

OPTIMIZE THE EFFICIENCY OF THE WIRELESS POWER TRANSFER SYSTEM USING THE QUALITY FACTOR OF THE RESONATOR

Le Thi Hong Hiep^{1,2,3}, Pham Thanh Son^{#2*}, Bui Xuan Khuyen^{#2},
Bui Son Tung¹, Tran Van Huynh³, Vu Dinh Lam¹

¹Graduate University of Science and Technology - Vietnam Academy of Science and Technology

²Institute of Materials Science - Vietnam Academy of Science and Technology, ³University of Fire Prevention and Fighting

ARTICLE INFO		ABSTRACT
Received:	05/10/2023	Wireless power transfer technology has become the ideal solution to provide energy for mobile electronic devices, implanted medical devices, and electric vehicles,... Currently, some studies have shown that the performance of the magnetic resonant wireless power transfer system depends on the quality factor Q of the transmitter/receiver resonant coils in the system. In this study, using electromagnetic simulation methods, we determine the quality factor of the resonant coil and investigate the optimized performance of the symmetric magnetic resonant wireless power transfer system according to the quality factor of this resonant coil. We design a system operating at the frequency of 13.56 MHz and obtaining the maximum and minimum efficiencies of 67.9%, and 54%, for the resonant coil with the highest and lowest quality factors of $Q = 261$, and $Q = 174.5$, respectively. This result can be applied to optimizing the structure of resonant coils to enhance the performance of the magnetic resonant wireless power transfer system.
Revised:	14/11/2023	
Published:	15/11/2023	
KEYWORDS		
Wireless power transfer		
Magnetic resonance		
Q-factor		
Transmission efficiency		
Optimization		

TỐI ƯU HIỆU SUẤT CỦA HỆ THỐNG TRUYỀN NĂNG LƯỢNG KHÔNG DÂY CỘNG HƯỞNG TỪ SỬ DỤNG HỆ SỐ PHẨM CHẤT CỦA BỘ CỘNG HƯỞNG PHÁT/THU

Lê Thị Hồng Hiệp^{1,2,3}, Phạm Thanh Sơn^{#2*}, Bùi Xuân Khuyên^{#2},
Bùi Sơn Tùng¹, Trần Văn Huỳnh³, Vũ Đình Lâm¹

¹Học viện Khoa học và Công nghệ - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

²Viện Khoa học vật liệu - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, ³Trường Đại học Phòng cháy chữa cháy

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 05/10/2023	Công nghệ truyền năng lượng không dây đã và đang trở thành giải pháp lý tưởng để cung cấp năng lượng cho các thiết bị điện tử di động, thiết bị y tế cấy ghép, xe điện,... Một số nghiên cứu gần đây đã chỉ ra rằng hiệu suất của hệ thống truyền năng lượng không dây cộng hưởng từ phụ thuộc vào hệ số phẩm chất Q của các cuộn cộng hưởng phát/thu trong hệ thống. Trong nghiên cứu này, bằng phương pháp mô phỏng điện từ, chúng tôi xác định hệ số phẩm chất của cuộn cộng hưởng và từ đó tối ưu hiệu suất của hệ thống truyền năng lượng không dây theo hệ số phẩm chất đó. Chúng tôi thiết kế một hệ thống hoạt động ở dải tần số 13,56 MHz và thu được hiệu suất tối đa và tối thiểu của hệ thống lần lượt là 67,9% và 54% tương ứng với cuộn cộng hưởng có hệ số phẩm chất cao nhất và thấp nhất là $Q = 261$ và $Q = 174,5$. Kết quả này có thể được ứng dụng để tối ưu hóa cấu trúc của các cuộn cộng hưởng nhằm tăng cường hiệu suất của hệ thống truyền năng lượng không dây.
Ngày hoàn thiện: 14/11/2023	
Ngày đăng: 15/11/2023	
TỪ KHÓA	
Truyền năng lượng không dây	
Cộng hưởng từ	
Hệ số phẩm chất Q	
Hiệu suất truyền dẫn	
Tối ưu hóa	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.8904>

* Corresponding author. Email: sonpt@ims.vast.ac.vn

Các tác giả này có đóng góp bằng nhau trong vai trò tác giả liên hệ chính của bài báo.

