

วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นดิวิตีไซเคิลสำหรับเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุ

CAPACITANCE-TO-DUTY CYCLE CONVERTER FOR CAPACITIVE SENSOR



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2561

KMITL-2018-EN-M-080-001

วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นดิวิตีไซเคิลสำหรับเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุ
CAPACITANCE-TO-DUTY CYCLE CONVERTER FOR CAPACITIVE SENSOR



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2561

KMITL-2018-EN-M-080-001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CAPACITANCE-TO-DUTY CYCLE CONVERTER
FOR CAPACITIVE SENSOR



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN CONTROL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2018

KMITL-2018-EN-M-080-001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2018

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นดิวิต์ไซเคิลสำหรับเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุ
Thesis Title Capacitance-to-Duty Cycle Converter for Capacitive Sensor
นักศึกษา นางสาวฉัตรภรณ์ ศรีพิศุทธิ์
รหัสประจำตัว 56601205
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมระบบควบคุม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.วรรณดี เพชรมณีล้ำค่า
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2018-EN-M-080-001

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.อนุชา	แก้วพูลสุข	
ศ.ดร.วันชัย	วีร์รุจจา	
ผศ.ดร.สิริชัย	ธรรมารักษ์วิวัฒน์	
ดร.อภินัย	ฤกษ์รัตน์	
ผศ.ดร.วรรณดี	เพชรมณีล้ำค่า	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันศุกร์ที่ 1 ธันวาคม พ.ศ. 2560 เวลา 11.00-13.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ฉบับตี คณะวิศวกรรมศาสตร์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงที่มาของเอกสารทุกครั้งที่มีควารนำไปใช้
วันที่ 1 ธันวาคม พ.ศ. 2560

หัวข้อวิทยานิพนธ์	วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นดิวตี้ไซเคิล สำหรับเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุ
นักศึกษา	นางสาวฉัตรภรณ์ ศรีพิศุทธิ์
รหัสประจำตัว	56601205
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมระบบควบคุม
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.วรรณดี เพชรมณีล้ำค่า

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นดิวตี้ไซเคิลสำหรับเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุ วงจรที่นำเสนอใช้หลักการพื้นฐานของการมอดูเลตแบบความกว้างพัลส์ เอาต์พุตที่ได้จากวงจรอยู่ในรูปของดิวตี้ไซเคิลที่เป็นสัดส่วนอย่างเป็นเชิงเส้นกับค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้จากเซนเซอร์ วงจรที่นำเสนอมีโครงสร้างอย่างง่ายไม่ซับซ้อน อุปกรณ์ที่ใช้สามารถหาซื้อได้ง่ายตามท้องตลาดและมีราคาถูก ผลการทดลองสามารถยืนยันได้ว่าสมรรถนะการทำงานของวงจรเป็นไปตามที่คาดหวัง นอกจากนี้ได้มีการนำวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นดิวตี้ไซเคิลที่ออกแบบขึ้นไปประยุกต์ใช้งานเพื่อเป็นการยืนยันการทำงานของวงจรที่นำเสนออีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Capacitance-to-Duty Cycle Converter for Capacitive Sensor
Student	Ms. Chattraporn Sripisut
Student ID.	56601205
Degree	Master of Engineering
Program	Control Engineering
Year	2018
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr. Wandee Petchmaneelumka

ABSTRACT

This thesis presents a design of capacitance-to-duty cycle converter for capacitive sensor. The proposed converter is based on pulse width modulation (PWM) technique. The obtained output of the proposed circuit is in the form of duty cycle which is linearly proportional to the sensed capacitance. The proposed scheme provides simple configuration and low cost. In addition, the converter requires only commercial available devices. The experimental results confirming the circuit performance are agreed with the expected values. Moreover, application of the proposed converter is also included.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้เขียนขอขอบคุณพระคุณในความกรุณาของอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.วรรณดี เพชรหมณีล้ำค่า เป็นอย่างสูงที่ได้ให้คำปรึกษา ให้ความรู้ คำแนะนำ ชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหาต่างๆ และตรวจสอบงานวิจัยตลอดการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ ศ.ดร. วันชัย ธีรรัฐจา อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม ที่คอยให้ความรู้ คำปรึกษา และคอยช่วยเหลือ ชี้แนะในการทำงานวิจัย เพื่อให้งานวิจัยออกมาอย่างมีประสิทธิภาพแก่ผู้เขียน ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.อภิณัย ฤกษ์รัตน์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม ที่ได้ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือแก้ไขปัญหาต่างๆ ในการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ภายใต้ทุน KREF115701 ที่ให้การสนับสนุนการวิจัยสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และเพื่อนๆ ของผู้เขียนทุกๆ คน ที่คอยห่วงใย ให้คำปรึกษา ให้โอกาสและการสนับสนุนผู้เขียนในทุกๆ ด้าน ทำให้สามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ตลอดจนครูบาอาจารย์ที่ได้มอบความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า ขอกราบขอบพระคุณอย่างสูง

ฉัตรารณ ศรีพิศุทธิ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 หลักการใหม่ที่น่าสนใจในวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีของตัวเก็บประจุไฟฟ้า.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 หลักการพื้นฐานในการกำหนดค่าของเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุ.....	4
2.2.1 ค่าความจุไฟฟ้าที่ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ.....	5
2.2.2 ค่าความจุไฟฟ้าที่ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ซ้อนทับของแผ่นตัวนำ.....	6
2.2.3 ค่าความจุไฟฟ้าที่ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติไดอิเล็กตริก.....	7
2.2.4 การวัดค่าความจุไฟฟ้าแบบผลต่าง.....	8
2.2.5 การวัดค่าความจุไฟฟ้าแบบแผ่นตัวนำในระนาบเดียวกัน.....	8
2.3 การนำระบบการทำงานของเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุไปใช้งาน.....	10
2.3.1 การนำเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุไปใช้งานระดับมหภาค.....	10
2.3.2 การนำเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุไปใช้งานระดับจุลภาค.....	12
2.4 บทสรุป.....	19
บทที่ 3 การเชื่อมต่อทางอิเล็กทรอนิกส์สำหรับเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุ.....	20
3.1 บทนำ.....	20
3.2 การแปลงค่าประจุไฟฟ้าเป็นแรงดัน.....	20
3.2.1 วงจรบริดจ์.....	20
3.2.2 วงจรเรียงกระแส.....	22

