

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ЗРАЗКА БЕЗДРОТОВОГО ЗАРЯДНОГО ПРИСТРОЮ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

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

*В роботі наведено результати експериментального дослідження створеного дослідного зразка бездротового зарядного пристрою індуктивного типу із послідовним резонансом в колах передавальної та приймальної котушок. Показано, що ефективність передачі в ньому електричної енергії від зовнішнього джерела до акумуляторної батареї, що характеризується величиною ККД, приймає значення в інтервалі 39% – 78% і залежить від робочої частоти та відстані між котушками. У разі збільшення відстані від 40 до 150 мм величина ККД зменшується відповідно з 71,4% до 58%. Також показано, що у випадку використання котушок із зовнішнім діаметром 500 мм зсув між ними у горизонтальній площині в процесі заряджання акумуляторної батареї на відстань до 100 мм не призводить до суттєвого зменшення ККД. Проведено порівняння експериментальних значень ККД із розрахунковими, які одержано на спрощеній моделі пристрою та враховують тільки резистивні втрати в обох котушках. Показано, що експериментальні значення ККД дослідного зразка на 15-20% менше, ніж розрахункові. Бібл. 8, рис. 5, табл. 1.*

**Ключові слова:** бездротова передача енергії, бездротова зарядка акумуляторної батареї, повітряний трансформатор, послідовний резонанс.

**Вступ.** Одним із сучасних трендів в галузі електротехніки є створення електричного транспорту та акумуляторних батарей підвищеної енергоємності для їхнього живлення. При цьому станом на сьогодні інфраструктура точок підзарядки акумуляторних батарей такого транспорту, особливо якщо для цього використовуються відновлювані джерела електроенергії, перебуває ще на стадії становлення і чим менше розвинена країна, тим більше проблем з цим [1, 2]. Світові виробники електромобілів та необхідної для них зарядної інфраструктури найближчою метою вважають розробку бездротових зарядних пристроїв, оскільки такі системи досить перспективні з огляду на тенденцію зростання популярності електротранспортних засобів [3 – 5].

Заряджання акумуляторних батарей електротранспорту може здійснюватися трьома способами передачі електроенергії – за допомогою гальванічного підключення або ж бездротовою зарядкою завдяки встановленню магнітного або ємнісного зв'язку між передавальною та приймальною котушками. Зараз вже можливе здійснення підзарядки електромобілів без використання будь-яких дротів або інших струмопровідних елементів завдяки появі бездротових зарядних пристроїв (БЗП).

Однією з проблем бездротової зарядки раніше був відносно низький ККД передачі електроенергії. Перші такі зарядні станції були здатні передати по повітрю тільки 60% електроенергії, але на початок 2020 року найбільше значення ККД було досягнуто 87,5%.

Важливою проблемою, пов'язаною з впровадженням бездротової зарядки електромобілів, є також нормування спектра електромагнітного випромінювання. Передавачі таких станцій працюють зазвичай на частоті 85 кГц. Частоти гармонік при цьому досягають 30 МГц, тобто охоплюють довгохвильовий, середньохвильовий та короткохвильовий діапазони. І, якщо радіомовлення в зазначених діапазонах поступово відходить у минуле, то службовий зв'язок на коротких хвилях ще існує. Можливі завади короткохвильового радіозв'язку – проблема державного рівня. Крім цього, свою стурбованість щодо завад від зарядних станцій офіційно висловив Міжнародний союз радіоаматорів (IARU) [6, 7].

