

## КОМП'ЮТЕРНЕ ТА ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ БЕЗДРОТОВОГО ЗАРЯДНОГО ПРИСТРОЮ ЄМНІСНОГО ТИПУ ДЛЯ МАЛОГАБАРИТНОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ

**В.Б. Павлов\***, докт. техн. наук, **О.Д. Подольцев\*\***, докт. техн. наук, **В.Є. Павленко**  
Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна,  
e-mail: [mobil99@ukr.net](mailto:mobil99@ukr.net); [podol@ied.org.ua](mailto:podol@ied.org.ua)

*В роботі розглянуто один з можливих підходів до створення бездротового зарядного пристрою ємнісного типу, який дозволяє здійснювати заряджання безконтактним способом акумуляторних батарей малогабаритних транспортних засобів: електровізків, електроскутерів, електросамокатів. В основу розроблення такого пристрою покладено роботу схеми гібридного DC-DC конвертора, що працює на високій частоті (550 кГц), передає енергію у коло заряджання за допомогою двох ємнісних елементів та дає змогу отримувати на навантаженні постійну регульовану напругу, яка може бути як менше, так і більше вхідної постійної напруги. Розроблено дослідний зразок такого пристрою та наведено результати його експериментального дослідження, що підтверджують можливість використання даної схеми задля здійснення бездротового заряджання акумуляторної батареї. Розроблено комп'ютерну Simulink-модель такого пристрою, що враховує реальні значення всіх параметрів розробленого дослідного зразка та використовує базову модель літій-іонної акумуляторної батареї. За результатами проведених розрахунків визначено, що для розробленого пристрою ємнісного типу найбільші втрати виникають в котушках індуктивності, а величина ККД, яка характеризує ефективність процесу передачі електричної енергії від первинного джерела живлення до акумуляторної батареї, на початковому етапі її заряджання (коли параметр стану батареї SOC=50%) становить 80%. Бібл. 10, рис. 5.*

**Ключові слова:** бездротова передача електроенергії, ємнісний спосіб передачі енергії, ефективність заряджання акумуляторної батареї, електротранспорт.

Одним із сучасних трендів світової електротехніки є розвиток досліджень і розробок у галузі електричного транспорту та акумуляторних батарей підвищеної енергоємності для їх нового живлення [1]. При цьому слід відзначити, що станом на сьогодні інфраструктура засобів підзарядки акумуляторних батарей електромобілів перебуває ще на стадії становлення. В той же час світові виробники електромобілів та відповідної 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 [2 – 4].

Заряджання акумуляторних батарей електротранспорту може здійснюватися трьома відомими способами передачі електроенергії, а саме, за допомогою гальванічного підключення або бездротового заряджання шляхом встановлення індуктивного чи ємнісного зв'язку між передавальною та приймальною котушками. Сьогодні здійснення підзарядки електромобілів без використання будь-яких струмопровідних елементів стало можливим завдяки появі бездротових пристроїв. Тому технологія бездротової підзарядки проста та має такі переваги як підвищена зручність та відсутність потреби в кабелях, довговічність без необхідності постійно підключати та від'єднувати пристрої, а також на практиці сьогодні найчастіше застосовуються системи індуктивної зарядки на основі явища паралельного або послідовного резонансу, структурна схема яких найчастіше містить такі компоненти: вхідне джерело живлення, що регулюється, конденсаторний фільтр, трифазний інвертор високої частоти, високочастотний роздільний трансформатор, резонансний повітряний трансформатор, що складається з двох котушок (передавальної та приймальної) з послідовно включеними конденсаторами. Приймальна котушка з випрямлячем та фільтром знаходиться на транспортному засобі. Навантаженням випрямляча є акумуляторна тягова батарея (АБ). Основні особливості такої системи були розглянуті, наприклад, в роботах [3, 4] або роботах авторів даної статті [5, 6].

---

© Павлов В.Б., Подольцев О.Д., Павленко В.Є., 2024

ORCID: \* <https://orcid.org/0000-0003-0565-265X>; \*\* <https://orcid.org/0000-0002-9029-9397>

© Видавець Інститут електродинаміки НАН України, 2024



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

Ємнісну систему заряджання, особливо відносно невеликої потужності, можна розглядати як альтернативу традиційній індуктивній системі бездротової зарядки електромобіля. Це пов'язано з перевагами зазначеної системи, які полягають у простій топології, меншій кількості компонентів, кращих характеристиках щодо електромагнітних завад і надійності по відношенню до оточуючих металевих елементів.

