

# THIẾT KẾ, MÔ PHỎNG CẢM BIẾN HÌNH TRỤ KIỂU TỤ ĐIỆN ĐO GÓC NGHIÊNG HAI CHIỀU

DESIGN, SIMULATION OF CAPACITOR TYPE CYLINDRICAL SENSOR TO MEASURE TWO-DIMENSIONAL TILT ANGLE

Trần Thị Thúy Hà<sup>1</sup>, Khuất Đức Dương<sup>2</sup>, Nguyễn Đắc Hải<sup>2,\*</sup>

## TÓM TẮT

Bài báo này trình bày thiết kế, mô phỏng cấu trúc cảm biến đo góc nghiêng hai trục dựa trên nguyên lý kiểu tụ điện. Cấu trúc cảm biến bao gồm một ống nhựa hình trụ có năm điện cực được gắn ở các vị trí cố định xung quanh ống trong đó có một điện cực đóng vai trò điện cực kích thích và hai cặp điện cực còn lại được đặt một cách đối xứng đóng vai trò điện cực thu. Ống nhựa được bơm một phần chất lỏng điện môi sử dụng là xăng có hằng số điện môi là 2. Cảm biến được đề xuất có thể phát hiện góc nghiêng theo 2 trục x và y. Khi ống nhựa bị quay một góc bất kỳ, dung dịch điện môi bao phủ một phần các điện cực cảm ứng sẽ di chuyển, từ đó làm thay đổi giá trị điện dung vì sai của tụ điện tương ứng với góc nghiêng và ta hoàn toàn có thể xác định được góc bị nghiêng. Hoạt động của cảm biến được khảo sát bởi phương thức phần tử hữu hạn (FEM) sử dụng phần mềm mô phỏng Comsol Multiphysics. Kết quả mô phỏng thể hiện sự thay đổi điện dung vì sai ứng với sự thay đổi của từng góc nghiêng. Dựa trên kết quả mô phỏng này, kích thước của các điện cực đã được tìm ra để có cấu hình cảm biến với độ nhạy 2 trục x, y và dải làm việc thích hợp. Kích thước tối ưu của cảm biến với các tham số  $W_1 = 10,47$  mm,  $L_2 = 3$  mm và  $L_3 = 5$  mm,  $D_2 = 17,45$  mm. Cảm biến làm việc tối ưu trong dải từ  $-90^\circ$  đến  $+90^\circ$  với độ nhạy  $0,426$  fF/ $^\circ$  theo trục x và từ  $-30^\circ$  đến  $+30^\circ$  với độ nhạy  $1,54$  fF/ $^\circ$  theo trục y.

**Từ khóa:** Cảm biến điện dung; Cảm biến điện dung năm điện cực; Cảm biến góc nghiêng hai chiều.

## ABSTRACT

This paper presents the design and simulation of a two-axis tilt sensor based on the principle of capacitor type. These two pairs of symmetric electrodes are placed symmetrically. cylindrical plastic tube filled part of the dielectric fluid used is petrol having a dielectric constant of 2. The proposed sensor can detect tilt angles in x and y axes. When the cylindrical plastic tube is rotated at any angle, the dielectric fluid covers a portion of the induction electrodes that will move, thereby changing the differential capacitance value of the capacitor corresponding to the angle tilte and so can defined angle tilte. Sensor activity was investigated by finite element method (FEM) using Comsol Multiphysics simulation software. Simulation results show the variation in capacitance with respect to the variation of each angle. Based on this simulation result, the size of the electrodes was found to have a sensor configuration with x, y two axis sensitivity and a suitable working range. Optimal size of the sensor with parameters  $W_1 = 10.47$  mm,  $L_2 = 3$  mm và  $L_3 = 5$  mm,  $D_2 = 17.45$  mm. The sensor work optimally in  $[-90^\circ, +90^\circ]$  range with sensitivity of  $0.426$  fF/ $^\circ$  on the x-axis and in  $[-30^\circ, +30^\circ]$  range with a sensitivity of  $1.54$  fF/ $^\circ$  on the y-axis.

