

## NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG DO LỆCH TRỤC VÀ LỆCH GÓC GIỮA HAI CUỘN CỘNG HƯỞNG TỚI HIỆU SUẤT CỦA HỆ THỐNG TRUYỀN NĂNG LƯỢNG KHÔNG DÂY

Phạm Thanh Sơn<sup>1\*</sup>, Nguyễn Thúy Vân<sup>1</sup>, Nguyễn Đức Khoa<sup>2</sup>, Hà Thị Kim Duyên<sup>2</sup>

**Tóm tắt:** Trong hệ thống truyền năng lượng không dây (WPT - Wireless Power Transfer), năng lượng được truyền từ cuộn phát sang cuộn thu thông qua tương tác trường gần. Hệ số ghép cặp giữa cuộn cộng hưởng phát và thu là một trong những thông số quan trọng tác động tới hiệu suất của hệ thống. Trong các ứng dụng thực tế, việc hai cuộn cộng hưởng này bị lệch trục hoặc lệch góc là điều khó có thể tránh khỏi, điều đó làm giảm hệ số ghép cặp giữa hai cuộn phát và thu. Trong bài báo này, chúng tôi trình bày các phân tích và khảo sát chi tiết về độ lệch ảnh hưởng tới hiệu suất truyền dẫn của hệ thống WPT. Một hệ thống WPT cộng hưởng từ hoạt động ở vùng tần số 6,78 MHz đã được chế tạo và đo đạc trong các điều kiện độ lệch khác nhau.

**Từ khóa:** Truyền năng lượng không dây; Cộng hưởng từ; Lệch trục; Lệch góc.

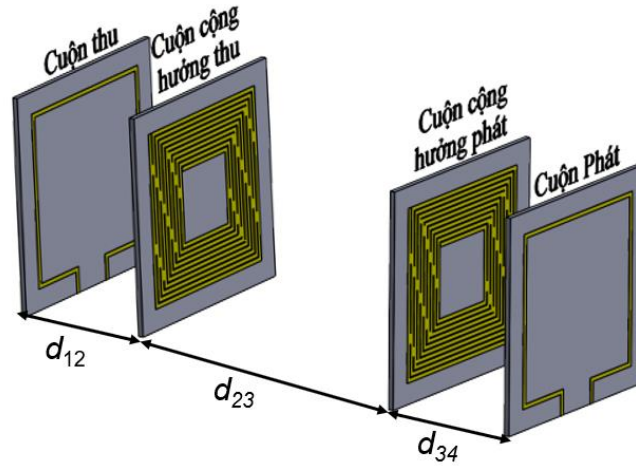
### 1. MỞ ĐẦU

Công nghệ WPT đã được giới thiệu từ hơn một thế kỷ trước bởi nhà khoa học thiên tài Nikola Tesla [1]. Trong hơn một trăm năm qua, công nghệ này đã phát triển theo rất nhiều hướng khác nhau [2-5]. Hiện tại, WPT có thể được chia làm 3 loại theo khoảng cách truyền: tầm gần, trung và tầm xa. Với mỗi cấu hình hệ thống sẽ hoạt động ở một dải tần số nhất định. Ở khoảng gần từ vài mm đến vài cm, hệ thống WPT thường hoạt động ở dải tần số kHz, đây là WPT tầm gần [6]. Với khoảng cách xa hơn từ vài cm đến vài m, hệ thống WPT sẽ hoạt động ở dải tần số cao hơn cỡ MHz, đây là WPT tầm trung [7, 8]. Truyền năng lượng không dây tầm xa ở khoảng cách vài chục m tới hàng trăm km hoạt động ở vùng tần số GHz [9]. Đã có những sản phẩm công nghệ được ra đời cho thấy sự phát triển và lợi ích mà công nghệ WPT đem lại như sạc không dây dành cho ô tô, điện thoại thông minh, thiết bị thăm dò đáy biển,... [10]. Việc truyền điện cho các thiết bị nhân tạo gắn sâu trong cơ thể con người mà không cần tiến hành phẫu thuật cũng là một ứng dụng tiềm năng của WPT [11]. Ở dải tần số GHz, WPT được ứng dụng vào việc truyền năng lượng từ vệ tinh, vũ trụ xuống mặt đất. Do ở tần số càng cao thì suy hao trên đường truyền càng lớn nên loại WPT tầm xa này không được ứng dụng phổ biến như ở dải tần số thấp.