Для повного заряду акумуляторної батареї ємністю 24 кВт·год менше ніж за 8 – 12 годин потрібна передача електроенергії із мінімальною потужністю 3 кВт. Щоб забезпечити достатню передачу електроенергії від джерела обмеженої потужності, наприклад, власний будинок із показниками 220 В та 30 А, ефективність передачі електроенергії має перевищувати 70%. Також кращий ККД буде означати меншу кількість теплоти, що виділяється у зарядному пристрої та акумуляторі, і дасть змогу спростити систему їхнього охолодження. У разі використання бездротового зарядного пристрою, який має передавальну та приймальну котушки, зазор між ними повинен бути 50–100 мм залежно від того, транспортний засіб порожній або повністю завантажений, а зсув між котушками у горизонтальній площині не повинен перевищувати 100 мм. Приймальна котушка має бути діаметром менше 1 м для практичного

встановлення на звичайних легкових автомобілях. Також зазначимо, що використовувати бездротовий зарядний пристрій доцільно і в системах швидкої зарядки, коли його потужність буде досягати 50 – 100 кВт, а включення та відключення може здійснюватися в автоматичному режимі без втручання людини.

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 котушок [4]. У попередній роботі авторів [8] наведено результати теоретичних досліджень ефективності передачі енергії у бездротовому зарядному пристрої із послідовним резонансом у колах обох котушок. Було показано, що величина цієї ефективності визначається значенням безрозмірного параметра  $k_{12}Q$  (добуток коефіцієнту магнітного зв'язку та добротності котушок) та співвідношенням активних опорів акумуляторної батареї та котушки. Показано також, що існує оптимальне значення співвідношення, за якого ефективність пристрою є максимальною (за умови  $k_{12}Q = \text{const}$ ), а її значення монотонно зростає із ростом параметра  $k_{12}Q$ . Причому, задля досягнення ефективності більше 0,8, необхідно мати систему котушок із значенням  $k_{12}Q > 10$ . Але при цьому аналізується лише спрощена схема пристрою, коли враховуються тільки резистивні втрати в обох котушках. В той же час відомо, що втрати на високій частоті у смісних елементах, в інверторі та випрямлячі можуть значно зменшувати ефективність енергопередачі. Іншим питанням, яке не досліджувалося раніше, є вплив відстані між котушками у горизонтальній площині (зсув котушок) на ефективність передачі енергії.

Враховуючи вищесказане, **метою роботи** є експериментальне визначення впливу робочих параметрів розробленого дослідного зразка БЗП – частоти струму в котушках, відстані між котушками як у горизонтальній, так і вертикальній площині – на ефективність передачі енергії від джерела живлення до акумуляторної батареї електромобіля, а також порівняння результатів цих досліджень із розрахунковими даними, які одержано на спрощеній моделі пристрою.

**Опис створеного дослідного зразка.** Структурну схему створеного дослідного зразка бездротового зарядного пристрою, що включає основні та додаткові компоненти, показано на рис. 1, а на рис. 2 показано його зовнішній вигляд. На рис. 1 зображено: ДЖ – регульоване джерело живлення постійної напруги; ІН – високочастотний інвертор; Тр1 – високочастотний понижуючий трансформатор; Тр2 – повітряний трансформатор; В – високочастотний випрямляч; С1, С2 – конденсатори послідовного резонансу; С3 – фільтровий конденсатор; АБ – акумуляторна батарея (навантаження).

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.

Інвертор ІН зібраний на транзисторах STW45N60DM2AG і забезпечує плавне регулювання частоти в межах 10 – 100 кГц, максимальний струм – 20 А.

Трансформатор Тр1 виконано на феритовому осерді E85/44/27 TP4A з коефіцієнтом трансформації 11:1.

Трансформатор Тр2 виконано у виді двох котушок однакового діаметру 440 мм і з однаковим числом витків (чотири). Котушки мають чотири витка, виготовлені з полого мідного провідника діаметром 10 мм і мають зовнішній діаметр 500 мм і внутрішній – 370 мм. Резонансний контур створюється за допомогою конденсаторів С1 та С2 – МКР, 600 В, 0,21 – 0,5 мкФ.

Випрямляч В виконано на високочастотних діодах VS-HF A16PB, 16 А, 600В, на виході якого встановлено фільтруючий конденсатор С3 SH NO PCBs 400В 380 мкФ.