1. Giới thiệu

Truyền năng lượng không dây (Wireless Power Transfer – WPT) đã và đang ngày càng phát triển, cung cấp giải pháp sạc không tiếp xúc tiện lợi cho thiết bị hàng ngày, từ các thiết bị điện tử tiêu dùng tiêu thụ ít năng lượng như điện thoại di động đến hệ thống tiêu thụ năng lượng cao như xe điện [1]. WPT có tiềm năng lớn trong công cuộc cách mạng hóa việc sạc năng lượng cho các thiết bị điện và đã thu hút được sự quan tâm lớn trong giới học thuật cũng như ngành công nghiệp trong thập kỷ qua [2], [3]. So với sạc điện thông thường, WPT mang lại một số lợi ích rõ ràng, bao gồm loại bỏ các tiếp xúc điện (sạc an toàn hơn), thiết kế khép kín (bảo vệ khỏi bụi và giảm nguy cơ ăn mòn), trải nghiệm người dùng tốt hơn (đặt và sạc) và môi trường sống gọn gàng hơn (tránh dây điện lộn xộn). Trong các công nghệ WPT đang được nghiên cứu và triển khai, WPT trường gần là công nghệ được sử dụng rộng rãi nhất, bao gồm WPT cảm ứng từ và WPT cộng hưởng từ (Magnetic Resonant Wireless Power Transfer - MR-WPT) [4] – [7].

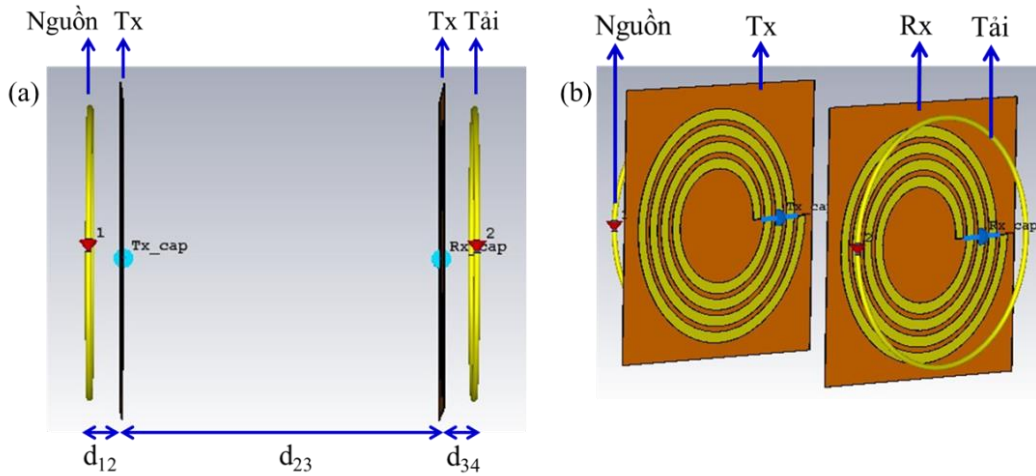
Hệ thống MR-WPT bao gồm bốn cuộn: cuộn nguồn, cuộn cộng hưởng phát (Tx), cuộn cộng hưởng thu (Rx) và cuộn tải, trong đó Tx, Rx là hai cấu trúc cộng hưởng ở cùng tần số để tăng cường hiệu suất của hệ thống [8]. Hệ thống MR-WPT còn được gọi là hệ thống WPT bốn cuộn. Khoảng cách giữa cuộn nguồn và Tx, (Rx và cuộn tải) thường nhỏ để chúng có thể tương tác với nhau thông qua ghép cặp cảm ứng từ. Khoảng cách giữa Tx và Rx xác định khoảng cách truyền dẫn hiệu quả của hệ thống. Tx và Rx thường có cấu trúc cuộn xoắn ốc nhiều vòng để thu được hệ số phẩm chất cao, từ đó giúp tăng cường hiệu suất truyền dẫn của hệ thống MR-WPT [9], [10]. Hệ thống MR-WPT cho phép mở rộng khoảng cách truyền dẫn đến tầm trung (từ vài cm đến m). Tuy nhiên, khi mở rộng khoảng cách truyền lại dẫn đến làm giảm sự ghép cặp từ tính giữa Tx và Rx hay làm suy giảm hiệu suất của hệ thống. Hiện nay, nhiều nghiên cứu đã và đang được thực hiện để giải quyết vấn đề này, một trong những giải pháp tiềm năng là tăng cường hệ số phẩm chất (Q -factor) của các cuộn cộng hưởng để bù đắp cho sự suy giảm về hệ số ghép cặp giữa chúng [11] – [16].

Trong nghiên cứu này chúng tôi tiến hành khảo sát sự phụ thuộc hiệu suất của hệ thống MR-WPT theo hệ số phẩm chất của cuộn cộng hưởng phát/thu. Để thay đổi hệ số phẩm chất của các cuộn cộng hưởng, chúng tôi cố định các thông số của cuộn cộng hưởng và chỉ thay đổi số vòng của cuộn trong khoảng cho phép từ 1 đến 6. Hiệu suất tối đa và tối thiểu của hệ thống lần lượt là 67,9% và 54% tương ứng với cuộn cộng hưởng có hệ số phẩm chất cao nhất và thấp nhất là $Q = 261$ và $Q = 174,5$. Điều này có nghĩa là với các thông số cố định của cuộn cộng hưởng đề xuất, số vòng tối ưu của cuộn là $N = 3$ thì cho hiệu suất hệ thống MR-WPT cực đại. Đồng thời, chúng tôi cũng khảo sát phân bố từ trường xung quanh hệ thống và ở không gian gần các cuộn cộng hưởng để phân tích, làm rõ nguyên nhân gây ra sự thay đổi hiệu suất của hệ thống MR-WPT.