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.3 การแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นความถี่.....	25
3.4 การแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นความกว้างพัลส์.....	26
3.5 การแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นกระแส.....	28
3.6 บทสรุป	29
บทที่ 4 วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นดิวิตีไซเคิลที่นำเสนอ	31
4.1 บทนำ.....	31
4.2 หลักการทำงานของวงจร.....	31
4.3 การวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของวงจร.....	34
4.4 การทดสอบและผลการทดสอบวงจรที่นำเสนอ.....	35
4.5 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นดิวิตีไซเคิลที่นำเสนอ	44
4.6 บทสรุป	47
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะแนวทางในการทำวิจัยต่อ.....	48
5.1 บทสรุป	48
5.2 ข้อเสนอแนะแนวทางในการทำวิจัยต่อ.....	48
เอกสารอ้างอิง	49
ภาคผนวก	53
ภาคผนวก ก บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	54
ประวัติผู้เขียน.....	62

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ค่าคงที่ได้ไอเล็กทริกของวัสดุต่างๆ..... 8
3.1	ข้อดีข้อเสียของวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุ 30
4.1	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบวงจรรูปที่ 4.1 35
4.2	ค่าพารามิเตอร์สำหรับเลือกย่านการทำงานของค่าความจุไฟฟ้า (C_s)..... 36
4.3	ค่าความจุไฟฟ้า C_s ที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะทางของเซนเซอร์ที่ทำขึ้น 46
4.4	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้กับเซนเซอร์วัดระยะทางที่ทำขึ้น 46



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	โครงสร้างของตัวเก็บประจุ..... 5
2.2	ความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้ากับระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ..... 5
2.3	โครงสร้างอย่างง่ายของแผ่นตัวนำสองแผ่นที่ซ้อนทับกัน 6
2.4	ความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้ากับพื้นที่ที่ซ้อนทับกันของแผ่นตัวนำ..... 6
2.5	โครงสร้างพื้นฐานของการวัดค่าความจุไฟฟ้าแบบผลต่าง 8
2.6	โครงสร้างของตัวเก็บประจุแบบแผ่นตัวนำในระนาบเดียวกัน 9
2.7	เซนเซอร์วัดตำแหน่งแบบใช้ค่าความจุไฟฟ้าแบบสองมิติ 9
2.8	การตรวจจับระดับของเหลวด้วยเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุ 11
2.9	ภาพตัดขวางของพรีอ็อกซิไดซ์เซนเซอร์ชนิดเก็บประจุ..... 11
2.10	การเคลื่อนที่ในแนวขวาง (แนวแกน Y) ของโครงสร้างแบบซีทีวี..... 13
2.11	การเคลื่อนที่ในแนวด้านข้าง (แนวแกน x) ของเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุในรูปแบบของซีทีวี .. 13
2.12	ภาพตัดขวางของโครงสร้างแบบซีทีวีก่อนการหมุน (แกนบน) และหลังการหมุน (แกนล่าง) ... 14
2.13	โครงสร้างอย่างง่ายของเซนเซอร์วัดค่าความจุไฟฟ้าและรูปแบบอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น..... 15
2.14	การเคลื่อนที่แนวด้านข้างของเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุที่มีโครงสร้างแบบซีทีวี..... 16
2.15	(ก) ภาพถ่ายการบิดตัวของมิเตอร์วัดความแรงในระดับจุลภาค 16 (ข) ภาพถ่ายแบบซูม 16
2.16	(ก) โครงร่างของเซนเซอร์วัดความชื้นชนิดเก็บประจุ 17 (ข) ภาพซูมด้านบนและล่างของแผ่นตัวนำ 17
2.17	โครงร่างของการวัดและอ้างอิงถึงตัวเก็บประจุที่สร้างจากแผ่นโลหะสองชั้นในกระบวนการ CMOS 18
2.18	เซนเซอร์ชนิดความดันและภาพตัดขวาง 18
3.1	วงจรถอดจี้..... 21
3.2	วงจรถอดจี้แบบค่าความจุไฟฟ้า 21
3.3	วงจรวัดค่าความจุไฟฟ้าโดยใช้วงจรรีจิสเตอร์ 24
3.4	วงจรถอดจี้อินสทรูเมนต์..... 24
3.5	วงจรถอดจี้ค่าความจุไฟฟ้าเป็นความถี่..... 25
3.6	วงจรถอดจี้ค่าความจุไฟฟ้าเป็นความกว้างพัลส์อย่างง่าย 26
3.7	กราฟการทำงานของวงจรถอดจี้ค่าความจุไฟฟ้าเป็นความกว้างพัลส์อย่างง่าย..... 27
3.8	วงจรถอดจี้ค่าความจุเป็นกระแส 29
4.1	วงจรถอดจี้ค่าความจุไฟฟ้าเป็นดิฟเฟอเรนเชียลสำหรับเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุ 32

