

**ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHỆ**

NGUYỄN NGỌC DŨNG

**NGHIÊN CỨU THIẾT KẾ, MÔ PHỎNG VÀ THỬ NGHIỆM
CẢM BIẾN GÓC NGHIÊNG HAI CHIỀU
CẤU TRÚC HAI PHA LỎNG – KHÍ**

**LUẬN VĂN THẠC SĨ
CÔNG NGHỆ KỸ THUẬT ĐIỆN TỬ TRUYỀN THÔNG**

Hà Nội - 2017

**ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHỆ**

NGUYỄN NGỌC DŨNG

**NGHIÊN CỨU THIẾT KẾ, MÔ PHỎNG VÀ THỬ NGHIỆM
CẢM BIẾN GÓC NGHIÊNG HAI CHIỀU
CẤU TRÚC HAI PHA LỎNG – KHÍ**

Chuyên ngành: Kỹ thuật Điện tử

Mã số: 60 52 02 03

**LUẬN VĂN THẠC SĨ
CÔNG NGHỆ KỸ THUẬT ĐIỆN TỬ TRUYỀN THÔNG**

Người hướng dẫn khoa học: TS. Bùi Thanh Tùng

Hà Nội - 2017

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan đề tài “NGHIÊN CỨU THIẾT KẾ, MÔ PHỎNG VÀ THỬ NGHIỆM CẢM BIẾN GÓC NGHIÊNG HAI CHIỀU CẤU TRÚC HAI PHA LỎNG -KHÍ” do TS. Bùi Thanh Tùng hướng dẫn là công trình nghiên cứu của tôi. Các nội dung nghiên cứu, kết quả trong đề tài này là trung thực và không sao chép các công trình của người khác.

Tất cả các tài liệu tham khảo được sử dụng trong luận văn này đều được ghi rõ nguồn gốc và tên tác giả. Nếu có sai sót, tôi xin hoàn toàn chịu trách nhiệm.

Hà Nội, tháng 10, năm 2017

Nguyễn Ngọc Dũng

LỜI CẢM ƠN

Tôi xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc đến TS. Bùi Thanh Tùng và PGS.TS. Chử Đức Trình đã tận tình chỉ hướng dẫn, chỉ bảo và có những góp ý giá trị để tôi hoàn thành luận văn này.

Tôi cũng xin cảm ơn TS. Nguyễn Đắc Hải (Đại học Công Nghiệp Hà Nội) và NCS Vũ Quốc Tuấn (Viện Vật lý ứng dụng – Viện Hàn lâm khoa học công nghệ Việt Nam) đã giúp đỡ tôi nhiệt tình trong quá trình đo đạc thực nghiệm các giá trị của cảm biến.

Cuối cùng, tôi cũng xin gửi lời cảm ơn tới các thầy cô giáo của khoa Điện Tử Viễn Thông, Trường Đại Học Công Nghệ - Đại Học Quốc Gia Hà Nội đã truyền đạt cho tôi những kiến thức bổ ích và thiết thực trong suốt quá trình học tập tại trường.

Trong quá trình thực hiện luận văn, do kiến thức còn hạn chế, không thể tránh khỏi những thiếu sót, tôi rất mong nhận được những ý kiến đóng góp của quý Thầy Cô để tôi có thể tiếp tục hoàn thiện và phát triển đề tài này.

Hà Nội, tháng 10, năm 2017

Nguyễn Ngọc Dũng

TÓM TẮT LUẬN VĂN

Luận văn này trình bày về nghiên cứu phát triển một cảm biến đo góc nghiêng hai trục dựa trên nguyên lý đo điện dung vi sai cấu trúc hai pha lỏng - khí. Cảm biến nghiêng được khảo sát thử nghiệm và cải tiến thiết kế với cấu trúc cảm biến là hình cầu rỗng với năm điện cực được gắn bên ngoài tại các vị trí xác định quanh hình cầu. Trong đó một điện cực đóng vai trò là điện cực kích thích, và hai cặp điện cực còn lại (có vị trí đối xứng nhau qua trục đối xứng của hình cầu) đóng vai trò là các điện cực thu cho hai trục x và y . Quả cầu có chứa một phần là chất lỏng điện môi (nước, hằng số điện môi là 81). Với cấu trúc cải tiến cảm biến được đề xuất có thể phát hiện góc nghiêng theo hai trục x và y với độ nhạy và dải làm việc của cảm biến trên 2 trục này là tương đồng nhau. Hoạt động của cảm biến trước tiên được khảo sát bằng phương pháp phần tử hữu hạn (Finite Element method - FEM) sử dụng phần mềm mô phỏng Comsol Multiphysics. Dựa trên kết quả mô phỏng này, kích thước của các điện cực đã được tìm ra để đạt được tối ưu về độ nhạy và dải làm việc cho cảm biến. Nguyên mẫu cảm biến đã được chế tạo thử sử dụng phương pháp in 3D tạo mẫu nhanh (3D printing) và hoạt động của cảm biến đã được kiểm nghiệm. Kết quả thực nghiệm xác nhận sự thay đổi giá trị điện dung vi sai trên các cặp điện cực tương ứng với thay đổi của góc nghiêng tác dụng lên cảm biến theo hai trục x và y . Trên trục x cảm biến có dải làm việc $[-70^\circ, 70^\circ]$ với độ nhạy $59.4 \text{ mV}/^\circ$ trong dải tuyến tính; trên trục y dải làm việc của cảm biến là $[-70^\circ, 70^\circ]$ với độ nhạy $32.1 \text{ mV}/^\circ$. Kết quả đo đạc cho thấy sự tương đồng của kết quả mô phỏng và kết quả thực nghiệm về dải làm việc nhưng vẫn còn sai khác về độ nhạy của cảm biến theo hai trục x, y .

MỤC LỤC

| | |
|---|------|
| DANH MỤC HÌNH VẼ..... | vi |
| DANH MỤC BẢNG BIỂU | viii |
| MỞ ĐẦU..... | 1 |
| CHƯƠNG 1. ỨNG DỤNG CỦA CẢM BIẾN ĐO GÓC NGHIÊNG VÀ CÁC PHƯƠNG PHÁP XÁC ĐỊNH ĐỘ NGHIÊNG..... | 3 |
| 1.1 Các ứng dụng của cảm biến đo góc nghiêng..... | 3 |
| 1.2 Một số phương pháp đo góc nghiêng | 4 |
| 1.2.1 Phương pháp đo góc nghiêng kiểu cơ học | 4 |
| 1.2.2 Phương pháp đo góc nghiêng kiểu vi cơ điện tử..... | 5 |
| 1.2.3 Phương pháp đo góc nghiêng kiểu quang học | 6 |
| 1.2.4 Phương pháp đo góc nghiêng kiểu điện dung..... | 7 |
| CHƯƠNG 2. LÝ THUYẾT VỀ TỤ ĐIỆN VÀ CẢM BIẾN KIỂU TỤ..... | 9 |
| 2.1 Lý thuyết về tụ điện..... | 9 |
| 2.2 Các loại cảm biến kiểu tụ | 12 |
| 2.3 Ứng dụng của cảm biến kiểu tụ..... | 13 |
| 2.3.1 Cảm biến đo độ ẩm..... | 13 |
| 2.3.2 Cảm biến đo góc nghiêng..... | 13 |
| 2.3.3 Cảm biến đo áp suất | 14 |
| CHƯƠNG 3. THIẾT KẾ - MÔ PHỎNG CẢM BIẾN GÓC NGHIÊNG HAI CHIỀU CẤU TRÚC HAI PHA LỎNG KHÍ..... | 15 |
| 3.1 Các tham số đặc tính của cảm biến nghiêng | 15 |
| 3.2 Kết quả của cấu trúc cảm biến góc nghiêng đã được đề xuất | 15 |
| 3.3 Đề xuất các cấu trúc cảm biến góc nghiêng mới..... | 17 |

| | | |
|---|---|-----------|
| 3.3.1 | Cấu trúc cảm biến hình lập phương | 18 |
| 3.3.2 | Cấu trúc cảm biến hình cầu | 21 |
| CHƯƠNG 4. ĐO ĐẠC - KHẢO SÁT CẢM BIẾN GÓC NGHIÊNG HAI CHIỀU CẤU TRÚC HAI PHA LÔNG KHÍ | | 29 |
| 4.1 | Công nghệ chế tạo cảm biến bằng máy in 3D | 29 |
| 4.1.1 | Công nghệ in 3D FDM..... | 29 |
| 4.1.2 | Công nghệ in 3D Polyjet | 29 |
| 4.1.3 | Mô hình thiết kế cảm biến..... | 31 |
| 4.2 | Mạch điện cảm biến góc nghiêng điện tử..... | 32 |
| 4.3 | Thiết lập hệ đo đạc | 35 |
| 4.4 | Kết quả đo đạc | 36 |
| KẾT LUẬN | | 41 |
| TÀI LIỆU THAM KHẢO..... | | 42 |
| PHỤ LỤC 1 | | 43 |

DANH MỤC HÌNH VẼ

| | |
|--|----|
| Hình 1.1: Một số ứng dụng của cảm biến góc nghiêng (Nguồn: Internet) | 3 |
| Hình 1.2: Hệ đo góc nghiêng kiểu cơ học (Nguồn: Internet)..... | 5 |
| Hình 1.3: Cấu trúc dầm treo – khối nặng trong cảm biến vi cơ điện tử đo góc nghiêng (Nguồn: Internet)..... | 6 |
| Hình 1.4: Cấu trúc hệ đo góc nghiêng bằng phương pháp quang học [3] | 7 |
| Hình 1.5: Mô tả cách tính góc nghiêng bằng phương pháp quang học [3]..... | 7 |
| Hình 1.6: Cấu trúc cảm biến góc nghiêng điện dung sử dụng quả cầu kim loại [8]..... | 8 |
| Hình 1.7: Cấu trúc cảm biến góc nghiêng điện dung sử dụng điện môi [8] | 8 |
| Hình 2.1: Cấu tạo đơn giản của tụ điện (Nguồn: Internet)..... | 9 |
| Hình 3.1: Hình mô phỏng cấu trúc cảm biến hình trụ..... | 15 |
| Hình 3.2: Mô tả hình ảnh cảm biến bị nghiêng theo trục x và trục y | 16 |
| Hình 3.3: Mô phỏng thiết kế mạch in PCB | 17 |
| Hình 3.4: Cấu trúc cảm biến nghiêng hình lập phương | 18 |
| Hình 3.5: Kết quả mô phỏng với hình lập phương theo trục x | 19 |
| Hình 3.6: Kết quả mô phỏng điện dung vi sai của tụ với đường tuyến tính | 20 |
| Hình 3.7: Sự phân bố điện trường của cảm biến khối lập phương tại 0 (trái) và 10 độ (phải) | 20 |
| Hình 3.8: Mô hình cấu trúc cảm biến hình cầu | 21 |
| Hình 3.9: Biểu đồ dải làm việc của cảm biến thu được ứng với thể tích dung dịch khác nhau | 22 |
| Hình 3.10: Mô phỏng hoạt động của cảm biến với mức nước được tìm thấy. | 23 |
| Hình 3.11: Hình phóng to điện dung vi sai của tụ với đường tuyến tính..... | 23 |
| Hình 3.12: Sự phân bố điện trường của cảm biến khối cầu tại 0 độ (trái) và 20 độ (phải) | 24 |
| Hình 3.13: Hình mô phỏng cấu trúc mặt cầu | 24 |
| Hình 3.14: Mối liên hệ giữa vị trí đặt điện cực và dải làm việc của cảm biến | 25 |
| Hình 3.15: So sánh điện dung vi sai theo 1 trục của hình cầu và lập phương | 26 |

| | |
|---|----|
| Hình 3.16: Kết quả mô phỏng khi khảo sát cảm biến nghiêng theo đường phân giác góc xOy | 28 |
| Hình 3.17: Sự phân bố điện trường cảm biến tại góc 0° (trái) và 20° (phải) theo hướng đường phân giác của xOy | 28 |
| Hình 4.1: Máy in 3D Objet 500 – Stratasys [7] | 30 |
| Hình 4.2: Mô hình thiết kế mặt cầu rỗng | 31 |
| Hình 4.3: Mô hình thiết kế nắp cầu | 31 |
| Hình 4.4: Kích thước cảm biến trong thực tế | 32 |
| Hình 4.5: Sơ đồ khối mạch điện cảm biến góc nghiêng điện tử | 32 |
| Hình 4.6: Sơ đồ khối tương ứng trên thiết kế PCB | 33 |
| Hình 4.7: Mạch đo cảm biến góc nghiêng điện tử - mặt trên | 34 |
| Hình 4.8: Mạch đo cảm biến góc nghiêng điện tử - mặt dưới | 35 |
| Hình 4.9: Vị trí đặt cảm biến trên mạch đo góc nghiêng điện tử | 35 |
| Hình 4.10: Hệ thống đo đạc trong thực tế | 36 |
| Hình 4.11: Mối liên hệ giữa điện áp lối ra và góc nghiêng theo trục x và trục y | 37 |
| Hình 4.12: Nhiễu cross-talk của trục y lên trục x | 38 |
| Hình 4.13: Dải làm việc của cảm biến theo trục x | 38 |
| Hình 4.14: Dải làm việc của cảm biến theo trục y | 39 |
| Hình 4.15: Biểu đồ chuẩn hóa giá trị đầu ra của trục Y theo trục X | 39 |

DANH MỤC BẢNG BIỂU

| | |
|--|----|
| Bảng 1: Tương quan giữa giá trị điện dung và các tham số phụ thuộc..... | 10 |
| Bảng 2: Bảng hằng số điện môi và độ nhớt của các dung dịch phổ biến | 12 |
| Bảng 3: Bảng giá trị thiết lập cho mô phỏng cảm biến nghiêng dạng lập phương | 18 |
| Bảng 4: Bảng giá trị thiết lập cho mô hình cảm biến nghiêng dạng cầu | 26 |
| Bảng 5: Bảng so sánh kết quả đo thực nghiệm của cảm biến hình trụ và hình cầu..... | 40 |

MỞ ĐẦU

Tổng quan

Hiện nay, cảm biến góc nghiêng ngày một trở nên phổ biến và được ứng dụng rộng rãi trong rất nhiều lĩnh vực từ: xây dựng, cơ khí, y tế đến quân sự, rô-bốt tự động hóa. Có nhiều cách để phân loại cảm biến góc nghiêng tùy thuộc vào nguyên lý hoạt động nhưng phổ biến nhất vẫn là phân loại dựa theo cấu trúc của cảm biến: Cảm biến có cấu trúc dạng lưu chất (bao gồm cả thể lỏng và khí); Cảm biến có cấu trúc cơ học rắn và Cảm biến có cấu trúc dựa trên nguyên lý lực cân bằng.

Trong các loại trên cảm biến được dùng phổ biến nhất hiện nay là cảm biến có cấu trúc cơ học rắn (MEMS) bởi kích thước nhỏ, gọn và độ chính xác mà nó đem lại. Một trong những cấu tạo phổ biến của loại cảm biến này là cấu trúc dầm treo-khối gia trọng. Gia tốc của khối gia trọng sẽ được xác định khi dầm treo biến dạng và giá trị này sẽ được sử dụng để đo góc nghiêng so với phương gia tốc trọng trường. Tuy nhiên về mặt chế tạo, cảm biến góc nghiêng vi cơ điện tử đòi hỏi công nghệ cao, mạch điện phức tạp, nên làm tăng giá thành của sản phẩm, khó thích hợp cho việc ứng dụng hàng loạt trong các sản phẩm ở các nước đang phát triển. Một hạn chế khác là cảm biến MEMS có hệ số nhiệt cao, khi sử dụng người dùng phải căn chỉnh lại và loại bỏ tín hiệu offset. Đối với cảm biến cấu trúc dạng lưu chất, độ nghiêng được xác định dựa theo sự thay đổi độ dẫn của chất lỏng hay khí. Cảm biến loại này có cấu trúc đơn giản, tuy nhiên kết quả đo rất dễ bị ảnh hưởng bởi các yếu tố môi trường như rung lắc hoặc sốc cơ khí. So với cảm biến lưu chất là chất lỏng thì cảm biến độ nghiêng sử dụng con lắc khí chống rung và sốc tốt hơn nhưng lại kém hơn về độ nhạy và tính ổn định của kết quả đo.

Luận văn này trình bày nguyên lý thiết kế, chế tạo, thử nghiệm và đánh giá hoạt động của một loại cảm biến nghiêng kiểu điện dung. Cấu trúc cảm biến này có độ tuyến tính và đầu ra analog tương ứng với góc nghiêng nên rất thuận tiện cho việc khảo sát và đánh giá.

Mục tiêu của đề tài

Mặc dù đã có một số công trình nghiên cứu mô phỏng về cảm biến nghiêng dựa trên cấu trúc lỏng-khí kiểu tụ [1] [2], tất cả những cảm biến này chỉ có cấu trúc cảm biến đơn trục hoặc song trục nhưng độ nhạy và dải làm việc giữa hai trục đo là không đồng đều.

