна. Такий підхід дає змогу врахувати особливості процесів заряджання та дослідити ефективність бездротової передачі електричної енергії від стаціонарного джерела живлення до акумулятора, що розташований на борту електромобіля. За результатами проведеного моделювання визначено, що для розробленого пристрою величина інтегрального ККД всього процесу заряджання батареї при зростанні параметру акумулятора SOC від 20 до 95% становить 86%. Бібл. 9, рис. 8.

Ключові слова: бездротова передача електроенергії, різномасштабні у часі процеси, комп'ютерне моделювання, ефективність заряджання акумуляторної батареї.

Одним із сучасних трендів світової електротехніки є розвиток досліджень і розробок у галузі електричного транспорту та акумуляторних батарей підвищеної енергоємності для їх живлення. При цьому слід відзначити, що станом на сьогодні інфраструктура засобів підзарядки акумуляторних батарей електромобілів перебуває ще на стадії становлення, і чим менше розвинена країна, тим більше відповідних проблем [1, 2]. В той же час світові виробники електромобілів та необхідної зарядної інфраструктури найближчою метою вважають розробку бездротових зарядних пристроїв (БЗП), оскільки такі системи досить перспективні з огляду на їхню привабливість на фоні зростання популярності електротранспортних засобів [3 – 5].

Заряджання акумуляторних батарей електротранспорту може здійснюватися трьома відомими способами передачі електроенергії, а саме: за допомогою гальванічного підключення та бездротовою зарядкою шляхом встановлення магнітного або ємнісного зв'язку між передавальною та приймальною котушками. Зараз вже можливе здійснення підзарядки електромобілів без використання будь-яких струмопровідних елементів завдяки появі бездротових пристроїв. Технологія бездротової підзарядки проста, зручна та має наступні переваги:

- захищені з'єднання без корозії, подалі від води або кисню в атмосфері. Менший ризик електричних несправностей, таких як коротке замикання через порушення ізоляції, особливо на з'єднанні роз'ємів або в місцях найчастішої поломки;
- довговічність без необхідності постійно підключати та від'єднувати пристрої, що спричиняє підвищений знос розетки та кабелю для підключення;
- підвищені зручність та естетична якість, немає необхідності в кабелях;

© Жаркін А.Ф., Подольцева О.Д., Павлов В.Б., 2023

ORCID ID: * <https://orcid.org/0000-0001-5996-0901>; ** <https://orcid.org/0000-0002-9029-9397>;

*** <https://orcid.org/0000-0003-0565-265X>

- автоматизована індуктивна зарядка електромобілів високої потужності, наприклад, електробусів, дає змогу проводити частіше зарядні операції з подальшим розширенням дальності руху електротранспорту;

- індуктивна зарядка електричних транспортних засобів за високих рівнів потужності дає змогу заряджати електромобілі в русі (динамічна зарядка).

Однією з проблем бездротової зарядки раніше був відносно низький ККД передачі електроенергії. Перші такі зарядні станції були здатні передати по повітрю тільки 60% електроенергії. Однак, на сьогодні у вирішенні цієї проблеми є суттєві позитивні результати, так за даними [6] на початок 2020 року було досягнуто найбільше значення ККД у 87,5%.

Задля підвищення ефективності передачі енергії в бездротовому пристрої використовують, як правило, високу робочу частоту (20 – 100 кГц) та різні резонансні схеми в колах передавальної та приймальної котушки [6]. У попередніх роботах авторів даної статті [7, 8] були наведені результати теоретичних та експериментальних досліджень ефективності передачі енергії у бездротовому зарядному пристрої із послідовним резонансом у колах обох котушок. Було показано, що ця ефективність визначається значенням безрозмірного параметра $k_{12}Q$ (добуток коефіцієнту магнітного зв'язку та добротності котушок) та співвідношення активних опорів акумуляторної батареї та котушки. Показано також, що існує оптимальне значення цього співвідношення, за якого ефективність пристрою є максимальною (за умови $k_{12}Q = \text{const}$). При цьому її значення монотонно зростає із ростом параметра $k_{12}Q$. Причому, для досягнення ККД більше 80%, необхідно мати систему котушок із значенням $k_{12}Q > 10$. В той же час слід визнати, що в зазначених роботах аналізується лише спрощена схема пристрою, коли враховуються тільки резистивні втрати в обох котушках та за умови, що еквівалентні параметри акумулятора впродовж всього процесу заряджання не змінюються.