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 ความสัมพันธ์ของการหาค่าดิวิตซ์เซลล์	33
4.3 สัญญาณในแต่ละจุดของวงจรในรูปที่ 4.1	34
4.4 การต่อแหล่งจ่ายกระแสคงที่ I_1 ที่ใช้สำหรับวงจรในรูปที่ 4.1	36
4.5 ผลการแปรค่าความจุไฟฟ้า C_S ในกรณีที่ 1	37
4.6 (ก) ผลการตอบสนองทางเวลาในแต่ละจุดของกรณีที่ 1 สำหรับ $C_S = 25\text{nF}$	37
(ข) ผลการตอบสนองทางเวลาในแต่ละจุดของกรณีที่ 1 สำหรับ $C_S = 58\text{nF}$	38
4.7 ผลการแปรค่าความจุไฟฟ้า C_S ในกรณีที่ 2	39
4.8 (ก) ผลการตอบสนองทางเวลาในแต่ละจุดของกรณีที่ 2 สำหรับ $C_S = 46\text{nF}$	39
(ข) ผลการตอบสนองทางเวลาในแต่ละจุดของกรณีที่ 2 สำหรับ $C_S = 88\text{nF}$	40
4.9 ผลการแปรค่าความจุไฟฟ้า C_S ในกรณีที่ 3	40
4.10 (ก) ผลการแปรค่าความจุไฟฟ้า C_S ในกรณีที่ 3 สำหรับ $C_S = 6\text{nF}$	41
(ข) ผลการแปรค่าความจุไฟฟ้า C_S ในกรณีที่ 3 สำหรับ $C_S = 15\text{nF}$	41
4.11 ผลการแปรค่าความจุไฟฟ้า C_S ในกรณีที่ 4	42
4.12 (ก) ผลการตอบสนองทางเวลาในแต่ละจุดของกรณีที่ 4 สำหรับ $C_S = 10\text{nF}$	42
(ข) ผลการตอบสนองทางเวลาในแต่ละจุดของกรณีที่ 4 สำหรับ $C_S = 20\text{nF}$	43
4.13 ความสัมพันธ์ของดิวิตซ์เซลล์กับค่าความจุไฟฟ้า C_S เมื่อเปลี่ยนค่าแรงดันอ้างอิง V_{ref} 3 ค่า	44
4.14 รูปแบบการเคลื่อนที่ของแผ่นทองแดงที่ใช้ในการทดสอบ	45
4.15 ไดอะแกรมการนำวงจรที่นำเสนอไปประยุกต์ใช้งานกับเซนเซอร์วัดระยะทาง	45
4.16 ดิวิตซ์เซลล์ที่ตรวจวัดได้เมื่อแปรค่าระยะทาง x เทียบกับค่าทางทฤษฎี	46

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เซนเซอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการตรวจสอบสัญญาณ หรือปริมาณในเชิงกายภาพต่างๆ อาทิเช่น อุณหภูมิ เสียง แสง การสัมผัส [1]-[2] โดยจะให้เอาต์พุตออกมาในรูปแบบปริมาณทางไฟฟ้า หรือใช้งานร่วมกับตัวประมวลผลสัญญาณในระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่เซนเซอร์ต่างชนิดจะถูกประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบตามงานที่หลากหลายแตกต่างกันออกไป โดยหนึ่งในหลายๆ ประเภทของเซนเซอร์ที่ถูกยอมรับว่าสามารถให้ข้อมูลที่ถูกต้องเหมาะสมก็คือ เซนเซอร์ชนิดเก็บประจุ (Capacitive sensor) เป็นเซนเซอร์ชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญและนิยมใช้งานในปัจจุบันโดยที่สัญญาณเอาต์พุตที่ได้ของวงจรประเภทนี้จะอยู่ในรูปแบบของค่าความจุไฟฟ้า การแปลงค่าดังกล่าวออกเป็นรูปแบบสัญญาณทางไฟฟ้าจึงเป็นหนึ่งในหัวข้อที่นักวิจัยหลายๆ ท่านให้ความสำคัญ และพัฒนาอย่างต่อเนื่องถึงจนปัจจุบันซึ่งสามารถแบ่งเป็นประเภทย่อยๆ ได้ตามรูปแบบของสัญญาณเอาต์พุต เช่น วิธีที่ 1 วงจรแปลงค่าความจุทางไฟฟ้าเป็นแรงดัน (Capacitance to voltage conversion) [3]-[5] มีข้อดีในเรื่องของขนาดวงจรที่มีขนาดเล็กและไม่ซับซ้อน แต่ถูกรบกวนได้ง่ายจากสภาพแวดล้อมและการปรับเปลี่ยนวงจรที่ทำได้ยาก วิธีที่ 2 การแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นรูปแบบของคาบเวลา (Capacitance to time period conversion) [6]-[8] ที่มีข้อดีสำคัญในเรื่องของรูปแบบสัญญาณที่มีเอาต์พุตคล้ายคลึงกับรูปแบบของสัญญาณดิจิทัล แต่ที่ผ่านมาก็มีข้อจำกัดทั้งในเรื่องของอุปกรณ์ที่ใช้ต้องอาศัยอุปกรณ์ที่มีจำนวนมาก และยังต้องใช้อุปกรณ์เฉพาะที่ไม่สามารถหาซื้อได้ตามท้องตลาดทั่วไป อีกทั้งยังง่ายต่อการรบกวนของสัญญาณรบกวนจากสภาพแวดล้อม วิธีที่ 3 การแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นรูปแบบของความถี่ (Capacitance to frequency conversion) [9]-[10] ที่มีข้อดีในเรื่องการนำสัญญาณเอาต์พุตไปใช้งานต่อเช่นเดียวกันกับวิธีที่ 2 แต่ต้องอาศัยอุปกรณ์เฉพาะเช่นเดียวกัน วิธีที่ 4 การแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นรูปแบบของกระแส (Capacitance to current conversion) [11]-[12] ซึ่งเป็นวงจรที่มีโครงสร้างอย่างง่ายจึงทำให้การเพิ่มหรือลดความไวต่อการตอบสนอง (Sensitivity) สามารถทำได้ง่ายเช่นกัน

