

**ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ОСНОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ БЕЗДРОТОВОГО ЗАРЯДНОГО ПРИБОРУ ДЛЯ ЗАРЯДКИ АКУМУЛЯТОРНОЇ БАТАРЕЇ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ**

**А.Ф. Жаркін**<sup>\*</sup>, академік НАН України, **О.Д. Подольцев**<sup>\*\*</sup>, докт. техн. наук,  
**В.Б. Павлов**<sup>\*\*\*</sup>, докт. техн. наук  
Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна.  
E-mail: [zhark@ied.org.ua](mailto:zhark@ied.org.ua); [mobil99@ukr.net](mailto:mobil99@ukr.net).

*В роботі розроблено методика розрахунку значень напруг на основних L, C елементах системи бездротової зарядки акумуляторної батареї, яка дає змогу на етапі проектування таких систем обирати необхідні параметри котушок та додаткового високочастотного трансформатора, узгоджуючи при цьому значення напруги на акумуляторній батареї із напругою на виході високочастотного інвертора. Порівняння результатів розрахунку за розробленою методикою із відповідними результатами, отриманими за допомогою розробленої Simulink-моделі системи, показав, що максимальна їх розбіжність не перевищує 15%. Зазначається, що на практиці під час розробки таких систем для узгодження по напрузі акумуляторної батареї, що заряджається, із високочастотним інвертором можливо або використовувати додатковий високочастотний трансформатор, або обирати необхідне співвідношення витків передавальної та приймальної котушок. В останньому випадку слід враховувати можливість виникнення внаслідок резонансу високої напруги на котушках та ємнісних елементах, що потребує використання посиленої ізоляції та виконання усіх вимог щодо експлуатації пристроїв за відповідній високій напрузі. Бібл. 6, рис. 3, табл. 1.*

**Ключові слова:** бездротова передача енергії, бездротова зарядка акумуляторної батареї, послідовний резонанс, резонансні напруги.

На сьогодні рівень розвитку технологій електромобілебудування дає можливість електромобілям конкурувати з традиційними автомобілями за всіма ключовими характеристиками, включаючи потужність та безпеку. Тому більшість провідних автомобільних корпорацій зробили ставку на електрифікацію автомобіля та приступили до масового виробництва електромобілів.

У той же час, незважаючи на велику кількість електромобілів, що експлуатуються, у світі й до сьогодні існує проблема забезпечення оперативного та ефективного поповнення енергії тягової акумуляторної батареї. Тому питання створення та розвитку зарядної інфраструктури і пошуку альтернативних способів заряджання акумуляторних батарей електромобілів, як і раніше, знаходяться в центрі уваги розробників і виробників такого обладнання [1–3]. При цьому велику надію пов'язують із використанням безконтактної зарядки, розробка різних варіантів якої проводиться в останні 10 років. Зокрема, вже робляться спроби запроваджувати динамічну зарядку, тобто безконтактну зарядку під час руху електромобіля [4–6].

Нині найчастіше застосовуються системи індуктивної зарядки 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.

Пропонується під час розробці пристроїв для бездротової зарядки акумуляторної батареї, а значить визначенні параметрів їх основних елементів, на етапі проектування оцінювати значення напруг на зазначених елементах – котушках для передачі електричної енергії та ємнісних елементах з урахуванням заданої величини напруги на акумуляторній батареї, що заряджається. Крім того, слід

© Жаркін А.Ф., Подольцев 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>

враховувати, що наявність резонансу у високодобротних контурах цих котушок може призводити до значного збільшення напруги на їх  $L$  та  $C$  елементах відносно напруги на виході високочастотного інвертора, який є найважливішим елементом таких систем. Таким чином, на етапі проектування зазначених пристроїв формулюється та потребує свого вирішення завдання оцінки рівня напруги на основних її елементах.

**Метою роботи** є розробка методики розрахунку значень напруг на основних елементах бездротового зарядного пристрою (БЗП), яка б дала можливість обирати на етапі проектування таких систем необхідні параметри або котушок (приймальної та передавальної), або ж додаткового високочастотного трансформатора, запобігаючи при цьому виникненню високих напруг на  $L$  та  $C$  елементах системи внаслідок наявності резонансу у її високодобротних контурах.