Під час впровадження пристроїв для бездротової зарядки акумуляторної батареї важливо на етапі проектування оцінювати ефективність такої системи не тільки в короткочасному режимі, але і для всього процесу заряджання батареї, тривалість якого може досягати декілька годин. При цьому в процесі заряджання змінюються параметри акумулятора (в першу чергу, напруга на його клеммах), що необхідно враховувати під час моделювання процесів в інверторі БЗП. Отже, при комп'ютерному моделюванні процесу заряджання акумуляторної батареї від БЗП необхідно враховувати одночасне протікання двох різномасштабних у часі та пов'язаних між собою процесів, а саме короткотривалого високочастотного процесу в інверторі зарядного пристрою із характерним часом 10^{-5} с та довготривалого процесу заряджання акумулятора із характерним часом 10^4 с. Прямий чисельний розрахунок одночасно цих двох процесів потребує значних комп'ютерних ресурсів.

Враховуючи вищесказане, **метою роботи** є розробка раціональної комп'ютерної моделі для розрахунку довготривалого процесу заряджання акумуляторної батареї від бездротового зарядного пристрою із врахуванням високочастотних процесів в його інверторі та дослідження ефективності енергоперетворення впродовж всього процесу заряджання, враховуючи при цьому втрати як в акумуляторі, так і в активних елементах БЗП.

Зазначимо, що задля досягнення цієї мети в роботі запропоновано та реалізовано в пакеті Matlab/Simulink новий підхід, згідно з яким на першому етапі при розрахунку короткотривалих високочастотних процесів в інверторі знаходяться модифіковані еквіваленти Тевеніна та Нортонна для пристрою бездротової зарядки із врахуванням внутрішніх втрат в цьому пристрої, а на другому етапі розраховується довготривалий процес заряджання акумуляторної батареї. Зазначений розрахунок проводиться спочатку в режимі джерела постійного струму, використовуючи при цьому побудований еквівалент Нортонна, а потім в режимі джерела постійної напруги, використовуючи побудований еквівалент Тевеніна. Такий підхід дає змогу врахувати взаємопов'язані та різномасштабні у часі процеси в інверторі та в акумуляторній батареї та дослідити ефективність бездротової передачі електричної енергії від стаціонарного джерела живлення до акумулятора, розташованого на борту електромобіля.

1. Опис системи бездротової зарядки літій-іонної акумуляторної батареї електромобіля.

Структурну схему створеного дослідного зразка бездротового зарядного пристрою, що включає основні та додаткові компоненти, показано на рис. 1, а на рис. 2 – його зовнішній вигляд. На рис. 1 позначено: ДЖ – стаціонарне регульоване джерело живлення постійної напруги; ІН – високочастотний інвертор; Тр1 – високочастотний понижуючий трансформатор; Тр2 – повітряний трансформатор, одна з обмоток якого розташована на нерухомій основі, а друга – на електромобілі; В

– високочастотний випрямляч; C1, C2 – конденсатори послідовного резонансу; C3 – фільтровий конденсатор; АБ – акумуляторна батарея, що заряджається.

Джерело живлення постійної напруги ДЖ складається з регульованого випрямляча та вихідного фільтра (конденсатора), який здійснює плавне регулювання випрямленої напруги в діапазоні 0–320 В, що подається на високочастотний інвертор.