Đề tài này nhằm mục đích nghiên cứu, thiết kế, chế tạo và thử nghiệm một cảm biến góc nghiêng điện tử 2 trục đo với độ nhạy trên hai trục là tương đồng nhau. Đồng thời cảm biến cũng phải đáp ứng được tiêu chí về hoạt động ổn định, độ tin cậy cao và dễ chế tạo. Cấu trúc được đề xuất có giá thành hợp lý, có thể phù hợp với nhiều ứng dụng khác nhau trong thực tế.

CHƯƠNG 1. ỨNG DỤNG CỦA CẢM BIẾN ĐỘ GÓC NGHIÊNG VÀ CÁC PHƯƠNG PHÁP XÁC ĐỊNH ĐỘ NGHIÊNG

1.1 Các ứng dụng của cảm biến độ góc nghiêng

Trong thực tế, cảm biến độ góc nghiêng được ứng dụng trong rất nhiều lĩnh vực khác nhau như cơ khí, tự động hóa, điện tử y sinh... Có thể kể đến một số ứng dụng sau đây (Hình 1.1)



Hình 1.1: Một số ứng dụng của cảm biến góc nghiêng (Nguồn: Internet)

- Hiệu chỉnh cân bằng trong các thiết bị bay: Trong quá trình bay và di chuyển, vị trí của cánh quạt sẽ được điều chỉnh ở các góc khác nhau nhờ cảm biến đo độ nghiêng. Từ đó có thể giúp thiết bị bay cân bằng và di chuyển như mong muốn.
- Tăng cường trải nghiệm khi chơi game: Cảm biến nghiêng được đặt trong game pad giúp hệ thống nhận diện được góc nghiêng của thiết bị, từ đó tạo ra nhiều

thao tác điều khiển hơn cho nhân vật giúp người chơi có thêm nhiều trải nghiệm trong game: Đua xe, Bóng đá...

- Điều chỉnh góc nghiêng của cần cầu: Khi nâng cầu, người lái có thể biết chính xác góc nghiêng của cần cầu để xác định độ cao thích hợp cần nâng mà không cần phải ước lượng bằng mắt.
- Xác định trạng thái của cơ thể trong hệ thống cảnh báo ngã: Khi người già sử dụng đeo các thiết bị có gắn cảm biến nghiêng lên cơ thể, dựa theo giá trị phản hồi của cảm biến, hệ thống có thể xác định chính xác trạng thái của cơ thể khi đi, đứng, nằm và ngã. Từ đó có những cảnh báo thích hợp cho những người liên quan.
- Điều chỉnh góc nghiêng và hướng của máy phát phong điện: Khi hệ thống hoạt động nếu có luồng gió thổi đến làm quay tua bin, hệ thống sẽ xác định được hướng quay tối ưu nhờ vào khả năng tự điều chỉnh góc nghiêng và hướng. Nhờ vậy, công suất điện lớn nhất sẽ được tạo ra.
- Khóa an toàn cho các thiết bị dễ cháy nổ khi có động đất: Khi có địa chấn, dựa vào giá trị đầu ra của cảm biến nghiêng, hệ thống có thể đánh giá được cường độ của cơn động đất, từ đó cho phép tự động khóa van ga của các thiết bị dễ cháy nổ.

1.2 Một số phương pháp đo góc nghiêng

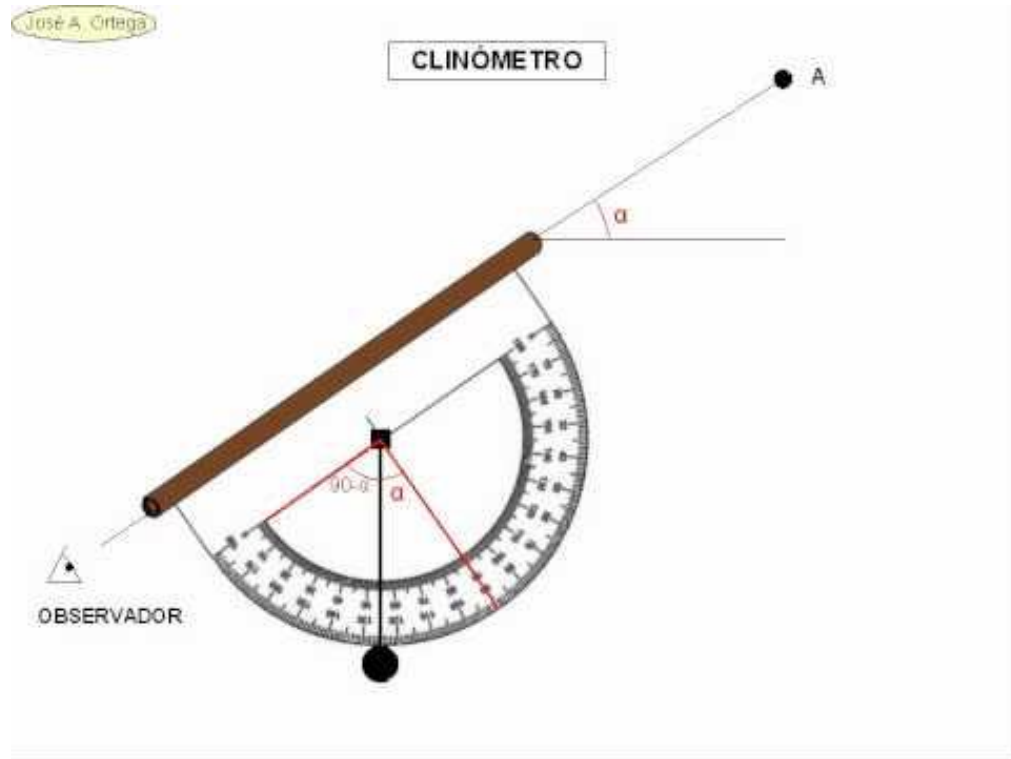
Góc nghiêng của một vật được xác định là góc lệch của mặt phẳng mà vật đó nằm lên so với phương nằm ngang. Do vậy, về phương pháp đo góc nghiêng của một vật cũng bao gồm nhiều cách khác nhau từ đơn giản đến phức tạp. Trong phần này sẽ trình bày một số phương pháp đo góc nghiêng như sau:

- Phương pháp đo góc nghiêng kiểu cơ học.
- Phương pháp đo góc nghiêng kiểu vi cơ điện tử.
- Phương pháp đo góc nghiêng kiểu quang học.
- Phương pháp đo góc nghiêng kiểu điện dung.

1.2.1 Phương pháp đo góc nghiêng kiểu cơ học

Cấu tạo của thiết bị đo góc nghiêng cơ học được mô tả như trong Hình 1.2 dưới đây. Hệ đo bao gồm một quả nặng được buộc vào một sợi dây theo phương thẳng đứng (trùng với phương của gia tốc trọng trường) và một thước chia độ để chỉ độ nghiêng.

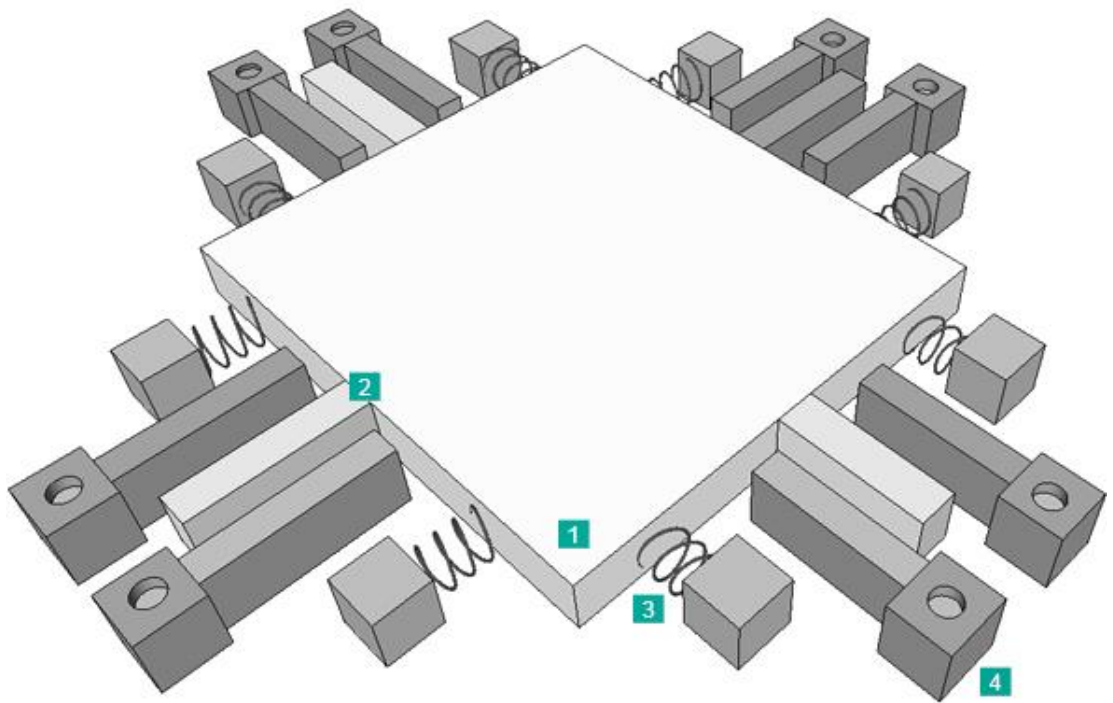
Góc nghiêng được xác định là góc lệch giữa phương vuông góc của vật thể với phương của gia tốc trọng trường. Phương pháp đo này thực hiện rất đơn giản, tuy nhiên dễ bị nhiễu khi có tác động cơ học từ bên ngoài.



Hình 1.2: Hệ đo góc nghiêng kiểu cơ học (Nguồn: Internet)

1.2.2 Phương pháp đo góc nghiêng kiểu vi cơ điện tử

Cảm biến vi cơ điện tử đo góc nghiêng được cấu tạo gồm một dầm treo khối nặng ở trung tâm, cùng với các thành phần khác như: lò xo, điện cực cố định, điện cực di động tạo thành cấu trúc tụ kiểu răng lược đối xứng như trong Hình 1.3 bên dưới. Hệ thống thanh dầm được thiết kế linh hoạt theo một mặt phẳng nhưng lại cố định đối với các phương vuông góc với mặt phẳng đó. Khi cảm biến nghiêng, khối nặng sẽ dịch chuyển về một phía, làm thay đổi vị trí của các điện cực di động. Điều này làm cho điện dung giữa các cặp điện cực sẽ có sai khác. Sự chênh lệch này sẽ tỉ lệ thuận với góc nghiêng. Thiết kế này cho phép mở rộng dải đo góc nghiêng của cảm biến. Công nghệ chế tạo MEMS cũng giúp loại bỏ các ảnh hưởng của rung và nhiễu cơ học trong quá trình đo. Tuy nhiên, do công nghệ chế tạo phức tạp nên giá thành sản phẩm còn cao.

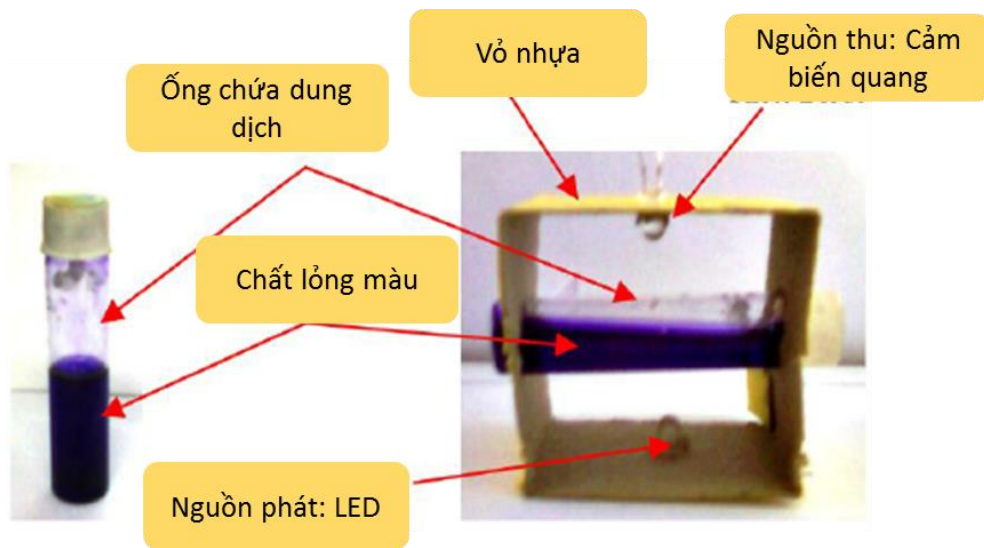


Hình 1.3: Cấu trúc dầm treo – khối nặng trong cảm biến vi cơ điện tử đo góc nghiêng
(Nguồn: Internet)

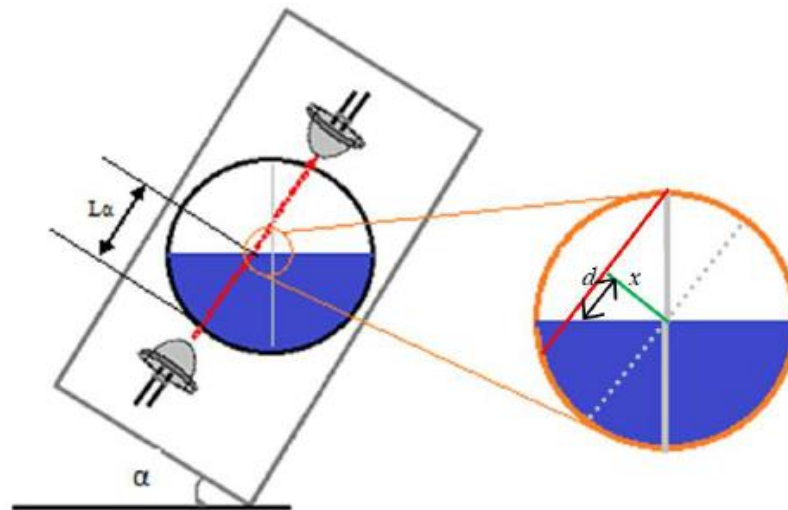
1.2.3 Phương pháp đo góc nghiêng kiểu quang học

Hệ thống đo góc nghiêng sử dụng phương pháp quang học được cấu tạo gồm một ống hình trụ trong suốt có chứa một chất lỏng màu bên trong, một đèn led làm nguồn quang và một cảm biến quang (Hình 1.4).

Cảm biến hoạt động trên nguyên tắc, khi nghiêng lớp chất lỏng trong ống hình trụ dịch chuyển sẽ làm thay đổi cường độ ánh sáng từ nguồn phát đến cảm biến photo diode. Bản chất của quá trình này chính là sự thay đổi của độ dài đường quang học, thay đổi này tương ứng với góc nghiêng của cảm biến (Hình 1.5). Module cảm biến này có phạm vi làm việc (-50° 50°), độ phân giải cao 0.09° [3]. Tuy nhiên mô hình này đòi hỏi việc tính toán phức tạp và khó triển khai sản xuất đại trà sản phẩm.



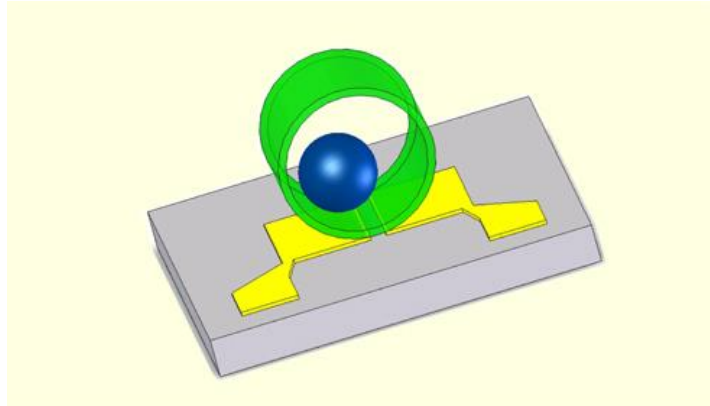
Hình 1.4: Cấu trúc hệ đo góc nghiêng bằng phương pháp quang học [3]



Hình 1.5: Mô tả cách tính góc nghiêng bằng phương pháp quang học [3]

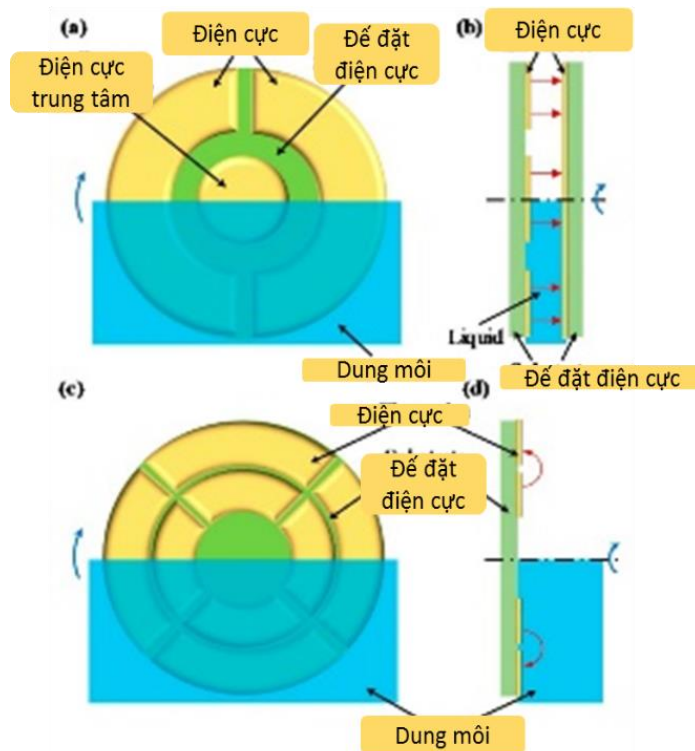
1.2.4 Phương pháp đo góc nghiêng kiểu điện dung

Cảm biến đo góc nghiêng kiểu điện dung có cấu tạo đơn giản nhất gồm một quả cầu kim loại (metallic ball) được đặt trong một ống nhựa trên nền một tụ điện phẳng. Khi cảm biến nghiêng, vị trí quả cầu thay đổi làm cho điện dung giữa quả cầu với hai bản cực cũng thay đổi theo [8]. Đây là một phương pháp có thiết kế đơn giản và mang lại độ chính xác cao, tuy nhiên cấu tạo lại chưa phù hợp với sản xuất đại trà.