**Keywords:** Capacitive sensor, 5-electrodes capacitive sensor, x-axis and y-axis tilt angle sensors.

<sup>1</sup>Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông

<sup>2</sup>Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

\*Email: haind@hau.edu.vn

Ngày nhận bài: 15/7/2018

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 10/10/2018

Ngày chấp nhận đăng: 25/10/2018

## 1. GIỚI THIỆU

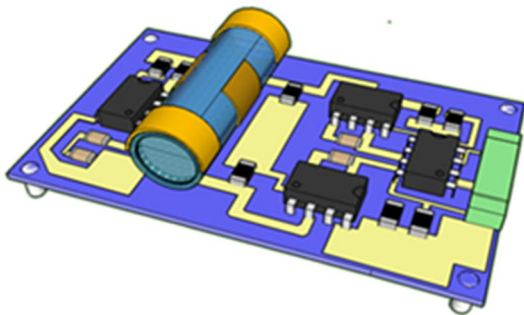
Ngày nay, có rất nhiều loại cảm biến góc nghiêng đã được đề xuất và phát triển. Các cảm biến này được sử dụng rộng rãi trong công nghiệp, nghiên cứu khoa học và trong một số ứng dụng hàng ngày. Một số ứng dụng phổ biến mà các cảm biến độ nghiêng được sử dụng bao gồm: điện thoại thông minh; thiết bị theo dõi của bệnh nhân [1]; bánh tự cân bằng xe [2, 3]; điều chỉnh góc quay của hệ thống năng lượng mặt trời [4, 5]; điều chỉnh góc quay của radar trong quân sự [6]; hiệu chỉnh cân bằng trong máy bay [7].

Một cảm biến góc nghiêng có thể được thiết kế bằng cách sử dụng một số nguyên tắc. Ví dụ bao gồm cảm biến độ nghiêng điện dung vì sai cấu rắn [8], cảm biến độ nghiêng sử dụng phương pháp quang học [9], cảm biến sử dụng chất lỏng dẫn tạo thành cấu trúc kênh vi dẫn được áp dụng để phát hiện góc nghiêng [10], cảm biến chất lỏng sử dụng điện cực tụ điện đo thay đổi độ dẫn để tính góc nghiêng [11, 12] ....

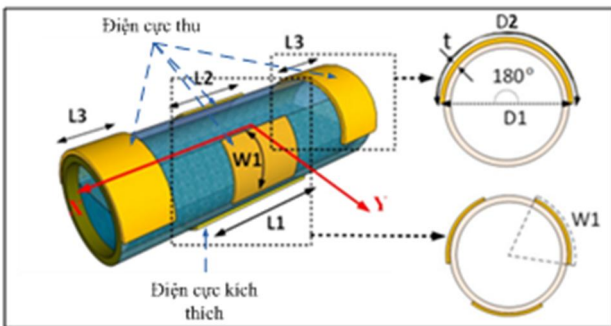
Trong bài báo này, chúng tôi đề xuất một cảm biến đo góc nghiêng hai chiều hình trụ kiểu tụ điện. Góc nghiêng được cảm nhận dựa trên sự chênh lệch điện dung của hai cặp tụ điện khi góc nghiêng làm thay đổi mặt phẳng cân bằng chất lỏng điện môi của cảm biến tụ điện. Đặc biệt, cấu trúc hoạt động dựa trên nguyên lý điện dung nên cảm biến này có thể hoạt động trong các điều kiện khắc nghiệt, phù hợp với nhiều ứng dụng khác nhau.

**2. THIẾT KẾ CẢM BIẾN**

Cấu trúc cảm biến đo góc nghiêng hai trục được thiết kế với một ống nhựa hình trụ có năm điện cực được gắn ở các vị trí cố định xung quanh ống trong đó có một điện cực đóng vai trò điện cực kích thích và hai cặp điện cực còn lại được đặt một cách đối xứng đóng vai trò điện cực thu như hình 1. Ống nhựa hình trụ rỗng, kín có đường kính 10 mm được bơm một phần dung dịch điện môi bên trong. Chất lỏng được bơm vào bên trong là xăng (chiếm khoảng 65% thể tích ống) với hằng số điện môi là 2. Khi ống nhựa bị quay một góc bất kỳ, dung dịch điện môi bao phủ một phần các điện cực cảm ứng sẽ di chuyển, từ đó làm thay đổi giá trị điện dung vi sai của tụ điện tương ứng với góc nghiêng và ta hoàn toàn có thể xác định được góc bị nghiêng.



a)



b)

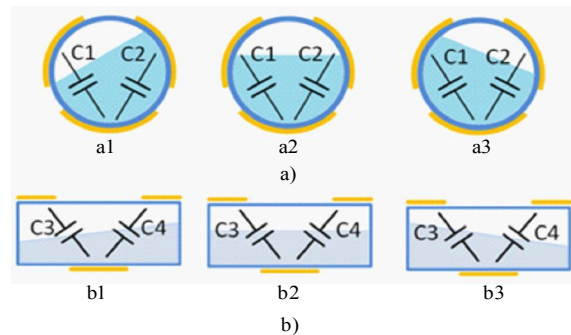
Hình 1. Thiết kế cảm biến góc nghiêng hai chiều hình trụ kiểu tụ điện

Các điện cực có chất liệu bằng đồng với kích thước như bảng 1 và chúng được uốn cong ôm lấy ống nhựa hình trụ ở vị trí xác định. Trong 5 điện cực của cảm biến này, điện cực kích thích được đặt ở bên dưới ống và bị dung dịch bao phủ hoàn toàn, hai cặp điện cực cảm ứng được đặt đối xứng nhau thì có kích thước giống nhau và bị dung dịch bao phủ một phần. Các cặp điện cực này tạo nên hai cặp tụ điện (C1 - C2) và (C3 - C4) ứng với hai trục x và y, giá trị điện dung của các tụ điện này phụ thuộc vào lượng chất lỏng trong ống, hình dạng, kích thước cũng như vị trí của các điện cực.