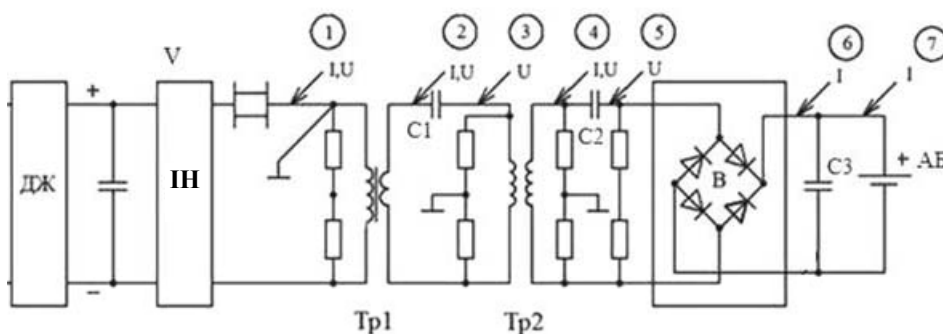


Рис. 1

Випрямлена напруга подається на батарею АБ 46 В. Величина струму в процесі заряду регулюється інвертором.

**Аналіз результатів експерименту.** В ході експерименту основна увага приділялася характеру електромагнітних процесів та величині ефективності



Рис. 2

характер цих кривих переважно не змінюється.

№ з/п	$f=100$ кГц			50кГц	100кГц	50кГц
	$h$ , мм	$I$ , А	$\eta$ , %	$\eta$ , %	$\eta$ середнє, %	$\eta$ середнє, %
1	150	10	65,2	50,5	65,8	50,8
2	150	10	64,9	52,0		
3	150	10	67,4	49,9		
4	150	5	58,7	39,3	58,0	38,7
5	150	5	58,7	37,7		
6	150	5	57,3	39,3		
7	100	7,5	71,6	68,9	70,3	66,6
8	100	7,6	69,1	67,3		
9	100	7,7	70,2	63,7		
10	100	5	63,3	67,9	65,6	68,0
11	100	5	67,0	69,5		
12	100	5	66,6	66,8		
13	40	10	76,4	76,2	77,2	75,4
14	40	10	78,1	75,0		
15	40	10	77,3	75,1		
16	40	5	73,9	78,0	71,4	76,9
17	40	5	71,1	78,0		
18	40	5	69,3	74,9		
Горизонтальне зміщення котушки на 100 мм.						
19	100	7,8	67,1	65,3	65,1	61,5
20	100	7,4	63,2	60,0		
21	100	7,6	65,1	59,2		
Горизонтальне зміщення котушки на 200 мм.						
22	100	7,1	38,1	37,1	39,8	35,2
23	100	7,3	42,0	35,3		
24	100	7,5	39,4	33,2		

Аналіз результатів вимірювання ККД (табл.) показує:

передачі енергії, що характеризується величиною ККД пристрою, на робочих частотах струму в котушках 50 і 100 кГц. При цьому змінювалася відстань між котушками як по вертикалі ( $h = 40 - 150$  мм), так по горизонталі – до 100 мм. В процесі досліджень проводилося осцилографування струмів та напруг у вузлах та відповідних вітках пристрою (1 – 8), вказаних на структурній схемі рис. 1. Осцилограми показано на рис. 3, а – 3, д. ККД системи визначалося як відношення середньої за період потужності на вході акумуляторної батареї до середньої потужності на вході високочастотного інвертора. Результати вимірювань наведено у таблиці. Осцилограми струмів і напруг, зняті на частоті 100 кГц та за входної напруги 100 В, показано на рис. 3. Зі зміною частоти (50 кГц)