และเมื่อพิจารณาข้อดีข้อเสียของวงจรในการแปลงค่าความจุไฟฟ้าประเภทต่างๆ ตามที่กล่าวมาข้างต้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเลือกที่จะนำเสนอวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นของดิวิตีไซเคิล เนื่องจากมีข้อดีอย่างชัดเจนในเรื่องของรูปแบบสัญญาณเอาต์พุตที่สะดวกต่อการนำไปใช้งานต่อ โดยปรับปรุงเรื่องข้อจำกัดวงจรเพิ่มเติมจากที่งานวิจัยเดิมที่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์เฉพาะทำให้ราคาโดยรวมของวงจรสูง อีกทั้งง่ายต่อการถูกรบกวนจากสัญญาณภายนอก ให้เป็นวงจรที่สามารถทำงานได้โดยอาศัยอุปกรณ์ที่หาได้ตามท้องตลาด มีความซับซ้อนของวงจรที่น้อยกว่า และยังเพิ่มเติมในเรื่อง

ของสมรรถนะของวงจรที่สามารถทำงานได้ในย่านการทำงานที่กว้างมากขึ้นเมื่อเทียบกับงานวิจัยที่มีการนำเสนอก่อนหน้านี้ [13]

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอเทคนิคอย่างง่ายในการออกแบบวงจรเชื่อมต่อสำหรับเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุโดยสัญญาณเอาต์พุตที่ได้อยู่ในรูปของดิฟเฟอเรนเชียลที่ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้จากเซนเซอร์ อุปกรณ์ที่ใช้เป็นอุปกรณ์ที่สามารถหาซื้อได้ง่ายในท้องตลาดและมีราคาถูก วงจรมีโครงสร้างอย่างง่ายไม่ซับซ้อน อีกทั้งยังสามารถปรับช่วงการใช้งานให้เหมาะสมกับค่าความจุไฟฟ้าที่ต้องการวัดได้

1.3 หลักการใหม่ที่น่าสนใจในวิทยานิพนธ์

หลักการใหม่ที่น่าสนใจในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คือวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุให้อยู่ในรูปแบบของดิฟเฟอเรนเชียล โดยมีการพัฒนางจรจากเดิมที่การออกแบบจำเป็นต้องอาศัยอุปกรณ์จำเพาะที่ไม่สามารถหาซื้อได้ในท้องตลาด จึงทำให้วงจรโดยรวมมีราคาที่สูง อีกทั้งประสิทธิภาพที่สามารถทำได้ของวงจร ยังไม่สามารถครอบคลุมย่านการใช้งานได้ทั่วถึง ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมา [13] ค่าที่ได้จากวงจรในรูปแบบดิฟเฟอเรนเชียลของวงจรดังกล่าว สามารถทำได้เพียง 50% ในวงจรที่มีการนำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จึงมุ่งเน้นในการนำเสนอ วงจรที่มีโครงสร้างอย่างง่าย เพื่อประโยชน์ในเรื่องของการลดต้นทุนที่ใช้สำหรับวงจร และอีกนัยหนึ่งคือการปรับปรุงประสิทธิภาพของวงจร ให้สามารถตอบสนองการทำงานได้ช่วงกว้างขึ้น กล่าวคือเอาต์พุตในรูปของดิฟเฟอเรนเชียลสามารถมีค่ามากกว่า 50% โดยไม่ต้องปรับเปลี่ยนวงจร

1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึง การออกแบบวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นรูปแบบของดิฟเฟอเรนเชียล โดยใช้อุปกรณ์ที่สามารถหาซื้อได้ง่ายตามท้องตลาดมาเป็นองค์ประกอบเพื่อลดต้นทุนและสะดวกในการออกแบบ จากนั้นทำการวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของวงจร ทำการทดสอบประสิทธิภาพของวงจรโดยการต่อวงจรจริงในหลายๆ เงื่อนไขการใช้งาน เพื่อพิสูจน์ถึงย่านการทำงานที่ครอบคลุมของวงจรที่ทำการออกแบบ จากนั้นจึงเป็นส่วนของการนำไปประยุกต์ใช้งาน เพื่อเป็นการยืนยันว่าวงจรที่ออกแบบสามารถใช้งานได้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเนื้อหาทั้งหมดออกเป็น 5 บท กับอีก 1 ภาคผนวก โดยที่แต่ละบทมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ หลักการใหม่ที่น่าเสนอในวิทยานิพนธ์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ในการศึกษา ตลอดจนรายละเอียดในแต่ละบทของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีของตัวเก็บประจุไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย หลักการพื้นฐานในการกำหนดค่าของเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุ การนำระบบการทำงานของเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุไปใช้งาน ทั้งในระดับจุลภาคและมหภาค

บทที่ 3 การเชื่อมต่อทางอิเล็กทรอนิกส์สำหรับเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุ ที่กล่าวถึงเทคนิคต่างๆ ในการเชื่อมต่อเพื่อนำค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุมาใช้งาน ประกอบด้วย การแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดัน การแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นความถี่ การแปลงค่าประจุไฟฟ้าเป็นคาบเวลา รวมถึงการแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นกระแส

บทที่ 4 กล่าวถึงวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นความถี่ไซน์เคิลที่น่าเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งประกอบด้วย เนื้อหาในส่วนของการทำงานของวงจร การวิเคราะห์สมรรถนะของวงจร และทดสอบด้วยการต่อจริงเพื่อยืนยันถึงสมรรถนะการทำงานของวงจรรวมถึงประยุกต์ใช้งานจริงของวงจรที่น่าเสนอ

บทที่ 5 เป็นส่วนของการสรุปผลการทำวิจัยที่น่าเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมถึงแนวทางและข้อเสนอแนะในการพัฒนาการทำวิจัยต่อไปในอนาคต

ในส่วนสุดท้ายของวิทยานิพนธ์จะเป็นส่วนของภาคผนวก ซึ่งจะแสดงถึงบทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ภาคผนวก ก บทความวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้รับการตีพิมพ์