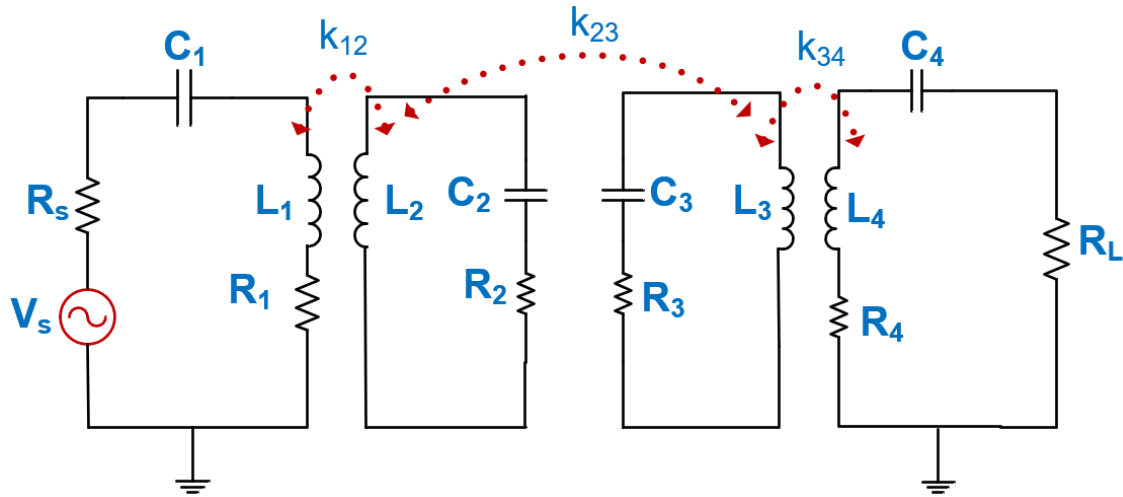
2. Cơ sở lý thuyết và phương pháp nghiên cứu

Hình 1(a), Hình 1(b) minh họa sơ đồ của hệ thống MR-WPT khi lần lượt quan sát theo phương vuông góc với mặt phẳng vòng dây và theo phương lệch góc với mặt phẳng vòng dây. Hệ thống MR-WPT bao gồm bốn cuộn: cuộn phát (nguồn), cuộn thu (tải) và hai cuộn cộng hưởng. Khoảng cách từ cuộn phát tới Tx, từ Rx tới cuộn thu được ký hiệu lần lượt là d_{12} và d_{34} . Các khoảng này có thể điều chỉnh để đạt phối hợp trở kháng cho hệ thống. Khoảng cách giữa Tx và Rx được ký hiệu là d_{23} , đó là khoảng cách truyền dẫn của hệ thống MR-WPT.

Hệ thống MR-WPT có thể được biểu diễn bằng một mạch điện tương đương như mô tả trong Hình 2. Trong đó các thông số R_i , L_i , C_i ($i = 1-4$) đại diện cho điện trở, cảm kháng và dung kháng ứng với mỗi cuộn dây. Hệ số ghép cặp giữa cuộn nguồn và Tx, giữa Tx và Rx, giữa Rx và cuộn thu lần lượt là k_{12} , k_{23} và k_{34} . Điện áp cấp vào cuộn nguồn là V_S ; điện trở nguồn và điện trở tải lần lượt là R_S và R_L . Với bộ cộng hưởng có hệ số phẩm chất (Q) cao và điều kiện trở kháng của nguồn/tải thực tế, chúng ta có $R_1 \ll R_S$ và $R_4 \ll R_L$, vì vậy $(R_1 + R_S \approx R_S)$ và $(R_4 + R_L \approx R_L)$.



Hình 1. (a) Sơ đồ hệ thống MR-WPT khi quan sát: theo phương vuông góc với mặt phẳng vòng dây, (b) theo phương lệch góc với mặt phẳng vòng dây.



Hình 2. Sơ đồ mạch điện tương đương của hệ thống MR-WPT.