Trong các ứng dụng dân dụng của WPT, chỉ có hệ thống tầm gần và tầm trung được sử dụng do chúng đạt hiệu năng cao và an toàn với con người. Hiện nay, trong nước cũng như trên thế giới, công nghệ WPT ở khoảng cách trung bình với cấu trúc 4 cuộn dây (WPT 4-cuộn) dựa trên nguyên lý cộng hưởng từ đang được ứng dụng và phát triển mạnh [7]. Trên thực tế hệ thống WPT nói chung cũng như hệ thống WPT 4-cuộn cũng sẽ có những hạn chế nhất định như việc hệ thống bị giảm hiệu suất khi cuộn phát/thu không cố định ở một vị trí nhất định [12]. Hiện tượng hệ thống bị lệch do tác động bởi con người cũng như từ môi trường xung quanh dẫn tới hai trường hợp có thể xảy ra đó là lệch trục và lệch góc [13]. Cả hai hiện tượng này đều làm hiệu suất truyền của hệ thống bị giảm nhanh chóng.

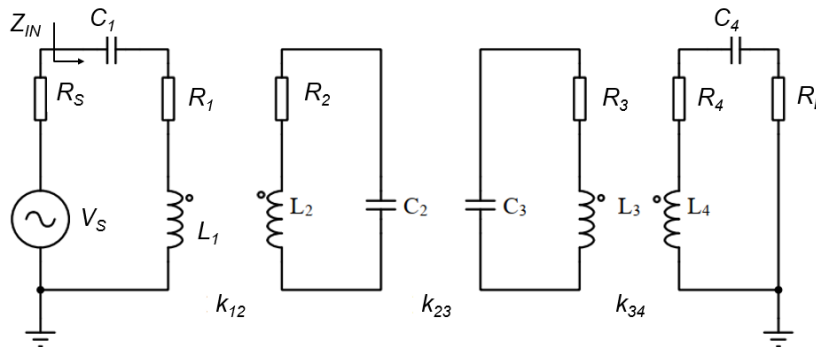
Trong bài báo này, chúng tôi khảo sát sự thay đổi hiệu suất của hệ thống WPT với các độ lệch trục và góc khác nhau. Trong hệ thống WPT cộng hưởng từ năng lượng được truyền đi nhờ có tương tác của các cuộn cộng hưởng trong trường gần. Sự ảnh hưởng của độ lệch tới hệ số ghép cặp giữa các cuộn cộng hưởng được khảo sát bằng lý thuyết, mô phỏng phân bố trường và thực nghiệm, từ đó cung cấp những thông tin quan trọng về ảnh hưởng của độ lệch tới hiệu suất của hệ thống WPT. Các kết quả thu được trong bài báo có thể được sử dụng để tối ưu hóa các hệ thống WPT hoạt động trong môi trường thực tế, nơi mà sự lệch trục và góc của các cuộn cộng hưởng trong hệ thống WPT rất dễ xảy ra.

## 2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU



**Hình 1.** Sơ đồ hệ thống WPT cộng hưởng từ.

Hình 1 là sơ đồ hệ thống WPT cộng hưởng từ với cấu trúc 4 cuộn dây bao gồm: cuộn phát, cuộn cộng hưởng phát (Tx), cuộn cộng hưởng thu (Rx), cuộn thu. Cuộn phát và cuộn thu được ghép cặp cảm ứng với các cuộn cộng hưởng có cấu trúc nhiều vòng xoắn (Tx và Rx), khoảng cách giữa cuộn phát/thu và các cuộn cộng hưởng tương ứng là  $d_{12}$  và  $d_{34}$  khá nhỏ. Với cấu trúc nhiều vòng xoắn của các cuộn cộng hưởng, chúng có hệ số phẩm chất cao ( $Q$ -factor = 405), phù hợp với hệ thống WPT cộng hưởng từ. Khoảng cách  $d_{23}$  giữa hai cuộn cộng hưởng là khoảng cách truyền dẫn hiệu dụng của hệ thống WPT. Năng lượng sẽ được truyền từ cuộn phát tới cuộn thu qua các tương tác từ trường trong trường gần. Hệ số phẩm chất cao của các cuộn cộng hưởng sẽ giúp cho hệ thống WPT cộng hưởng từ duy trì được hiệu suất cao ở khoảng cách xa hơn nhiều so với hệ thống WPT tầm ngắn thông thường [10].