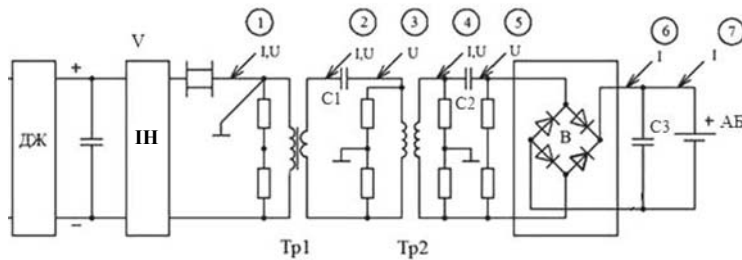


Рис. 1

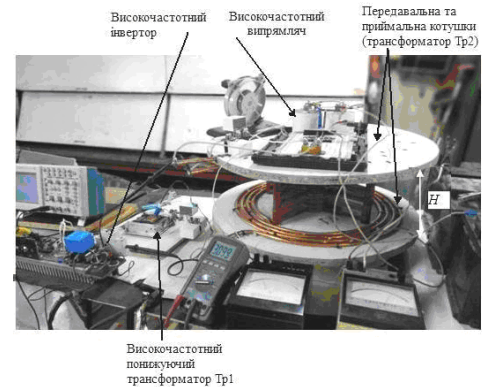


Рис. 2

Інвертор ІН, зібраний на транзисторах STW45N60DM2AG, забезпечує плавне регулювання частоти в межах 10–100 кГц, максимальний струм – 20 А. Номінальна частота роботи БЗП, що досліджується далі, вибрана у 100 кГц. Високочастотний понижуючий трансформатор Tr1 виконано на феритовому осерді E85/44/27 TR4A з коефіцієнтом трансформації 11:1. Трансформатор Tr2 виконано у вигляді двох котушок однакового зовнішнього діаметру 400 мм і з однаковим числом витків (п'ять). Котушки виготовлені з полого мідного провідника діаметром 10 мм та із провідника типу літцендрат. Резонансний контур створюється за допомогою конденсаторів C1 та C2 – МКР, 600 В, 0,21 – 0,5 мкФ.

Випрямляч В виконано на високочастотних діодах VS-HF A16PB, 16 А, 600В, на виході якого

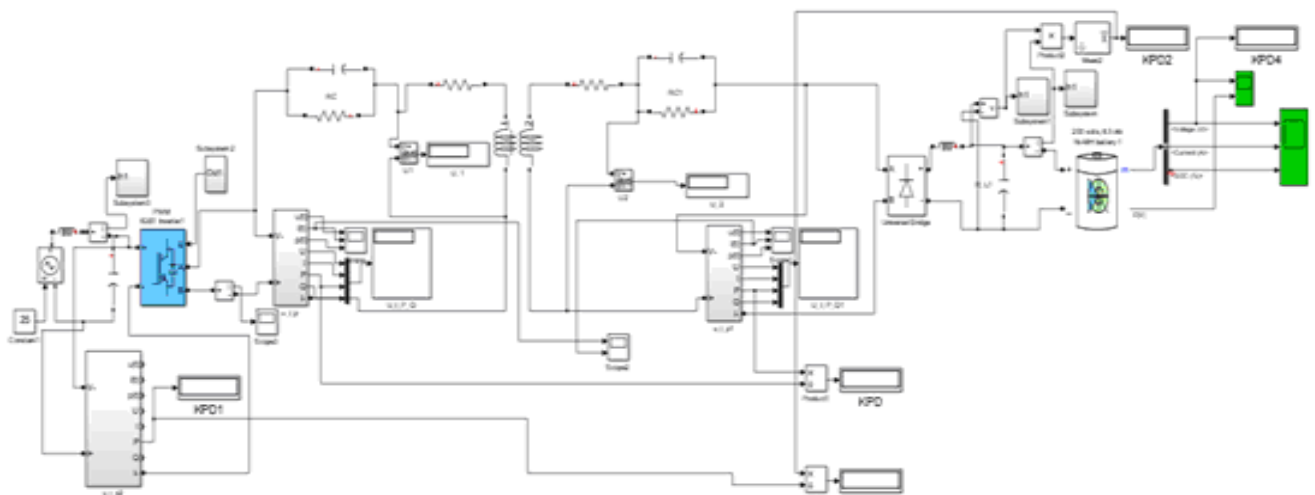


Рис. 3

встановлено фільтруючий конденсатор C3 SH NO PCBs 400В 380 μ F.

Випрямлена напруга подається на батарею АБ 56 В. Величина струму в процесі заряду регулюється напругою на вході інвертора.

2. Високочастотна Simulink-модель системи бездротової зарядки акумуляторної батареї індуктивно-резонансного типу. Задля моделювання процесу заряджання акумуляторної батареї на відносно невеликому проміжку часу ($\sim 10^{-4}$ с) було розроблено високочастотну Simulink-модель системи (рис. 3). Структура моделі відповідає структурі системи на рис. 1. Модель містить відповідні блоки:

кероване джерело постійної напруги на вході інвертора, модель інвертора, побудовану на основі блоку «Універсальний міст», повітряний трансформатор із послідовно з'єднаними резонансними ємностями, випрямляч та акумуляторну батарею. На рис. 3 наведено крім названих елементів силової частини засоби обробки вимірюваних сигналів для визначення активної потужності на вході та виході БЗП, а також втрат в активних елементах цієї системи. Втрати в ємнісних резонансних елементах розраховувалися за умови, що добротність цих елементів на робочій частоті (100 кГц) дорівнює 200.