Bảng 1. Tham số của cảm biến góc nghiêng hai trục được thiết kế

Tham số	W <sub>1</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	t
Giá trị (mm)	7,5	10	5	7	11	15,7	0,2

Khi cảm biến ở vị trí góc nghiêng 0° như hình 2 (a2 và b2) thì dung dịch điện môi bao phủ lên điện cực thu là bằng nhau, vì vậy giá trị điện dung của tụ C<sub>1</sub> = C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub> = C<sub>4</sub> và giá trị điện dung vi sai ΔC<sub>1</sub> = C<sub>1</sub> - C<sub>2</sub> = 0, ΔC<sub>2</sub> = C<sub>3</sub> - C<sub>4</sub> = 0. Khi cảm biến bị nghiêng theo phương trục x và theo chiều kim đồng hồ (hình 2-a3), dung dịch điện môi bao phủ lên điện cực (C1) tăng lên, điện cực còn lại (C2) giảm xuống, vì vậy điện dung vi sai ΔC<sub>1</sub> = C<sub>1</sub> - C<sub>2</sub> sẽ tăng lên. Ngược lại, khi cảm biến nghiêng theo phương trục y và theo chiều ngược chiều kim đồng hồ (hình 2-a1), lượng dung dịch bao quanh (C1) giảm đi, còn (C2) tăng lên dẫn đến ΔC<sub>1</sub> = C<sub>1</sub> - C<sub>2</sub> sẽ giảm đi. Tương tự như vậy, theo phương trục y ta cũng có ΔC<sub>2</sub> = C<sub>3</sub> - C<sub>4</sub> tăng khi quay theo chiều kim đồng hồ (hình 2-b3) và ΔC<sub>2</sub> = C<sub>3</sub> - C<sub>4</sub> giảm khi quay ngược chiều kim đồng hồ (hình 2-b1). Bằng cách so sánh lượng thay đổi ΔC<sub>1</sub> = C<sub>1</sub> - C<sub>2</sub> và ΔC<sub>2</sub> = C<sub>3</sub> - C<sub>4</sub> ứng với các trục x và y ta có thể tính được góc nghiêng của cảm biến.



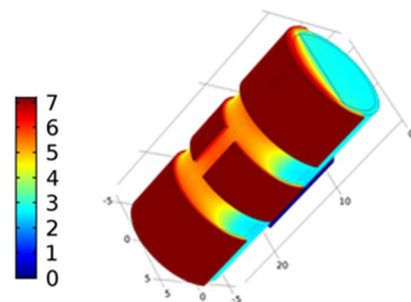
Hình 2. Điện dung thay đổi khi cảm biến quay theo trục x (a) và trục y (b)

**3. THIẾT LẬP MÔ PHỎNG**

Hoạt động của cảm biến được khảo sát bởi phương pháp phần tử hữu hạn (FEM - Finite Element Method) sử dụng phần mềm mô phỏng Comsol Multiphysics.

Bảng 2. Các tham số dùng trong mô phỏng cảm biến

Thành phần hệ thống của cảm biến	Chất liệu	Hằng số điện môi	Độ dẫn điện
Pha khí	Không khí	1	-
Dung dịch điện môi	Xăng	2	-
Ống nhựa	Nhựa	2,36	-
Điện cực	Đồng	-	5,96.10 <sup>7</sup>



Hình 3. Sự phân bố điện trường của cảm biến

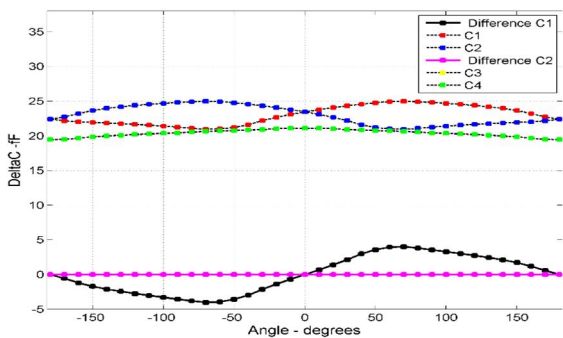
Mô hình cảm biến được thiết kế gồm một ống nhựa hình trụ chứa xăng và không khí bên trong, năm điện cực