У разі подачі прямокутних імпульсів від ІН на трансформатор Tr1, струм у первинному колі трансформатора має пилкоподібну форму тим більше виражену, чим більше його величина (рис. 3, а). На рис. 3, б показано напругу та струм на вторинній обмотці трансформатора Tr1. Як видно з осцилограм, струм вторинної обмотки має явно виражену синусоїдальну форму, що дає змогу отримати синусоїдальну форму напруги (рис. 3, в) на первинній обмотці повітряного трансформатора Tr2 у колі після резонансного конденсатора С1. При цьому напруга обмотки в результаті резонансу збільшується практично в два рази. На рис. 3, г показано осцилограми у вторинній обмотці повітряного трансформатора Tr2. Форма струму і напруги практично синусоїдальна. В той же час напруга вторинної обмотки після резонансного конденсатора С2 дещо відрізняється від синусоїди внаслідок нелінійної характеристики діодів випрямляча В, вихідний струм якого до фільтрового конденсатора С3 показано на рис. 3, д.

На рис. 3, в показано струм заряду акумуляторної батареї АБ. Отже можна констатувати, що в основному струми та напруги на елементах системи змінюються за законом, близьким до синусоїдального, і деяке спотворення здійснюється в силу нелінійних властивостей елементів схеми.

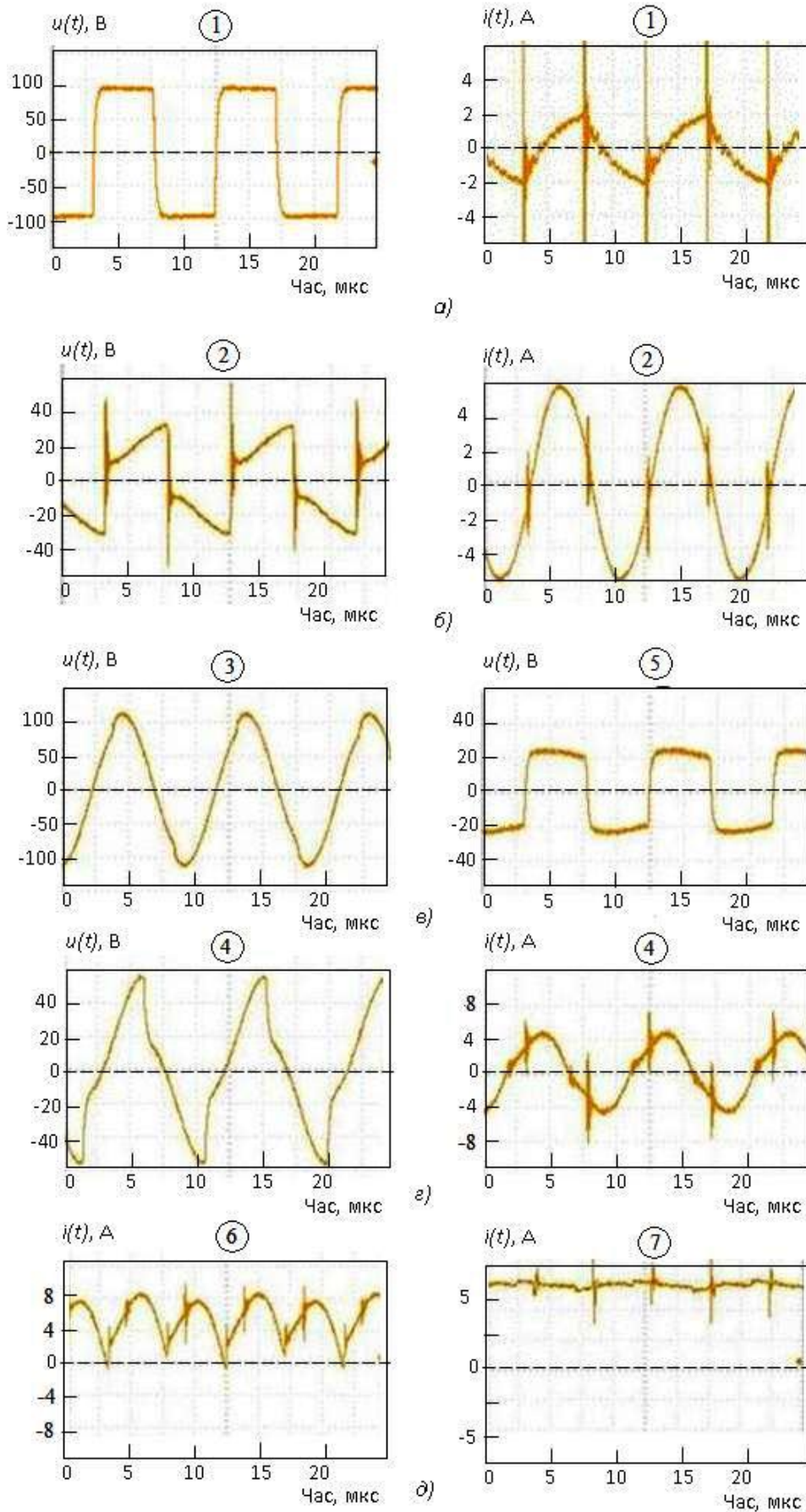


Рис. 3

- зниження ККД в усьому діапазоні зміни відстані між котушками у разі переходу зі 100 кГц на 50 кГц в середньому на 22,8 % за  $h = 150$  мм і 5,3 % – за  $h = 100$  мм. Однак, за малих струмів навантаження та малому зазорі ККД (50 кГц) перевищує ККД (100 кГц) в середньому на 7 %;
- збільшення ККД по мірі зменшення зазору між котушками на 8 % (100 кГц) і 34 % (50 кГц) за  $h = 40 - 150$  мм;