**Hình 2.** Sơ đồ mạch tương đương của hệ thống WPT cộng hưởng từ.

Các cuộn dây được sử dụng trong nghiên cứu này có kích thước 30 cm hoạt động ở vùng tần số 6,78 MHz. Bởi vì kích thước của các cuộn dây rất nhỏ so với bước sóng hoạt động của hệ thống WPT (0,3 m so với 44,2 m), chúng ta có thể sử dụng các phần tử mạch như được trình bày trong hình 2 để mô hình hóa hệ thống [14]. Các cuộn dây có thể được mô tả bằng các phần tử RLC, trong đó,  $R_i$  ( $i = 1-4$ ) đại diện cho mất mát Ohmic và phát xạ,  $L_i$  ( $i = 1-4$ ) đại diện cho cảm kháng của các cuộn dây,  $C_i$  ( $i = 1-4$ ) đại diện cho dung kháng của các cuộn dây. Hệ số ghép cặp giữa các cuộn dây liên kế nhau được định nghĩa bởi  $k_{12}$ ,  $k_{23}$ , và  $k_{34}$ .  $R_S$  là điện trở của nguồn phát và  $R_L$  là điện trở của tải tiêu thụ.

Theo định luật Kirchhoff cho điện áp ta có:

$$\begin{cases} V_s = \left( R_s + R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} \right) I_1 + j\omega M_{12} I_2 \\ 0 = \left( R_2 + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2} \right) I_2 + j\omega M_{12} I_1 + j\omega M_{23} I_3 \\ 0 = \left( R_3 + j\omega L_3 + \frac{1}{j\omega C_3} \right) I_3 + j\omega M_{23} I_2 + j\omega M_{34} I_4 \\ 0 = \left( R_L + R_4 + j\omega L_4 + \frac{1}{j\omega C_4} \right) I_4 + j\omega M_{34} I_3 \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó:  $I_i$  ( $i = 1-4$ ) là các dòng điện chạy trong các cuộn dây,  $M_{ij} = k_{ij} \sqrt{L_i L_j}$  là độ hồ cảm giữa hai cuộn dây,  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_i C_i}}$  là tần số cộng hưởng của các cuộn dây,  $\omega$  là tần số làm việc của hệ thống WPT.

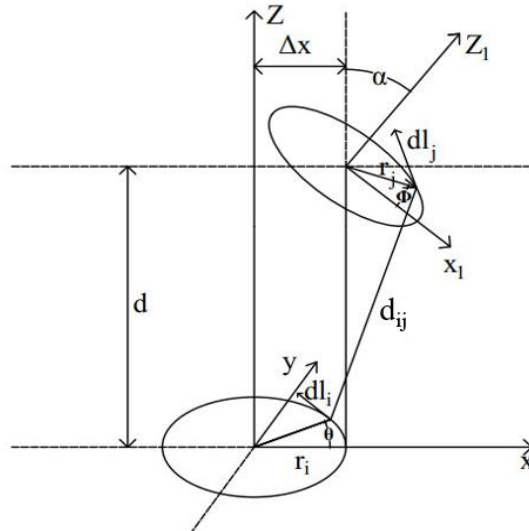
Khi hệ thống WPT đối xứng với cuộn phát/thu giống nhau và hai cuộn cộng hưởng Tx/Rx cũng giống nhau. Khi đó, ta có  $Q_1 = Q_4$ ;  $Q_2 = Q_3$  và  $k_{12} = k_{34}$ .

Trong đó, hệ số phẩm chất của mỗi cuộn dây được tính bằng công thức:

$$Q_i = \omega \frac{L_i}{R_i} \quad (2)$$

Hệ số điện áp giữa nguồn phát và tải tiêu thụ là một đại lượng đặc trưng cho hiệu quả hoạt động của hệ thống WPT được tính bằng công thức [14]:

$$\left| \frac{V_L}{V_s} \right| = \left| \frac{I_4 R_L}{I_1 R_s} \right| = \frac{k_{23} k_{12}^2 Q_1 Q_2^2}{(1 + k_{12}^2 Q_1 Q_2)^2 + k_{23}^2 Q_2^2} \sqrt{\frac{R_L}{R_s}} \quad (3)$$



**Hình 3.** Sơ đồ vị trí các cuộn dây khi bị lệch.

Theo công thức (3), trong các đại lượng ảnh hưởng tới hệ số điện áp thì các đại lượng  $Q_i$ ,  $R_L$  và  $R_s$  là cố định đối với một hệ WPT cho trước. Các hệ số ghép cặp  $k_{12}$  và  $k_{34}$  cũng dễ dàng cố

định và không ảnh hưởng đến hiệu suất truyền dẫn. Do đó, hệ số ghép cặp  $k_{23}$  là một tham số có tác động rất lớn đến hiệu suất truyền dẫn của một hệ WPT. Trong thực tế, các cuộn dây ở phía phát và thu của hệ thống WPT có thể bị lệch trục một khoảng ( $\Delta x$ ) và lệch một góc ( $\alpha$ ) như trong hình 3. Các tham số này sẽ thay đổi hệ số ghép cặp  $k_{23}$  và từ đó ảnh hưởng tới hiệu suất truyền dẫn của hệ thống. Tác động của các tham số hình học tới hệ số ghép cặp và độ hở cảm của hai cuộn cộng hưởng được làm rõ trong các phân tích dưới đây.