У той же час відзначимо недолік ємнісної передачі енергії в необхідності конструктивного рішення – забезпечення мінімальної відстані між конденсаторними пластинами, дві з яких мають розташовуватися на екіпажній частині транспортного засобу. Таке конструктивне рішення важко здійснити на електромобілях та інших електротранспортних засобах середньої та великої вантажопідйомності, які мають акумуляторні батареї великої енергоємності.

Тому найбільш прийнятними для ємнісної зарядки є малогабаритні електротранспортні засоби: електросамокати, електроскутери, електроколяски і т.д.

Незважаючи на велику кількість робіт у галузі теорії та практики ємнісної передачі енергії, зокрема [7, 8], на даний час майже відсутні дослідження щодо практичного використання цього способу безконтактної зарядки саме для малогабаритних транспортних засобів

**Метою роботи** є фізичне та комп'ютерне моделювання розробленого експериментального зразка бездротового зарядного пристрою ємнісного типу та визначення ефективності передачі електроенергії таким бездротовим способом.

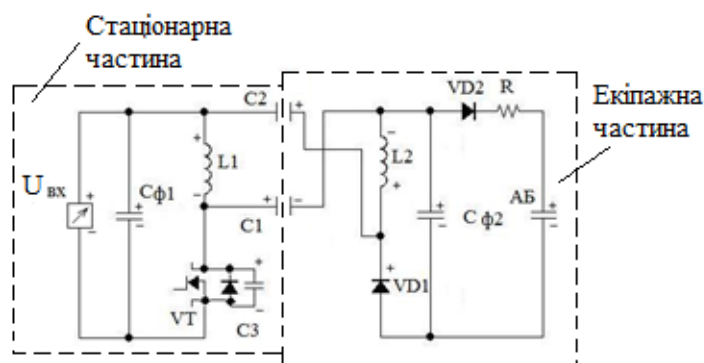


Рис. 1

### Експериментальний зразок бездротового зарядного пристрою ємнісного типу.

На рис. 1 показано принципову електричну схему бездротової системи ємнісного заряду з резонансним інвертором. Параметри системи наведено в табл. 1. Інвертор, який розроблено на основі транзистору STW45N60DM2AG (650 В, 34 А, 0,093 Ом), [10] забезпечує регулювання частоти в межах 400-600 кГц. Максимальний струм – 30 А, номінальна частота роботи для дослідження – 550 кГц. Вхідна напруга забезпечується регульованим джерелом постійної напруги. Конденсатори C1 і C2 системи ємнісного заряду виконано з фольгованого текстоліту товщиною 0,5 мм із розмірами прямокутної пластини 25x46 см. Хоча на практиці використовують пластини із захисною ізоляцією та з повітряним проміжком між ними, фольгований текстоліт є модельне наближення до реальності (ємності будуть мати таке саме значення, як і між пластинами із повітряним проміжком 0,25 мм).

На рис. 2 наведено осцилограми керуючого сигналу 12 В (крива 1), напруги на транзисторі (крива 2) – 1 поділлка

Таблиця 1		
Параметри	Позначення	Значення
Ємності зв'язку	$C_1, C_2$	10 nF, 10 nF
Первинна індуктивність	$L_1, R_1$	14 μH, 0,5 Ом
Вторинна індуктивність	$L_2, R_2$	7,6 μH, 0,18 Ом
Паразитна індуктивність	$L_{\text{par}}$	240 nH
Снаберна ємність	$C_3$	0,47 nF
Резистор	$R$	1 Ом
Вхідна/вихідна ємність	$C_{\phi 1}, C_{\phi 2}$	2000pF
Вхідна напруга	$U_{\text{вх}}$	70 В
Вхідний струм	$I_{\text{вх}}$	0,6 А
Струм заряду	$I_{\text{зар}}$	1,9 А
Акумуляторна батарея	-	7,7 В, 20 А·год

=100 В, струму транзистора (крива 3) – 1 поділлка =1 А.

З осцилограм видно, що за вхідній напрузі 70 В напруга на транзисторі досягає 220 В за максимального струму транзистора 1,97 А і частоті 552,4 кГц.