บทที่ 2

ทฤษฎีของตัวเก็บประจุไฟฟ้า

2.1 บทนำ

ในปัจจุบันเซนเซอร์ถือเป็นหนึ่งในอุปกรณ์ที่มีความสำคัญต่อภาคอุตสาหกรรมอย่างมาก ทั้งในแง่ของการตรวจสอบการควบคุม หรือกระทั่งการสั่งงานในระบบการทำงานอัตโนมัติ ซึ่งเซนเซอร์แต่ละชนิดย่อมมีความแตกต่างกันทั้งในปริมาณที่ทำการวัด โครงสร้างและข้อจำกัด

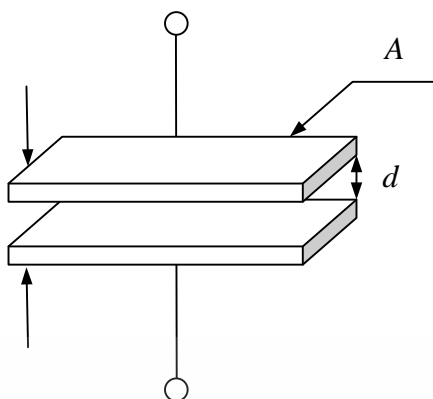
โดยวิทยานิพนธ์ในส่วนของบทนี้จะมุ่งเน้นไปในการประยุกต์ใช้ทฤษฎีพื้นฐานของตัวเก็บประจุไฟฟ้า ที่สามารถตรวจสอบทั้งการเปลี่ยนแปลงในเชิงกายภาพ รวมถึงสารเคมี ที่ตรวจสอบโดยอาศัยการวัดการเคลื่อนที่ หรืออาศัยการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ของสารไดอิเล็กตริก (Dielectric material) ซึ่งถือว่าเป็นคุณสมบัติของตัววัสดุ ผ่านการออกแบบที่ต้องพิจารณาถึงวิธีการที่เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งาน ซึ่งได้มีการนำเสนอในส่วนถัดไป

2.2 หลักการพื้นฐานในการกำหนดค่าของเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุ

โครงสร้างของเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุมีโครงสร้างแบบเดียวกับตัวเก็บประจุโดยโครงสร้างแบบพื้นฐานจะมีแผ่นตัวนำสองชั้นวางในแนวขนานกันด้วยระยะ d และซ้อนทับกันภายในพื้นที่ A ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งทำให้ค่าความจุไฟฟ้าสามารถเขียนแทนได้ด้วยสมการ

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (2.1)$$

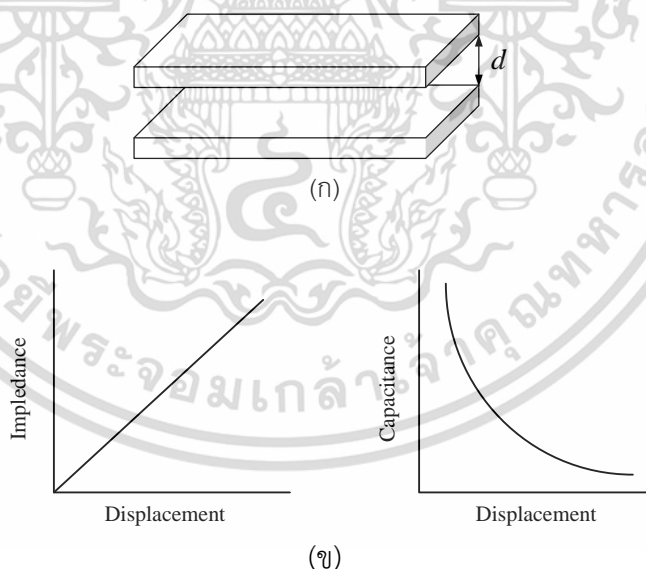
เมื่อ	A	คือ พื้นที่ของแผ่นตัวนำ (m^2)
	d	คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ (m)
	ϵ_0	คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของสุญญากาศ (Permittivity of free space) มีค่า 8.85×10^{-12} (farad/m)
	ϵ_r	คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์ (Relative permittivity) หรือค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของตัวเก็บประจุ

2.2.1 ค่าความจุไฟฟ้าที่ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ

วิธีการหนึ่งสำหรับเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุคือ การวัดค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงที่ขึ้นกับการเปลี่ยนไปของระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ หรือค่า d ดังรูปที่ 2.2 โดยที่ค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าเป็นสัดส่วนผกผันกับระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำตามสมการที่ (2.1) โดยค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุที่ถูกวัดจะแสดงคุณลักษณะเป็นเชิงเส้น ในขณะที่การวัดโดยตรงสำหรับตัวเก็บประจุจะให้ผลที่ไม่เป็นเชิงเส้น



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้ากับระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ

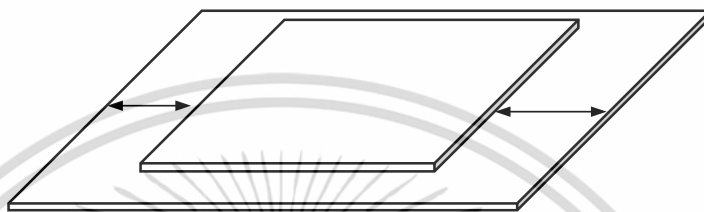
(ก) ทิศทางการเคลื่อนที่ของตัวเก็บประจุแบบเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ

(ข) กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าและค่าอิมพีแดนซ์ต่อระยะห่างของแผ่นตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นในการวัดโดยตรงสำหรับความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุจึงจำเป็นต้องมีเงื่อนไขของสัญญาณเพิ่มเติมเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้ากับการเคลื่อนที่ของแผ่นตัวนำ

หนึ่งในปัญหาของเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุคือค่าความไว (Sensitivity) ของเซนเซอร์ในแนวขวาง โดยที่ปัญหานี้จะสามารถแก้ไขได้โดยการที่ให้แผ่นตัวนำทั้งสองแผ่นมีขนาดต่างกัน ดังรูปที่ 2.3 เพื่อให้มั่นใจได้ว่า พื้นที่ของทั้งสองแผ่นจะซ้อนทับกัน และสามารถลดค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการเคลื่อนที่ตามขอบของแผ่นตัวนำได้

