

АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ МАГНІТНО-РЕЗОНАНСНІЙ БЕЗДРОТОВІЙ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ НА ВЕЛИКІ ВІДСТАНІ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Проведено теоретичний аналіз електродинамічних процесів у системі магнітно-резонансної бездротової передачі електричної енергії. Розглянуто фізичні принципи явища магнітного резонансу між пов'язаними LC-контурами. Досліджено вплив відстані між котушками та добротності резонансних контурів на ефективність передачі енергії. Отримано аналітичні вирази для розрахунку коефіцієнта корисної дії системи та визначено оптимальні умови її роботи.

Ключові слова: магнітний резонанс, бездротова передача енергії, електромагнітна індукція, резонансний контур, коефіцієнт корисної дії, добротність, коефіцієнт зв'язку.

Abstract

A theoretical analysis of electrodynamic processes in a magnetic resonance wireless electrical energy transmission system is carried out. The physical principles of the magnetic resonance phenomenon between coupled LC circuits are considered. The influence of the distance between coils and the quality factor of resonant circuits on energy transfer efficiency is studied. Analytical expressions for calculating the system efficiency are obtained and optimal operating conditions are determined.

Keywords: magnetic resonance, wireless energy transfer, electromagnetic induction, resonant circuit, efficiency, quality factor, coupling coefficient.

Вступ

Бездротова передача електричної енергії є одним із пріоритетних напрямів сучасної електроніки та енергетики. Інтерес до цієї технології зумовлений широкими практичними застосуваннями - від зарядки мобільних пристроїв до живлення імплантованих медичних систем та електромобілів [1]. Класичні методи індуктивної передачі ефективні лише на відстанях, значно менших за розмір котушки, що суттєво обмежує сферу їх застосування.

Метод магнітно-резонансної бездротової передачі енергії, запропонований дослідниками Массачусетського технологічного інституту [2], дозволяє суттєво збільшити дальність ефективної передачі за рахунок явища резонансного зв'язку між котушками. Проте електродинамічні процеси, що визначають ефективність такої системи на великих відстанях, потребують детального теоретичного аналізу.

Метою роботи є аналіз електродинамічних процесів у системі магнітно-резонансної бездротової передачі енергії та встановлення залежності ефективності передачі від відстані між котушками та параметрів резонансних контурів.

Результати дослідження

Система магнітно-резонансної бездротової передачі енергії (рис. 1) складається з двох резонансних LC-контурів - передавального (L_1, C_1) та приймального (L_2, C_2), налаштованих на однакову резонансну частоту f_0 . Передача електромагнітної енергії відбувається через ближнє магнітне поле котушки-передавача.

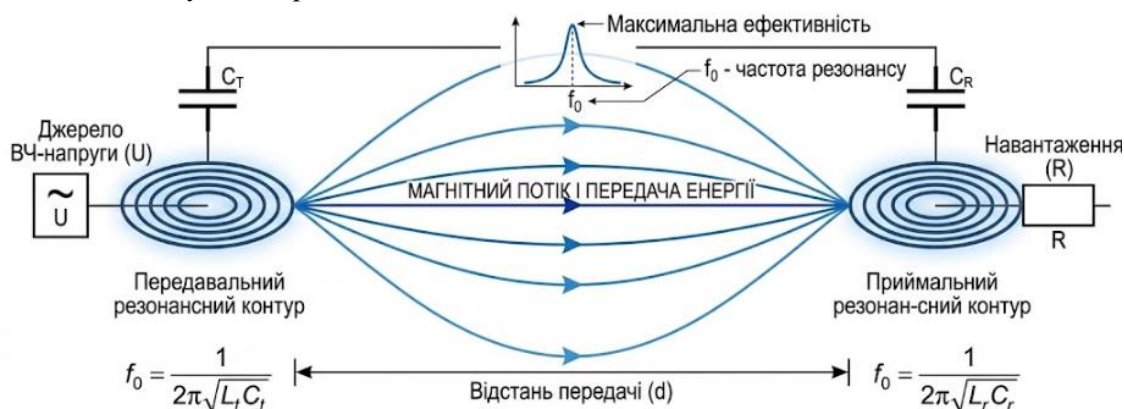


Рис. 1 – Схема магнітно-резонансної бездротової передачі енергії

Резонансна частота кожного контуру визначається з умови

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

де L - індуктивність котушки (Гн); C - ємність конденсатора (Ф).