bằng đồng được thiết kế ôm xung quanh ống. Điện cực kích thích được đặt điện thế 0 V và coi đây là đất, điện thế 7,2V được đặt vào 2 cặp điện cực thu. Bảng 2 thể hiện các tham số của vật liệu sử dụng trong cảm biến. Hình 3 thể hiện sự phân bố điện trường khi mô phỏng với phần mềm Comsol. Hình 3 cũng thể hiện sự phân bố điện trường tập trung nhiều ở giữa các điện cực, các khu vực màu đỏ thể hiện cường độ điện trường cao và các vùng màu xanh thể hiện cường độ điện trường thấp hơn.

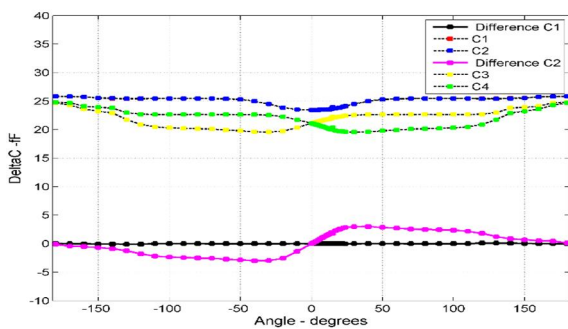
**4. MÔ PHỎNG**

Khi cảm biến bị xoay đi một góc  $\beta$  nào đó đủ lớn thì dẫn đến mức dung dịch trong ống sẽ phủ kín một trong 2 điện cực thu khiến sự thay đổi điện dung vi sai  $\Delta C$  là rất nhỏ. Vì vậy khi góc nghiêng càng lớn thì sự thay đổi điện áp lối ra sẽ giảm dần làm cho dải làm việc của cảm biến bị thu hẹp lại. Ở phần này, cách khảo sát các điện cực theo từng trục để tìm ra kích thước tối ưu hơn của các điện cực cho dải làm việc và độ nhạy tốt nhất sẽ được trình bày. Các tham số trong bảng 1 ở trên là  $W_1, L_2, L_3, D_2$  sẽ lần lượt được thay đổi trong một phạm vi nào đấy. Cụ thể, khi khảo sát cảm biến theo trục x, các tham số  $L_3, D_2$  của trục y sẽ được giữ nguyên, một trong hai tham số  $W_1, L_2$  ứng với chiều dài và chiều rộng của điện cực sẽ được thay đổi. Tương tự, khi khảo sát cảm biến theo trục y, các tham số  $W_1, L_2$  của trục x sẽ được giữ nguyên, một trong hai tham số  $L_3, D_2$  ứng với chiều dài và chiều rộng của điện cực sẽ được thay đổi.

**4.1. Mô phỏng mối liên hệ giữa điện dung và góc nghiêng tương ứng theo trục x và trục y**



(a)



(b)

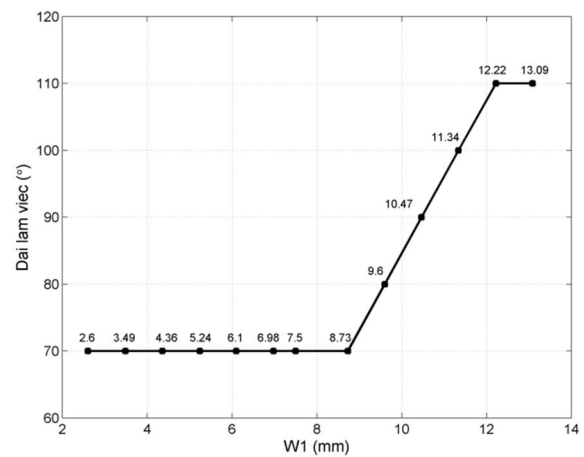
Hình 4. Đồ thị mối liên hệ giữa điện dung và góc nghiêng tương ứng theo trục x và trục y

Dựa trên kích thước của các tham số ở bảng 1 và 2, kết quả mô phỏng với các kích thước này thể hiện sự thay đổi điện dung vi sai  $\Delta C_1 = C_1 - C_2$  và  $\Delta C_2 = C_3 - C_4$  tương ứng với góc nghiêng. Đồ thị hình 4 thể hiện sự thay đổi của góc nghiêng theo trục x (hình 4a) và trục y (hình 4b). Góc nghiêng được khảo sát trong phạm vi từ  $-180^\circ$  đến  $+180^\circ$ . Ta thấy rằng điện dung vi sai và góc nghiêng đồng biến trong dải từ  $-50^\circ$  đến  $+50^\circ$  với độ nhạy  $0,36 \text{ fF}^\circ$  theo trục x và đồng biến trong dải từ  $-18^\circ$  đến  $+18^\circ$  với độ nhạy  $1,5 \text{ fF}^\circ$  theo trục y. Dễ dàng nhận thấy theo như hình 4 thì khi xoay góc nghiêng theo trục x thì điện dung vi sai của trục y gần như bằng không và ngược lại. Điều này cho thấy rằng nhiều xuyên âm (crosstalk) của hai trục lên nhau là không đáng kể.