Dựa vào sơ đồ mạch điện ở Hình 2, theo định luật Kirchhoff ta có:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} \\ Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_{44} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_S \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Trong đó I_i là dòng điện trong các cuộn dây, Z_{ij} là trở kháng của các cuộn dây và trở kháng truyền dẫn giữa hai cuộn dây, V_S là điện áp nguồn. Ở tần số cộng hưởng, $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_i C_i}}$, chúng ta có các biểu thức sau:

$$\begin{aligned} Z_{11} &= R_S; Z_{22} = R_2; Z_{33} = R_3; Z_{44} = R_L; Z_{13} = Z_{14} = Z_{24} = 0; \\ Z_{12} &= j\omega k_{12} \sqrt{L_1 L_2}; Z_{23} = j\omega k_{23} \sqrt{L_2 L_3}; Z_{34} = j\omega k_{34} \sqrt{L_3 L_4}. \end{aligned} \quad (2)$$

Giải phương trình (1) và (2), chúng ta thu được dòng điện chạy trong cuộn nguồn và cuộn tải:

$$I_1 = \frac{1 + k_{23}^2 Q_2 Q_3 + k_{34}^2 Q_3 Q_4}{\left[(1 + k_{12}^2 Q_1 Q_2) (1 + k_{34}^2 Q_3 Q_4) + k_{23}^2 Q_2 Q_3 \right]} \cdot \frac{V_s}{R_s}$$

$$I_4 = \frac{k_{12} k_{23} k_{34} \sqrt{Q_1 Q_2} \sqrt{Q_2 Q_3} \sqrt{Q_3 Q_4}}{\left[(1 + k_{12}^2 Q_1 Q_2) (1 + k_{34}^2 Q_3 Q_4) + k_{23}^2 Q_2 Q_3 \right]} \cdot \frac{j V_s}{\sqrt{R_s R_L}}$$
(3)

Trong đó: $Q_i = \omega L_i / R_i$.

Khi hệ thống đối xứng, ta có: $Q_1 = Q_4$; $Q_2 = Q_3$ và $k_{12} = k_{34}$. Khi đó tỉ số điện áp giữa điện áp nguồn và điện áp tải của hệ thống là:

$$\left| \frac{V_L}{V_s} \right| = \left| \frac{I_4 R_L}{I_1 R_s} \right| = \frac{k_{23} k_{12}^2 Q_1 Q_2^2}{\left((1 + k_{12}^2 Q_1 Q_2)^2 + k_{23}^2 Q_2^2 \right)} \sqrt{\frac{R_L}{R_s}}$$
(4)

Hiệu suất truyền tải năng lượng η (tỷ lệ giữa công suất đầu ra và công suất đầu vào) được xác định:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_L^2 / R_L}{V_s^2 / 4 R_s} = |S_{21}^2|$$
(5)

Từ (4) và (5) thu được:

$$\eta = \frac{4 k_{12}^4 k_{23}^2 Q_1^2 Q_2^4}{\left[(1 + k_{12}^2 Q_1 Q_2)^2 + k_{23}^2 Q_2^2 \right]^2}$$
(6)

Để đạt được hiệu suất cao, cần đạt được phối hợp trở kháng. Khi đó, với trường hợp các cuộn dây đối xứng, hệ số ghép cặp k_{12} được xác định [17]:

$$k_{12}^2 = \frac{\sqrt{k_{23}^2 Q_2^2 + 1}}{Q_1 Q_2}$$
(7)

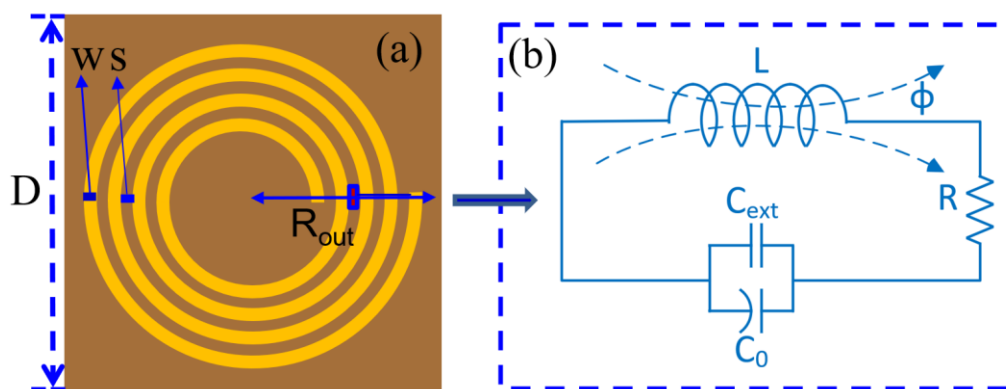
Thay (7) vào (6), chúng ta thu được hiệu suất của hệ thống MR-WPT đối xứng được xác định như sau:

$$\eta = \frac{\sqrt{k_{23}^2 Q_2^2 + 1} - 1}{\sqrt{k_{23}^2 Q_2^2 + 1} + 1} = 1 - \frac{2}{\sqrt{k_{23}^2 Q_2^2 + 1} + 1}$$
(8)

Xét trường hợp hệ số ghép cặp giữa hai cuộn cộng hưởng k_{23} cố định hoặc k_{23} rất nhỏ so với hệ số phẩm chất của cuộn cộng hưởng, từ phương trình (8) dễ dàng nhận thấy khi hệ số phẩm chất của cuộn cộng hưởng tăng (Q_2 tăng) thì dẫn tới hiệu suất của hệ thống MR-WPT cũng tăng hay hiệu suất của hệ thống MR-WPT có thể được cải thiện bằng cách tăng hệ số phẩm chất của các cuộn cộng hưởng.