Hệ số ghép cặp của hai cuộn dây  $i$  và  $j$  được biểu diễn như sau: [12]

$$k_{ij} = \beta \times \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=m} M_{ij}}{\sqrt{L_i L_j}} \quad (4)$$

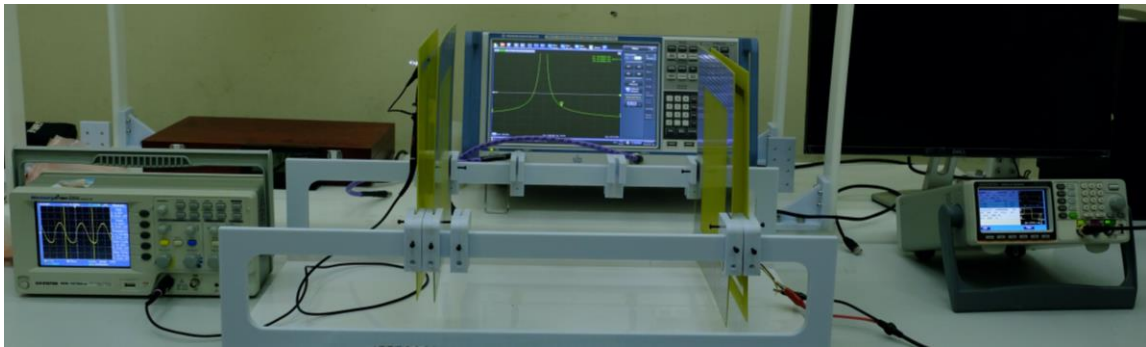
Trong đó,  $n$  và  $m$  là số vòng của cuộn dây,  $\beta = 4/\pi$  là hệ số hình dạng của cuộn dây [16]. Dựa trên công thức Newman, độ hở cảm giữa hai vòng dây bị lệch có thể được tính theo công thức sau: [15]

$$M_{ij} = \frac{\mu_0 r_i r_j}{4\pi} \frac{d\vec{l}_i d\vec{l}_j}{d_{ij}} = \frac{\mu_0}{4\pi} \iint \frac{\sin \theta \sin \varphi \cos \alpha + \cos \theta \cos \varphi}{\sqrt{\left[ r_i^2 + r_j^2 + d^2 + \Delta x^2 + 2\Delta x r_j \cos \varphi \cos \alpha - 2\Delta x r_i \cos \varphi - \left[ 2r_i r_j (\cos \theta \cos \varphi \cos \alpha + \sin \theta \sin \varphi) - 2r_j d \cos \varphi \sin \alpha \right] \right]}} d\varphi d\theta \quad (5)$$

Trong đó,  $r_i, r_j$  là bán kính của cuộn dây,  $d$  là khoảng cách giữa hai cuộn dây khi đồng phẳng,  $\Delta x$  là độ lệch trục của hai cuộn dây, các góc  $\theta, \varphi, \alpha$  là các góc như mô tả trên hình 3. Các đại lượng trong công thức (5) được biểu diễn như sau: [15]

$$\begin{aligned} d\vec{l}_i &= r_i (-\sin \theta \vec{x} + \cos \theta \vec{y}) d\theta \\ d\vec{l}_j &= r_j (-\sin \varphi \cos \alpha \vec{x} + \cos \varphi \vec{y} + \sin \varphi \sin \alpha \vec{z}) d\varphi \\ d_{ij} &= \left| (\Delta x + r_j \cos \varphi \cos \alpha, r_j \sin \varphi, d - r_j \cos \varphi \sin \alpha) - (r_i \cos \theta, r_i \sin \theta, 0) \right| \end{aligned} \quad (6)$$