**Методика розрахунку напруг на основних елементах системи.** Базову структуру БЗП індуктивного типу з послідовним резонансом показано на рис. 1, де крім всіх стандартних елементів [2] наведено також додатковий високочастотний трансформатор  $Tr$ , призначений для забезпечення необхідного значення напруги на передавальній котушці  $L_1$ . Знаючи число витків первинної та вторинної обмотки цього трансформатора – відповідно  $N_1$  та  $N_2$  – можна визначити напругу на його виході, що приблизно буде дорівнювати  $U = U_{inv} N_2 / N_1$ .

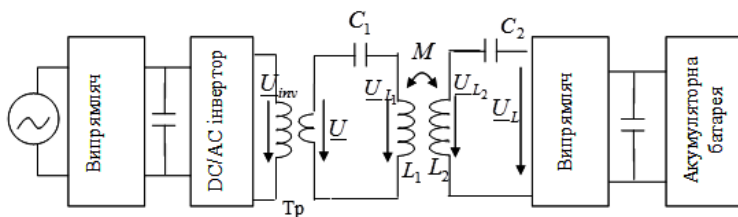


Рис. 1

та  $C_2$  в схемі заміщення враховано також величинами  $R_1$  та  $R_2$  відповідно. Між котушками існує магнітний зв'язок, що характеризується коефіцієнтом взаєміндукції  $M$  або коефіцієнтом магнітного зв'язку  $k_{12} = M / \sqrt{L_1 L_2}$ . Активний опір навантаження  $R_L$  для конкретного режиму роботи може бути розрахований як  $R_L = U_2^2 / P_2$ , де  $U_2$  та  $P_2$  – відповідно напруга та активна потужність на виході випрямляча.

Баланс напруг у колах обох котушок, записаний у частотній області, має наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \underline{U} &= (R_1 + \frac{1}{j\omega C_1} + j\omega L_1) \underline{I}_1 + j\omega M \underline{I}_2 \\ 0 &= (R_2 + R_L + \frac{1}{j\omega C_2} + j\omega L_2) \underline{I}_2 + j\omega M \underline{I}_1 \end{aligned} \quad (1)$$

Після підстановки значення струму  $\underline{I}_2$  із другого рівняння системи (1) в перше значення еквівалентного імпедансу кола резонансного трансформатора розраховується як

$$\underline{Z} = \underline{U} / \underline{I}_1 = R_1 + j(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}) + \frac{(\omega M)^2}{R_2 + R_L + j(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2})} \quad (2)$$

З цього виразу видно, що загальний резонанс у зазначеному колі, який виникає за умови  $\text{Im}(\underline{Z}) = 0$ , буде мати місце, якщо

$$\omega_0 L_1 = 1/(\omega_0 C_1) \quad \text{та} \quad \omega_0 L_2 = 1/(\omega_0 C_2), \quad (3)$$

де  $\omega_0$  – резонансна кутова частота. Аналізуючи (3) можна зробити висновок, що умови резонансу не залежать від взаємного розташування котушок, яке визначається величиною  $M$ , а значення ємностей за заданої частоти  $\omega$  визначаються тільки значенням відповідних індуктивностей. Така властивість БЗП із послідовним резонансом є їхньою важливою перевагою у порівнянні з іншими можливими структурами аналогічних зарядних пристроїв.