Hình 1.6: Cấu trúc cảm biến góc nghiêng điện dung sử dụng quả cầu kim loại [8]

Để khắc phục điểm này, một hệ thống cảm biến có sử dụng các điện cực dạng bán nguyệt hoặc cung tròn đặt trong khoang có chứa dung dịch điện môi được đề xuất. Khi nghiêng, điện môi sẽ làm thay đổi điện dung giữa các cặp tụ. Sự thay đổi này sẽ tương ứng với góc nghiêng. Độ rộng dải đo của mô hình cảm biến này có thể lên đến $[-180^\circ, 180^\circ]$.

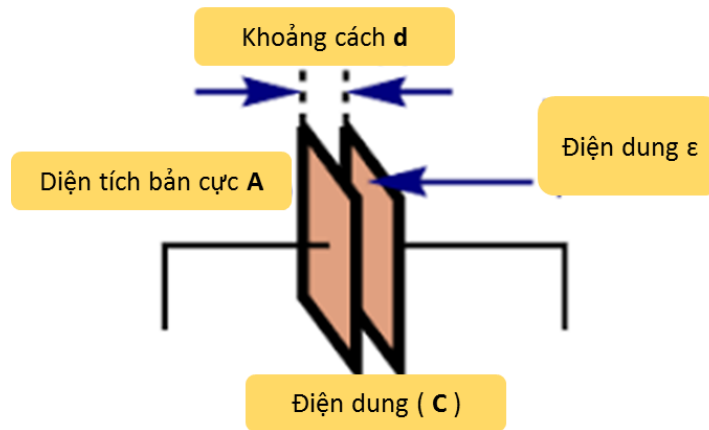


Hình 1.7: Cấu trúc cảm biến góc nghiêng điện dung sử dụng điện môi [8]

CHƯƠNG 2. LÝ THUYẾT VỀ TỤ ĐIỆN VÀ CẢM BIẾN KIỂU TỤ

2.1 Lý thuyết về tụ điện

Tụ điện là một phần tử của mạch điện được thiết kế để lưu trữ năng lượng dưới dạng điện trường bằng cách lưu trữ các electron [4]. Tụ điện được cấu tạo bằng 2 bản cực kim loại có tiết diện A , đặt song song với nhau cách nhau một khoảng d . Giữa hai bản cực này là lớp dung dịch có hằng số điện môi ϵ (Hình 2.1)



Hình 2.1: Cấu tạo đơn giản của tụ điện (Nguồn: Internet)

Điện dung của tụ được xác định bằng công thức:

$$C = \frac{Q}{V} \quad (2.1)$$

Hoặc

$$C = \epsilon_0 * \epsilon * \frac{A}{d} \quad (2.2)$$

Trong đó, C là điện dung, giá trị tính theo Fara (F), Q là điện tích trên bản cực, V là điện thế đặt vào hai đầu bản cực.

$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m là hằng số điện môi trong môi trường chân không.


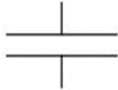


ϵ là hằng số điện môi tương đối của dung môi giữa hai bản tụ.

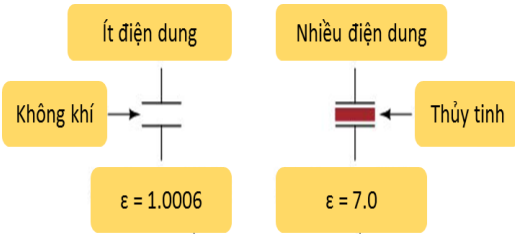
A là diện tích hiệu dụng giữa hai bản cực.

d là khoảng cách giữa hai bản cực.

Mối phụ thuộc tương quan giữa điện dung và các tham số của tụ điện [4] được thể hiện như trong Bảng 1 dưới đây:

Bảng 1: Tương quan giữa giá trị điện dung và các tham số phụ thuộc

| Tham số | Tương quan (với giá trị điện dung) | Giải thích | Minh họa |
|----------|--|--|--|
| A | Tỷ lệ thuận: Diện tích hiệu dụng giữa hai bản tụ càng lớn thì giá trị điện dung của tụ càng lớn và ngược lại | Diện tích hiệu dụng càng lớn thì điện trường giữa hai bản cực càng lớn, trong khi điện thế trên hai bản tụ không đổi -> Giá trị điện dung tụ tăng tỷ lệ với diện tích hiệu dụng của hai bản cực | <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <p>ít điện dung</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>Nhiều điện dung</p>  </div> </div> |
| d | Tỷ lệ nghịch: Khoảng cách giữa hai bản tụ càng lớn thì giá trị điện dung của tụ càng nhỏ và ngược lại | Khoảng cách giữa hai bản tụ càng gần thì lực điện trường giữa hai bản tụ càng lớn. Điều này làm cho cường độ điện trường giữa hai bản tụ cũng tăng tương ứng với độ giảm khoảng cách của hai bản cực | <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <p>ít điện dung</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>Nhiều điện dung</p>  </div> </div> |

| | | | |
|--|---|--|--|
| <p style="text-align: center;">ϵ</p> | <p>Tỷ lệ thuận: Dung môi nào đặt giữa hai bản tụ có giá trị hằng số điện môi càng lớn thì cho giá trị điện dung càng lớn</p> | <p>Hằng số điện môi của dung dịch đặc trưng cho tính chất điện của môi trường đó. Hằng số này là độ điện thẩm tương đối giữa môi trường và chân không. Dung dịch đặt giữa hai bản tụ có hằng số điện môi cao hơn thì cường độ điện trường giữa hai bản tụ cũng lớn hơn trường hợp dung dịch có hằng số điện môi nhỏ hơn. Điều này dẫn đến giá trị của điện dung cũng tỷ lệ tương ứng với hằng số điện môi đặt vào hai bản tụ</p> |  |
|--|---|--|--|

Một điểm cần lưu ý đối với các khảo sát về cảm biến kiểu tụ có cấu trúc dạng lưu chất là cần phải xét thêm tham số về độ nhớt của dung dịch. Tham số này cho phép xác định ma sát nội tại của một chất dịch chuyển và sẽ ảnh hưởng trực tiếp đến độ nhạy của cảm biến trong quá trình sử dụng. Thông số chi tiết về hằng số điện môi và độ nhớt của một số dung dịch được liệt kê trên trong Bảng 2 dưới đây:

Bảng 2: Bảng hằng số điện môi và độ nhớt của các dung dịch phổ biến

| Dung dịch | Hằng số điện môi | Độ nhớt |
|--------------|------------------|---------|
| Nước | 81 | 0.01 |
| Xăng | 2 | 0.006 |
| Axeton | 20.7 | 0.032 |
| Dầu (nhẹ) | 2.1 | 1.1 |
| Dầu (nặng) | 2.1 | 6.6 |
| Rượu (ethyl) | 24.3 | 0.012 |
| Rượu (metyl) | 24.3 | 0.0056 |

2.2 Các loại cảm biến kiểu tụ

Về cấu trúc, cảm biến kiểu tụ cũng có thiết kế đơn giản nhất giống như cấu tạo của một tụ điện hình 2.1, gồm hai điện tấm điện cực đặt song song nhau với một lớp điện môi nằm giữa hai bản cực.

Dựa theo công thức (2.2) có thể thấy giá trị điện dung phụ thuộc vào cả 3 tham số: ϵ , A , d

$$C = f(A, \epsilon, d) \quad (2.3)$$

Do đó, tùy thuộc vào sự thay đổi của 3 thông số này, ta sẽ có 3 loại cảm biến khác nhau:

- *Cảm biến điện dung loại D* (Giá trị của A , ϵ là không đổi): Hoạt động dựa trên sự thay đổi khoảng cách giữa hai bản tụ. Cảm biến loại D có độ nhạy rất cao và có thể đo được khoảng cách rất nhỏ (cỡ nanomet) Tuy nhiên khi tăng khoảng cách giữa hai bản tụ lại làm độ nhạy cảm biến giảm đi. Do vậy khi sử dụng cảm biến đòi hỏi phải loại bỏ tối đa các ảnh hưởng của môi trường có thể tác động đến. Cảm biến loại này được ứng dụng trong các phép đo xác định độ phẳng hay độ rung của vật thể.
- *Cảm biến điện dung loại ϵ* (Giá trị của D , A là không đổi): Hoạt động dựa trên sự thay đổi dung môi giữa hai bản cực. Cảm biến loại ϵ có thể sử dụng để đánh giá đặc tính của vật liệu hoặc xác định vị trí điểm chuyển giao của các loại dung

môi dựa trên giá trị thay đổi của điện dung. Trong thực tế cảm biến loại này được sử dụng khá rộng rãi nhưng phổ biến nhất là dùng trong hệ thống xác định môi chất, đo độ ẩm hoặc đo mức chất lỏng.

- *Cảm biến điện dung loại A* (Giá trị của D , ϵ là không đổi): Hoạt động dựa trên sự thay đổi diện tích hiệu dụng giữa hai bản tụ. Cảm biến loại này có dải làm việc rộng và vẫn đảm bảo sự tuyến tính của các giá trị đầu ra, đồng thời cũng không gặp hạn chế về suy giảm độ nhạy như loại D. Do vậy cảm biến loại này được sử dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực, có thể kể đến: đo độ nghiêng, điều chỉnh tần số.

2.3 Ứng dụng của cảm biến kiểu tụ

2.3.1 Cảm biến đo độ ẩm

Cảm biến này hoạt động theo cùng nguyên tắc với cảm biến điện dung loại ϵ , có cấu tạo đơn giản gồm các bản cực đặt song song nhau. Tuy nhiên vật liệu điện môi giữa các bản tụ thường chứa các lớp oxit vô cơ có khả năng ngậm nước. Nhờ khả năng này mà độ điện thẩm của dung dịch điện môi sẽ thay đổi tùy theo độ ẩm của môi trường đặt thiết bị. Nếu độ ẩm càng cao, giá trị hằng số điện môi của dung dịch càng tăng, điều này dẫn đến điện dung của tụ cũng biến đổi tương ứng.

Loại cảm biến này có độ trễ thấp, kết quả đầu ra ổn định và tin cậy, ít bị ảnh hưởng bởi các yếu tố của môi trường nhiệt độ. Do vậy cảm biến độ ẩm rất thích hợp cho các ứng dụng yêu cầu thời gian hoạt động lâu dài, ít phải bảo trì, hiệu chỉnh.

2.3.2 Cảm biến đo góc nghiêng

Cảm biến này hoạt động theo cùng nguyên tắc với cảm biến điện dung loại **A**. Cùng với sự phát triển của công nghệ chế tạo vi cơ điện tử (MEMS), trong những năm trở lại đây số lượng cảm biến đo góc nghiêng trên thị trường chủ yếu là các cảm biến MEMS. Cấu trúc của các cảm biến loại này theo kiểu dầm treo khối trọng như đã trình bày trong mục 1.2.2 (bên trên). Cảm biến loại này được ứng dụng chủ yếu trong hệ thống tự cân bằng của thiết bị bay, hệ thống túi khí trên ô tô hay hệ thống hãm phanh tự động... Ngoài ra, cảm biến đo góc nghiêng cũng có thể chế tạo theo cấu trúc hai pha

lồng khí với dung môi được đặt trong một vật thể rỗng đã được gắn các điện cực xung quanh. Cấu trúc dùng lưu chất tuy có cấu tạo đơn giản hơn, giá thành chế tạo rẻ hơn so với cấu trúc vi cơ, nhưng lại chưa đáp ứng được các yêu cầu để sản xuất đại trà: kích thước cảm biến, độ bền trong quá trình sử dụng...

Chất lượng của một cảm biến đo góc nghiêng thường được xác định bởi các tham số như trong mục 3.1 dưới đây.

2.3.3 Cảm biến đo áp suất

Cảm biến đo áp suất kiểu tụ hoạt động theo cùng nguyên tắc với cảm biến điện dung loại **d**. Điện dung của tụ được thay đổi bằng cách thay đổi khoảng cách cực tụ. Khi có áp suất tác động vào lớp màng làm lớp màng bị biến dạng sẽ đẩy bản cực vào gần hay ra xa. Dựa vào sự thay đổi điện dung này, có thể xác định được áp suất tác động lên cảm biến là bao nhiêu.

Cảm biến áp suất có thể phân loại dựa theo giá trị của áp suất mà cảm biến có thể đo:

- *Cảm biến áp suất tuyệt đối*: dùng để đo áp suất với chân không, loại bỏ hoàn toàn áp suất khí quyển.
- *Cảm biến áp suất calip*: dùng để đo áp suất của một khu vực hoặc đường ống so với áp suất khí quyển.
- *Cảm biến áp suất vi sai*: dùng để đo áp suất trong một đường ống hoặc một khu vực so với áp suất ở một khu vực khác.

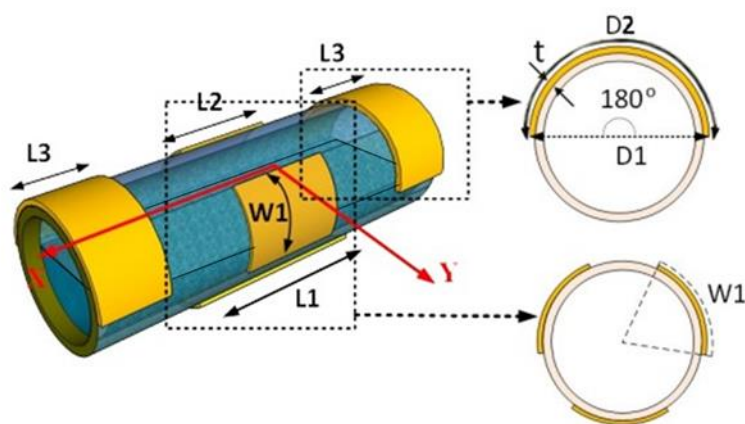
CHƯƠNG 3. THIẾT KẾ - MÔ PHỎNG CẢM BIẾN GÓC NGHIÊNG HAI CHIỀU CẤU TRÚC HAI PHA LỒNG KHÍ

3.1 Các tham số đặc tính của cảm biến nghiêng

Thông thường, chất lượng của cảm biến sẽ được đánh giá thông qua các các tham số mô tả đặc tính làm việc của loại cảm biến đó. Đối với cảm biến độ nghiêng, các tham số dưới đây thường được dùng để đánh giá chất lượng hoạt động của cảm biến:

- **Độ nhạy** (sensitivity - đơn vị đo là $mV/^\circ$ hoặc $fF/^\circ$): là giá trị thay đổi trung bình của một đơn vị độ nghiêng của cảm biến.
- **Dải làm việc** (measure range – đơn vị đo là $^\circ$): là dải mà cảm biến có thể phát hiện góc nghiêng một cách chính xác.
- **Độ phân giải** (đo bằng nhiều/độ nhạy – đơn vị đo là $^\circ$): là giá trị góc nghiêng nhỏ nhất mà cảm biến có thể phát hiện.
- **Nhiều xuyên trục** (crosstalk): là giá trị thể hiện sự ảnh hưởng của trục này lên trục kia khi cảm biến bị nghiêng theo một trục.