**4.2. Khảo sát các điện cực của cảm biến góc nghiêng khi quay theo trục x**

**4.2.1. Khảo sát  $W_1$**

$L_2 = 5 \text{ mm}$  lần lượt thay đổi kích thước của  $W_1$ , đồ thị hình 5 thể hiện dải làm việc của cảm biến thu được ứng với từng kích thước của  $W_1$ .

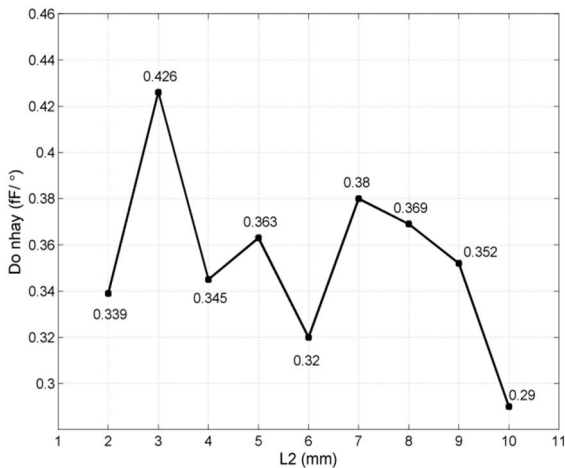


Hình 5. Mối liên hệ giữa dải làm việc của cảm biến với kích thước  $W_1$

Nhìn vào đồ thị hình 5, dễ dàng chọn được  $W_1 = 10,47 \text{ mm}$  sẽ cho dải làm việc của cảm biến từ  $0^\circ$  đến  $90^\circ$ . Đây là dải làm việc tối ưu của cảm biến theo trục x vì các điện cực của trục x được đặt đối xứng, chính vì vậy góc nghiêng sẽ đồng biến dải góc nghiêng từ  $0^\circ$  đến  $90^\circ$  sau đó sẽ nghịch biến trong dải góc nghiêng từ  $90^\circ$  đến  $180^\circ$  để tạo thành một hình gần giống hình sin. Trong dải góc nghiêng từ  $-180^\circ$  đến  $-90^\circ$  sẽ đảo ngược lại do cấu trúc đối xứng của cảm biến.

**4.2.2. Khảo sát  $L_2$**

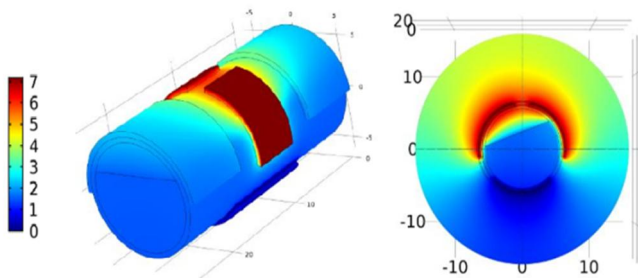
Từ kết quả khảo sát  $W_1 = 10,47 \text{ mm}$ . Lần lượt thay đổi kích thước của  $L_2$ , kết quả mô phỏng cho thấy khi lần lượt thay đổi từng kích thước của  $L_2$  thì dải làm việc của cảm biến với từng kích thước là giống nhau nhưng độ nhạy của cảm biến với từng kích thước là khác nhau. Đồ thị hình 6 thể hiện sự thay đổi kích thước của chiều dài  $L_2$  và độ nhạy của cảm biến ứng với từng kích thước thay đổi.



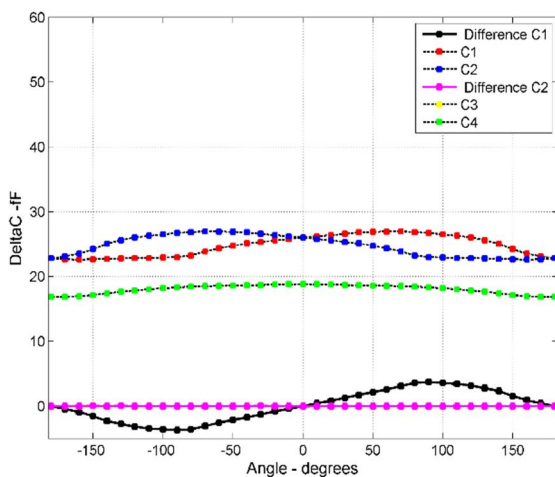
Hình 6. Khảo sát kích thước  $L_2$  với độ nhạy của cảm biến

Nhìn vào đồ thị hình 6 để dàng thấy rằng, với  $L_2 = 3$  mm thì sẽ cho độ nhạy của cảm biến cao nhất là  $0,426 \text{ fF}/^\circ$ .