Як навантаження використовується модель літій-іонного акумулятора із бібліотеки моделей пакету SimPowerSystems. Схема заміщення такого акумулятора, що показана на рис. 4, містить

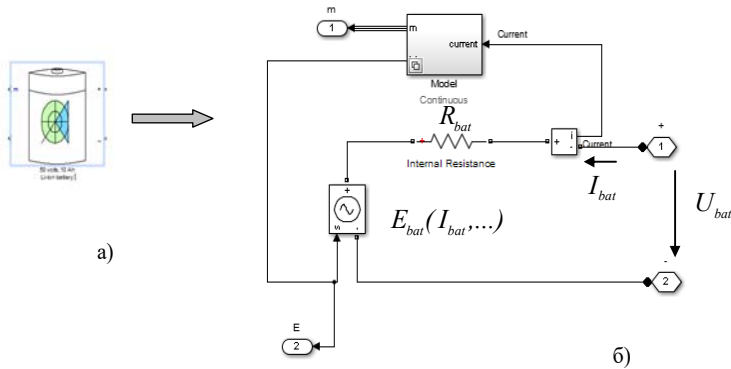


Рис. 4

послідовно з'єднані резистивний елемент і кероване джерело напруги. Значення напруги на акумуляторі розраховується в режимі заряджання та розряджання за емпіричними виразами в залежності від значення електричного струму та електричного заряду акумулятора. Для акумулятора, що досліджується в роботі, задавалися наступні параметри: номінальна напруга 50 В, ємність 10 А·год, параметр SOC, що характеризує стан заряду (stage-of-charge), приймав значення в діапазоні 20%÷100%. В роботі досліджується процес заряджання акумулятора і при цьому відомо [9], що такий

процес доцільно проводити на початку зарядки в режимі джерела струму, коли значення параметру SOC зростає від початкового значення (приймається $SOC=20\%$) до приблизно 80%, а потім в режимі джерела напруги, коли значення SOC зростає до 100%. Таким чином, БЗП, що досліджується, повинен працювати відповідно на початку в режимі джерела струму (режим 1 в подальшому), а потім в режимі джерела напруги – режим 2.

3. Алгоритм розрахунку різномасштабних у часі процесів заряджання акумуляторної батареї від БЗП. На практиці під час проектування системи заряджання акумулятора від БЗП необхідно оцінювати ефективність енергоперетворення всього процесу заряджання, який є відносно довго-тривалим, а час заряджання триває $\sim 10^4$ с. Для цього необхідно розраховувати два різномасштабні процеси, що протікають одночасно, а саме, високочастотний процес в інверторі та повітряному трансформаторі із характерним часом 10^{-4} с та довготривалий процес заряджання акумуляторної батареї із характерним часом 10^4 с. Одночасний розрахунок цих двох процесів потребує при чисельному інтегруванні вибору часового кроку порядку 10^{-5} с. Це унеможливило розрахунок всього процесу заряджання.

В роботі задля вирішення цієї задачі запропоновано новий підхід, згідно з яким високо-частотна частина системи у разі заряджання в режимі джерела постійного струму замінюється еквівалентною схемою заміщення із джерелом струму, а в режимі заряджання від джерела постійної напруги – схемою заміщення із джерелом напруги. При цьому в обох цих схемах міститься резистивний елемент, який відповідає сумарним втратам в усіх активних елементах БЗП, і ці втрати розраховуються за допомогою високочастотної моделі, наведеної на рис. 3.

Вищесказане пояснюється на рис. 5. З рисунку видно, що в режимі заряджання від джерела постійного струму БЗП моделюється послідовно з'єднаними джерелом постійного струму та резистивним елементом, втрати в якому дорівнюють сумарним втратам в усіх активних елементах БЗП (рис. 5, a). Таку схему заміщення можна назвати модифікованою еквівалентною схемою Нортон на відміну від класичної схеми, яка містить джерело струму із паралельно з'єднаним резистивним елементом. В запропонованій схемі резистивний елемент під'єднується послідовно і це дає змогу, знаючи після розрахунку на моделі рис. 3 сумарні втрати в БЗП, які позначимо як P_{loss} , визначити величину резистора за спрощеним виразом $R_N = P_{loss} / I_N^2$.