Продовжуючи аналіз, запишемо баланс напруг для контуру 1 (рис. 2) із системи (1), підставивши значення  $\underline{I}_2$  із другого рівняння в перше і використовуючи умови резонансу (3). При цьому отримаємо

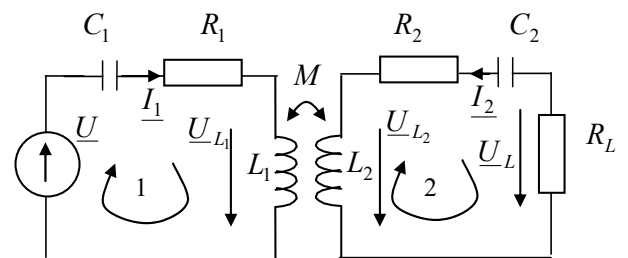


Рис. 2

$$\underline{U} = (R_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2 + R_L})I_1 + j(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1})I_1. \quad (4)$$

Із цього виразу видно, що в контурі існує еквівалентний активний опір

$$R_e = R_1 + \omega^2 M^2 / (R_2 + R_L),$$

а добротність такого контуру на резонансній частоті  $\omega_0$  буде

$$Q_e = \omega_0 L_1 / R_e. \quad (5)$$

За умови резонансу в контурі напруга на котушці  $L_1$  буде

$$U_{L_1} = U \cdot Q_e. \quad (6)$$

Напруга на ємнісному елементі  $C_1$  буде  $U_{C_1} = U_{L_1}$ .

Для розрахунку напруги на приймальній котушці розглянемо контур 2 в схемі на рис. 2. Із другого рівняння системи (1), підставивши значення  $I_1$  із рівняння (4) та враховуючи умови резонансу (3), будемо мати

$$(R_2 + R_L)I_2 + jQ_e k_{12} \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} U = 0.$$

З цього виразу, за умови  $R_L \gg R_2$ , діюче значення напруги на навантаженні буде

$$U_L = Q_e k_{12} \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} U = k_{12} \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} U_{L_1},$$

де було враховано вираз (6). В разі, якщо обидві котушки мають однакову геометрію і відрізняються тільки числом витків,  $L_2 / L_1 = W_2^2 / W_1^2$ . Тоді

$$U_{L_1} = \frac{W_1}{k_{12} W_2} U_L. \quad (7)$$

Напругу на котушці  $L_2$ , знаючи напругу на навантаженні  $U_L$  та напругу на ємності  $C_2$ , яка дорівнює  $U_{C_2} = U_L \cdot Q_2$ , де  $Q_2 = \omega L_2 / R_L$ , можна буде розрахувати як

$$U_{L_2} = \sqrt{U_L^2 + U_{C_2}^2} = U_L \sqrt{1 + Q_2^2}.$$

Очевидно, що під час зарядки електромобіля в першу чергу необхідно забезпечити задану напругу на навантаженні  $U_L$ . У процесі проведення розрахунків необхідно знати значення наступних параметрів системи  $N_1 / N_2$ ,  $W_1 / W_2$ ,  $k_{12}$ ,  $Q_e$ ,  $Q_2$ .

Тоді значення невідомих напруг можуть бути розраховані за наступним алгоритмом

$$\text{Задано } U_L \Rightarrow U_{L_2} = U_L \sqrt{1 + Q_2^2} \Rightarrow U_{L_1} = \frac{W_1}{k_{12} W_2} U_L \Rightarrow U = U_{L_1} / Q_e \Rightarrow U_{inv} = U \cdot N_1 / N_2. \quad (8)$$

Зазначимо, що справедливість цих виразів досягається, коли виконуються умови резонансу (3) та  $R_L \gg R_2$ .

В роботі було проведено розрахунки. При цьому параметри основних елементів БЗП використовувалися наступні:  $L_1 = L_2 = 11,5$  мкГн,  $R_1 = R_2 = 0,03$  Ом,  $W_1 = W_2$ ,  $k_{12} = 0,28$ ,  $R_L = 7,3$  Ом. Розраховано значення добротності:  $Q_e = 14,4$ ,  $Q_2 = 0,98$ . Результати розрахунку напруг за розробленою мето-

	$U_L$ , В	$U_{L_2}$ , В	$U_{L_1}$ , В	$U$ , В
Розрахунок за виразами (8)	78,9	111,5	281,7	19,6
Розрахунок на Simulink-моделі	78,9	110,9	284,1	23

дикою (вирази 8) наведено у таблиці. Задля оцінки достовірності результатів розрахунку напруг за вищевказаною методикою було розроблено уточнену Simulink-модель БЗП та проведено порівняння результатів розрахунків за допомогою цієї моделі із результатами

за виразами (8).