Hình 3(a) thể hiện cấu trúc của cuộn cộng hưởng phát/thu và Hình 3(b) cho thấy mô hình mạch điện tương đương của mỗi cuộn cộng hưởng. Hai cuộn cộng hưởng có cấu trúc giống nhau với bán kính ngoài $R_{out} = 23$ mm, độ rộng dải $W = 2$ mm, khoảng cách giữa các dải $S = 2$ mm, làm bằng đồng với độ dày $t_{Cu} = 0,105$ mm; được đặt trên chất nền Polyimide có độ dày $t_{Po} = 0,13$ mm, hằng số điện môi 3,4 và số vòng của hai cuộn thay đổi trong khoảng cho phép từ 1 đến 6. Các cuộn cộng hưởng này thường có tần số cộng hưởng riêng lớn cỡ vài chục MHz. Để các cuộn cộng hưởng hoạt động ở tần số mong muốn 13,56 MHz, một tụ điện được gắn thêm vào để giảm tần số cộng hưởng của chúng. Mỗi cuộn cộng hưởng có thể được mô hình hóa bằng mạch điện đương gồm các phần tử: độ tự cảm L , điện trở R , điện dung riêng C_0 và tụ điện gắn ngoài C_{ext} . Bằng cách sử dụng mạch điện tương đương, tần số cộng hưởng của mỗi cuộn cộng hưởng được xác định:

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{L(C_0 + C_{ext})}}$$
(9)



Hình 3. (a) Cấu trúc của cuộn cộng hưởng Tx/Rx, (b) mô hình mạch điện tương đương của cuộn cộng hưởng Tx/Rx.

Để khảo sát các đại lượng đặc trưng của cuộn cộng hưởng như: độ tự cảm, hệ số phẩm chất, tần số cộng hưởng, giá trị của tụ điện gắn vào cuộn cộng hưởng, cũng như hiệu suất của hệ thống MR-WPT, mô phỏng điện từ được thực hiện bằng phần mềm CST Studio Suite. Các mô phỏng được thực hiện với các điều kiện biên mở, được áp dụng theo mọi hướng và hai cổng riêng biệt được sử dụng để kích thích cuộn nguồn và cuộn tải. Trong các mô phỏng, chúng tôi thiết kế cuộn nguồn và cuộn tải là các vòng dây có bán kính ngoài 23 mm, bán kính trong 22 mm và cố định khoảng cách giữa hai cuộn cộng hưởng phát/thu là $d_{23} = 50$ mm, còn các khoảng cách d_{12} , d_{34} được chúng tôi tiến hành khảo sát để tìm ra vị trí cho hệ thống MR-WPT đạt điều kiện phối hợp trở kháng.