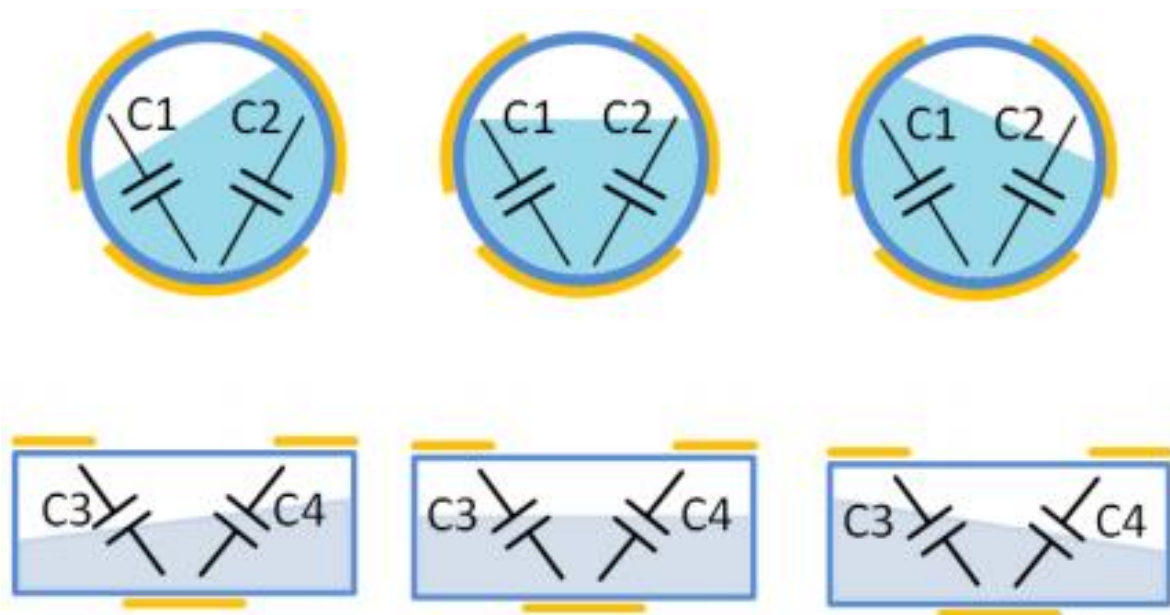
3.2 Kết quả của cấu trúc cảm biến góc nghiêng đã được đề xuất



Hình 3.1: Hình mô phỏng cấu trúc cảm biến hình trụ

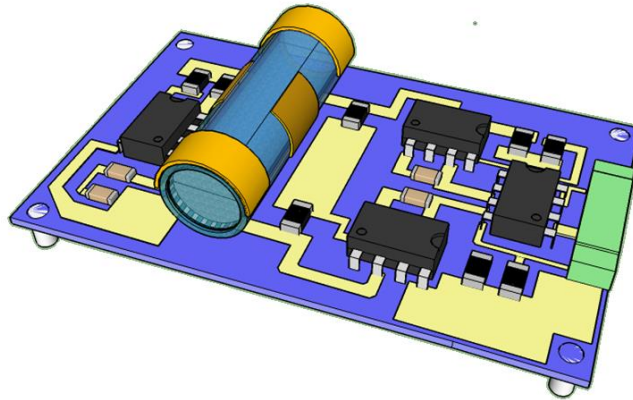
Cấu trúc cảm biến góc nghiêng hai trục kiểu tụ đã được thiết kế, thử nghiệm và được trình bày trong [2] gồm có năm điện cực được gắn ở các vị trí cố định trên một

ống nhựa hình trụ trong đó một điện cực đóng vai trò điện cực phát và bốn điện cực còn lại là điện cực thu được đặt một cách đối xứng nhau như Hình 3.1 bên trên. Ống nhựa hình trụ rỗng, kín có chiều cao 25 mm, đường kính đáy 10 mm và được bơm một phần dung dịch xăng (chiếm 65% thể tích ống) bên trong. Dựa theo cấu trúc, cảm biến có thể phát hiện góc nghiêng theo 2 trục x và y như trong hình bên dưới. Nguyên lý của cảm biến là khi cảm biến bị nghiêng, dung dịch điện môi bao phủ lên một phần các điện cực sẽ dịch chuyển, do đó làm thay đổi giá trị điện dung vì sai tương ứng của tụ điện. Hình 3.2 thể hiện sự thay đổi của dung dịch bao phủ lên điện cực khi cảm biến bị nghiêng đi.



Hình 3.2: Mô tả hình ảnh cảm biến bị nghiêng theo trục x và trục y

Hoạt động của cảm biến được khảo sát bởi phần mềm Comsol Multiphysics. Dựa vào việc mô phỏng, kích thước phù hợp của các điện cực cũng như mức dung dịch trong ống đã được tìm ra và cảm biến đã được chế tạo. Cấu trúc cảm biến được đặt trên một bản mạch in PCB với sự thay đổi của điện áp lối ra thể hiện góc nghiêng tương ứng như Hình 3.3 bên dưới.



Hình 3.3: Mô phỏng thiết kế mạch in PCB

Kết quả thực nghiệm cho thấy rằng dải làm việc của cảm biến từ -60° đến 60° với độ nhạy $3 \text{ mV}/^\circ$ theo trục x và từ -30° đến 30° với độ nhạy $17 \text{ mV}/^\circ$ theo trục y. Dễ dàng thấy rằng dải làm việc của cảm biến theo trục x và trục y là không bằng nhau. Nguyên nhân là do cấu trúc đặc thù của hình trụ, vì vậy khi cảm biến bị nghiêng theo trục y đến một góc đủ lớn nào đó, dung dịch điện môi sẽ bao phủ toàn bộ một trong hai điện cực và điện cực còn lại sẽ không có dung dịch bao phủ, do đó làm điện dung vi sai của tụ thay đổi rất nhỏ, dẫn đến điện áp lối ra thay đổi không đáng kể. Ngoài ra, có thể thấy là khi cảm biến bị nghiêng không phải theo một trục x hay y cố định nào thì độ chính xác của cảm biến là rất thấp. Chính vì vậy, việc đưa ra những cấu trúc tốt hơn cho cảm biến là rất cần thiết. Ở phần sau, các cấu trúc mới tối ưu hơn, giúp giải quyết những vấn đề ở trên sẽ được trình bày.

3.3 Đề xuất các cấu trúc cảm biến góc nghiêng mới

Cấu trúc cảm biến được khảo sát sẽ bao gồm 2 mô hình:

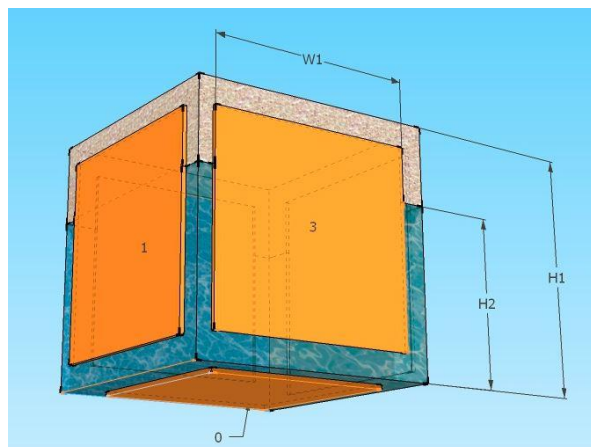
- Cấu trúc cảm biến hình lập phương
- Cấu trúc cảm biến hình cầu

Cả hai cấu trúc này về mặt hình học đều đáp ứng được tính đối xứng giữa trục x, trục y nên có thể khắc phục được vấn đề về sai khác dải làm việc và độ nhạy trên 2 trục đo đối với cảm biến cấu trúc hình trụ.

Hoạt động của cảm biến sẽ được mô phỏng và đánh giá theo phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) sử dụng phần mềm mô phỏng Comsol Multiphysics. Mô hình cảm biến bao gồm một khối lập phương hoặc khối cầu rỗng bằng nhựa có gắn 5 điện cực xung quanh. Dung môi được sử dụng trong mô phỏng là nước. Tuy nhiên, lượng nước sẽ không choáng đầy phần thể tích bên trong cảm biến mà chỉ chiếm một phần, phần còn lại sẽ là không khí. Điện cực kích thích được đặt điện thế 0 V (được coi là đất), các điện cực thu được đặt điện thế 7.2 V . Phần đi vào khảo sát chi tiết từng cấu trúc sẽ được trình bày dưới đây

3.3.1 Cấu trúc cảm biến hình lập phương

Hình lập phương là một hình có cấu trúc đặc biệt với các cạnh đối xứng và bằng nhau. Vì vậy, cấu trúc cảm biến này cho phép dải làm việc theo trục x và trục y là bằng nhau. Cấu trúc cảm biến hình lập phương có 5 điện cực giống hình trụ ban đầu [2] được trình bày như trong Hình 3.4 bên dưới:



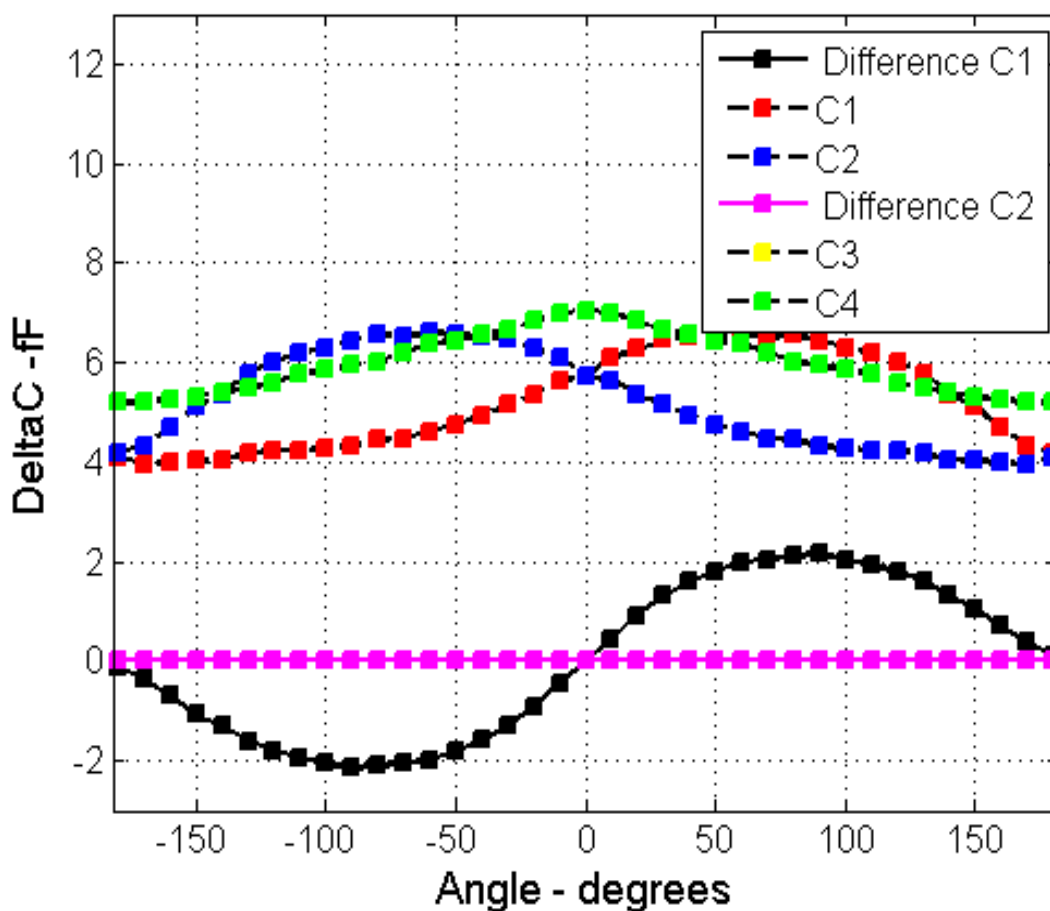
Hình 3.4: Cấu trúc cảm biến nghiêng hình lập phương

Tham số kích thước của cảm biến ở bảng sau:

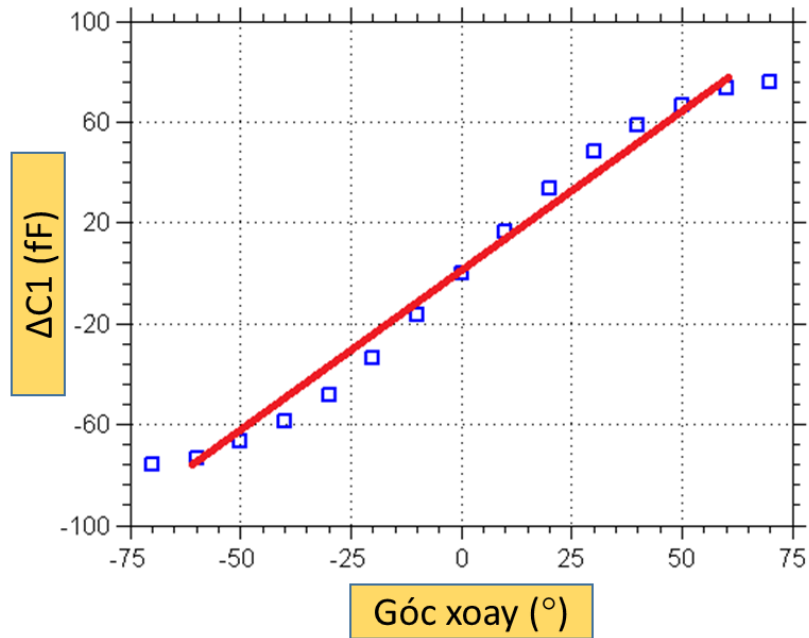
Bảng 3: Bảng giá trị thiết lập cho mô phỏng cảm biến nghiêng dạng lập phương

| Tham số | Cạnh của hình lập phương (H1) | Chiều dài của điện cực (W1) | Chiều rộng của điện cực (W1) | Thể tích dung dịch ($H1^2 * H2$) | Thể tích khối lập phương ($H1^3$) |
|----------------|-------------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| Giá trị | 10 mm | 8 mm | 8 mm | 600 mm^3 | 1000 mm^3 |

Bằng cách sử dụng phần mềm Comsol Multiphysics, hoạt động của cảm biến với các góc nghiêng khác nhau ứng với kích thước trong bảng trên đã được khảo sát. Kết quả được biểu diễn ở hình bên dưới. Do cấu trúc đối xứng các cạnh của hình lập phương nên dải làm việc của cảm biến cũng như điện dung vi sai của tụ theo trục x và trục y là giống nhau. Vì vậy, ở phần này chỉ trình bày cách khảo sát hoạt động của cảm biến với dải góc nghiêng từ -180° đến 180° theo trục x.

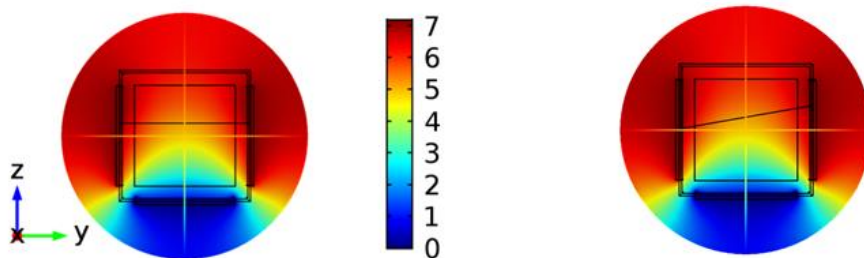


Hình 3.5: Kết quả mô phỏng với hình lập phương theo trục x



Hình 3.6: Kết quả mô phỏng điện dung vi sai của tụ với đường tuyến tính

Nhìn vào biểu đồ Hình 3.6 ta có thể thấy rằng dải làm việc của cảm biến cấu trúc hình lập phương là từ **-60° đến 60°** với độ nhạy **12fF/°**. Hình 3.7 biểu diễn kết quả mô phỏng trường tĩnh điện của cảm biến với góc nghiêng tương ứng là 0° và 20°, khi một điện cực kết nối với đất 0 V và những điện cực khác kết nối với điện áp tích cực 7.2 V. Dải màu thể hiện cụ thể thang chia màu sắc và mức điện thế của trường tĩnh điện.

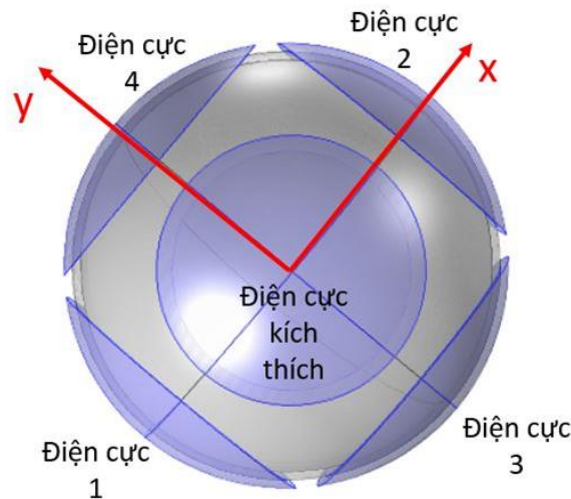


Hình 3.7: Sự phân bố điện trường của cảm biến khối lập phương tại 0 (trái) và 10 độ (phải)

Mức điện thế của trường tĩnh điện được biểu diễn bằng màu sắc trong đó vị trí trường tĩnh điện có điện thế cao nhất được biểu diễn bằng màu đỏ, vị trí có điện thế nhỏ nhất được biểu diễn bằng màu xanh. Dựa theo kết quả Hình 3.7 có thể thấy điện trường phân bố ở mặt ngoài khối lập phương là giống nhau trong hai trường hợp cảm biến thẳng bằng (0°) và cảm biến nghiêng một góc 10° .