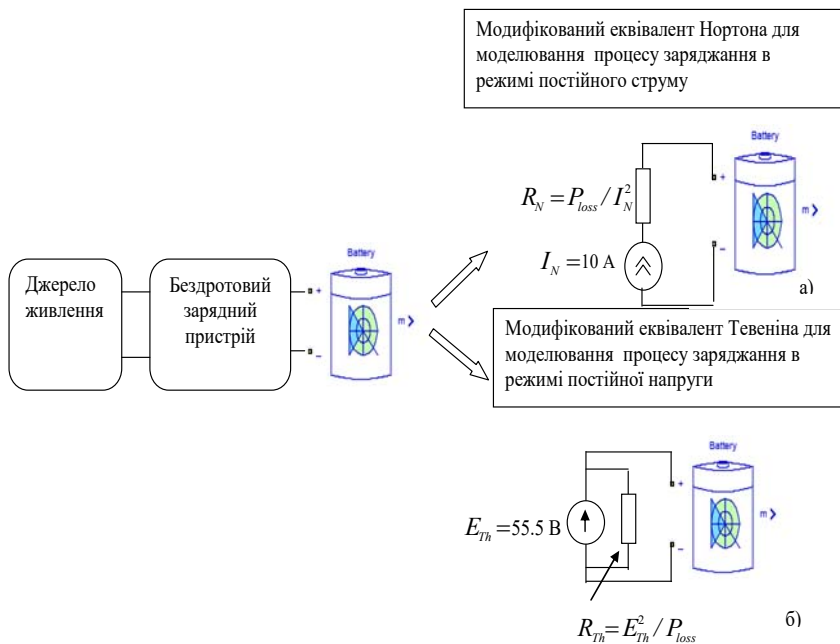


Рис. 5

активних елементах БЗП (рис. 5, б). Таку схему заміщення можна назвати модифікованою еквівалентною схемою Тевеніна на відміну від класичної схеми Тевеніна, яка містить джерело напруги із послідовно з'єднаним резистивним елементом. В запропонованій схемі резистивний елемент під'єднується паралельно до джерела напруги і це дає змогу, знаючи після розрахунку на моделі з рис. 3 сумарні втрати в БЗП P_{loss} , визначити величину резистора за спрощеним виразом $R_{Th} = E_{Th}^2 / P_{loss}$.

4. Комп'ютерне моделювання довготривалого (біля 1-ї години) процесу заряджання акумуляторної батареї в режимах постійного струму та постійної напруги. Розроблена Simulink-модель для розрахунку довготривалого процесу заряджання літій-іонної акумуляторної батареї від бездротового зарядного пристрою показана на рис. 6. За допомогою цієї моделі розраховується процес

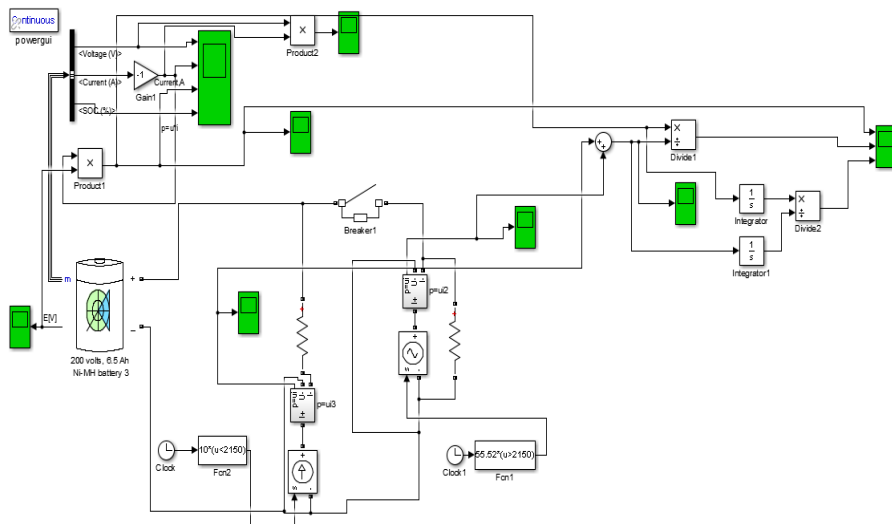


Рис. 6

заряджання спочатку в режимі джерела постійного струму 10 А (режим 1), а потім, коли напруга досягає гранично допустимого значення 55,5 В, здійснюється перехід до режиму зарядки від джерела постійної напруги 55,5 В (режим 2). При цьому в режимі 1 для моделювання процесів в БЗП використовується його еквівалентна схема заміщення, що відповідає модифікованому еквіваленту Нортна (рис. 5, а) із параметрами: $I_N = 10$ А, сумарні втрати в БЗП за результатами розрахунку на моделі з рис. 3 $P_{loss} = 67,4$ Вт, еквівалентний опір $R_N = P_{loss} / I_N^2 = 0,674$ Ом. В режимі 2 для моделювання процесів в БЗП використовується його еквівалентна схема

У загальному випадку значення R_N залежить від параметрів акумулятора, які змінюються в процесі заряджання (наприклад, в залежності від значення параметру SOC), але, як показали проведені розрахунки на високо-частотній моделі за різних значень цього параметру, величина сумарних втрат P_{loss} слабо залежить від SOC . Звідси величина R_N може розглядатися як константа.