**4.2.3. Mô phỏng với các điện cực có kích thước tối ưu  $W_1 = 10,47$  mm và  $L_2 = 3$  mm**



Hình 7. Đồ thị phân bố trường tĩnh điện và phân bố điện thế trong trường tĩnh điện khi cảm biến nghiêng  $0^\circ$  và  $20^\circ$  theo trục x



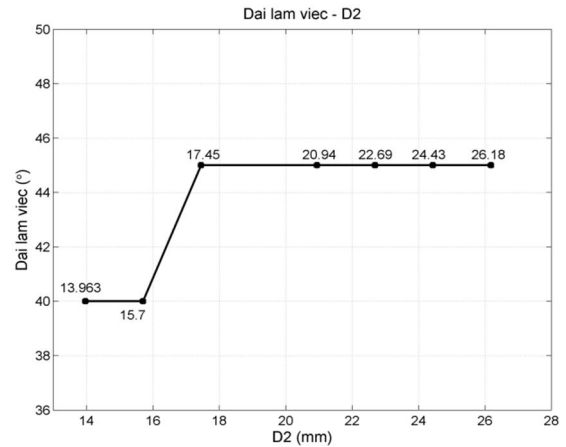
Hình 8. Kết quả mô phỏng góc nghiêng theo trục x với  $W_1 = 10,47$  mm và  $L_2 = 3$  mm

Từ hình 7 và 8 ta thấy, khi cảm biến quay theo trục x thì hiệu điện dung của hai tụ  $C_3$  và  $C_4$  ( $\Delta C_2 = C_3 - C_4$ ) bằng 0, điều này chứng tỏ khi cảm biến quay theo trục x thì tín hiệu của cặp tụ ( $C_3 - C_4$ ) không tạo ra nhiễu xuyên âm (crosstalk).

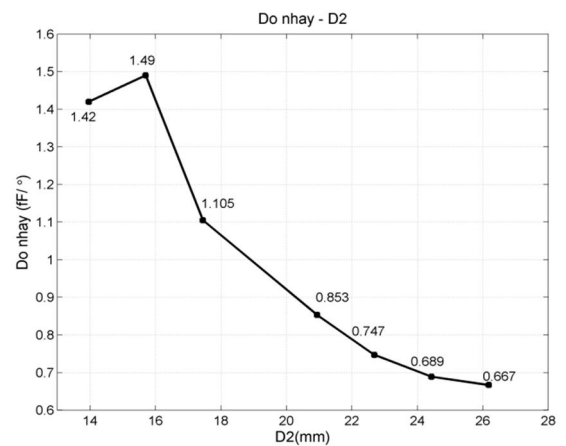
**4.3. Khảo sát các điện cực của cảm biến góc nghiêng khi quay theo trục y**

**4.3.1. Khảo sát  $D_2$**

$L_3 = 7$  mm lần lượt thay đổi kích thước của  $D_2$ , đồ thị hình 9 thể hiện dải làm việc của cảm biến thu được ứng với từng kích thước khác nhau của  $D_2$ , đồ thị hình 10 thể hiện độ nhạy của cảm biến thu được ứng với từng kích thước khác nhau của  $D_2$ .



Hình 9. Dải làm việc của cảm biến ứng với kích thước  $D_2$

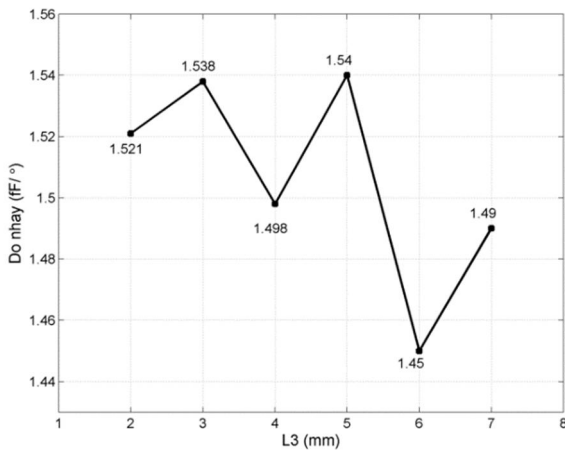


Hình 10. Độ nhạy của cảm biến ứng với kích thước  $D_2$

Từ hình 9 và 10 ta thấy rằng,  $D_2 = 17,45$  mm sẽ cho độ nhạy và dải đo thích hợp nhất lần lượt là  $1,105 \text{ fF}/^\circ$ . Ta thấy rằng, sở dĩ dải làm việc của trục y bé hơn trục x nhiều là bởi vì khi xoay cảm biến theo trục y, đến một góc  $\beta$  đủ lớn nào đấy, dung dịch trong ống sẽ ngập kín toàn bộ một trong hai điện cực của trục y và điện cực còn lại sẽ không có dung dịch chạm tới, do đó điện dung vi sai của tụ sẽ giảm.