На рис. 3 показано осцилограми напруги на дроселі L2 (крива 1) та струм у колі VD1 (крива 2). Максимальна напруга на дроселі становить 22 В. 1 поділлка =10 В; 2 поділлка =2 А.

**Комп'ютерне моделювання бездротового зарядного пристрою ємнісного типу.** Одним з головних питань, що виникає у процесі розробки таких пристроїв, є визначення їхньої енергетичної ефективності на етапі проектування. Дослідження енергоефективності розробленого експеримен-

тального зразка ускладнюється роботою на високій частоті та необхідністю застосування датчиків струму та напруги, що працюють на частоті 550 кГц із заданою похибкою. Альтернативним методом дослідження ефективності таких систем є комп'ютерне моделювання і, відповідно, побудова комп'ютерної моделі бездротового зарядного пристрою, що враховує втрати в усіх його елементах. Виходячи з цього, в роботі була створена Simulink-модель такого пристрою, яка показана на рис. 4. Було застосовано модель, яка представляє собою гібридний buck-boost dc/dc конвектор, що дає змогу отримати на навантаженні напругу, яка може бути як менше (buck конвектор), так і більше за вхідну напругу (boost конвектор) [9].

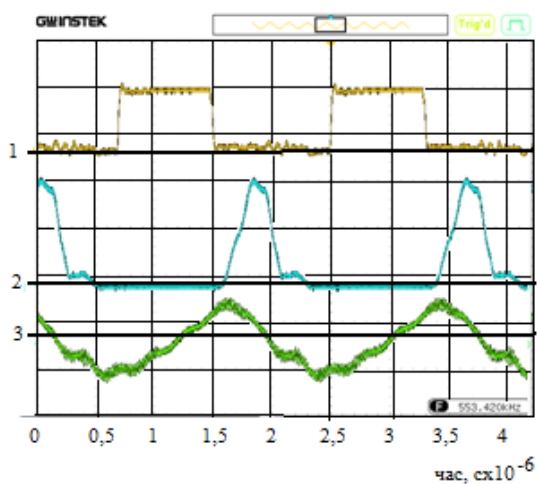


Рис. 2

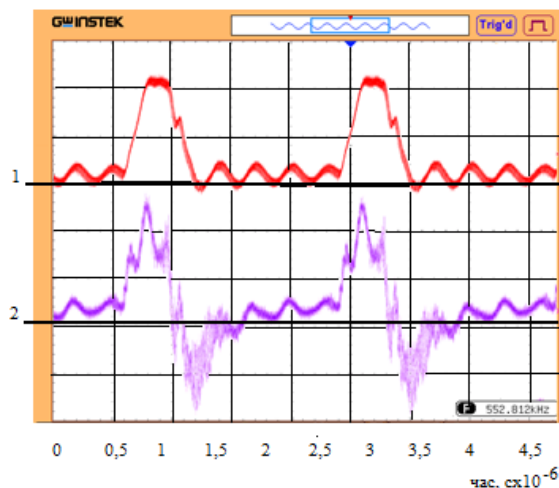


Рис. 3

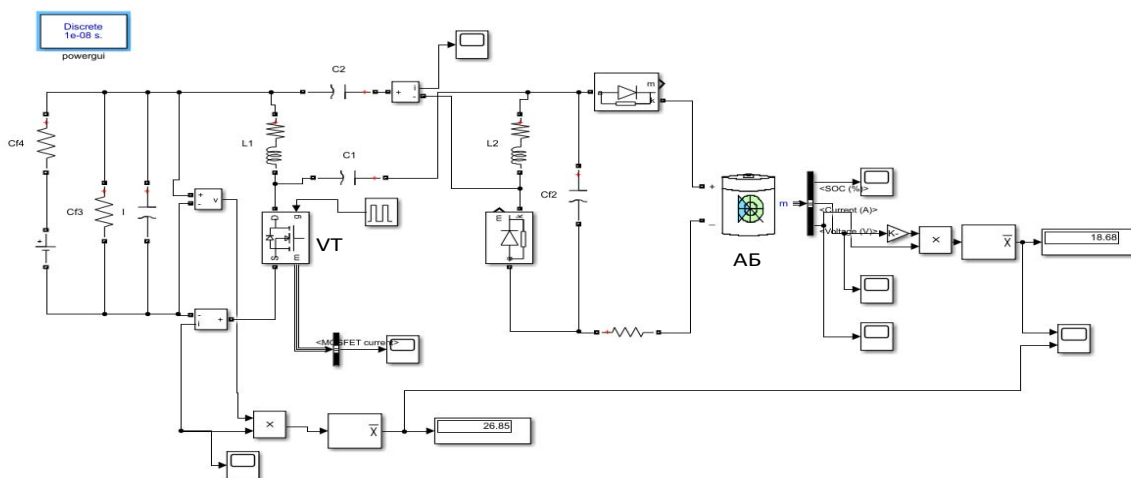


Рис. 4

Як навантаження в схемі розглядається літій-іонна АБ, параметри якої наведено у табл. 2. У процесі моделювання використовується базова модель АБ пакету Simulink. Для керування роботою транзистора в схемі використовується генератор періодичних імпульсів, що дає можливість змінювати значення коефіцієнту заповнення цих імпульсів  $D = t_{on}/T$ , де  $t_{on}$  – час включення транзистора, а  $T = 1/f$  – період, що відповідає робочій частоті пристрою  $f = 550$  кГц.

Таблиця 2	Спосіб заряджання	
	Індуктивний	Ємнісний
Робоча частота	10 кГц ÷ 10 МГц	1 ÷ 10 МГц
Потужність	0,1 ÷ 10 кВт	0,1 ÷ 1 кВт
Повітряний проміжок	1 мм ÷ 1 м	0,1 ÷ 1 мм