- у разі збільшення струму зарядки в два рази ККД підвищується в середньому на 7%;
- у випадку зміщення котушки на 100 мм зменшення ККД становить 7,4 % (100 кГц) і 7,7 % (50 кГц);
- у разі зміщення котушки на 200 мм зменшення ККД становить 30,7 % (100 кГц) і 33 % (50 кГц);
- в середньому максимальне значення ККД досягало 78 %, мінімальне – 39 %.

**Вплив зсуву котушок на ефективність передачі енергії.** Задля визначення умов щодо точності позиціонування електромобіля із прийнятною котушкою відносно передавальної, необхідно більш детально дослідити вплив відстані між котушками у горизонтальній площині – величини зсуву  $y$  – на характеристики пристрою.

Для цього проводилися розрахунки коефіцієнту магнітного зв'язку між котушками  $k_{12}$  в залежності від зсуву  $y$  шляхом вирішення тривимірної польової задачі для магнітного поля двох котушок за допомогою пакету програм Comsol.

Одержану розрахункову залежність  $k_{12}(y)$  за відстані між котушками у вертикальній площині  $h = 100$  мм наведено на рис. 4. Ця залежність дає змогу розрахувати вплив величини зсуву  $y$  на ефективність перетворення електричної енергії – величину ККД. Використовуючи результати роботи [8], значення цієї величини може бути розраховано як

$$\eta = \left[ 1 + R / R_L + (k_{12} Q)^{-2} (R / R_L + 2 + R_L / R) \right]^{-1}.$$

На рис. 5 наведено розрахункову залежність  $\eta(y)$  за добротності котушки  $Q = 215$  та значенні співвідношення активного опору навантаження та котушки  $R_L / R = 700$ , де  $R$  – активний опір котушки на робочій частоті 100 кГц. Із цього рисунку видно, що у разі зсуву котушок до 100 мм величина ККД зменшується несуттєво, а при зсуві більше 200 мм ефективність передачі енергії в пристрої, що