**4.3.2. Khảo sát  $L_3$**

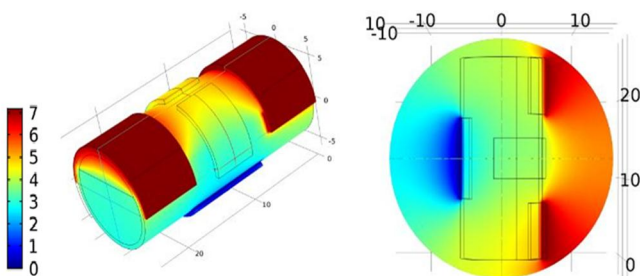
Từ kết quả khảo sát  $D_2 = 17,45$  mm. Lần lượt thay đổi kích thước của  $L_3$ , kết quả mô phỏng cho thấy khi lần lượt thay đổi từng kích thước của  $L_3$  thì dải làm việc của cảm biến với từng kích thước là giống nhau nhưng độ nhạy của cảm biến với từng kích thước là khác nhau. Đồ thị hình 11 thể hiện sự thay đổi kích thước của chiều dài  $L_3$  và độ nhạy của cảm biến ứng với từng kích thước thay đổi.



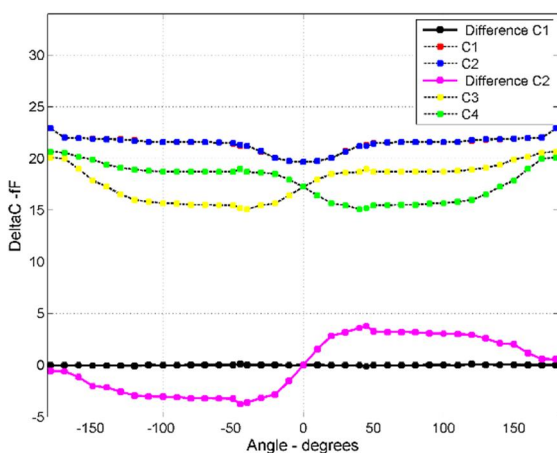
Hình 11. Đồ thị độ nhạy của cảm biến thu được ứng với từng kích thước của L<sub>3</sub>

Hình 11 cho thấy, với L<sub>3</sub> = 5 mm sẽ cho độ nhạy của cảm biến là lớn nhất (1,54 fF/°). Như vậy, với L<sub>3</sub> = 5 mm, D<sub>2</sub> = 17,45 mm là kích thước tối ưu của điện cực khi cảm biến nghiêng theo trục y.

**4.3.3. Mô phỏng với các điện cực có kích thước tối ưu L<sub>3</sub> = 5 mm, D<sub>2</sub> = 17,45 mm**



Hình 12. Đồ thị phân bố trường tĩnh điện và phân bố điện thế trong trường tĩnh điện khi cảm biến nghiêng 0° và 20° theo trục y



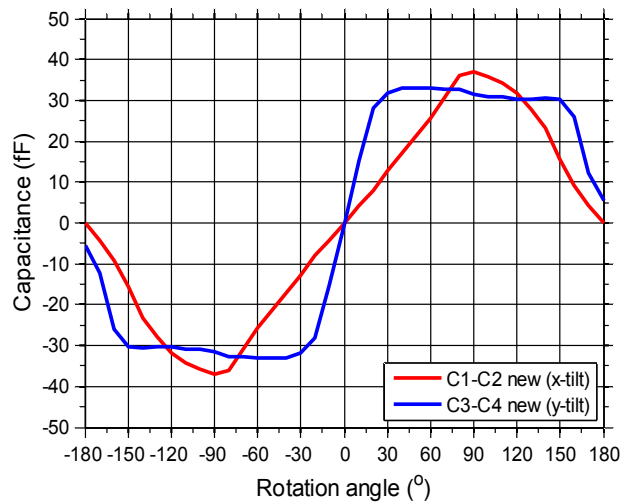
Hình 13. Đồ thị kết quả mô phỏng các kích thước tối ưu của trục y

Từ hình 12 và 13 ta thấy, khi cảm biến quay theo trục y thì hiệu điện dung của hai tụ C<sub>1</sub> và C<sub>2</sub> ( $\Delta C_1 = C_1 - C_2$ ) xấp xỉ bằng 0, điều này chứng tỏ khi cảm biến quay theo trục y thì

tín hiệu của cặp tụ (C<sub>1</sub> - C<sub>2</sub>) tạo ra nhiễu xuyên âm (crosstalk) là rất nhỏ.