3.3.2 Cấu trúc cảm biến hình cầu

Cấu trúc cảm biến hình lập phương ở trên đã giúp giải quyết được vấn đề dải làm việc của cảm biến theo 2 trục x và y không bằng nhau. Tuy nhiên nó lại không giúp giải quyết tốt bài toán nghiêng theo một góc bất kỳ do cấu trúc đặc trưng của hình lập phương. Cấu trúc cảm biến hình cầu có thiết kế đối xứng ở mọi điểm trên mặt cầu có thể giúp giải quyết đầy đủ những nhược điểm trên.



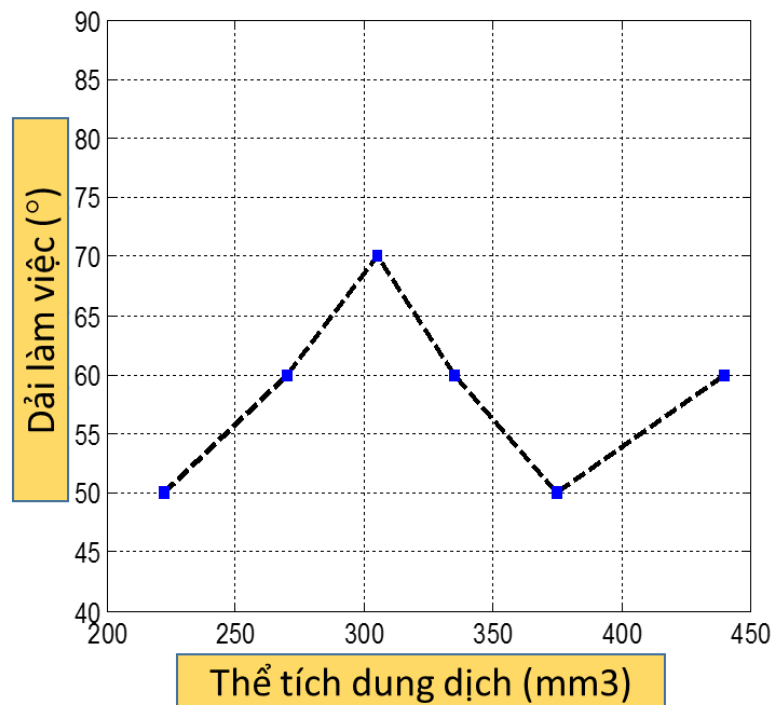
Hình 3.8: Mô hình cấu trúc cảm biến hình cầu

Cấu trúc cảm biến nghiêng hình cầu như ở Hình 3.8 vẫn sẽ gồm có 5 điện cực, trong đó một điện cực đóng vai trò điện cực kích thích, hai cặp điện cực còn lại đóng vai trò điện cực thu. Đường kính của hình cầu là 10 mm và dung dịch trong ống chiếm khoảng 60% thể tích ống. Do kích thước của các điện cực cũng như mức dung dịch trong ống phụ thuộc vào rất nhiều tham số nên việc tìm ra kích thước tối ưu của các điện cực là rất khó. Ở phần này sẽ trình bày cách khảo sát các kích thước khác nhau của từng điện cực để tìm ra kích thước tốt nhất. Cách để lựa chọn tham số tốt nhất dựa

trên dải làm việc lớn nhất của cảm biến được khảo sát với góc nghiêng từ -180° đến 180° ứng với tham số này.

Khảo sát mức dung dịch của cảm biến

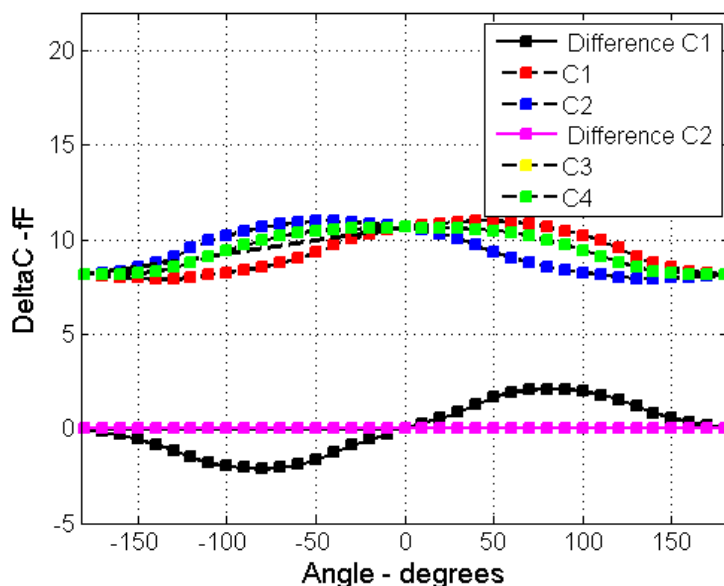
Lượng dung dịch được bơm vào là một trong những tham số quan trọng của cảm biến. Nhờ phần mềm Comsol, hoạt động của cảm biến sẽ được khảo sát trong nhiều trường hợp ứng với những lượng dung dịch khác nhau được đưa vào cảm biến. Biểu đồ Hình 3.9 dưới đây thể hiện thể tích của dung dịch được bơm vào cảm biến trong những trường hợp khác nhau và dải làm việc tương ứng của cảm biến thu được khi thay đổi góc nghiêng. Thể tích của khối cầu là 523mm^3 . Khảo sát được thực hiện với góc nghiêng từ -180° đến 180° .



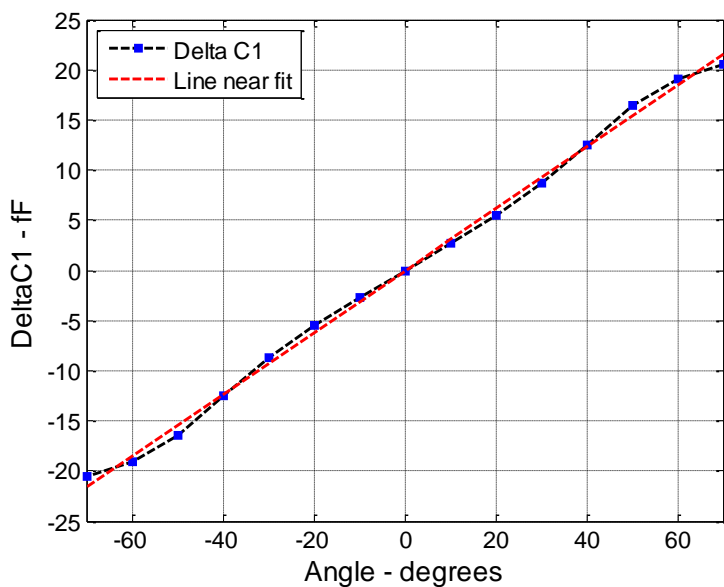
Hình 3.9: Biểu đồ dải làm việc của cảm biến thu được ứng với thể tích dung dịch khác nhau

Nhìn vào biểu đồ ở trên có thể dễ dàng thấy rằng khi thể tích dung dịch là 305mm^3 (tương đương với khoảng 60% thể tích dung dịch) thì dải làm việc của cảm biến

nằm trong khoảng từ -70° đến 70° là tốt nhất. Kết quả mô phỏng hoạt động của cảm biến bị nghiêng theo trục x với tham số này trên phần mềm Comsol được biểu diễn ở hình bên dưới. Ở đây C_1, C_2, C_3, C_4 là giá trị điện dung của tụ điện tạo bởi điện cực kích thích và các điện cực thu (được mô tả trong Hình 3.8).



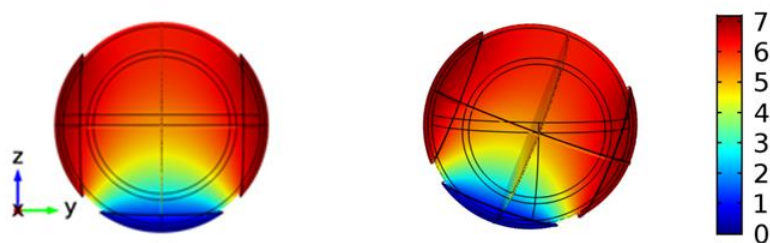
Hình 3.10: Mô phỏng hoạt động của cảm biến với mức nước được tìm thấy.



Hình 3.11: Hình phóng to điện dung vi sai của tụ với đường tuyến tính

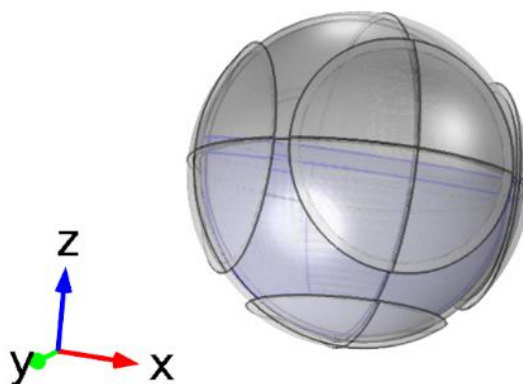
Nhìn vào Hình 3.10 có thể thấy rằng khi cảm biến bị nghiêng theo trục x thì trục y sẽ không bị ảnh hưởng (điện dung vi sai $\Delta C2$ bằng không), đường tuyến tính bám theo điện dung vi sai $\Delta C1$. Có được kết quả này chính là do cấu trúc hình học đối xứng của hình cầu, khi cảm biến nghiêng theo một phương, thì mức dung dịch bao phủ lên hai điện cực vuông góc (với phương nghiêng) là như nhau. Điều này dẫn đến điện dung giữa điện cực kích thích với hai điện cực 3, 4 (Hình 3.8) sẽ có giá trị như nhau, nên $\Delta C2 = 0$.

Sự phân bố điện trường của cảm biến được thể hiện trong kết quả mô phỏng Hình 3.12 (dải màu đỏ sẫm thể hiện mức điện thế cao nhất là 7.2V, dải màu xanh nước biển thể hiện mức điện thế tại đây là 0V), trường tĩnh điện phía bên ngoài cảm biến ở vị trí cảm biến cân bằng và cảm biến nghiêng một góc 20° là giống nhau.



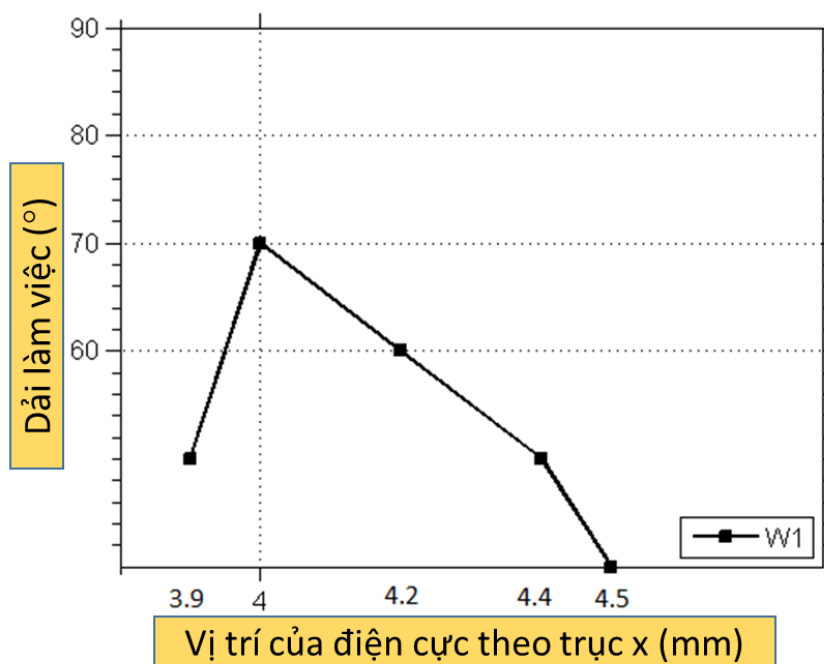
Hình 3.12: Sự phân bố điện trường của cảm biến khối cầu tại 0 độ (trái) và 20 độ (phải)

a. Khảo sát kích thước của điện cực



Hình 3.13: Hình mô phỏng cấu trúc mặt cầu

Tham số kích thước của điện cực cũng như vị trí đặt các điện cực là phần rất quan trọng của cảm biến. Các thông số này ảnh hưởng đến dải làm việc cũng như độ nhạy của cảm biến. Giống như mức nước ở trên, việc đi tìm kích thước và vị trí đặt điện cực sẽ được khảo sát với những vị trí và kích thước khác nhau để tìm ra tham số cho dải làm việc và độ nhạy của cảm biến là tốt nhất. Do tính chất đối xứng của hình cầu và điện cực nên vị trí đặt điện cực phù hợp trên mặt cầu sẽ quyết định đến kích thước của điện cực. Dựa trên cách thiết kế mô phỏng mặt cầu trên phần mềm Comsol, 1 cặp điện cực sẽ vuông góc với trục x hoặc trục y. Chính vì vậy, vị trí của điện cực trên mặt cầu cũng sẽ trùng với vị trí của 1 điểm trên trục x hoặc y. Ở trong phần này, trục x được lựa chọn làm trục tham chiếu. Hình 3.14 bên dưới thể hiện mối liên hệ tương ứng giữa vị trí đặt điện cực và dải làm việc của cảm biến:



Hình 3.14: Mối liên hệ giữa vị trí đặt điện cực và dải làm việc của cảm biến

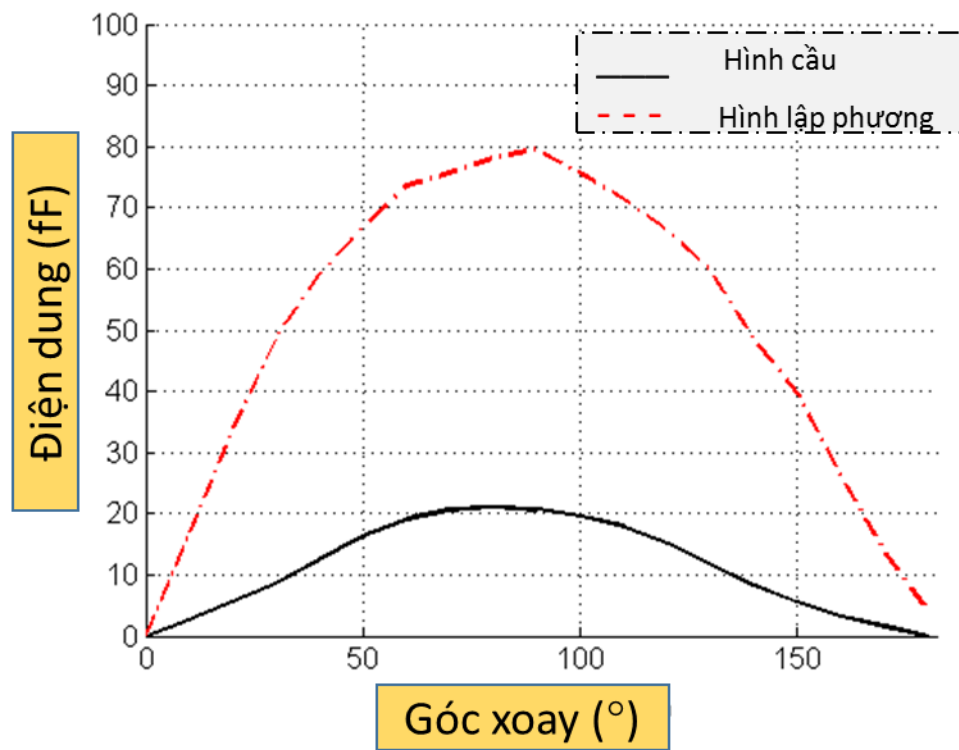
Nhìn vào biểu đồ, dễ dàng thấy khi điện cực được đặt ở vị trí **4mm** tại trục x thì dải làm việc của cảm biến là lớn nhất. Đây cũng chính là kích thước được dùng để mô phỏng chiều cao của nước ở trên. Như vậy, theo như phần a, dải làm việc của cảm biến là từ **-70° đến 70°** với độ nhạy **2.8fF/°**.