**Порівняння результатів розрахунку.** Розроблено високочастотну Simulink-модель БЗП (рис. 3), в який високочастотний інвертор як джерело живлення моделюється джерелом напруги 23 В, 100 кГц, а випрямляч із акумуляторною батареєю – еквівалентним резистором 7,3 Ом. Результати розрахунку діючих значень напруг на основних елементах системи для усталеного режиму наведено на рис. 3 на від-

повідних екранах цифрових дисплеїв та у таблиці, звідки видно, що результати розрахунків за допомогою розробленої методики мають задовільне співпадіння із результатами, що отримані за допомогою Simulink-моделі. Найбільша розбіжність має місце для величини напруги на приймальній котушці  $U$  і досягає 15%.

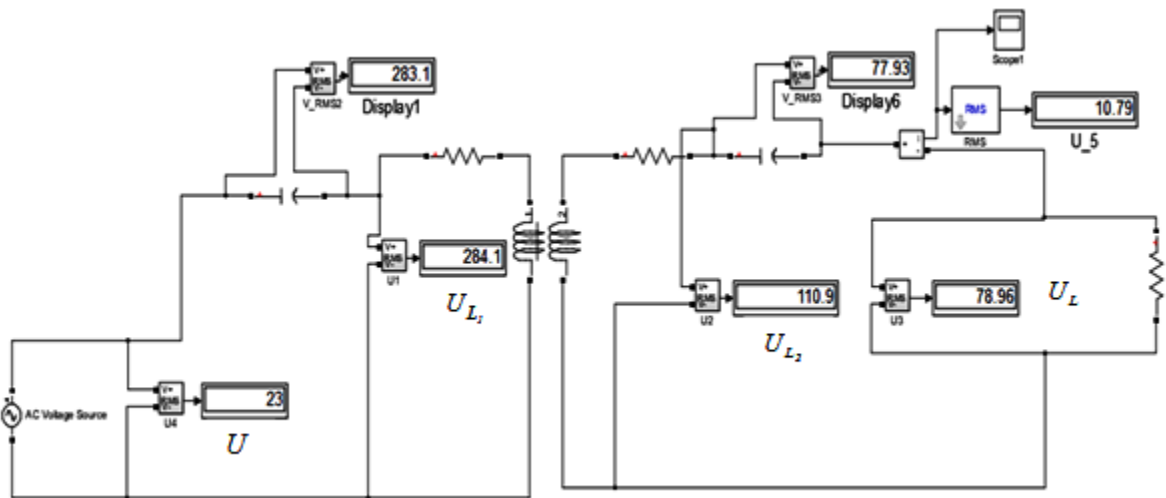


Рис. 3

Підсумовуючи основні результати роботи зазначимо наступне. На практиці у процесі розробки БЗП задля узгодження по напрузі акумуляторної батареї та високочастотного інвертора можна застосовувати додатковий високочастотний трансформатор, обираючи при цьому відповідне значення його коефіцієнту трансформації –  $N_1 / N_2$  і використовуючи наведений алгоритм розрахунку (8). Можливий інший підхід, коли замість такого трансформатора, який зменшує напругу на виході інвертора, зазначене узгодження здійснюється шляхом вибору необхідного співвідношення витків передавальної та приймальної котушки –  $W_1 / W_2$ , використовуючи вирази (8). В такому випадку доведеться враховувати те, що напруга на передавальній котушці в  $Q_e$  раз буде перевищувати напругу на виході інвертора (див. вираз (6)) і може значно перевищувати напругу в 1 кВ. Це потребує використання додаткової ізоляції котушок і виконання усіх вимог щодо безпеки експлуатації пристроїв за відповідній високій напрузі.

**Висновки.** В роботі розроблено методику розрахунку напруг на основних  $L, C$  елементах бездротового зарядного пристрою для акумуляторної батареї електромобіля, що дає змогу вибирати на етапі проектування цього пристрою необхідні параметри котушок – передавальної та приймальної, або в разі необхідності додаткового високочастотного трансформатора, узгоджуючи при цьому значення напруги на акумуляторній батареї із напругою на виході високочастотного інвертора.