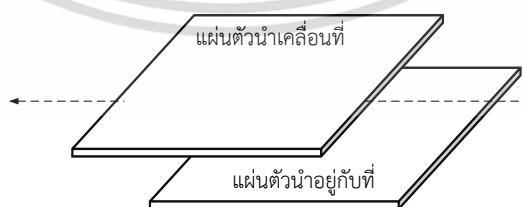


รูปที่ 2.3 โครงสร้างอย่างง่ายของแผ่นตัวนำสองแผ่นที่ซ้อนทับกัน

2.2.2 ค่าความจุไฟฟ้าที่ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ซ้อนทับของแผ่นตัวนำ

อีกหนึ่งประเภทของเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุที่ทำงานโดยอาศัยพื้นฐานของการเปลี่ยนแปลงในส่วนพื้นที่ซ้อนทับของแผ่นตัวนำ [6] การเคลื่อนที่ในแนวขวางของเซนเซอร์ดังรูปที่ 2.4 ในส่วนที่เป็นพื้นที่ซ้อนทับร่วมกันของแผ่นตัวนำ จะมีการเปลี่ยนแปลงโดยการเคลื่อนที่ในแนวขวางของแผ่นตัวนำ โดยค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าเป็นสัดส่วนแบบเชิงเส้นกับพื้นที่ ดังสมการที่ (2.1)

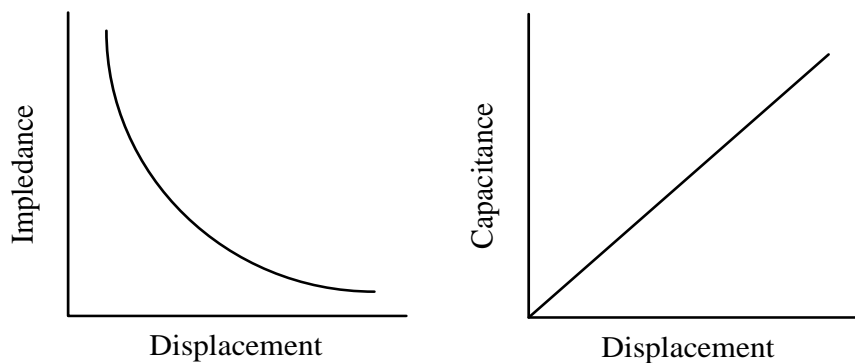
เซนเซอร์ประเภทนี้มีความไวต่อพื้นที่ว่างและการเอียง โดยบางส่วนของความผิดพลาด (Cross-sensitivity error) สามารถลดลงได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงรูปทรงทางเรขาคณิต โดยความแม่นยำของเซนเซอร์ชนิดนี้จะขึ้นกับความแม่นยำเชิงกลของแผ่นตัวนำ โดยความโค้งมนของพื้นผิวแผ่นตัวนำ การบิดเบี้ยวหรือระยะทางที่แตกต่างกัน สามารถส่งผลให้การวัดของเซนเซอร์ชนิดนี้ไม่เป็นเชิงเส้นได้ [1]



(ก)

รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้ากับพื้นที่ที่ซ้อนทับกันของแผ่นตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้ากับพื้นที่ที่ซ้อนทับกันของแผ่นตัวนำ (ต่อ)

(ก) แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของตัวเก็บประจุแบบเปลี่ยนแปลงพื้นที่ระหว่างแผ่นตัวนำ

(ข) กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าและอิมพีแดนซ์ต่อการเปลี่ยนแปลงระยะทางที่เคลื่อนที่แนวขวาง

2.2.3 ค่าความจุไฟฟ้าที่ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติไดอิเล็กตริก

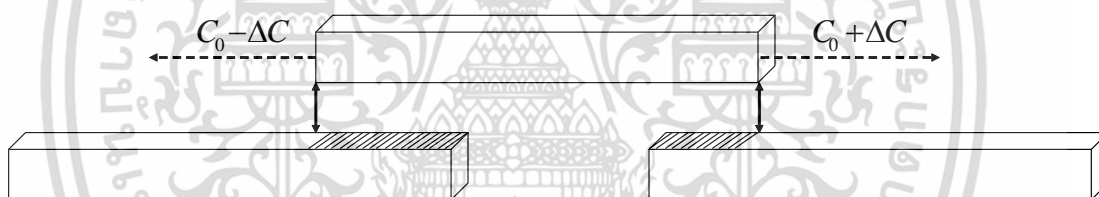
วัสดุไดอิเล็กตริกคือสารที่ภายในไม่มีประจุไฟฟ้าอิสระ หรือถ้ามีก็น้อยมาก หากนำไปวางภายในสนามไฟฟ้า จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระ และหากเพิ่มความเข้มของสนามไฟฟ้าขึ้นถึงระดับหนึ่งจะสามารถเปลี่ยนวัสดุไดอิเล็กตริกให้เป็นตัวนำได้ การเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติไดอิเล็กตริกตรงกลางระหว่างแผ่นตัวนำส่งผลต่อค่าของความจุไฟฟ้าเช่นเดียวกับสมการที่ (2.1) โดยที่สารไดอิเล็กตริกแต่ละชนิดมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่แตกต่างกันดังตารางที่ 2.1 และมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความจุไฟฟ้า [9] โดยการพิจารณาเลือกใช้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสำหรับเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุในงานต่างประเภทก็จะแตกต่างกันออกไป [10] เช่นในการวัดความชื้นโดยส่วนมากจะนิยมใช้วัสดุที่ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกแปรผันกับค่าความชื้นเป็นสารไดอิเล็กตริก

ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุต่างๆ

วัสดุ	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	วัสดุ	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก
สุญญากาศ	1.0	น้ำมัน	4.0
เทฟลอน	2.0	ไม้ก้ำ	5.0
ซีผึ้ง	2.25	เซรามิก	6.0
ยาง	3.0	แก้ว	7.5
แบคคาไลต์	3.5	น้ำ	78

2.2.4 การวัดค่าความจุไฟฟ้าแบบผลต่าง

ความไวต่อการเคลื่อนที่ในเชิงกลสามารถปรับปรุงด้วยการเพิ่มแผ่นตัวนำระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสองโดยใช้เทคนิคการเปลี่ยนแปลงทั้งช่องว่างและการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ ดังรูปที่ 2.5



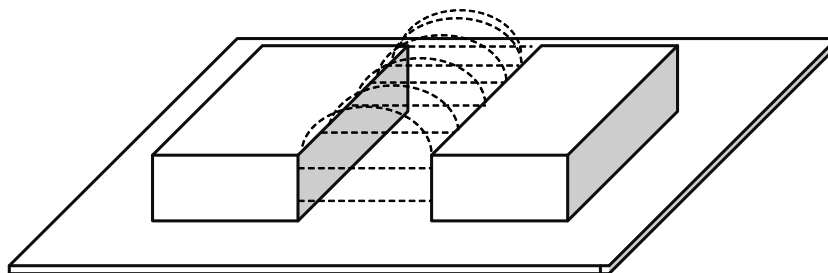
รูปที่ 2.5 โครงสร้างพื้นฐานของการวัดค่าความจุไฟฟ้าแบบผลต่าง

เซนเซอร์แบบสามแผ่นตัวนำมีข้อดีที่รู้จักกันดีในรูปแบบของระบบผลต่าง โดยวงจรที่ใช้เป็นการวัดผลต่างของค่าความจุไฟฟ้า 2 ค่ามากกว่าการวัดค่าความจุไฟฟ้าเพียงค่าเดียว [11] ซึ่งค่าที่วัดได้จะเป็นสัดส่วนกับ $\frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2}$ หรือ $C_1 - C_2$ โดยจะขึ้นกับระบบที่ทำการตรวจวัด

2.2.5 การวัดค่าความจุไฟฟ้าแบบแผ่นตัวนำในระนาบเดียวกัน

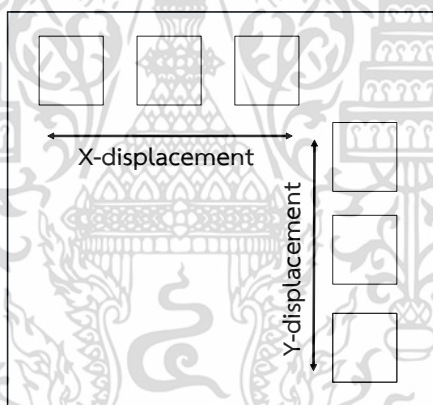
นอกจากเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุที่แผ่นตัวนำขนานกันที่ได้อธิบายไปแล้วนั้น ยังมีแผ่นตัวนำชนิดสองแผ่นในระนาบเดียวกัน ดังรูปที่ 2.6 อีกด้วย ค่าสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำทำหน้าที่กำหนดค่าความจุไฟฟ้า [14] โดยที่การสอดแทรกของสนามไฟฟ้าทำให้ค่าความจุไฟฟ้าเปลี่ยนตัวอย่างเช่น การเคลื่อนที่ของแผ่นตัวนำหรือการเปลี่ยนแปลงของไดอิเล็กตริกทำให้ค่าความจุไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของตัวเก็บประจุแบบแผ่นตัวนำในระนาบเดียวกัน

เทคนิคการวัดค่าความจุไฟฟ้าแบบผลต่างสามารถนำมาใช้กับเซนเซอร์แบบผลต่างซึ่งสามารถนำมาใช้งานกับเซนเซอร์แบบแผ่นตัวนำระนาบเดียวกันได้ ตัวอย่างเช่น โครงสร้างของเซนเซอร์วัดตำแหน่งโดยใช้ค่าความจุไฟฟ้าแบบสองมิติ (2D capacitive position sensor) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 เมื่อคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของร่างกายมนุษย์ส่งผลต่อแผ่นตัวนำที่อยู่ติดกัน เช่น หน่วยแสดงผลแบบไร้สัมผัส



รูปที่ 2.7 เซนเซอร์วัดตำแหน่งแบบใช้ค่าความจุไฟฟ้าแบบสองมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

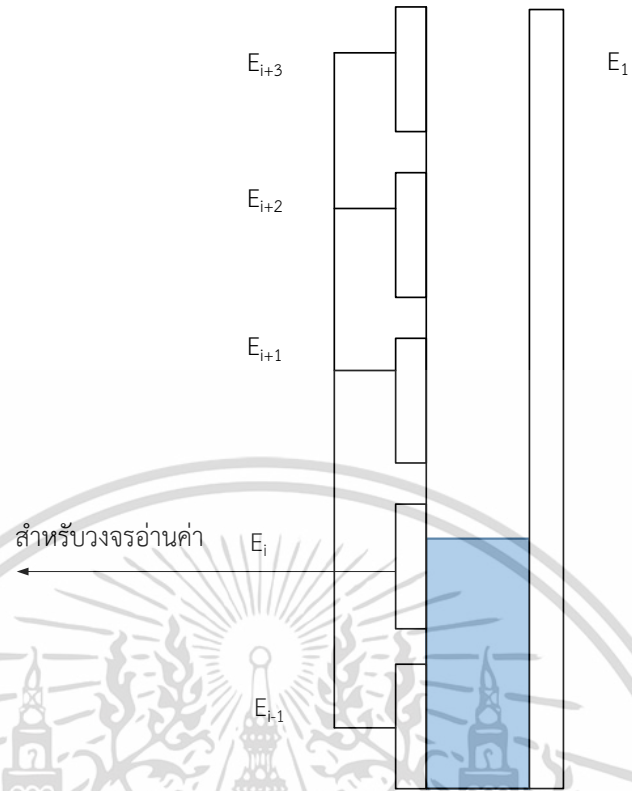
2.3 การนำระบบการทำงานของเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุไปใช้งาน