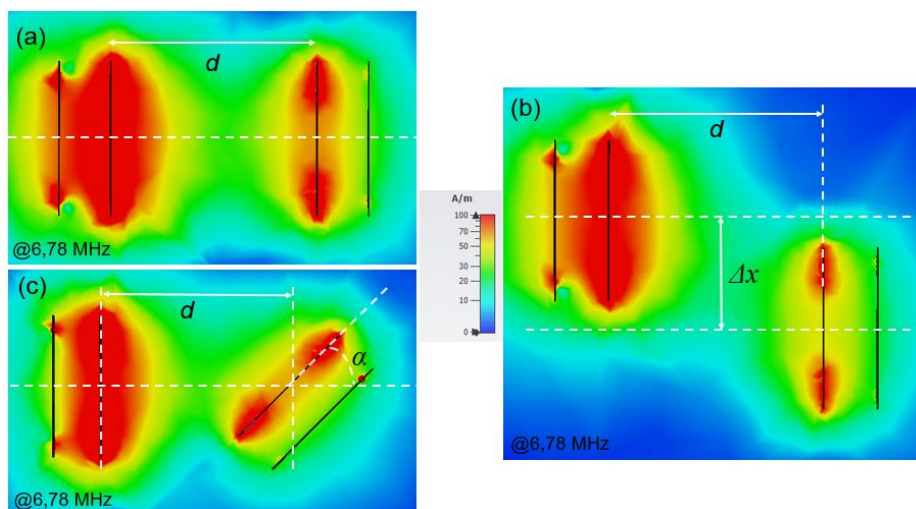
### 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN



**Hình 4.** Hệ thống truyền năng lượng không dây 4 cuộn.

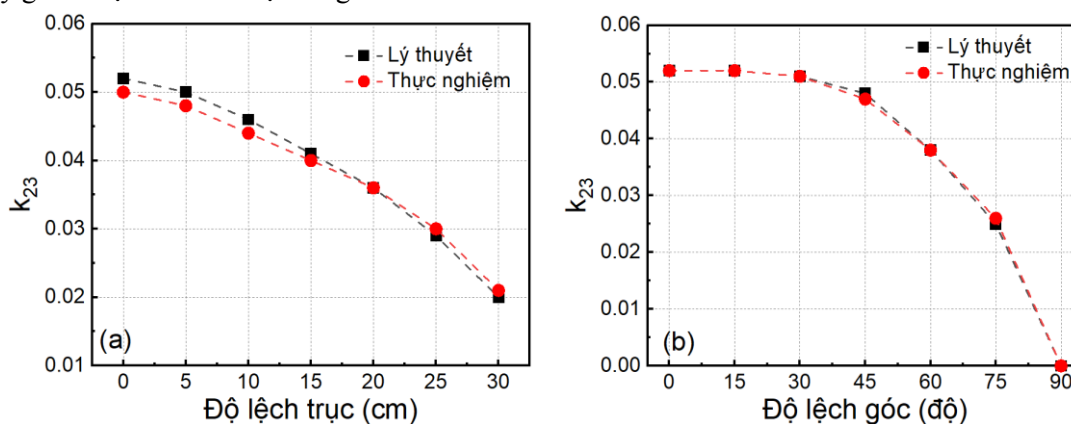
Sau khi tiến hành các phân tích về độ lệch ảnh hưởng tới hiệu suất của hệ thống WPT, chúng tôi chế tạo hệ thống WPT và tiến hành đo đạc như trên hình 4. Hệ thống WPT này được chế tạo dựa trên sơ đồ trong hình 1, bao gồm 4 cuộn dây được chế tạo trên đế PCB bằng vật liệu FR-4 có độ dày 1,6 mm. Hai cuộn đóng vai trò là anten phát/thu có cấu trúc một vòng dây có đường kính 25 cm. Hai cuộn cộng hưởng có cấu trúc dạng vòng xoắn với 9,5 vòng dây, đường kính ngoài là

30 cm, khoảng cách giữa các vòng dây là 1 mm, độ rộng vòng dây là 3 mm. Với các thông số thiết kế như trên, hai cuộn cộng hưởng có tần số cộng hưởng là 6,78 MHz và đó cũng là tần số hoạt động của hệ thống WPT. Tần số trên nằm trong dải tần số ISM (6,765 MHz – 6,795 MHz) được quốc tế quy định cho phép sử dụng với các thiết bị công nghiệp, khoa học và y tế.



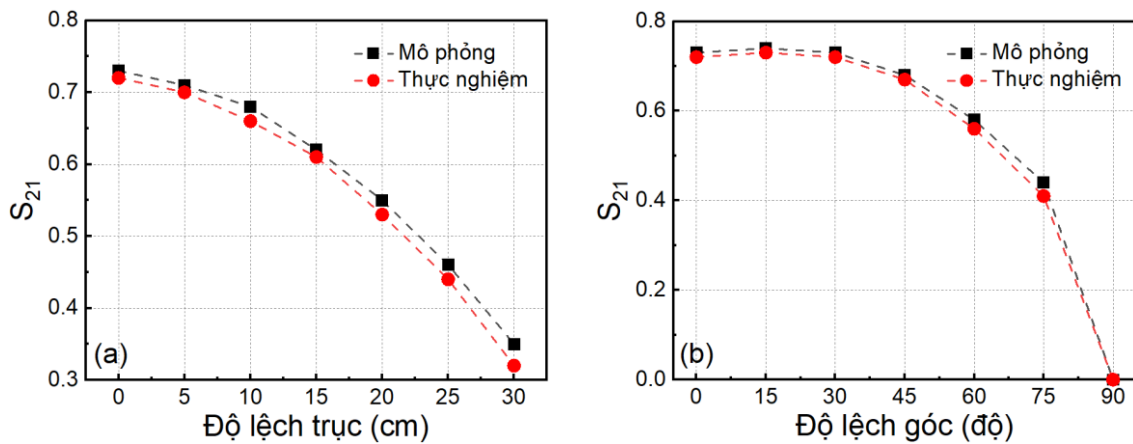
**Hình 5.** Phân bố từ trường trong hệ thống WPT: (a) hệ thống cơ bản, (b) hệ thống bị lệch trục, (c) hệ thống bị lệch góc.