В режимі заряджання від джерела постійної напруги БЗП моделюється паралельно з'єднаними джерелом постійної напруги та резистивним елементом, втрати в якому дорівнюють сумарним втратам в усіх

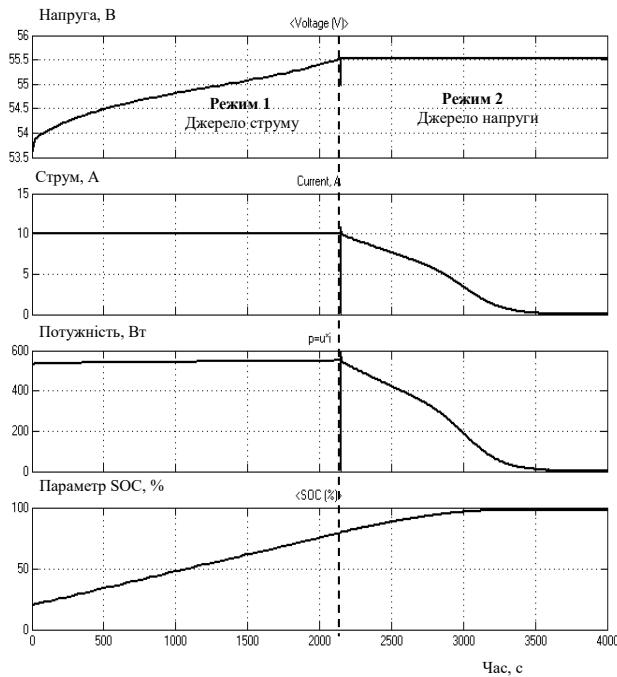


Рис. 7

споживається. Загальний час заряджання в цих двох режимах складає 3600 с.

Як енергетичні характеристики, що визначають ефективність передачі електричної енергії від стаціонарного джерела живлення до акумуляторної батареї, в роботі розглядається миттєве $\eta(t)$ та інтегральне значення $\eta_{int}(t)$ ККД зарядки. При цьому $\eta(t) = \frac{E_{bat}I_{bat}}{P_{inv}}$, де в чисельнику наведено потужність, що безпосередньо накопичується в батареї (відрізняється від потужності на вході батареї на величину втрат в акумуляторі при його заряджанні). В знаменнику наведено потужність на вході інвертора.

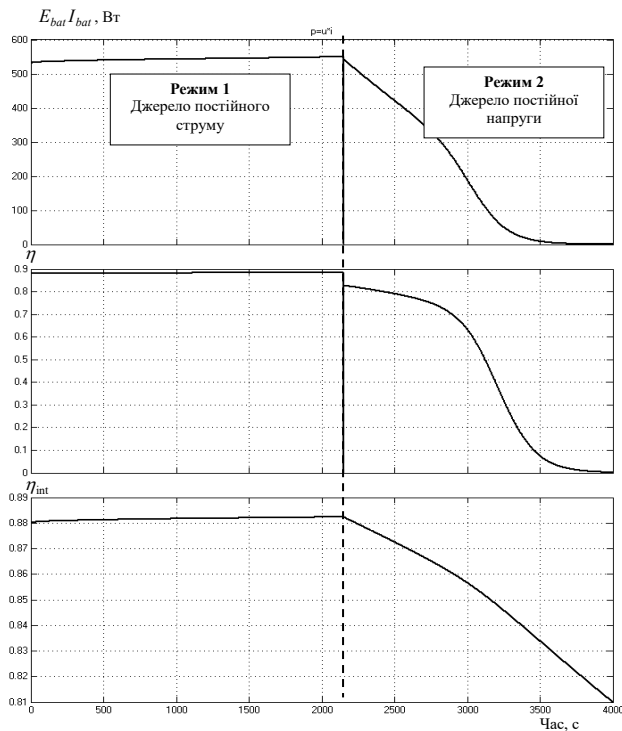


Рис. 8

заміщення, що відповідає модифікованому еквіваленту Тевеніна (рис. 5, б) із параметрами: $E_{Th} = 55,5$ В, сумарні втрати в БЗП в цьому режимі за результатами розрахунку на моделі з рис. 3 $P_{loss} = 108,6$ Вт, еквівалентний опір $R_{Th} = E_{Th}^2 / P_{loss} = 28,3$ Ом.

