

ФІЗИКА РЕЗОНАНСНОЇ БЕЗДРОТОВОЇ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі проведено аналіз фізичних процесів у системах бездротової передачі енергії (WPT) в режимі сильного магнітного зв'язку. Розглянуто вплив добротності Q коливальних контурів на ефективність передачі енергії при слабкому коефіцієнті індуктивного зв'язку (k). Досліджено залежність ККД від узгодження резонансних частот та геометричного розташування котушок. Показано, що максимізація добутку kQ є ключовою умовою для мінімізації втрат у ближньому полі.

Ключові слова: бездротова передача енергії, магнітний резонанс, добротність, імпеданс, сильний зв'язок.

Abstract

The paper analyzes physical processes in wireless power transfer (WPT) systems under the strong magnetic coupling regime. The influence of the oscillatory circuits' quality factor (Q) on power transfer efficiency with a weak inductive coupling coefficient (k) is examined. The dependence of efficiency on resonant frequency matching and coil geometry is investigated. It is shown that maximizing the kQ product is a key condition for minimizing losses in the near field.

Keywords: wireless power transfer, magnetic resonance, quality factor, impedance, strong coupling.

Технологія бездротової передачі енергії базується на використанні змінного електромагнітного поля для транспортування енергії від джерела до навантаження без фізичного контакту. У класичних індукційних системах (трансформаторах) ефективність забезпечується феромагнітним осердям, яке концентрує магнітний потік ($k \approx 1$). Однак при передачі енергії "по повітрю" коефіцієнт зв'язку падає до значень $k < 0.1$, що робить звичайну індукцію неефективною. Вирішенням є використання магнітного резонансу, який дозволяє накопичувати енергію в коливальному контурі та ефективно передавати її навіть при слабкому зв'язку [2].

Основною умовою роботи такої системи є налаштування передавача та приймача на ідентичну резонансну частоту, що визначається формулою Томсона:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}},$$

де f – частота резонансу (Гц), L – індуктивність котушки (Гн), C – ємність конденсатора (Ф) [3].

Фізична суть методу полягає у створенні так званого "режиму сильного зв'язку". У цьому режимі швидкість передачі енергії між котушками перевищує швидкість загасання енергії через внутрішні втрати. Критичним параметром, що визначає здатність системи до такої передачі, є добротність контуру (Q):

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{\omega L}{R},$$

де R — активний опір втрат (опір дроту + втрати на випромінювання) [3].

Висока добротність ($Q > 100$) означає, що енергія в контурі здійснює сотні коливань до того, як розсіється у вигляді тепла. Для оцінки потенціалу системи використовують узагальнений параметр добротності U , який об'єднує електричні та геометричні характеристики:

$$U = k\sqrt{Q_1 Q_2}$$

де k — коефіцієнт магнітного зв'язку, який показує, яка частка магнітного потоку передавача пронизує витки приймача; Q_1, Q_2 — добротності передавального та приймального контурів.

Знаючи цей параметр, максимальну теоретичну ефективність передачі енергії η (без урахування втрат у джерелі живлення) можна розрахувати за формулою:

$$\eta = \frac{U^2}{(1 + \sqrt{1 + U^2})^2}$$

Аналіз цих залежностей демонструє головний принцип резонансної передачі: мале значення коефіцієнта зв'язку k (що неминуче при збільшенні відстані) можна компенсувати високою добротністю Q [2].

Одним з найпоширеніших практичних втілень цих фізичних принципів є індустріальний стандарт Qi. У мобільних пристроях, через жорсткі обмеження по товщині, використовуються не циліндричні, а планарні (плоскі) спіральні котушки. Для мінімізації омичних втрат на високих частотах (скін-ефект) обмотка виконується спеціальним багатожильним проводом — літцендратом (Рис. 1) [3].



Рис. 1 – бездротова зарядка

Хоча відстань між телефоном і зарядною станцією є мінімальною (3–5 мм), коефіцієнт зв'язку k залишається відносно низьким. Для компенсації цього ефекту застосовують феритові екрани, розташовані зі зворотного боку котушок. Ферит виконує подвійну фізичну функцію: концентрує магнітний потік (збільшуючи L та k) та екранує металеві компоненти телефону від вихрових струмів.

Робоча частота системи зазвичай лежить у діапазоні 110–205 кГц. Особливістю стандарту є наявність цифрового зворотного зв'язку: телефон модулює навантаження приймальної котушки, передаючи дані передавачу. Це дозволяє динамічно підлаштовувати робочу частоту для точного керування потужністю та безпеки [1].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Assawaworrarit S., Yu X., Fan S. Robust wireless power transfer using a nonlinear parity–time-symmetric circuit. *Nature*. 2017. Vol. 546. P. 387–390.
2. Kurs A., Karalis A., Moffatt R., Soljacic M. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances. *Science*. 2007. Vol. 317. P. 83–86.
3. Сидоренко О. М. Основи теорії кіл: підручник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 360 с.

Вітюк Володимир Артемович – студент групи 1KI-25МС, факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, email: vitiukvolodymyr@gmail.com

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

Vitiuk Volodymyr Artemovich – Department of Information Technologies and Computer Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, email: vitiukvolodymyr@gmail.com

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