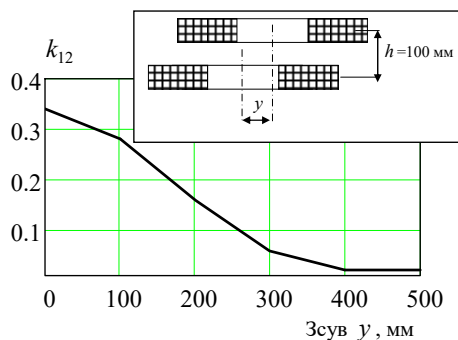


Рис. 4

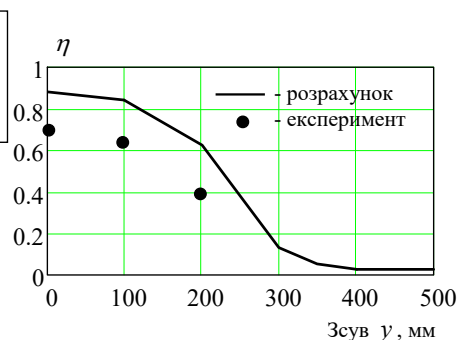


Рис. 5

досліджується, значно зменшується. Ця залежність враховує тільки резистивні втрати в обох котушках, та не враховує втрати в інверторі, випрямлячі, трансформаторі та в ємнісних елементах на частоті 100 кГц, які можуть значно зменшувати значення ККД. На рис. 5 задля порівняння наведено

експериментальні дані, що враховують втрати у всіх елементах пристрою, які свідчать, що у такому разі значення ефективності енергопередачі зменшується на 15-20 % від розрахункового за виразом (1), одержаного у [8] для ідеалізованої моделі пристрою бездротової передачі електричної енергії.

**Висновки.** В роботі проведено експериментальні дослідження створеного дослідного зразка бездротового зарядного пристрою індуктивного типу із послідовним резонансом в колах передавальної та приймальної котушок та визначено залежність ефективності передачі електричної енергії від зовнішнього джерела до акумуляторної батареї, що характеризується величиною ККД, від його робочих параметрів – частоти та відстані між котушками у горизонтальній та вертикальній площині. Показано, що зростання робочої частоти із 50 до 100 кГц призводить до росту величини ККД, а у разі збільшення відстані між котушками від 40 до 150 мм величина ККД зменшується відповідно з 71,4 % до 58 %. За результатами експериментальних та розрахункових даних показано, що під час заряджання акумулятора величина зсуву між прийнятною та передавальною котушками допустима в межах 0 – 100 мм без суттєвого зменшення ККД.

Порівняння експериментальних та розрахункових даних, одержаних на спрощеній моделі пристрою показує, що значення вимірюваного ККД дослідного зразка на 15-20 % менше, ніж розрахункове.

Одержані експериментальні значення ККД, що досягають до 78 %, можуть бути підвищені у разі використання сучасних компонентів для виготовлення зарядного пристрою та випрямляча та під час виготовлення котушок із використанням проводу типу літцендрат.

Роботу виконано за темою «Розвиток теоретичних засад і розроблення рекомендацій по створенню високоефективних систем заряду накопичувачів енергії електромобільного транспорту з урахуванням вимог забезпечення електромагнітної сумісності з системою електроживлення», державний реєстраційний номер 0116U008455, КПКВК 6541030.