В роботі досліджувався режим холостого ходу, коли відключалася АБ, і вимірювалася напруга на виході пристрою  $U_H$  та напруга на вході –  $U_D$  за різних значеннях коефіцієнту заповнення  $D$ . Отримані результати показано на рис. 5, а. Видно, що напруга на виході може бути як менше (коли  $<0,2$ ), так і більше вхідної напруги (коли  $D > 0,2$ ) і це є особливістю саме такої структури перетворювача. Таким чином, змінюючи значення

$D$ , можна змінювати вихідну напругу в широкому діапазоні і тим самим керувати режимом заряджання АБ.

Було проведено розрахунки режиму заряджання акумуляторної батареї на початковому етапі, коли параметр, що характеризує відносне значення її заряду,  $SOC = 50\%$ . Зазначені результати комп'ютерних розрахунків наведено на рис. 5, б, в, г. На рис. 5, б показано залежності напруг та струму від часу на транзисторі VT. Видно, що максимальне значення напруги на транзисторі досягає 220 В, що співпадає із експериментом (рис. 2). Відповідна залежність напруг та струму на АБ показано на рис. 5, в. При цьому, коефіцієнт пульсації для напруги  $K_U = (U_{max} - U_{min}) / (U_{max} + U_{min}) 100\%$  складає 0,09%, а для струму –  $K_I = 85\%$ . Така значна пульсація струму пов'язана з тим, що величина струму АБ,  $I_{AB} = (U_{AB} - E_{AB}) / R_{AB}$ , зменшується внаслідок наявності постійної складової – величини ЕРС батареї  $E_{AB}$ , зменшується постійна складова напруги  $U_{AB}$ , що і призводить до значного зростання  $K_I$  відносно  $K_U$ .

Задля оцінки ефективності передавання електричної енергії від первинного джерела постійної напруги до АБ в роботі розраховувалася потужність на вході у пристрій та на АБ. Результати розрахунку цих потужностей як функцій часу показано на рис. 5, г. Величина ККД пристрою, як співвідношення цих потужностей,  $\eta = P_{AB} / P_{вхід} = 19,6/24,4 = 0,8$ . Причому, найбільші втрати мають місце в котушках індуктивності  $L_1$  та  $L_2$  і складають 1,5 Вт та 0,88 Вт відповідно. Отже, для зменшення цих втрат доцільно підвищувати добротність таких котушок, наприклад, шляхом використання проводу типу літцендрат та вибору їх оптимальних розмірів.