3. Kết quả và thảo luận

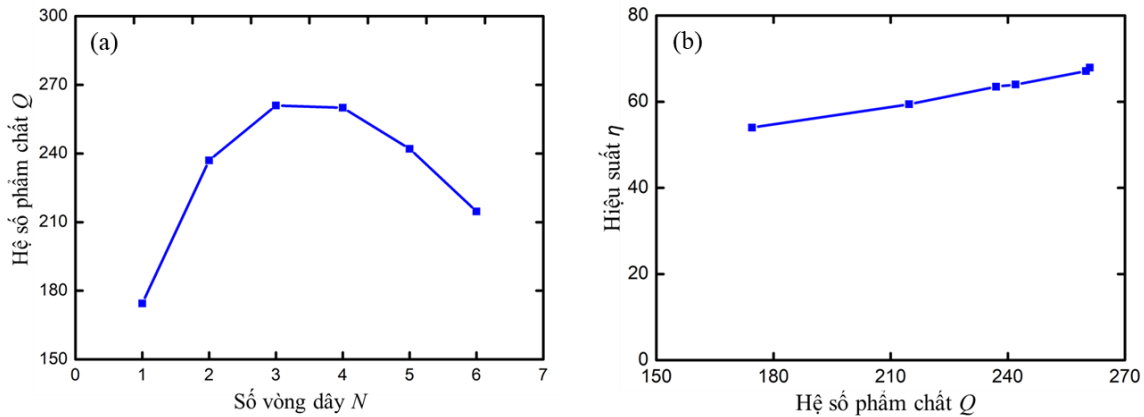
Dựa vào mô phỏng điện từ được thực hiện bằng phần mềm CST Studio Suite, với cấu trúc cuộn cộng hưởng gồm: $R_{out} = 23$ mm, $W = 2$ mm, $S = 2$ mm, $t_{Cu} = 0,105$ mm, $t_{P0} = 0,13$ mm và số vòng thay đổi từ 1 đến 6, chúng tôi lần lượt xác định được hệ số phẩm chất, độ tự cảm, cũng như tần số cộng hưởng riêng của mỗi cuộn. Từ đó, chúng tôi thực hiện khảo sát giá trị của tụ điện gắn ngoài thích hợp cho các cuộn cộng hưởng phát/thu để chúng hoạt động ở tần số mong muốn đối với hệ thống MR-WPT là 13,56 MHz. Trên cơ sở đó, chúng tôi thực hiện mô phỏng hệ thống MR-WPT, khảo sát khoảng cách từ nguồn đến Tx, từ Rx đến tải nhằm thu được hiệu suất tối ưu của hệ thống MR-WPT theo hệ số phẩm chất của cuộn cộng hưởng phát/thu. Bảng 1 liệt kê các giá trị gồm: hệ số phẩm chất của cuộn cộng hưởng phát/thu Q , hệ số truyền qua của hệ thống MR-WPT S_{21} và hiệu suất của hệ thống MR-WPT η khi số vòng dây N của cuộn cộng hưởng tăng từ 1 đến 6. Trong đó, hiệu suất của hệ thống MR-WPT được xác định thông qua hệ số truyền qua $\eta = |S_{21}|^2$. Có thể thấy khi số vòng dây thay đổi thì hệ số phẩm chất Q thay đổi và hiệu suất của hệ thống cũng thay đổi. Để thấy rõ hơn mối quan hệ này, đồ thị biểu diễn sự phụ thuộc của hệ số phẩm chất theo số vòng dây, sự phụ thuộc của hiệu suất theo hệ số phẩm chất của các cuộn cộng hưởng được trình bày trong Hình 4.

Bảng 1. Hệ số phẩm chất của cuộn cộng hưởng, hệ số truyền qua và hiệu suất của hệ thống MR-WPT theo số vòng của cuộn cộng hưởng.

N	1	2	3	4	5	6
Q	174,5	237	261	260	242	214,7
S_{21}	0,735	0,797	0,824	0,819	0,800	0,771
η	54%	63,5	67,9%	67,1%	64%	59,4%

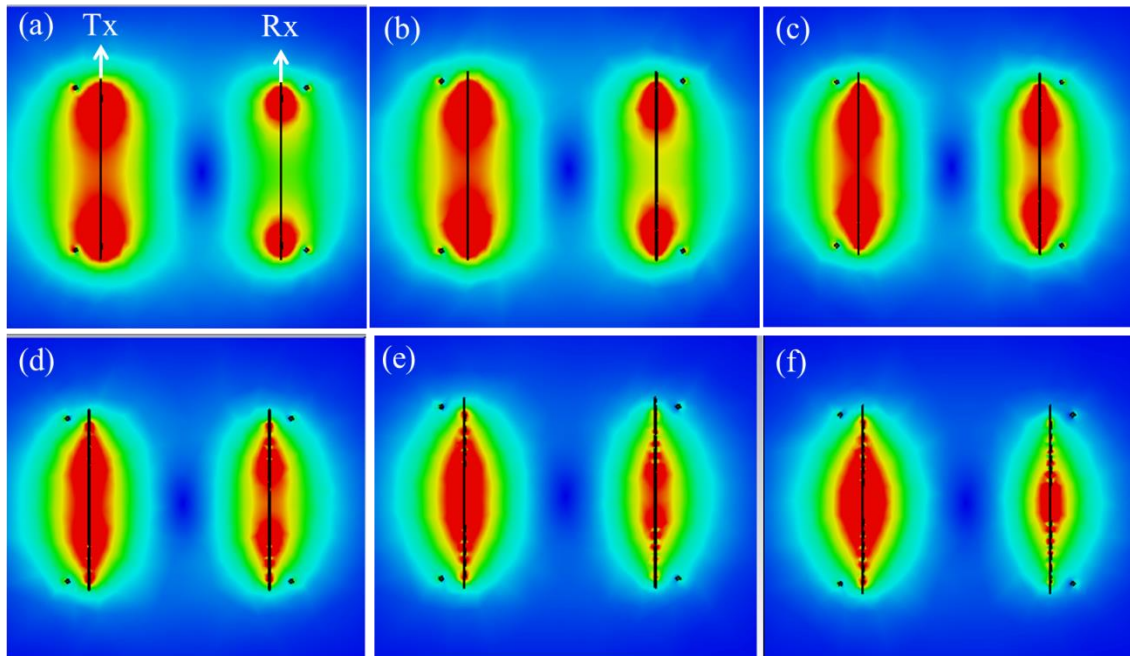
Hình 4(a) thể hiện sự thay đổi hệ số phẩm chất của cuộn cộng hưởng khi số vòng dây thay đổi trong khoảng giá trị khả thi từ 1 đến 6. Kết quả cho thấy khi cuộn cộng hưởng có số vòng dây $N = 3$ thì hệ số phẩm chất của cuộn đạt cực đại $Q = 261$. Hình 4(b) cho thấy sự phụ thuộc hiệu suất của