1. Ahmad A., Saad Alam M.S., Chalan R.C. A Comprehensive Review of Wireless Charging Technologies for Electrical Vehicles. *IEEE Transaction On Transportation Electrification*. 2018. Vol. 4. Issue 1. Pp. 38-63. DOI: <https://doi.org/10.1109/TTE.2017.2771619>
2. Choi S.Y., Jeong S.Y., Gu B.W., Lim G.C., Rim C.T. Ultraslim S-Type Power Supply Rails for Roadway – Powered Electric Vehicles. *IEEE Transaction on Power Electronics*. 2015. Vol. 30. No 11. Pp. 6456-6468. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2444894>
3. Беспроводная зарядка автомобилей. URL: <https://ecocars.wixsite.com/sale/> (дата доступу 25.09.2020)
4. Trivino-Cabrera A., Gonzalez-Gonzalez J.M., Aguado J.A. 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). DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4981396>
6. Беспроводная зарядка для электрокара: настоящее и будущее, плюсы и минусы. URL: <https://itc.ua/articles/besprovodnaya-zaryadka-dlya-elektrokara-nastoyashche-i-budushhee-plyusyi-i-minusyi/> (дата доступу 25.09.2020)
7. Индуктивная зарядка – Inductive charging. URL: [https://wikichi.ru/wiki/Inductive\\_charging#Electric\\_vehicles](https://wikichi.ru/wiki/Inductive_charging#Electric_vehicles) (дата доступу 25.05.2020)
8. Подольцев О.Д., Павлов В.Б., Западничук О.П. Аналіз ефективності передачі електричної енергії в системі бездротової зарядки акумуляторної батареї електромобіля. *Техн. електродинаміка*. 2021. № 4. С. 63-70. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.04.063>

## EXPERIMENTAL STUDY OF A TEST SAMPLE OF A WIRELESS POWER TRANSFER FOR ELECTRIC VEHICLES

V.B. Pavlov, O.D. Podoltsev, V.E. Pavlenko,  
Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
Pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine, e-mail: [mobil99@ukr.net](mailto:mobil99@ukr.net)

*A prototype of a wireless charger of inductive type with serial resonance in the circuits of the transmitting and receiving coils has been developed and manufactured, and experimental studies of the efficiency of power transmission from an external source to a storage battery have been carried out. It is shown that the efficiency of the created sample takes values in the range 39% - 78 % and depends on the operating frequency and the distance between the coils. It is also shown that when using coils with an outer diameter of 500 mm, the positioning of these coils in the process of charging the battery at a distance of up to 10 cm does not lead to a significant decrease in efficiency. The experimental values of the efficiency are compared with the calculated ones obtained on a simplified model that takes into account only resistive losses in the coils, and it is shown that the experimental values of the efficiency are 15-20 % less than the calculated ones. References. 8, figures. 5, table 1.*

**Key words:** wireless power transmission, wireless battery charging, air transformer, series resonance.

1. Ahmad A., Saad Alam M.S., Chalan R.C. A Comprehensive Review of Wireless Charging Technologies for Electrical Vehicles. *IEEE Transaction On Transportation Electrification*. 2018. Vol. 4. Issue 1. Pp. 38-63. DOI: <https://doi.org/10.1109/TTE.2017.2771619>
2. Choi S.Y., Jeong S.Y., Gu B.W., Lim G.C., Rim C.T. Ultraslim S-Type Power Supply Rails for Roadway – Powered Electric Vehicles. *IEEE Transaction on Power Electronics*. 2015. Vol. 30. No 11. Pp. 6456-6468. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2444894>
3. Беспроводная зарядка автомобилей. URL: <https://ecocars.wixsite.com/sale/> (accessed 25.09.2020) (Rus)
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). DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4981396>
6. Беспроводная зарядка для электрокара: настоящее и будущее, плюсы и минусы. URL: <https://itc.ua/articles/besprovodnaya-zaryadka-dlya-elektrokara-nastoyashche-i-budushhee-plyusyi-i-minusyi/> (accessed 25.09.2020) (Rus)
7. Индуктивная зарядка – Inductive charging. URL: [https://wikichi.ru/wiki/Inductive\\_charging#Electric\\_vehicles](https://wikichi.ru/wiki/Inductive_charging#Electric_vehicles) (accessed date 25.05.2020) (Rus)
8. Podoltsev O.D., Pavlov V.B., Zapadnychuk O.P. Analysis of the efficiency of electric power transmission in the system of wireless charging of the electric vehicle's battery. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2021. No 4. Pp. 63-70. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.04.063> (Ukr)

Надійшла 30.11.2020  
Остаточний варіант 03.06.2021