Từ các kết quả khảo sát mức dung dịch và vị trí đặt điện cực, các tham số kích thước tối ưu của cảm biến ở sẽ được dùng cho mô phỏng như bảng dưới đây:

Bảng 4: Bảng giá trị thiết lập cho mô hình cảm biến nghiêng dạng cầu

| Tham số | Bán kính hình cầu (mặt trong) | Độ dày của điện cực | Bán kính của điện cực thu | Thể tích dung dịch | Bán kính điện cực phát | Độ dày vỏ của hình cầu |
|---------|-------------------------------|---------------------|---------------------------|--------------------|------------------------|------------------------|
| Giá trị | 5mm | 0.2 mm | 2.75 mm | 305 mm^3 | 2.3 mm | 0.2 mm |

b. So sánh cấu trúc cảm biến hình cầu và hình lập phương



Hình 3.15: So sánh điện dung vi sai theo 1 trục của hình cầu và lập phương

Nhìn vào Hình 3.15 và dựa theo kết quả khảo sát ở trên ta có thể thấy dải làm việc của cảm biến với cấu trúc hình cầu ($\pm 70^\circ$) sẽ lớn hơn cấu trúc hình lập phương ($\pm 60^\circ$). Có sự khác biệt trên là do cấu trúc hình học của hình cầu là như nhau khi xoay

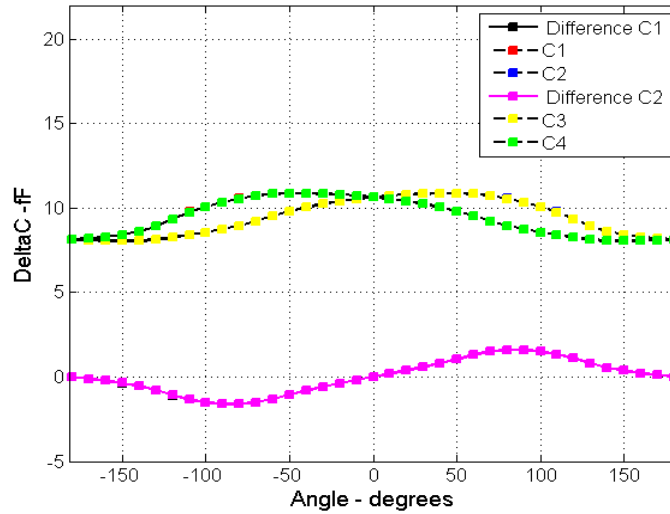
theo các phương khác nhau, nhưng với hình lập phương khi góc xoay khác trục x hoặc y thì độ tuyến tính của điện dung vi sai theo góc nghiêng cũng sẽ giảm dần. Tuy nhiên, độ nhạy của cảm biến theo hình cầu (**2.8 fF/°**) chỉ **bằng** $\frac{1}{4}$ của độ nhạy của cảm biến theo cấu trúc hình lập phương (**12 fF/°**). Điểm này xuất phát từ nguyên nhân điện dung giữa các điện cực của khối lập phương lớn hơn so với điện dung của các điện cực trên khối cầu: Diện tích điện cực lập phương là: 64 mm^2 và khoảng cách giữa điện cực phát và thu là không đổi, trong khi diện tích điện cực của khối cầu là 23.76 mm^2 và khoảng cách giữa hai điện cực là thay đổi theo đường bao của hai vòng tròn. Điều này dẫn đến điện trường giữa hai bản cực của khối lập phương lớn hơn của khối cầu. Giá trị điện dung của các cặp điện cực lập phương lớn hơn nên giá trị điện dung vi sai giữa các cặp tụ của khối lập phương cũng lớn hơn so với giá trị tương ứng của khối cầu.

Sự chênh lệch về độ nhạy có thể điều chỉnh bằng cách thay đổi lại thiết kế cho các điện cực của khối cầu. Tuy nhiên sai khác về cấu trúc hình học ảnh hưởng đến dải làm việc của 2 loại cảm biến thì không thể thay đổi được. Do vậy, trong luận văn này tác giả muốn đi sâu khảo sát thiết kế của cảm biến cấu trúc hình cầu trong mô phỏng và thực tế.

c. Khảo sát cảm biến nghiêng theo đường phân giác của góc xOy

Ở phần trên, kích thước của điện cực, vị trí đặt điện cực cũng như mức nước đã được tìm ra. Cảm biến đã được khảo sát với góc nghiêng thay đổi từ -180° đến 180° theo trục x (cũng y cũng giống trục x vì tính đối xứng của điện cực và hình cầu). Trong thực tế, một vật thể trong không gian sẽ nghiêng theo một góc bất kỳ chứ không hẳn là nghiêng theo 1 trục x hay 1 trục y. Chính vì vậy, cảm biến phát hiện góc nghiêng phải phát hiện được những góc này. Trong phần này, cảm biến sẽ được khảo sát thêm theo 1 vài hướng nghiêng khác.

Cảm biến được khảo sát nghiêng theo hướng tạo với Ox và Oy một góc 45° ($\frac{\pi}{4}$) - hướng nghiêng này là đường phân giác của góc xOy. Do bị nghiêng theo đường chéo như vậy nên kết quả hiển thị cảm biến góc nghiêng sẽ hiển thị kết quả nghiêng theo trục x và trục y tham chiếu.

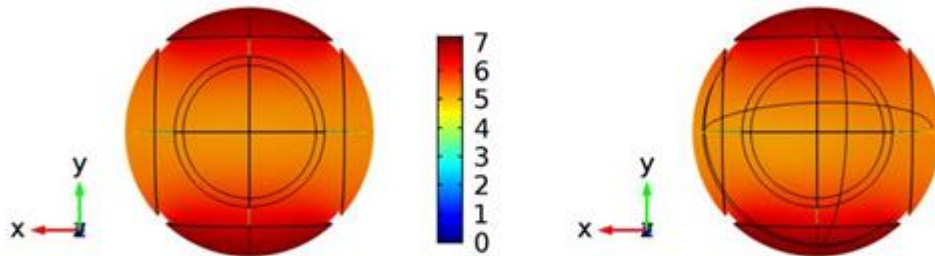


Hình 3.16: Kết quả mô phỏng khi khảo sát cảm biến nghiêng theo đường phân giác góc xOy

Nhìn vào biểu đồ Hình 3.16 có thể thấy rằng sự chênh lệch của điện dung vi sai của tụ theo trục x và y là xấp xỉ bằng nhau. Dựa trên kết quả mô phỏng, ta có thể đưa ra công thức về mối liên hệ điện dung vi sai của cảm biến khi xoay theo 1 trục Ox (hoặc Oy vì kết quả điện dung vi sai là như nhau) và trục phân giác của xOy :

$$\Delta C(\pi/4) = \Delta C(0x) * \cos(\pi/4).$$

Sự phân bố điện trường của cảm biến là như nhau trong hai trường hợp cảm biến đặt cân bằng ở góc 0° và cảm biến nghiêng 20° theo hướng đường phân giác của xOy (Hình 3.17)



Hình 3.17: Sự phân bố điện trường cảm biến tại góc 0° (trái) và 20° (phải) theo hướng đường phân giác của xOy

CHƯƠNG 4. ĐO ĐẠC - KHẢO SÁT CẢM BIẾN GÓC NGHIÊN HAI CHIỀU CẤU TRÚC HAI PHA LỒNG KHÍ

4.1 Công nghệ chế tạo cảm biến bằng máy in 3D

Trên thị trường máy in 3D hiện nay, có hai công nghệ được sử dụng phổ biến để chế tạo các vật thể có hình dạng theo một thiết kế có trước là FDM và Polyjet:

4.1.1 Công nghệ in 3D FDM

Máy in 3D chạy trên công nghệ FDM tạo ra các phần bằng cách đắp từng lớp từng lớp từ dưới lên với đầu phun được nung nóng và ép đùn sợi nhựa nhiệt dẻo. Quá trình này khá đơn giản: [5]

- **Xử lý trước sản xuất:** Chuẩn bị phần mềm. Định vị tập tin in dưới dạng 3D CAD. Tính toán lượng nhựa dẻo và các loại chất hỗ trợ cần thiết.
- **Sản xuất:** máy in 3D làm nóng nhựa nhiệt dẻo trở thành dưới dạng bán lỏng và tạo chất kết tủa thành một lớp siêu mịn dưới dạng bán lỏng dọc theo con đường ép đùn. Những vị trí cần chất hỗ trợ hoặc chất đệm, máy 3D tạo chất kết tủa như một dạng của dàn giáo
- **Xử lý sau sản xuất:** Dùng các vòi nước áp lực hoặc chất hòa tan phá vỡ các chỗ hỗ trợ, phần còn lại là có thể đã sẵn sàng để sử dụng.
- **Lợi ích của công nghệ FDM:** Đây là công nghệ sạch, đơn giản, dễ sử dụng và thân thiện trong môi trường văn phòng. Hỗ trợ sản xuất nhựa nhiệt dẻo có máy móc và ổn định môi trường. Các dạng hình học phức tạp hay lỗ rỗng sâu sẽ không là vấn đề với công nghệ FDM.

4.1.2 Công nghệ in 3D Polyjet

Công nghệ in 3D PolyJet hoạt động giống máy in mực inkjet nhưng thay vì phun ra mực in trên giấy, máy in 3D công nghệ PolyJet phun ra từng tia nhựa quang hóa ở dạng lỏng trên một khay tạo dựng. Quy trình khá đơn giản: [6]

- Trước sản xuất: Chuẩn bị phần mềm tạo dựng tự động tính toán lượng nhựa quang hóa (photopolymers) và vật liệu hỗ trợ (support material) từ 3D CAD.
- Tiến hành sản xuất: Máy in 3D bắn các tia nhựa lỏng quang hóa (photopolymers) nhỏ li ti và làm đông cứng bằng tia UV. Từng lớp chồng từng lớp trên khay tạo dựng để tạo ra một mẫu hoặc một bộ phận 3D chính xác. Tại các vị trí nhô ra, lỗ trống hoặc hình dạng quá phức tạp cần hỗ trợ, máy in 3D bắn vật liệu hỗ trợ có thể gỡ bỏ được.
- Xử lý sau sản xuất: Người sử dụng dễ dàng loại bỏ chất hỗ trợ bằng tay hoặc nước. Nguyên mẫu hoặc bộ phận đã sẵn sàng để đưa vào sử dụng.
- Lợi ích của máy in 3D PolyJet: Cung cấp nhiều ưu thế trong việc tạo mẫu, mẫu công cụ dụng cụ và thậm chí trong sản xuất bộ phận sản phẩm bao gồm:
 - Tạo ra các nguyên mẫu có bề mặt nhẵn mịn, chi tiết sắc sảo
 - Sản xuất dụng cụ sản xuất sử dụng trong ngắn hạn như khuôn gá và định vị lắp ráp.
 - Sản xuất các sản phẩm có hình dạng và chi tiết phức tạp, bề mặt nhẵn mịn.
 - Kết hợp màu sắc và chất liệu đa dạng trong một mô hình hay sản phẩm với đa dạng hóa nhất vật liệu có sẵn.

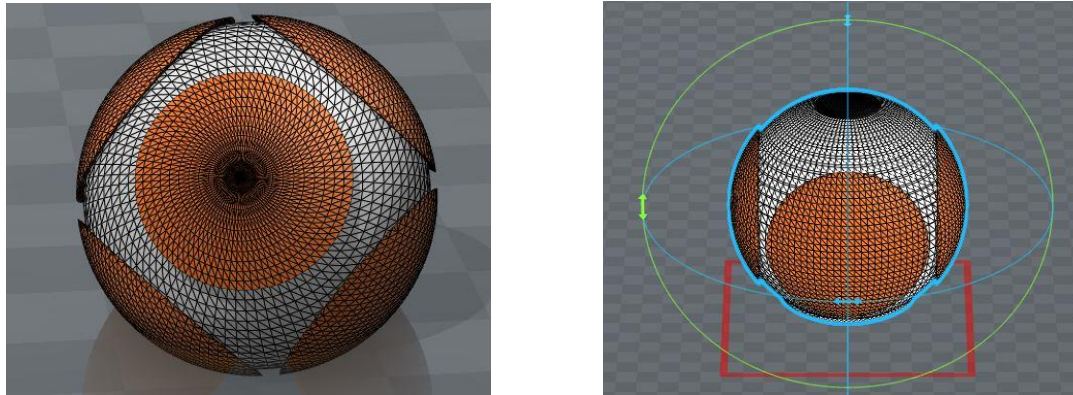
Dựa theo các phân tích trên, công nghệ in 3D Polyjet đã được sử dụng trong quá trình chế tạo cảm biến góc nghiêng hai chiều hai pha lỏng-khí. Máy in 3D được sử dụng là Objet500 của hãng Stratasys với hệ thống Connex3 cho phép pha trộn ba vật liệu để tạo ra hỗn hợp vật liệu kỹ thuật số.



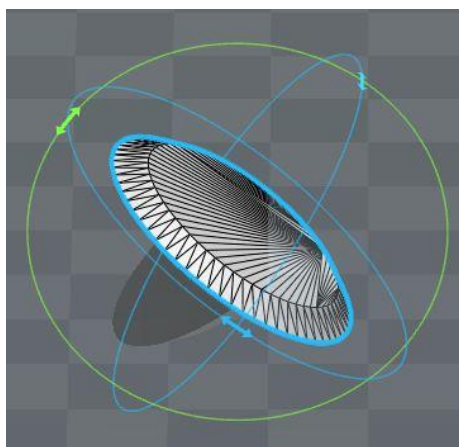
Hình 4.1: Máy in 3D Objet 500 – Stratasys [7]

4.1.3 Mô hình thiết kế cảm biến

Đối với khối cầu nhựa, cảm biến được thiết kế bằng phần mềm Solid Works, với các kích thước theo như khi thực hiện mô phỏng trong phần mềm Comsol (Bảng 4). Tuy nhiên, theo công nghệ in 3D Polyjet trong quá trình in một hợp chất dẻo sẽ được phun đầy vào lõi của cảm biến để tạo cốt. sau khi in xong, hợp chất này sẽ cần phải được lấy sạch để đảm bảo hoạt động chính xác của cảm biến. Để thuận tiện cho quá trình thao tác chế tạo, thiết kế cho in 3D cảm biến sẽ bao gồm hai phần: **Một mặt cầu rỗng** (có định vị các vị trí gán điện cực) bị khoét 1 lỗ trên đỉnh (Hình 4.2) và **một nắp cầu** có kích thước đúng bằng lỗ khoét (Hình 4.3) được trình bày như dưới đây:



Hình 4.2: Mô hình thiết kế mặt cầu rỗng



Hình 4.3: Mô hình thiết kế nắp cầu

Sau khi lấy hết phân hợp chất, dung môi nước sẽ được bơm vào khối cầu theo đúng giá trị khi mô phỏng, phần nắp cầu sau đó sẽ được đẩy lên và gắn chặt bằng keo dính nhựa để đảm bảo cảm biến không bị dò nước khi hoạt động.

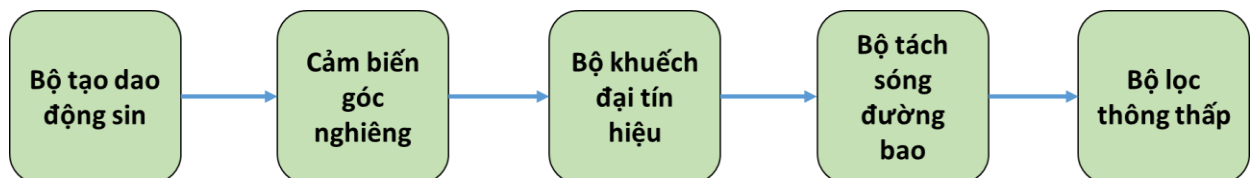


Hình 4.4: Kích thước cảm biến trong thực tế

Đối với điện cực, các điện cực này sẽ được chế tạo bằng đồng, kích thước điện cực sẽ được gia công chính xác bằng công nghệ CNC và được gắn vào các vị trí đã đánh dấu trên khối cầu bằng manipulator.

4.2 Mạch điện cảm biến góc nghiêng điện tử

Kế thừa từ các nghiên cứu [1] [2], sơ đồ khối của mạch cảm biến góc nghiêng điện tử không có nhiều thay đổi như trong Hình 4.5 dưới đây:

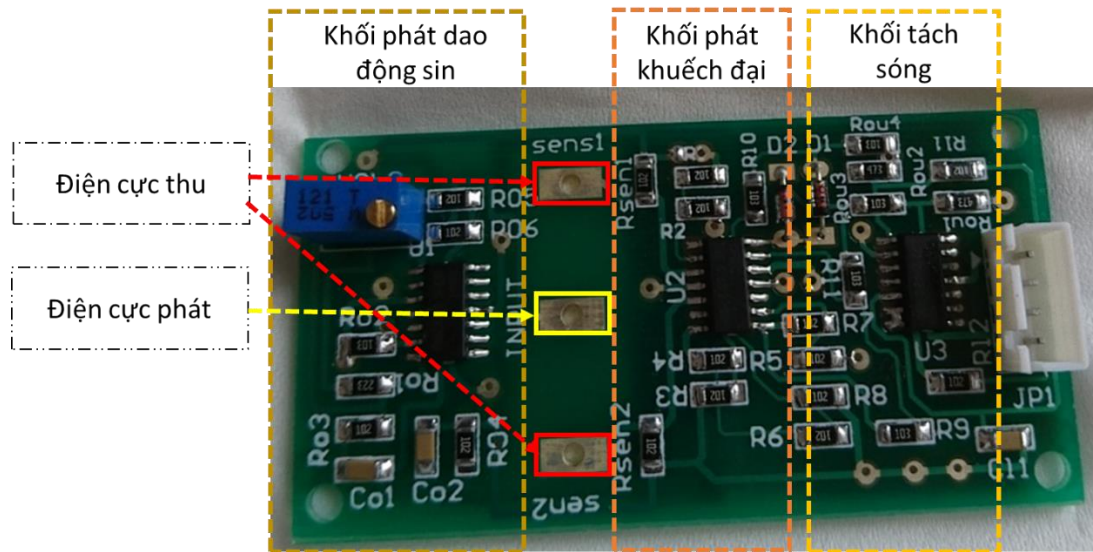


Hình 4.5: Sơ đồ khối mạch điện cảm biến góc nghiêng điện tử

- *Bộ tạo dao động sin*: sử dụng mạch cầu Wien để phát tín hiệu vào cho hệ thống. Tần số tín hiệu của mạch dao động là 127 kHz.
- *Cảm biến góc nghiêng*: cung cấp giá trị đầu ra là điện dung vi sai giữa hai bản tụ điện. Giá trị ΔC này sẽ được đưa qua mạch chuyển đổi điện áp để điều chế tín hiệu nguồn theo sự thay đổi của điện dung vi sai.
- *Bộ khuếch đại tín hiệu*: bao gồm mạch tiền khuếch đại và khuếch đại vi sai, làm nhiệm vụ khuếch đại biên độ của tín hiệu ở đầu ra của bộ chuyển đổi điện áp.
- *Bộ tách sóng đường bao và Bộ lọc thông thấp*: tách sự thay đổi biên độ trong tín hiệu và loại bỏ thành phần tần số cao. Tín hiệu đầu ra của hệ thống sẽ là tín hiệu một chiều có giá trị điện áp tỷ lệ với điện dung vi sai giữa 2 điện cực cảm ứng của cảm biến.