На рис. 7 наведено електричні характеристики всього процесу заряджання акумуляторної батареї в двох послідовно реалізованих режимах, а саме: напруга на батареї $U_{bat}(t)$, електричний струм батареї $I_{bat}(t)$, електрична потужність на клеммах акумулятора $P_{bat} = U_{bat}I_{bat}$ та параметр SOC, який змінюється від початкового значення 20% і до повної зарядки 100%. Із наведених характеристик видно, що в режимі 1 акумулятор ефективно заряджається до значення параметру SOC = 80%. Далі відбувається перехід до зарядки в режимі 2, щоб напруга не перевищувала гранично допустиме значення. При цьому подальший заряд акумулятора здійснюється за відносно невеликої потужності, що

$$\eta_{int}(t) = \frac{\int_0^t E_{bat}I_{bat}dt}{\int_0^t P_{inv}dt}$$

Значення цієї величини в кінці процесу заряджання буде характеризувати енерго-ефективність всього цього процесу.

Результати розрахунку зазначених енергетичних характеристик наведено на рис. 8. З рисунку видно, що максимальне значення миттєвого ККД для режиму 1 складає 89%, а в режимі 2 воно зменшується. Інтегральне значення ККД залежить від часу закінчення процесу заряджання. Так, при закінченні процесу заряджання в момент часу 2900 с, коли значення SOC=95%, значення інтегрального ККД складає 86%. Зазначимо, що розраховані за допомогою запропонованого підходу енергетичні характеристики дають змогу вибрати раціональні режими заряджання акумуляторної батареї від БЗП на етапі проектування цієї системи.

Висновки. В роботі шляхом комп'ютерного моделювання досліджено процес заряджання літій-іонної акумуляторної батареї для електромобіля від бездротового зарядного пристрою індуктивно-резонансного типу. Показано, що під час моделювання цього процесу необхідно враховувати одночасне протікання двох різномасштабних у часі та пов'язаних між собою процесів: високочастотного процесу в інверторі зарядного пристрою із характерним часом 10^{-5} с та довготривалого процесу заряджання акумулятора із характерним часом 10^4 с. Прямий чисельний розрахунок одночасно цих двох процесів потребує значних комп'ютерних ресурсів.

Задля вирішення цієї проблеми в роботі запропоновано та реалізовано в пакеті Matlab/Simulink комп'ютерну модель та алгоритм розрахунку, згідно з яким на першому етапі під час аналізу високочастотних процесів в інверторі знаходяться модифіковані еквіваленти Тевеніна та Нортон для пристрою бездротової зарядки із врахуванням сумарних внутрішніх втрат в цьому пристрої, а на другому етапі розраховується довготривалий процес заряджання акумуляторної батареї. Зазначений розрахунок проводиться спочатку в режимі джерела постійного струму, використовуючи при цьому побудований еквівалент Нортон, а потім – в режимі джерела постійної напруги, використовуючи побудований еквівалент Тевеніна. Такий алгоритм дає змогу провести відповідні розрахунки та дослідити інтегральну ефективність бездротової передачі електричної енергії від стаціонарного джерела живлення до акумулятора, що розташований на борту електромобіля.

За результатами моделювання отримано зарядні енергетичні характеристики акумуляторної батареї під час її заряджання від бездротового зарядного пристрою: миттєве значення ККД зарядки $\eta(t)$ та інтегральне значення ККД всього процесу зарядки η_{int} , що враховує сумарні втрати як в зарядному пристрої, так і в акумуляторній батареї. Показано, що для розробленого пристрою максимальне значення $\eta(t)$ досягає 89% , а величина інтегрального η_{int} для всього процесу заряджання батареї у разі зростання параметра SOC від 20% до 95% становить 86%.

Роботу виконано за держбюджетною темою «Розвиток теорії регулювання параметрів високочастотних напівпровідникових перетворювачів та електротехнічних систем керованої інтенсифікації енергетичних і технологічних процесів» (шифр «Режим-1»). Державний реєстраційний номер 0122U001494. КПКВК 6541230.