Đối với các hệ thống WPT cộng hưởng từ, phân bố của từ trường xung quanh hệ và gần các cuộn dây có tác động rất lớn tới hiệu suất truyền dẫn. Do đó, chúng tôi sử dụng phần mềm mô phỏng điện từ trường CST Studio Suite để phân tích hệ thống. Phân bố từ trường xung quanh hệ thống WPT được biểu diễn trên hình 5 cho ba trường hợp: hệ thống cơ bản, hệ thống bị lệch trục, và hệ thống bị lệch góc. Trong cả ba trường hợp này khoảng cách tính từ tâm của hai cuộn cộng hưởng đều bằng 40 cm ( $d = 40$  cm). Hình 5(a) trình bày phân bố trường của hệ thống WPT cơ bản, từ trường tập trung mạnh ở các vùng gần cuộn cộng hưởng. Do hiệu suất của hệ thống không thể đạt được 100% nên từ trường tại bên phát (bên trái) mạnh hơn so với bên thu (bên phải). Các hình 5(b)-(c) mô tả phân bố trường của hệ thống WPT khi bị lệch trục một khoảng  $\Delta x = 20$  cm và bị lệch một góc  $\alpha = 45^\circ$ . Kết quả mô phỏng với các cấu hình này chỉ ra rằng cường độ từ trường bên phía cuộn cộng hưởng thu yếu hơn so với hệ thống cơ bản. Điều này sẽ dẫn đến suy giảm hiệu suất của hệ thống WPT.



**Hình 6.** Hệ số ghép cặp giữa hai cuộn cộng hưởng trong các trường hợp (a) lệch trục, (b) lệch góc.

Đối với WPT cộng hưởng từ, hệ số ghép cặp của hai cuộn cộng hưởng ( $k_{23}$ ) là một thông số quan trọng quyết định tới hiệu suất của hệ thống. Theo phương trình (3), hệ số điện áp truyền qua tỉ lệ với  $k_{23}$  trong khoảng  $0 < k_{23} < 1$  [14]. Khi các cuộn cộng hưởng trong hệ WPT bị lệch trục hoặc lệch góc, độ hồ cảm  $M$  sẽ bị suy giảm từ đó làm giảm hệ số ghép cặp giữa các cuộn cộng hưởng ( $k_{23}$ ). Hình 6 trình bày các kết quả tính toán và đo đạc hệ số ghép cặp giữa hai cuộn cộng hưởng với các độ lệch trục và lệch góc khác nhau. Hệ số ghép cặp này được đo đạc thông qua các giá trị độ hồ cảm  $M$  (phụ thuộc vào khoảng cách, độ lệch), và độ tự cảm  $L$  ( $k = M/L$ ). Các giá trị  $M$  và  $L$  (22.2  $\mu\text{H}$ ) có thể thu được từ phép đo hai cổng (2-port) sử dụng máy phân tích mạng [17]. Hình 6(a) trình bày các kết quả của  $k_{23}$  với các độ lệch trục khác nhau. Khi tăng độ lệch trục giá trị  $k_{23}$  giảm đi nhanh chóng từ 0.05 xuống 0.026 tương ứng với độ lệch từ 0 đến 30 cm. Hình 6(b) mô tả kết quả  $k_{23}$  khi các góc lệch thay đổi từ  $0^\circ$  đến  $90^\circ$ . Với các góc lệch nhỏ hệ số  $k_{23}$  không thay đổi nhiều, tuy nhiên, sự suy giảm xảy ra nhanh chóng khi góc lệch lớn hơn  $60^\circ$ , và tiến tới 0 khi góc lệch đạt  $90^\circ$ .