Sơ đồ nguyên lý mạch điện cảm biến góc nghiêng điện tử được trình bày chi tiết trong PHỤ LỤC 1.

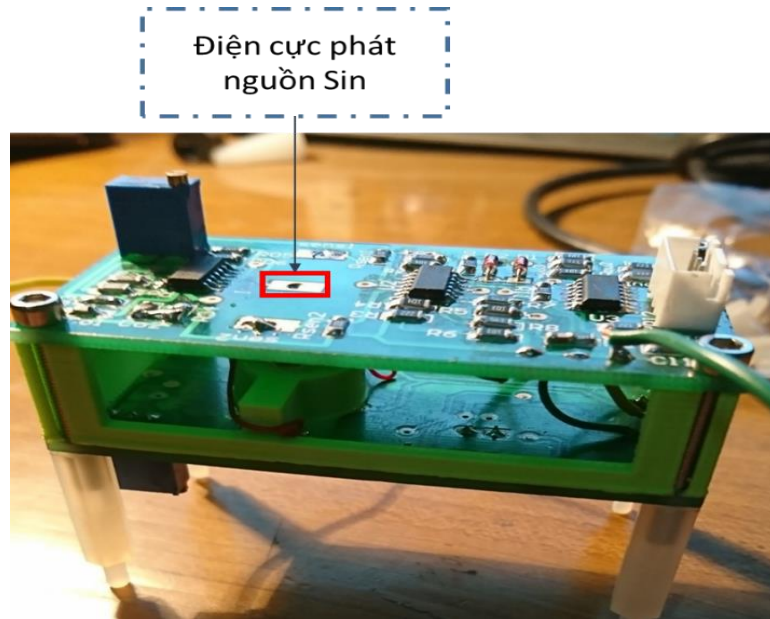
Hình ảnh thực tế của mạch đo sau khi được chế tạo như dưới đây:



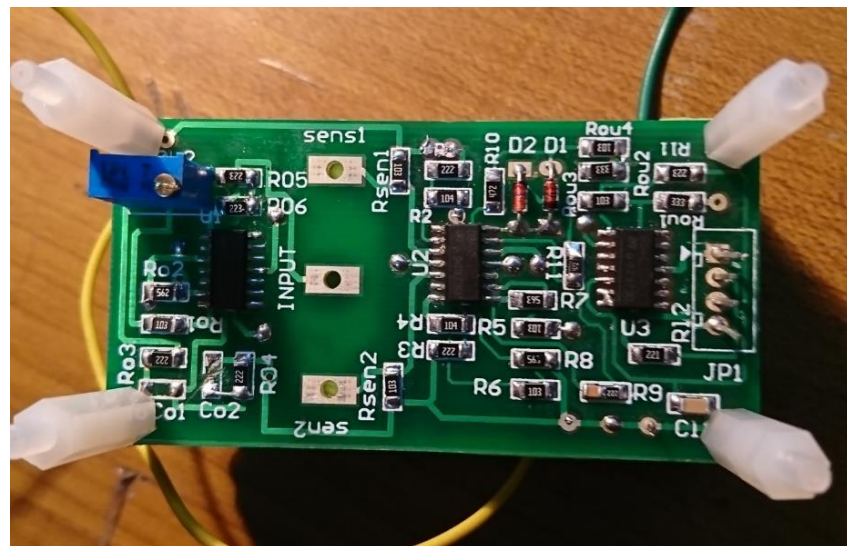
Hình 4.6: Sơ đồ khối tương ứng trên thiết kế PCB

Do thiết kế cảm biến có 2 cặp điện cực cần đo, trong khi với một tấm mạch PCB chỉ cho phép xác định điện áp vi sai trên một cặp điện cực nên giải pháp sử dụng 2 tấm mạch PCB để xác định đầy đủ điện áp vi sai trên hai cặp cực khi nghiêng cảm biến ở

các góc khác nhau được đề xuất. Nguồn dao động sẽ chỉ được cấp trên 1 bảng mạch PCB (Hình 4.7). Ở đây, phương pháp ghép hai bản mạch PCB đã được tính đến, nhưng do không đảm bảo được yếu tố về tính đối xứng của các đường mạch, dễ dàng phát sinh tụ ký sinh trên mạch điện, gây ảnh hưởng đến độ chính xác của kết quả đo nên phương án này đã không được sử dụng.

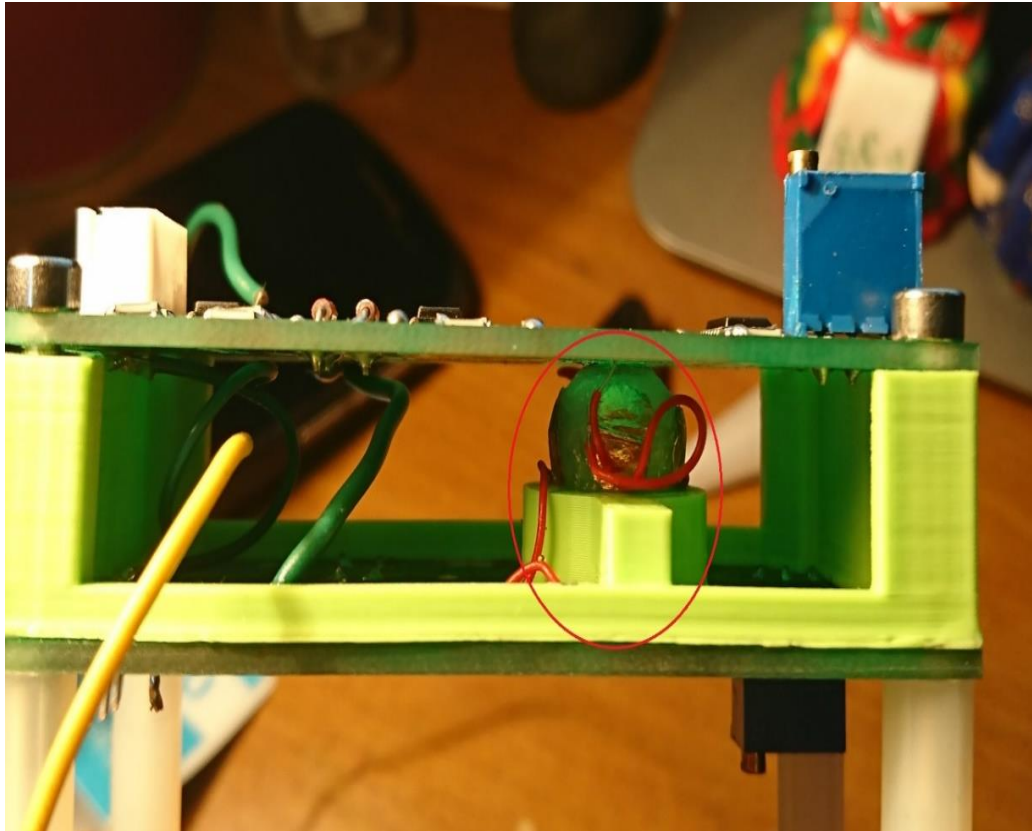


Hình 4.7: Mạch đo cảm biến góc nghiêng điện tử - mặt trên



Hình 4.8: Mạch đo cảm biến góc nghiêng điện tử - mặt dưới

Vị trí của cảm biến nghiêng được đặt giữa hai bảng mạch và kết nối với các điện cực như Hình 4.9.



Hình 4.9: Vị trí đặt cảm biến trên mạch đo góc nghiêng điện tử

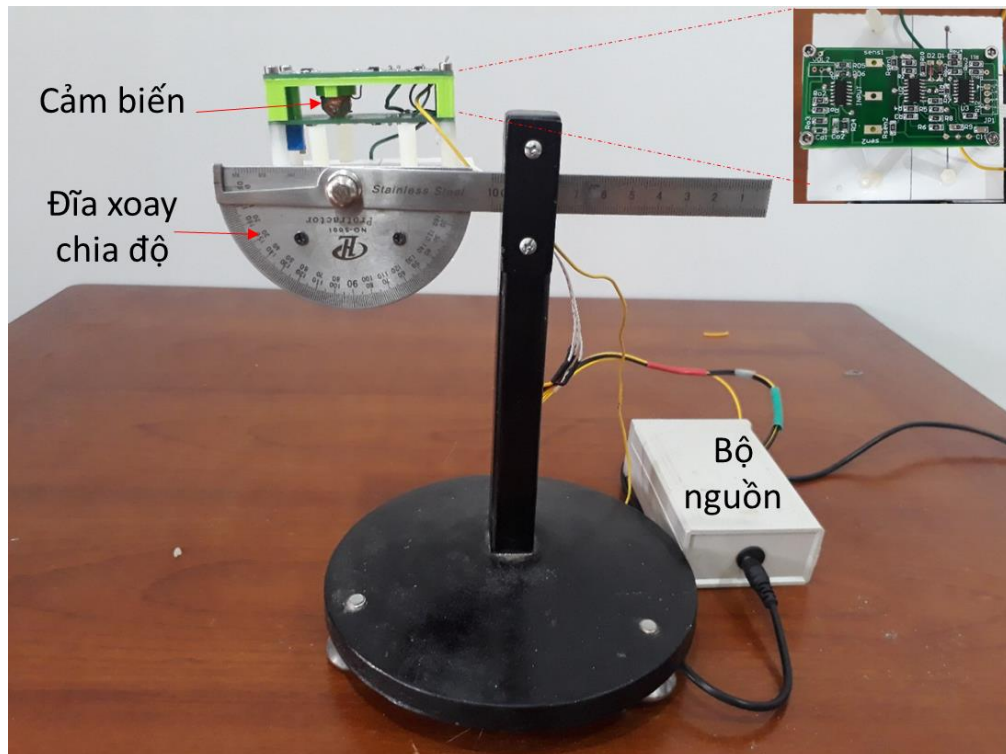
4.3 Thiết lập hệ đo đạc

Dựa trên các kết quả mô phỏng đã được thực hiện, cấu trúc cảm biến đề xuất được chế tạo thử nghiệm có các thông số như trong Bảng 4

Hệ đo được đặt trên một mặt phẳng có giá đỡ và có thể xác định góc nghiêng của mặt phẳng bằng thước chia độ với độ phân dải 1 độ. Mạch cảm biến được gắn cố định vào đĩa xoay. Khi điều chỉnh độ nghiêng của cảm biến, giá trị điện áp đầu ra của trên mạch điện xử lý cũng sẽ thay đổi tương ứng.

Hệ thống tiến hành khảo sát góc nghiêng thay đổi từ -180° đến 180° , với bước thay đổi là 5° /lần đo. Lần lượt cho thay đổi độ nghiêng của cảm biến theo từng trục (theo hướng của các cặp điện cực thu). Đồng hồ đo điện áp một đầu được nối với chân tín hiệu đất, đầu còn lại được nối với chân tín hiệu điện áp ra. Tại mỗi góc đo giá trị điện áp đầu ra theo trục đang đo và trục còn lại (nhiều cross talk) đều được xác định.

Hệ thống đo đạc được triển khai trong thực tế như dưới đây (Hình 4.10):



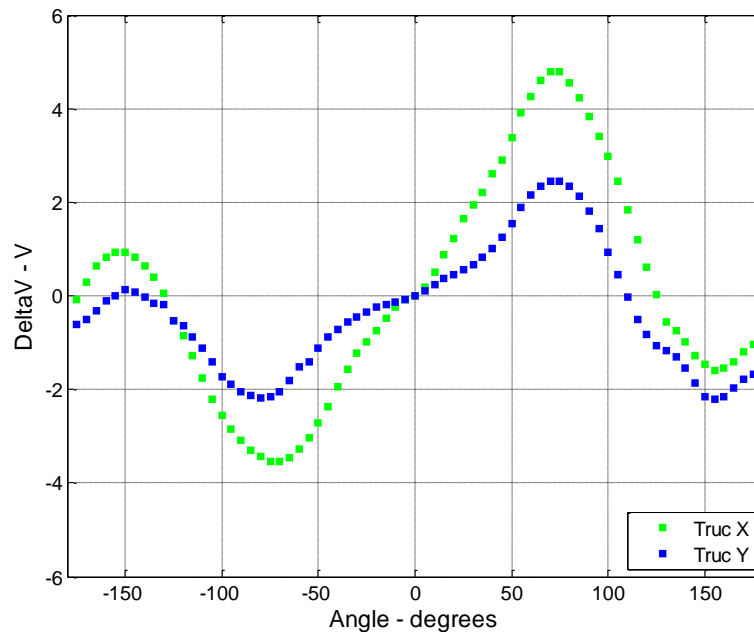
Hình 4.10: Hệ thống đo đạc trong thực tế

4.4 Kết quả đo đạc

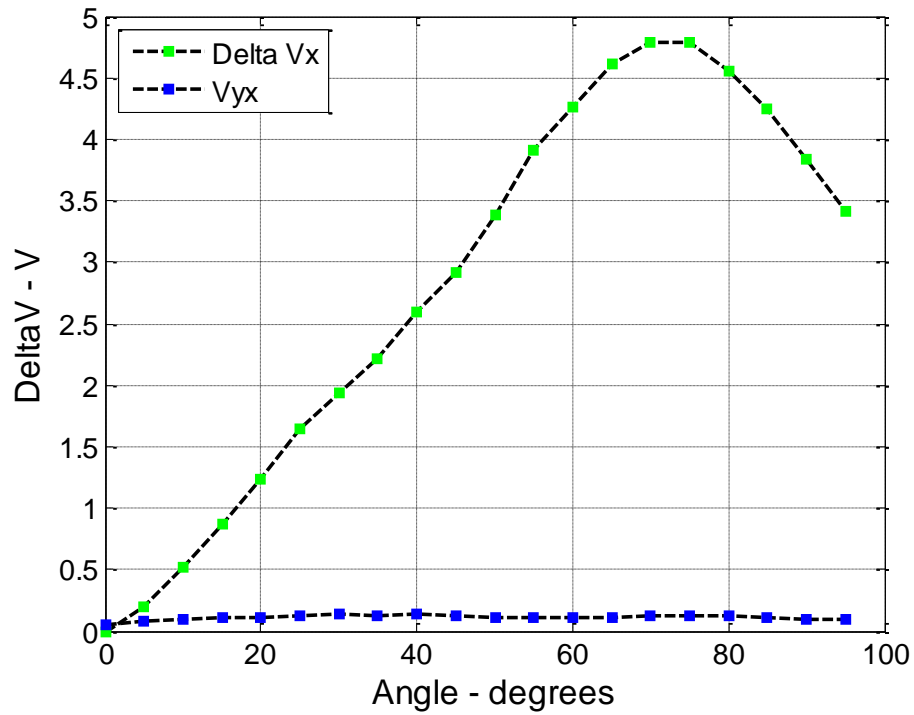
Cảm biến được khảo sát trong toàn dải từ -180° đến 180° với 5° /lần theo trục x và y. Kết quả đo đạc thực tế được biểu diễn ở Hình 4.11 bên dưới, có thể thấy hình dạng đường đồ thị của trục x và trục y khá tương đồng với nhau tại các vị trí điện áp ra đạt cực tiểu, cực đại nhưng độ nhạy và hệ số tuyến tính của trục x và trục y lại chênh lệch nhau nhiều. Khi cảm biến được xoay theo trục x, dải điện áp đồng biến nằm trong khoảng $[-70^\circ, 70^\circ]$ với độ nhạy $59.4 \text{ mV}/^\circ$. Khi cảm biến được xoay theo trục y, dải

điện áp đồng biến thu được bằng với trục x, nằm trong khoảng $[-70^\circ, 70^\circ]$ với nhưng độ nhạy chỉ đạt $32.1 \text{ mV}/^\circ$. Nhiễu xuyên kênh crosstalk là không đáng kể, ít hơn 2.3% trong dải tuyến tính khi đo theo trục x (Hình 4.11).