Задля оцінки достовірності результатів розрахунку за розробленою методикою запропоновано імітаційну Simulink-модель цього пристрою та проведено порівняння отриманих на її основі діючих значень напруг на основних елементах із відповідними значеннями, розрахованими за цією методикою. Показано, що максимальна розбіжність не перевищує 15%.

В роботі зазначено, що на практиці під час розробки системи із БЗП задля узгодження по напрузі акумуляторної батареї, що заряджається, та високочастотного інвертора можливо або використовувати додатковий високочастотний трансформатор, або обирати необхідне співвідношення витків передавальної та приймальної котушок  $W_1 / W_2$ . В останньому випадку слід враховувати можливість виникнення високої напруги на  $L, C$  елементах системи внаслідок резонансу у високочастотних контурах. Це потребує використання посиленої ізоляції приймальної котушки та виконання усіх вимог щодо безпечної експлуатації пристроїв за високої напрузі – більше 1 кВ.

*Роботу виконано за держбюджетною темою "Розвиток теорії електротехнологічних процесів та розроблення ефективних електроплавильних і електрозарядних систем з керованим електромагнітним впливом" (шифр "Елтех"), 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. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 3. С. 74–82. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.03.074>.
2. Подольцев О.Д., Павлов В.Б., Западнчук О.П. Аналіз ефективності передачі електричної енергії в системі бездротової зарядки акумуляторної батареї електромобіля. *Технічна електродинаміка*. 2021. № 4. С. 63-69. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.04.063>.
3. Беспроводная зарядка автомобилей (блог от 28.08.2015). URL: <https://ecocars.wixsite.com/sale/single-post/2015/08/28/беспроводная-зарядка-автомобилей> (дата доступу 15.03.2023).
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. Xi Zhang, Choug Zhu, Haitao Song. *Wireless Power Transfer Technologies for Electrica Vehicles*. Springer, 2022. 268 p.

## THE DETERMINATION OF THE PARAMETERS OF THE MAIN ELEMENTS OF THE WIRELESS CHARGER FOR CHARGING AN ELECTRIC CAR BATTERY

**A.F. Zharkin, O.D. Podoltsev, V.B. Pavlov**  
**Institute of electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,**  
**Beresteyskiy Ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine.**  
**E-mail: [zhark@ied.org.ua](mailto:zhark@ied.org.ua); [mobil99@ukr.net](mailto:mobil99@ukr.net).**

*The work has developed a methodology for calculating voltage values on the main elements of the wireless battery charging system, which allows at the design stage of such systems to choose the necessary parameters of coils and an additional high-frequency transformer, while harmonizing the voltage value on the battery with the voltage at the output of the high-frequency inverter. A comparison of the calculation results using the developed methodology with the corresponding results obtained using the developed Simulink-model of the system showed that their maximum discrepancy does not exceed 15%. It is noted that in practice, when developing such systems to match the voltage of the rechargeable battery with the high-frequency inverter, it is possible to either use an additional high-frequency transformer, or choose the necessary ratio of turns of the transmitting and receiving coils. In the latter case, the possibility of high voltage resonance voltage on the coils and capacitive elements should be taken into account, which requires the use of reinforced insulation and the fulfillment of all requirements for the operation of devices at the corresponding high voltage. References 6, figures 3, table 1.*

**Key words:** wireless power transmission, wireless battery charging, series resonance, resonant voltages.

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. 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 elektrodynamika*. 2021. No 4. Pp. 63-69. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.04.063>
3. Wireless charging-cars (blog from 28.08.2015). URL: <https://ecocars.wixsite.com/sale/single-post/2015/08/28/беспроводная-зарядка-автомобилей> (accessed at 15.03.2023).
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. Xi Zhang, Choug Zhu, Haitao Song. *Wireless Power Transfer Technologies for Electrica Vehicles*. Springer, 2022. 268 p.

Надійшла 22.03.2023  
Остаточний варіант 07.04.2022