Взаємна індуктивність між двома коаксіально розміщеними котушками радіуса R на відстані d описується виразом

$$M = \frac{\mu_0 \pi R^4}{2(R^2 + d^2)^{3/2}} \quad (2)$$

де $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м - магнітна стала. З наведеного виразу випливає, що зі збільшенням відстані d взаємна індуктивність M спадає пропорційно d^{-3} , що є визначальним чинником зменшення ефективності передачі.

Коефіцієнт зв'язку між котушками визначається як

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (3)$$

де L_1, L_2 - індуктивності передавальної та приймальної котушок відповідно. Ефективність системи у стані резонансу виражається через коефіцієнт корисної дії

$$\eta = \frac{k^2 Q_1 Q_2}{1 + k^2 Q_1 Q_2} \quad (4)$$

де Q_1, Q_2 - добротності контурів передавача та приймача відповідно [3]. Аналіз виразу показує, що при $k^2 Q_1 Q_2 \gg 1$ ефективність системи наближається до одиниці. Результати чисельного моделювання показали, що при добротності $Q > 100$ та коефіцієнті зв'язку $k > 0,01$ досягається ефективність передачі понад 85 % на відстанях до 4–5 діаметрів котушки. Зниження температури середовища та застосування провідників з малим поверхневим опором сприяє зростанню добротності і, відповідно, підвищенню ефективності системи.

Висновки

Проведений аналіз електродинамічних процесів у системі магнітно-резонансної бездротової передачі енергії показав, що ефективність передачі визначається добутком $k^2 Q_1 Q_2$. Взаємна індуктивність між котушками спадає пропорційно d^{-3} , однак в умовах резонансу висока добротність контурів дозволяє компенсувати цей ефект. Встановлено, що при $Q > 100$ система забезпечує

ефективність понад 85 % на відстанях до 5 діаметрів котушки, що відповідає вимогам практичних застосувань у безпроводному живленні пристроїв.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Kurs A. et al. Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances // Science. – 2007. – Vol. 317. – P. 83–86.
2. Sample A. P., Meyer D. T., Smith J. R. Analysis, Experimental Results, and Range Adaptation of Magnetically Coupled Resonators for Wireless Power Transfer // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2011. – Vol. 58, No. 2. – P. 544–554.
3. Бортник Г. Г., Васильківський М. В., Кичак В. М. Методи та засоби підвищення ефективності оцінювання фазового дрижання сигналів у телекомунікаційних системах: Монографія. – Вінниця: ВНТУ, 2015. – 140 с.
4. Tesla N. Apparatus for Transmitting Electrical Energy. US Patent 1,119,732. – 1914.
5. Imura T., Hori Y. Maximizing Air Gap and Efficiency of Magnetic Resonant Coupling for Wireless Power Transfer Using Equivalent Circuit and Neumann Formula // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2011. – Vol. 58, No. 10. – P. 4746–4752.

Урсуленко Дмитрій Юрійович - студент групи 4КН-25Б, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, email: ursulenkodima08@gmail.com

Науковий керівник: Мартинюк Володимир Валерійович - канд. техн. наук, доцент кафедри загальної фізики, Вінницький національний технічний університет, Вінниця.

Ursulenko Dmytrii Yuriyovych - student of group 4KN-25B, Faculty of Intellectual Information Technologies and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, email: ursulenkodima08@gmail.com

Supervisor: Martyniuk Volodymyr Valeriiovych - Candidate of Philology tech. Sciences, Associate Professor of General Physics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.