**Hình 7.** Hiệu suất của hệ thống WPT trong các trường hợp (a) lệch trục, (b) lệch góc.

Hình 7 trình bày kết quả đo đạc hiệu suất của hệ thống WPT với khoảng cách truyền dẫn hiệu dụng  $d = 40$  cm trong các trường hợp có độ lệch trục và lệch góc khác nhau. Máy phân tích mạng (VNA - Vector Network Analyzer) Rohde & Schwarz ZNB20 cùng phương pháp hiệu chỉnh SOLT (Short-Open-Load-Through) đã được sử dụng trong quá trình đo. Hệ số truyền qua của hệ thống với các độ lệch trục khác nhau từ 0 đến 30 cm được trình bày trên Hình 7(a) cho thấy sự suy giảm hệ số truyền qua khi độ lệch trục tăng dần. Khi độ lệch trục tăng từ  $\Delta x = 0$  cm tới  $\Delta x = 30$  cm ( $\Delta x/r_i = 200\%$ ) thì hệ số truyền qua của hệ thống WPT giảm dần từ  $S_{21} = 0,72$  xuống  $S_{21} = 0,32$ . Hình 7(b) biểu diễn hệ số truyền qua của hệ thống WPT khi độ lệch góc thay đổi từ  $\alpha = 0^\circ$  tới  $\alpha = 90^\circ$ . Với độ lệch góc nhỏ hơn  $30^\circ$  hệ số truyền qua của hệ thống gần như không thay đổi. Tuy nhiên, khi độ lệch góc tăng lên lớn hơn  $30^\circ$ , hệ số truyền qua bắt đầu giảm rất nhanh. Tại góc lệch bằng  $90^\circ$ , hai cuộn cộng hưởng vuông góc với nhau, do đó, giữa chúng hoàn toàn không có tương tác và hệ số truyền qua của hệ thống giảm về 0. Các kết quả thu được cho thấy rằng độ lệch trục và góc có ảnh hưởng lớn tới hiệu suất của hệ thống WPT. Khi độ lệch trục tăng lên hệ số truyền qua của hệ thống giảm dần. Với độ lệch góc nhỏ hơn  $30^\circ$  hệ số truyền qua của hệ thống hầu như không có thay đổi. Tuy nhiên, hiệu suất của hệ thống giảm rất nhanh khi góc lệch lớn hơn  $60^\circ$  và hoàn toàn bằng 0 khi góc lệch là  $90^\circ$ .

#### 4. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, chúng tôi đã phân tích lý thuyết, mô phỏng, chế tạo thực nghiệm và đo đạc hệ thống WPT cộng hưởng từ ở các độ lệch trục và góc khác nhau. Các kết quả chỉ ra rằng, độ lệch trục và góc có tác động làm giảm hiệu suất của hệ thống WPT. Tuy nhiên, với các độ lệch góc nhỏ hơn  $30^\circ$  hiệu suất của hệ thống không có sự thay đổi nhiều. Các kết quả thu được có thể



áp dụng vào việc thiết kế hệ thống WPT. Chúng ta cần giảm thiểu việc các cuộn cộng hưởng bị lệch trục và góc. Với các độ lệch góc nhỏ hơn  $30^\circ$  hiệu suất của hệ thống sẽ không bị ảnh hưởng, nhưng với độ lệch trục sự suy giảm diễn ra khá tuyến tính, do đó sẽ luôn làm suy giảm hiệu năng của hệ thống.

**Lời cảm ơn:** Công trình này được thực hiện với sự hỗ trợ về kinh phí của đề tài hỗ trợ kinh phí nghiên cứu cấp cơ sở cho cán bộ trẻ năm 2021, mã số: HTCBT.03/21-21 của Viện Khoa học vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam.