hệ thống MR-WPT đối xứng theo hệ số phẩm chất của cuộn cộng hưởng phát/thu. Kết quả cho thấy rằng khi hệ số phẩm chất của các cuộn cộng hưởng phát/thu tăng thì hiệu suất của hệ thống MR-WPT cũng tăng theo. Với các thông số cố định của cuộn cộng hưởng như đã đề xuất ở trên, số vòng dây để thu được hệ số phẩm chất tối đa ($Q = 261$) là $N = 3$ và khi đó hiệu suất của hệ thống MR-WPT đạt hiệu suất lớn nhất là 67,9%. Điều này hoàn toàn phù hợp với phân tích lý thuyết về sự phụ thuộc hiệu suất của hệ thống MR-WPT theo hệ số phẩm chất của các cuộn cộng hưởng trong hệ thống.



Hình 4. (a) Sự phụ thuộc: hệ số phẩm chất của cuộn cộng hưởng theo số vòng dây, (b) hiệu suất của hệ thống MR-WPT theo hệ số phẩm chất của cuộn cộng hưởng phát/thu.

Để minh chứng rõ hơn cho sự thay đổi hiệu suất tối ưu của hệ thống MR-WPT đối xứng khi thay đổi hệ số phẩm chất của cuộn cộng hưởng phát/thu thông qua thay đổi số vòng dây, phân bố từ trường xung quanh hệ thống cũng như ở không gian gần các cuộn cộng hưởng được trích xuất từ mô phỏng điện từ CST và được thể hiện như trong Hình 5.



Hình 5. Phân bố từ trường trong hệ thống MR-WPT khi thay đổi số vòng của cuộn cộng hưởng từ 1 đến 6.

Quan sát phân bố từ trường trong Hình 5 có thể nhận thấy rằng: khi số vòng dây tăng từ 1 đến 3 đồng nghĩa với hệ số phẩm chất của cuộn cộng hưởng tăng dần tới giá trị cực đại thì cường độ

trường H tại R_x sẽ tăng lên và đạt cực đại. Khi số vòng dây tiếp tục tăng từ 4 đến 6 đồng nghĩa với hệ số phẩm chất của cuộn cộng hưởng giảm dần thì cường độ trường H tại R_x cũng suy giảm dần. Điều này cũng có nghĩa rằng hiệu suất truyền dẫn của hệ thống được cải thiện khi cải thiện hệ số phẩm chất của các cuộn cộng hưởng. Với số vòng dây tối ưu $N = 3$ thì hệ số phẩm chất của cuộn đạt giá trị tối ưu $Q = 261$, khi đó phân bố từ trường tại R_x mạnh nhất. Như vậy, quy luật phân bố từ trường tại R_x cho thấy sự phù hợp với quy luật thay đổi hiệu suất tối ưu của hệ thống khi thay đổi hệ số phẩm chất của các cuộn cộng hưởng.

4. Kết luận

Trong nghiên cứu này, bằng mô phỏng điện từ, chúng tôi đã xác định được hệ số phẩm chất của cuộn cộng hưởng ứng với số vòng dây khác nhau của cuộn. Trên cơ sở đó, chúng tôi tiếp tục khảo sát hiệu suất của hệ thống MR-WPT hoạt động ở dải tần số 13,56 MHz theo hệ số phẩm chất của cuộn. Kết quả cho thấy hiệu suất của hệ thống MR-WPT tăng khi hệ số phẩm chất của các cuộn cộng hưởng tăng. Với cuộn cộng hưởng có hệ số phẩm chất nhỏ nhất $Q = 174,5$ (khi $N = 1$) thì hiệu suất của hệ thống đạt giá trị nhỏ nhất là 54% và với cuộn cộng hưởng có hệ số phẩm chất cao nhất $Q = 261$ (khi $N = 3$) thì hiệu suất của hệ thống đạt giá trị lớn nhất bằng 67,9%. Điều này có nghĩa là với các thông số cấu trúc của cuộn cộng hưởng đề xuất, số vòng dây tối ưu của cuộn cộng hưởng là $N = 3$ thì cho hiệu suất của hệ thống MR-WPT cực đại. Các kết quả thu được đối với hệ số phẩm chất Q của cuộn cộng hưởng có thể được ứng dụng trong việc thiết kế và tối ưu hóa hiệu suất của hệ thống MR-WPT. Hơn thế nữa, các kết quả trên cũng có thể áp dụng cho nghiên cứu vật liệu biến hóa có độ từ thẩm âm do cấu trúc tương tự của chúng trong hệ thống MR-WPT.