**4.4. Mô phỏng mối liên hệ giữa điện dung và góc nghiêng tương ứng theo trục x và trục y theo kích thước tối ưu**

Hình 14 thể hiện mối liên hệ giữa điện dung và góc nghiêng tương ứng theo trục x và trục y với các điện cực có kích thước tối ưu tìm được W<sub>1</sub> = 10,47 mm, L<sub>2</sub> = 3 mm và L<sub>3</sub> = 5 mm, D<sub>2</sub> = 17,45 mm. Ta thấy rằng điện dung sai và góc nghiêng đồng biến trong dải từ -90° đến +90° với độ nhạy 0,426 fF/° theo trục x và đồng biến trong dải từ -30° đến +30° với độ nhạy 1,54 fF/° theo trục y.



Hình 14. Đồ thị kết quả mô phỏng các kích thước tối ưu của trục x và y

**5. KẾT LUẬN**

Bài báo này trình bày thiết kế, mô phỏng cấu trúc cảm biến đo góc nghiêng hai trục dựa trên nguyên lý kiểu tụ điện. Cảm biến được đề xuất có thể phát hiện góc nghiêng theo 2 trục x và y. Kích thước tối ưu của các điện cực đã được tìm ra W<sub>1</sub> = 10,47 mm, L<sub>2</sub> = 3 mm và L<sub>3</sub> = 5 mm, D<sub>2</sub> = 17,45 mm. Kết quả mô phỏng cho thấy dải đo từ -90° đến +90° với độ nhạy 0,426 fF/° theo trục x và từ -30° đến +30° với độ nhạy 1,54 fF/° theo trục y. Với dải làm việc này, cảm biến có thể được ứng dụng trong nhiều thiết bị yêu cầu dải đo lớn như theo dõi dao động của sóng trên mặt biển, trong các vũ khí quân sự, các máy móc công nghiệp trong đời sống.

**TÀI LIỆU THAM KHẢO**

[1]. L. Zhao, E. M. Yeatman, 2007. "Micro Capacitive Tilt Sensor for Human Body Movement Detection". Body Sensor Networks 2007, Aachen, Germany, March 26-28, 2007, pp. 195-200.  
 [2]. Kerry D. Wong. *A Self-Balancing Robot*, 2012.  
 [3]. M. M. Rahman, Ashik-E-Rasul, N. M. A. Haq, M. Hassan, I. M. A. Hasib, and K. M. R. Hassan, 2016. *Development of a two wheeled self balancing robot with speech recognition and navigation algorithm*. AIP Conference Proceedings, vol. 1754, no. 1, p. 060005, Jul. 2016.

- [4]. Department of Physics The University of Toledo, Astronomy, and PVIC SSARE. *Fundamental Properties of Solar Cells, Principles and Varieties of Solar Energy Key functions of a solar cell*. (Phys 4400), 2012.
- [5]. H. Ozbay, A. Karafil, Y. Onal, M. Kesler, and H. Parmaksiz, 2017. *The Monitoring of Monthly, Seasonal and Yearly Optimum Tilt Angles by Raspberry Pi Card for Bilecik City, Turkey*. Energy Procedia, vol. 113, pp. 311318, May 2017.
- [6]. Peter Folger. *Chapter 1- Basic Radar Principles and General Characteristics*. Pages 1-34, 2014.
- [7]. David G. Hull. *Fundamentals of airplane flight mechanics*. 2007.
- [8]. Chang Hwa Lee and Seung S. Lee, 2014. "Study of a capacitive tilt sensor with a metallic ball". ETRI Journal, vol. 36, no. 3, pp. 361-366.
- [9]. S. Das, 2014. "A Simple, Low Cost Optical Tilt Sensor". Int. J. Electron. Electr. Eng., vol. 2, no. 3, pp. 235-241.
- [10]. S. M. Kuo and C. H. Lin, 2008. "Micro-impedance inclinometer with wide-angle measuring capability and no damping effect". Sensors and Actuators, A: Physical, vol. 143, no. 1, pp. 133-119.
- [11]. Yiping Tang, Caiguo Chen, 2011. "Design of Omni- Directional Tilt Sensor Based on Machine Vision". Journal of Sensor Technology, 1, 108-115.
- [12]. J. A. Westphal, M. A. Carr, and W. F. Mille, SI, 1983. "Expendable bubble tiltmeter for geophysical monitoring". Rev. Sci. Instrum., Vol. 54, No.4, April 1983.