### **TÀI LIỆU THAM KHẢO**

- [1]. N. Tesla, "Apparatus for transmitting electrical energy," 1119732, 1914.
- [2]. W. Lee and Y.-K. Yoon, "Wireless power transfer systems using metamaterials: A review," IEEE Access, vol. 8, pp. 147930–147947, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3015176.
- [3]. X. Dang, P. Jayathurathnage, S. A. Tretyakov, and C. R. Simovski, "Self-tuning multi-transmitter wireless power transfer to freely positioned receivers," IEEE Access, vol. 8, pp. 119940–119950, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3005657.
- [4]. M. Song et al., "Smart table based on a metasurface for wireless power transfer," Phys. Rev. Appl., vol. 11, no. 054046, pp. 1–9, 2019, doi: 10.1103/PhysRevApplied.11.054046.
- [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., vol. 17, no. 3, pp. 126–132, 2017, doi: 10.5515/JKIEES.2017.17.3.126.
- [6]. H. Zhou, B. Zhu, W. Hu, Z. Liu, and X. Gao, "Modelling and practical implementation of 2-Coil wireless power transfer systems," J. Electr. Comput. Eng., vol. 2014, no. 906537, pp. 1–8, 2014, doi: 10.1155/2014/906537.
- [7]. S. Y. R. Hui, W. Zhong, and C. K. Lee, "A critical review of recent progress in mid-range wireless power transfer," IEEE Trans. Power Electron., vol. 29, no. 9, pp. 4500–4511, 2014, doi: 10.1109/TPEL.2013.2249670.
- [8]. T. S. Pham et al., "Enhanced efficiency of asymmetric wireless power transmission using defects in 2D magnetic metamaterials," J. Electron. Mater., vol. 50, no. 2, pp. 443–449, 2021, doi: 10.1007/s11664-020-08586-w.
- [9]. M. Xia and S. Aïssa, "On the efficiency of far-field wireless power transfer," IEEE Trans. Signal Process., vol. 63, no. 11, pp. 2835–2847, 2015, doi: 10.1109/TSP.2015.2417497.
- [10]. J. Garnica, R. A. Chinga, and J. Lin, "Wireless power transmission: From far field to near field," Proc. IEEE, vol. 101, no. 6, pp. 1321–1331, 2013, doi: 10.1109/JPROC.2013.2251411.
- [11]. M. Kod, J. Zhou, Y. Huang, M. Hussein, A. P. Sohrab, and C. Song, "An approach to improve the misalignment and wireless power transfer into biomedical implants using meandered wearable loop antenna," Wirel. Power Transf., vol. 2021, no. 6621899, pp. 1–12, 2021, doi: 10.1155/2021/6621899.
- [12]. T. P. Duong and J.-W. Lee, "A dynamically adaptable impedance-matching system for midrange wireless power transfer with misalignment," Energies, vol. 2015, no. 8, pp. 7593–7617, 2015, doi: 10.3390/en8087593.
- [13]. A. L. A. K. Ranaweera, C. A. Moscoso, and J.-W. Lee, "Anisotropic metamaterial for efficiency enhancement of mid-range wireless power transfer under coil misalignment," J. Phys. D: Appl. Phys., vol. 48, no. 455104, pp. 1–8, 2015, doi: 10.1088/0022-3727/48/45/455104.
- [14]. T. P. Duong and J. W. Lee, "Experimental results of high-efficiency resonant coupling wireless power transfer using a variable coupling method," IEEE Microw. Wirel. Components Lett., vol. 21, no. 8, pp. 442–444, 2011, doi: 10.1109/LMWC.2011.2160163.
- [15]. S. Wang et al., "Enhancing the stability of medium range and misalignment wireless power transfer system by negative magnetic metamaterials," Materials, vol. 13, no. 5695, pp. 1–11, 2020, doi: 10.3390/ma13245695.
- [16]. S. Raju, R. Wu, M. Chan, and C. P. Yue, "Modeling of Mutual Coupling Between Planar Inductors in Wireless Power Applications," IEEE Trans. Power Electron., vol. 29, no. 1, pp. 481–490, 2014, doi: 10.1109/TPEL.2013.2253334.
- [17]. A. Vallecchi, S. Chu, L. Solymar, C. J. Stevens, and E. Shamonina, "Coupling between coils in the presence of conducting medium," IET Microwaves, Antennas Propag., vol. 13, no. 1, pp. 55–62, Jan. 2019, doi: 10.1049/iet-map.2018.5292.

**ABSTRACT**

**INVESTIGATION ON COIL MISALIGNMENT AFFECT MAGNETIC RESONANT  
WIRELESS POWER TRANSFER SYSTEM**

*In a wireless power transfer (WPT) system, energy is transferred from the transmitter to the receiver through near-field interaction. The coupling coefficient between the transmitter and the receiver is one of the key parameters affecting the system's performance. It is difficult to avoid the resonator coils being misaligned in practical applications, thereby reducing the coupling coefficient between them. In this paper, we investigate the effect of misalignment on WPT efficiency. A magnetic resonant WPT operating at 6.78 MHz has been fabricated and measured under various misalignment conditions.*

**Keywords:** Wireless Power Transfer; Magnetic Resonance; Lateral Misalignment; Angular Misalignment.

*Nhận bài ngày 14 tháng 07 năm 2021*

*Hoàn thiện ngày 13 tháng 09 năm 2021*

*Chấp nhận đăng ngày 10 tháng 10 năm 2021*

*Địa chỉ:* <sup>1</sup>Viện Khoa học vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam;

<sup>2</sup>Khoa Điện tử, Trường Đại học Công Nghiệp Hà Nội.

\*Email: sonpt@ims.vast.ac.vn.