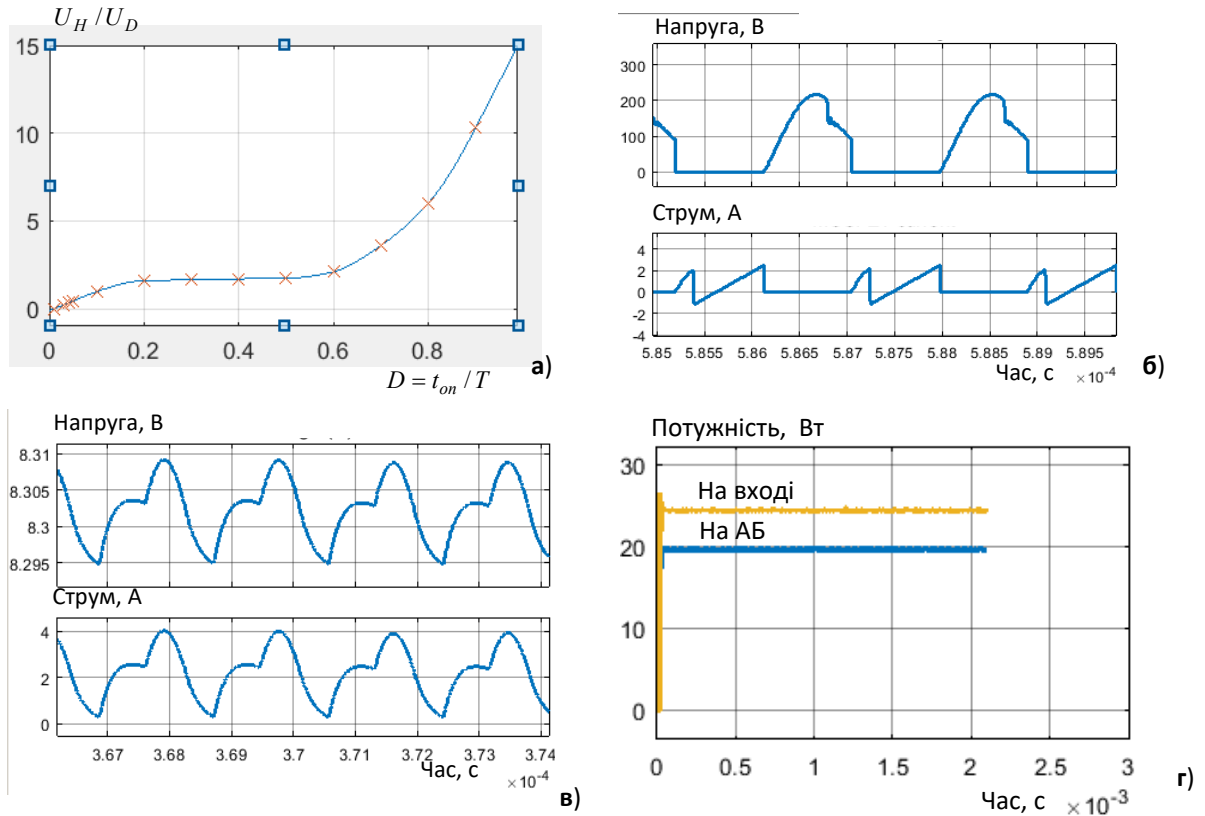


Рис. 5

Згідно з дослідженнями, що висвітлені у [7] (табл. 2), можливість реалізації ЕСЗ для споживачів наразі обмежується потужністю 1 кВт. Звідси і час заряджання батареї, наприклад, малогабаритного транспортного засобу енергоемністю 5 кВт·год буде становити приблизно 5 год.

**Висновки.** Розроблено дослідний зразок бездротового зарядного пристрою емнісного типу, який дає змогу здійснювати заряджання безконтактним способом акумуляторних батарей малогабаритних транспортних засобів: електровізків, електроскутерів, електросамокатів. В основу створення такого пристрою покладено роботу схеми гібридного DC-DC конвертора, що працює на високій частоті (550 кГц) та дає змогу отримувати у навантаженні постійну регульовану напругу, яка може бути як менше, так

і більше вхідної постійної напруги. Результати проведених експериментів показали можливість використання даної схеми для бездротового заряджання таких батарей.