1. Шидловський А.К., Жаркін А.Ф., Павлов В.Б., Новський В.О. Вплив розвитку зарядної інфраструктури електромобільного і гібридного транспорту на режими електричних мереж. *Техн. електродинаміка*. 2018. № 3. С. 74–82. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.03.074>
2. Бudyко В. І., Войтко С. В., Трофименко О. О. Економічні аспекти реалізації автономних зарядних станцій електромобілів на основі фотоелектричних батарей. *Відновлювана енергетика*. 2018. № 1(52). С. 19-25.
3. Беспроводная зарядка-автомобилей. URL: <https://ecocars.wixsite.com/sale/> (дата доступу 28 серпня 2015).
4. Trivino-Cabrera A., Gonzalez-Gonzalez J., Aguado J. *Wireless Power Transfer for Electric Vehicles: Foundations and Design Approach*. Springer. 2020. 175 p.
5. Song M., Belov P., Kapitanova P. Wireless Power transfer inspired by the modern trends in electromagnetics. *Applied Physics Reviews*. 2017. No 4. Pp.0211102(1-19).
6. Xi Zhang, Choug Zhu, Haitao Song. *Wireless Power Transfer Technologies for Electrica Vehicles*. Springer, 2022. 268 p.
7. Подольцев О.Д., Павлов В.Б., Западинчук О.П. Аналіз ефективності передачі електричної енергії в системі бездротової зарядки акумуляторної батареї електромобіля. *Техн. електродинаміка*. 2021. № 4. С. 63-69. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.04.063>
8. Павлов В.Б., Подольцев О.Д., Павленко В.С. Експериментальні дослідження макетного зразка бездротового зарядного пристрою електромобіля. *Техн. електродинаміка*. 2021. № 5. С. 21-26. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.05.021>
9. Linden D., Reddy T.B. *Handbook of Batteries*. McGraw-Hill, 2002. 1453 p.

COMPUTER SIMULATION AND RESEARCH OF ENERGY EFFICIENCY OF PROCESSES OF CHARGING AN ELECTRIC CAR BATTERY FROM A WIRELESS CHARGER

A.F. Zharkin, O.D. Podoltsev, V.B. Pavlov
Institute of electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine, e-mail: mobil_99@ukr.net

In the paper, based on the method of computer simulation, the process of charging a lithium-ion battery for an electric car from a wireless charger of the inductive-resonance type was investigated. It is shown that when modeling this process, it is necessary to take into account the simultaneous flow of two processes of different scales in time and interconnected - a short-term high-frequency process in the inverter of the charger with a characteristic time of 10-5 s and a long-term process of charging the battery with a characteristic time of 104 s. Direct numerical calculation of these two processes simultaneously requires significant computer resources. To solve this problem, a new approach is proposed and implemented in the Matlab/Simulink package, according to which, at the first stage, when calculating high-frequency processes in the inverter, there are modified Thevenin and Norton equivalents for a wireless charging device, taking into account the total internal losses in this device, and at in the second stage, the long-term battery charging process is calculated first in the mode of a constant current source, using the constructed Norton equivalent, and then in the mode of a constant voltage source, using the constructed Thevenin equivalent. This approach makes it possible to take into account interrelated and time-varying processes in the inverter and in the battery and to investigate the efficiency of wireless transmission of electrical energy from a stationary power source to a battery located on board an electric vehicle. According to the results of the calculations, it is shown that for the developed device, the integral efficiency of the entire battery charging process when the battery parameter increases from 20% to 95% is 86%. References 9, figures 8.

Key words: wireless power transmission, time-varying processes, computer modeling, battery charging efficiency.

1. Shidlovsky A.K., Zharkin A.F., Pavlov V.B., Novsky V.O. The influence of the development of the charging infrastructure of electric and hybrid transport on the regimes of electric networks. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2018. No 3. Pp. 74–82 (Ukr.) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.03.074>
2. Budko V.I., Voitko S.V., Trofymenko O.O. Economic aspects of the implementation of autonomous charging stations for electric vehicles based on photovoltaic batteries. *Renewable energy*. 2018. No 1(52). Pp. 19-25 (Ukr.)
3. Wireless car charging. URL: <https://ecocars.wixsite.com/sale/> (accessed at August 28, 2015).
4. Trivino-Cabrera A., Gonzalez-Gonzalez J., Aguado J. *Wireless Power Transfer for Electric Vehicles: Foundations and Design Approach*. Springer. 2020. 175 p.
5. Song M., Belov P., Kapitanova P. Wireless Power transfer inspired by the modern trends in electromagnetics. *Applied Physics Reviews*. 2017. No 4. Pp. 0211102(1-19).
6. Xi Zhang, Choug Zhu, Haitao Song. *Wireless Power Transfer Technologies for Electrica Vehicles*. Springer, 2022, 268 p.
7. Podoltsev O.D., Pavlov V.B., Zapadynchuk O.P. Analysis of the efficiency of electric energy transmission in the system of wireless charging of the battery of an electric vehicle. *Tekhnichna elektrodynamyka*. 2021. No 4. Pp. 63-69. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.04.063>
8. Pavlov V.B., Podoltsev O.D., Pavlenko V.S. Experimental studies of a mock-up sample of a wireless charger for an electric car. *Tekhnichna elektrodynamyka*. 2021. No 5. Pp. 21-26. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.05.021>
9. Linden D., Reddy T.B.. *Handbook of Batteries*. McGraw-Hill, 2002. 1453 p.

Надійшла 06.02.2023