Lời cảm ơn

Nhiệm vụ phát triển nhóm nghiên cứu xuất sắc hạng II, cấp Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, Mã số: NCXS02.01/23-24. Lê Thị Hồng Hiệp được tài trợ bởi Chương trình học bổng đào tạo thạc sĩ, tiến sĩ trong nước của Quỹ Đổi mới sáng tạo Vingroup (VINIF), mã số VINIF.2022.TS040.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] A. Laha, A. Kalathy, M. Pahlevani, and P. Jain, "A Comprehensive Review on Wireless Power Transfer Systems for Charging Portable Electronics," *Eng.*, no. 4, pp. 1023–1057, 2023.
- [2] W. Lee and Y.-K. Yoon, "Wireless Power Transfer Systems Using Metamaterials: A Review," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 147930–147947, 2020.
- [3] M. J. Karimi, A. Schmid, and Dehollain, "Wireless Power and Data Transmission for Implanted Devices via Inductive Links: A Systematic Review," *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 6, pp. 7145–7161, 2021.
- [4] J. Garnica, R. A. Chinga, and J. Lin, "Wireless Power Transfer: from far field to near field," *Proc. IEEE*, vol. 101, no. 6, pp. 1321–1331, 2013.
- [5] J. H. Choi, S. H. Kang, and C. W. Jung, "Magnetic resonant wireless power transfer with L shape arranged resonators for laptop computer," *J. Electromagn. Eng. Sci.*, no. 17, pp. 126–132, 2017.
- [6] T. S. Pham, T. D. Nguyen, and D. L. Vu, "Metamaterials for improving efficiency of magnetic resonant wireless power transfer applications," *Communications in Physics*, vol. 32, no. 1, pp. 39–48, 2022.
- [7] P. T. Son, X. K. Bui, S. T. Bui, T. H. H. Le, and D. L. Vu, "A critical review on wireless power transfer systems using metamaterials," *Vietnam Journal of Science and Technology*, vol. 60, no. 4, pp. 587–613, 2022.
- [8] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljačić, "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances," *Science*, vol. 317, no. 5834, pp. 83–86, 2007.
- [9] S. Y. R. Hui, "Magnetic Resonance for Wireless Power Transfer," *IEEE Power Electronics Magazine*, vol. 3, no. 1, pp. 14–31, 2016.
- [10] P. Liu, T. Gao, and Z. Mao, "Optimization of Transfer Quality Factor of Limited-Size Coils for Series-Series Compensated Inductive Power Transfer System," *Magnetochemistry*, vol. 8, no. 30, pp. 1–13, 2022.

-
- [11] T. H. H. Le, T. S. Pham, X. K. Bui, S. T. Bui, Q. M. Ngo, T. H. Nguyen, T. M. Nguyen, and D. L. Vu, "Enhanced transmission efficiency of magneto-inductive wave propagating in non-homogeneous 2-D magnetic metamaterial array," *Phys. Scr.*, vol. 97, no. 2, 2022, Art. no. 025504.
 - [12] D. Shan, H. Wang, K. Cao, and J. Zhang, "Wireless power transfer system with enhanced efficiency by using frequency reconfigurable metamaterial," *Scientific Reports*, vol. 12, no. 331, pp.1-11, 2022.
 - [13] T. S. Pham, X. K. Bui, S. T. Bui, V. D. Pham, Q. M. Ngo, and D. L. Vu, "Enhanced Efficiency of Asymmetric Wireless Power Transmission Using Defects in 2D Magnetic Metamaterials," *Journal of Electronic Materials*, vol. 50, no. 2, pp.443-449, 2021.
 - [14] T. S. Pham, T. D. Nguyen, S. T. Bui, X. K. Bui, T. T. Hoang, Q. M. Ngo, T. H. H. Le, and D. L. Vu, "Optimal frequency for magnetic resonant wireless power transfer in conducting medium," *Scientific Reports*, vol. 11, 2021, Art. no. 18690.
 - [15] T. H. H. Le, X. K. Bui, S. T. Bui, Q. M. Ngo, D. L. Vu, and T. S. Pham, "Flexible Magnetic Metasurface with Defect Cavity for Wireless Power Transfer System," *Materials*, vol. 15, 2022, Art. no. 6583.
 - [16] T. S. Pham, T. V. Nguyen, D. K. Nguyen, and T. K. D. Ha, "Investigation on coil misalignment affect magnetic resonant wireless power transfer system," *Journal of Military Science and Technology*, no. 75, pp. 57-64, 2021.
 - [17] T. P. Duong and J.-W. Lee, "Experimental Results of High-Efficiency Resonant Coupling Wireless Power Transfer Using a Variable Coupling Method," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 21, no. 8, pp.442-444, 2011.