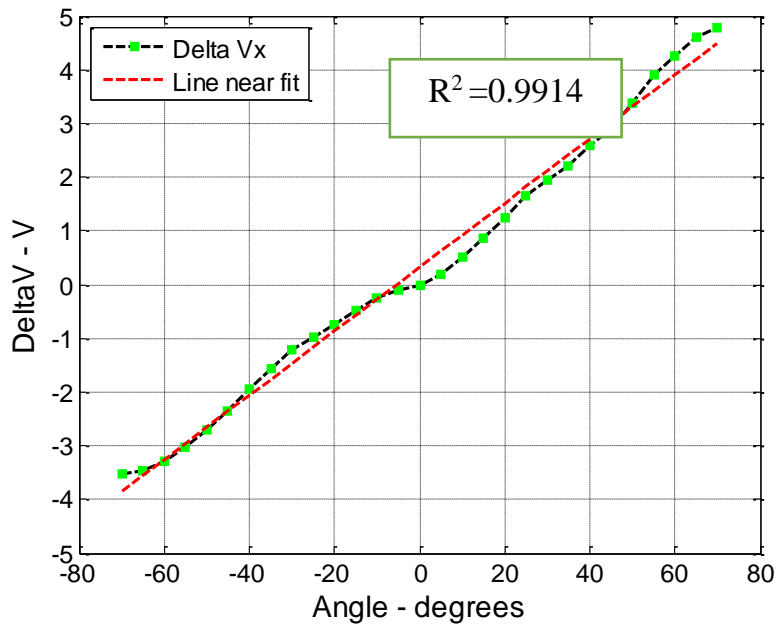
Có sự khác nhau này một phần do kích thước của cảm biến là nhỏ khó thao tác điều này dẫn đến vị trí đặt các điện cực là không thực sự đối xứng và độ bám dính của các điện cực vào bề mặt cảm biến thấp nên ảnh hưởng đến tiếp xúc của các điện cực với mạch đo. Một nguyên nhân khác, không thể bỏ qua là dung dịch sử dụng trong quả cầu là nước máy, có trở kháng nên sẽ làm ảnh hưởng đến giá trị điện dung của các cặp điện cực. Nếu sử dụng một dung môi khác như xăng hay rượu thì sẽ loại bỏ được trở kháng của dung dịch, nhưng các loại dung môi này có thể làm hỏng cầu nhựa nếu như để trong một thời gian dài nên đã không được lựa chọn. Ngoài ra, có thể sử dụng thủy tinh làm vật liệu chế tạo cảm biến. Trong trường hợp này, các hạn chế về môi chất sẽ được khắc phục hoàn toàn. Tuy nhiên, việc chế tạo cảm biến bằng thủy tinh là phức tạp và tác giả muốn đi sâu vào khảo sát cảm biến cấu trúc dạng cầu trước tiên nên đã chọn chất liệu cho cảm biến là nhựa.



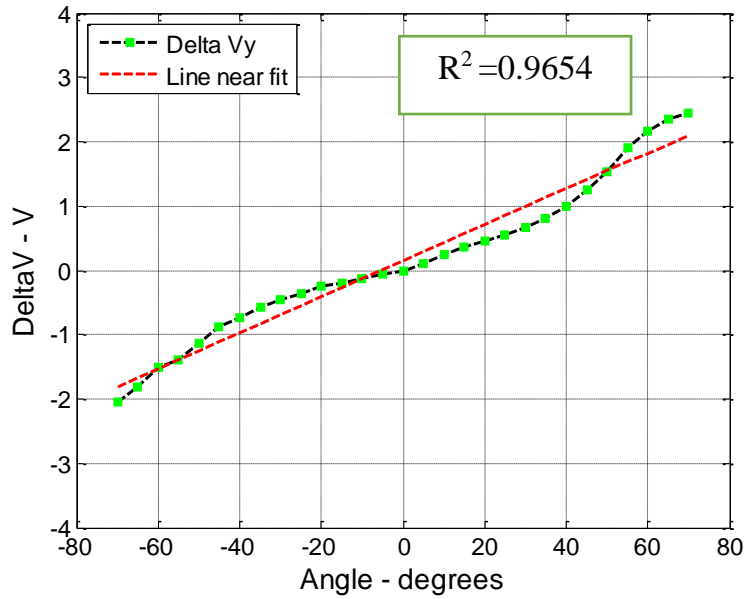
Hình 4.11: Mối liên hệ giữa điện áp lỗi ra và góc nghiêng theo trục x và trục y



Hình 4.12: Nhiều cross-talk của trục y lên trục x

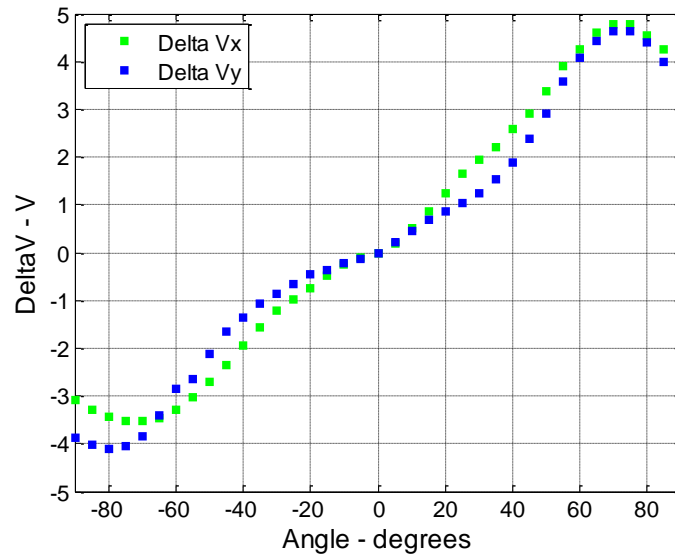


Hình 4.13: Dải làm việc của cảm biến theo trục x



Hình 4.14: Dải làm việc của cảm biến theo trục y

Sự khác biệt về độ nhạy của cảm biến theo hai trục x, y có thể được khắc phục bằng việc điều chỉnh hệ số khuếch đại của mạch đo. Trong đồ thị chuẩn hóa (normalization) dưới đây, giá trị điện áp ra trên trục y đã được nhân với hệ số khuếch đại $V_{\text{peakX}}/V_{\text{peakY}} = 1.886$.



Hình 4.15: Biểu đồ chuẩn hóa giá trị đầu ra của trục Y theo trục X

Từ đồ thị chuẩn hóa (Hình 4.15), giá trị điện áp ra đỉnh của theo trục X và Y đã trùng nhau, nhưng ở nhiều điểm các giá trị này vẫn chưa thực sự trùng khớp. Sự khác biệt này có cùng một nguyên nhân như trên: vị trí cân bằng ban đầu của cảm biến là chưa chính xác và kích thước, vị trí của các điện cực cũng không đảm bảo được là giống và đối xứng nhau hoàn toàn.

So sánh kết quả đo đạc thực nghiệm với kết quả mô phỏng, đối với trục x và y dải làm việc thực tế đạt được như mô phỏng từ -70° đến 70° mặc dù hệ số xác định (R^2 – Coefficient of determination) chưa đạt được tuyệt đối (chỉ 99.14% với trục x và 96.54% với trục y) nhưng đây là kết quả khả quan, có thể là tiền đề để tối ưu lại hoạt động của cảm biến trong các nghiên cứu tiếp theo.

So sánh với kết quả của cảm biến độ nghiêng hai trục hình trụ [2] thì kết quả như sau:

Bảng 5: Bảng so sánh kết quả đo thực nghiệm của cảm biến hình trụ và hình cầu

| Thông số | Cảm biến nghiêng hình trụ [2] | Cảm biến nghiêng hình cầu |
|---------------------|--------------------------------------|----------------------------------|
| Dải làm việc trục x | $-60^\circ, 60^\circ$ | $-70^\circ, 70^\circ$ |
| Độ nhạy trục x | $3\text{mV}/^\circ$ | $59.4\text{mV}/^\circ$ |
| Dải làm việc trục y | $-30^\circ, 30^\circ$ | $-70^\circ, 70^\circ$ |
| Độ nhạy trục y | $17\text{mV}/^\circ$ | $32.1\text{mV}/^\circ$ |

Như vậy, với mô hình cảm biến nghiêng hai trục hình cầu cho kết quả thực nghiệm tốt hơn nhiều so với mô hình cảm biến nghiêng hai trục cấu trúc hình trụ đã được nghiên cứu trước đó về cả độ rộng của dải làm việc và độ nhạy cảm biến. Tuy nhiên hệ số tuyến tính theo trục y đối với mô hình cảm biến cầu là chưa thực sự tốt, cần phải xem xét và cải tiến độ chính xác khi gắn điện cực trong các nghiên cứu tiếp theo.

KẾT LUẬN

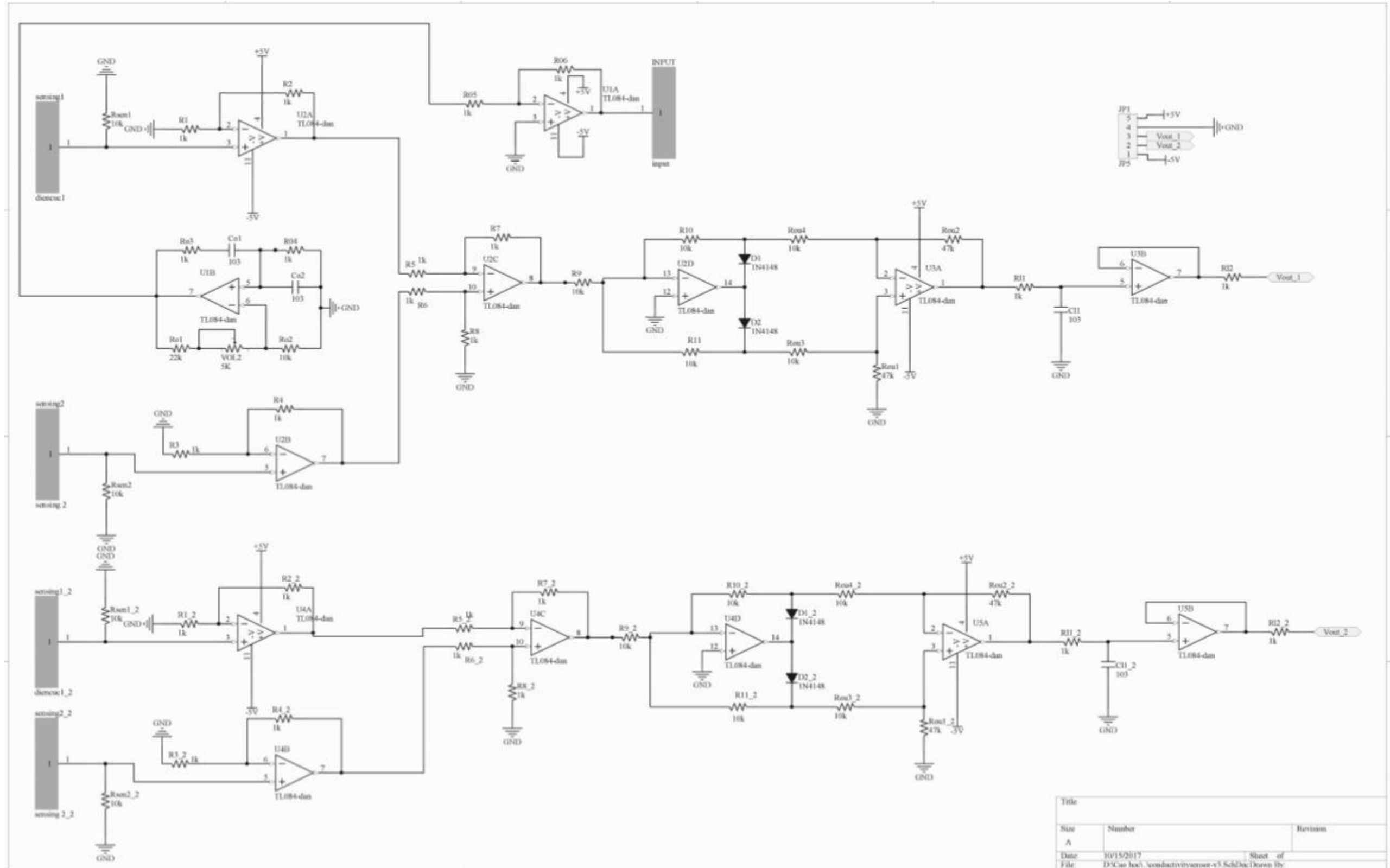
Luận văn này trình bày về nghiên cứu phát triển cảm biến đo góc nghiêng hai trục dựa trên nguyên lý kiểu tụ điện. Thiết kế cảm biến được cải tiến với cấu trúc cảm biến là hình cầu rỗng với năm điện cực được gắn cố định ở các vị trí bên ngoài xung quanh hình cầu. Trong đó một điện cực đóng vai trò là điện cực kích thích, và hai cặp điện cực còn lại (có vị trí đối xứng nhau) đóng vai trò là điện cực thu. Quả cầu có chứa một phần chất lỏng điện môi là nước, có hằng số điện môi là 81. Với cải tiến cấu trúc cảm biến được đề xuất có thể phát hiện góc nghiêng theo hai trục x và y với độ nhạy và dải làm việc của cảm biến trên 2 trục này là tương đồng nhau. Hoạt động của cảm biến trước tiên được khảo sát bằng phần mềm mô phỏng Comsol Multiphysics sử dụng phương thức phần tử hữu hạn (Finite Element method - FEM). Dựa trên kết quả mô phỏng này, kích thước của các điện cực đã được tìm ra để đạt được tối ưu về độ nhạy và dải làm việc cho cảm biến. Nguyên mẫu cảm biến đã được chế tạo thử sử dụng phương pháp in 3D tạo mẫu nhanh (3D printing) và hoạt động của cảm biến đã được kiểm nghiệm, kết quả đo đạc phù hợp với kết quả mô phỏng. Kết quả thực nghiệm thể hiện sự thay đổi giá trị điện dung vi sai trên từng cặp điện cực tương ứng với thay đổi của góc nghiêng, với dải làm việc $[-70^\circ, 70^\circ]$, độ nhạy $59.4\text{mV}/^\circ$ theo trục x và dải làm việc $[-70^\circ, 70^\circ]$, độ nhạy $32.1\text{ mV}/^\circ$ theo trục y. Đây là kết quả tốt hơn so với các cấu trúc cảm biến hai chiều cấu trúc hai pha lỏng khí đã được nghiên cứu trước đây.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Trần Minh Cường. Thiết kế, chế tạo và thử nghiệm cảm biến góc nghiêng điện tử cấu trúc hai pha lỏng – khí, 2016.
- [2] Trần Ngọc Thành. Nghiên cứu phát triển cảm biến góc nghiêng hai chiều kiểu tụ, 2017.
- [3] S. Das, "A Simple, Low Cost Optical Tilt Sensor," Int. J. Electron. Electr. Eng., vol. 2, no. 3, pp. 235-241, 2014.
- [4] Internet, <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/direct-current/chpt-13/factors-affecting-capacitance/>
- [5] Internet, <http://creatz3d.com.vn/cong-nghe-fdm/>
- [6] Internet, <http://creatz3d.com.vn/cong-nghe-polyjet/>
- [7] User guide Stratasys Objet 500 3D Printing System.
- [8] C. H. Lee and S. S. Lee, "Study of capacitive tilt sensor with metallic ball," ETRI J., vol. 36, no. 3, pp. 361-366, 2014.
- [9] Dang Dinh Tiep, Bui Ngoc My, Vu Quoc Tuan, Pham Quoc Thinh, Tran Minh Cuong, Bui Thanh Tung, and Chu Duc Trinh. Tilt sensor based on three electrodes dielectric liquid capacitive sensor. In 2016 IEEE Sixth International Conference on Communications and Electronics (ICCE), pages 172–175. IEEE, Jul 2016.
- [10] Tiep Dang Dinh, Tung Thanh Bui, Tuan Vu Quoc, Thinh Pham Quoc, Masahiro Aoyagi, and Chu Duc Trinh. Two-axis Tilt Angle Detection based on Dielectric Liquid Capacitive Sensor. Pages 907–909, 2016.
- [11] Che Hsin Lin and Shu Ming Kuo. Micro-impedance inclinometer with wide-angle measuring capability and no damping effect. Sensors and Actuators A: Physical, 143 (1):113–119,2008.

PHỤ LỤC 1

SƠ ĐỒ NGUYÊN LÝ MẠCH CẢ BIẾN GÓC NGHIÊNG ĐIỆN TỬ



| Title | | |
|-------|---|----------|
| Size | Number | Revision |
| A | | |
| Date | 10/15/2017 | Sheet of |
| File | D:\Cao hoc\conductivitysensor-v5.SchDoc | Drawn By |