Розроблено комп'ютерну Simulink-модель такого пристрою, що враховує реальні значення всіх параметрів розробленого зразка та використовує базову модель літій-іонної акумуляторної батареї. Ця модель дає можливість провести розрахунки компонентів бездротового зарядного пристрою ємнісного типу на різну потужність та напругу. За результатами проведених розрахунків показано, що для розробленого пристрою ємнісного типу найбільші втрати виділяються в котушках індуктивності, а величина ККД, що характеризує ефективність процесу передачі електричної енергії від первинного джерела живлення до безпосередньо акумуляторної батареї, на початковому етапі заряджання (коли параметр стану батареї SOC=50%) становить  $\eta = 80\%$ .

1. Sanguesa J.A., Torres-Sanz V., Garrido P., Martinez F.J., Marquez-Barja J.M. A Review on Electric Vehicles: Technologies and Challenges. *Smart Cities*. 2021. No 4. Pp. 372–404. DOI: <https://doi.org/10.3390/smartcities4010022>.
2. Trivino-Cabrera A., Gonzalez-Gonzalez J., Aguado J. Wireless Power Transfer for Electric Vehicles: Foundations and Design Approach. Springer, 2020. 175 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-26706-3>.
3. 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). DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4981396>.
4. Xi Zhang, Choug Zhu, Haitao Song. Wireless Power Transfer Technologies for Electrica Vehicles. Springer, 2022. 268 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-981-16-8348-0>.
5. Zharkin A.F., Podoltsev O.D., Pavlov V.B.. Computer simulation and research of energy efficiency of processes of charging an electric car battery from a wireless charger. *Tekhnichna Elerodynamika*. 2023. No 4. Pp. 11-18. (Ukr) .DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.04.011>.
6. Podoltsev O.D., Pavlov V.P., Zapadynchuk O.P. Analysis of the efficiency of electric power transmission in the system of wireless charging of the electric vehicles battery. *Tekhnichna Elerodynamika*. 2021. No 4. Pp. 63-69. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.04.063>.
7. Dai J., Ludois D.C. A Survey of Wireless Power Transfer and a Critical Comparison of Inductive and Capacitive Coupling for Small Gap Applications. *IEEE Trans. Power Electron*. 2015. No 30. Pp. 6017–6029. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2415253>.
8. Li L., Wang Z., Gao F., Wang S., Deng J. A family of compensation topologies for capacitive power transfer converters for wireless electric vehicle charger. *Appl. Energy*. 2020. Vol. 260. Pp. 114156. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114156>.
9. Rashid M.H. Power Electronics. Prentice Hall, 2021. 602 pp.
10. Jiejian Dai, Daniel C. Ludois. Capacitive Power Transfer Through a Conformal Bumper for Electric Vehicle Charging-. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2016. Vol. 4. Issue 3. Pp. 1015 – 1025. DOI: <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2015.2505622>.

## COMPUTER AND PHYSICAL SIMULATION OF CAPACITIVE TYPE WIRELESS CHARGER FOR SMALL ELECTRIC VEHICLE

**V.B. Pavlov, O.D. Podoltsev, V.E. Pavlenko**

**Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine.**

**Beresteyskiy Ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine.**

**E-mail: [mobil99@ukr.net](mailto:mobil99@ukr.net); [podol@ied.org.ua](mailto:podol@ied.org.ua).**

*The work considers one of the possible approaches to the creation of a capacitive type wireless charger, which allows for non-contact charging of batteries of small-sized vehicles: electric carts, electric scooters, electric scooters. The basis of the development of such a device is the operation of the hybrid DC-DC converter circuit, which operates at a high frequency (550 kHz), transfers energy to the charging circuit using two capacitive elements and allows receiving a constant regulated voltage on the load, which can be either lower or and more input DC voltage. A prototype of such a device has been developed and the results of its experimental research are given, which confirm the possibility of using this scheme for wireless charging of the battery. A Simulink computer model of such a device has been developed, which takes into account the real values of all parameters of the developed prototype and uses the basic model of a lithium-ion battery. According to the results of the calculations, it was determined that for the developed device of the capacitive type, and the largest losses occur in the inductor coils, the value of efficiency, which characterizes the efficiency of the process of transferring electrical energy from the primary power source to the battery, at the initial stage of its charging (when the parameter of the state of the battery SOC =50%) is 80%. References 10, figures 5.*

**Key words:** wireless transmission of electricity, capacitive method of energy transmission, battery charging efficiency, electric transport.

Надійшла 30.04.2024

Остаточний варіант 27.05.2024