เซนเซอร์ชนิดเก็บประจุนำมาใช้อย่างหลากหลายทั้งในอุปกรณ์ระดับมหภาค และจุลภาค ในการวัดความแตกต่างของคุณลักษณะทางกายภาพ หรือคุณสมบัติทางเคมี เช่น ความเร่ง [19] ความดัน [15] ตำแหน่ง [16] ความชื้น [17] และความเข้มข้นของแก๊ส [18] เป็นต้น ข้อดีของการใช้การตรวจวัดแบบค่าความจุไฟฟ้าคือ การที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการผลิตจำนวนมากโดยที่มีราคาถูก ข้อดีอีกอย่างหนึ่งคือใช้กำลังงานต่ำ เนื่องจากตัวเก็บประจุในอุดมคติไม่ใช้กระแสไฟฟ้า กระแสตรงจึงเหมาะกับการนำไปใช้ในงานที่ต้องการใช้กระแสต่ำๆ โดยที่ประโยชน์อื่นๆ ของเซนเซอร์ชนิดนี้ ยังมีดังเช่น

- วงจรมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน
- มีโครงสร้างที่ง่าย ใช้พลังงานต่ำ
- เอาต์พุตของวงจรเสมือนสัญญาณดิจิทัล
- การปรับค่าความไวของวงจรสามารถทำได้ง่าย

2.3.1 การนำเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุไปใช้งานระดับมหภาค

หนึ่งในประโยชน์ของการใช้ตัวเก็บประจุในการวัดระดับมหภาคคือ ไม่ต้องการสัมผัสในเชิงกายภาพระหว่างผิวของวัสดุที่ทำการวัด หมายถึงเซนเซอร์ไม่จำเป็นต้องออกแบบให้ติดเข้ากับโครงสร้างของอุปกรณ์ ทำให้ไม่เป็นภาระสำหรับอุปกรณ์ที่มีการเคลื่อนที่ โดยหนึ่งในการนำเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุไปใช้งาน คือ การตรวจวัดระดับของเหลวภายในถังที่ต้องการความละเอียดในการตรวจวัดที่สูง [20] ดังรูปที่ 2.8 โครงสร้างของแผ่นตัวนำประกอบด้วยแผ่นตัวนำที่ขนาดยาวเท่ากับ ความสูงของถัง ส่วนแผ่นตัวนำอีกด้านหนึ่งจะถูกแบ่งเป็นส่วนๆ ที่แยกกันตามความสูงของถัง ในการทดสอบจะต่อขั้วไฟฟ้าเข้ากับวงจรอ่านค่า ส่วนแผ่นตัวนำที่เหลือจะต่อลงกราวด์ การเปลี่ยนแปลงของตัวเก็บประจุที่ทำการวัดจากแผ่นตัวนำหนึ่งไปยังตัวอื่นจะเป็นข้อมูลที่บอกถึงระดับของเหลวในถังบรรจุของเหลวที่ทำการวัด



รูปที่ 2.8 การตรวจจับระดับของเหลวด้วยเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุ

พรีอกซิมีตี้เซนเซอร์ (Proximity sensor) เป็นเซนเซอร์ที่ใช้ในการตรวจจับการปรากฏของวัตถุใกล้เคียงโดยที่ไม่มีการสัมผัสทางกายภาพ [21], [22] การวัดของพรีอกซิมีตี้ถือว่าเป็นวิธีการวัดที่นิยมใช้ในทางวิทยาศาสตร์ เพื่อจุดประสงค์ที่หลากหลายที่ต้องการวัดการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในระยะเวลาห่าง 2 ชั้นงาน



รูปที่ 2.9 ภาพตัดขวางของพรีอกซิมีตี้เซนเซอร์ชนิดเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พรีอ็อกซิมีตี้เซนเซอร์ที่แสดงในรูปที่ 2.9 ทำงานโดยอาศัยหลักการที่ขอบของตัวเก็บประจุไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำสองแผ่น มีโครงสร้างรูปวงกลมอยู่ภายใน [23] การนำวัตถุเข้าใกล้สนามจะส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โดยที่วัตถุดังกล่าวสามารถเป็นวัตถุชนิดตัวนำหรือไม่เป็นตัวนำก็ได้

2.3.2 การนำเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุไปใช้ในงานระดับจุลภาค

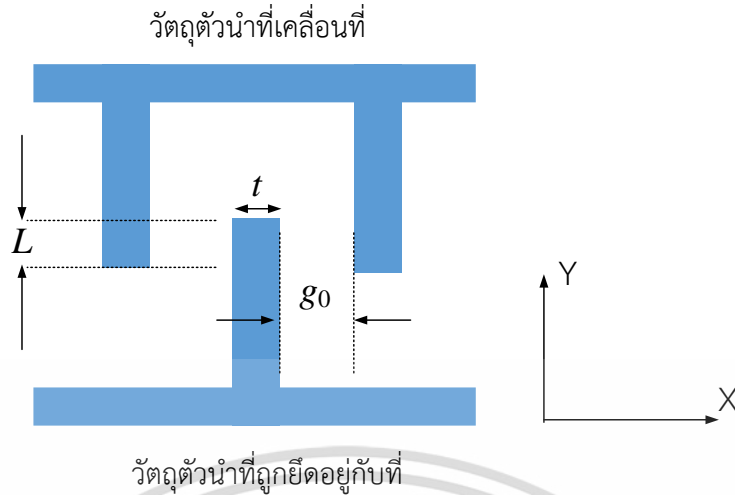
เซนเซอร์ชนิดเก็บประจุที่ให้ค่าความจุไฟฟ้าในระดับจุลภาค การเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ ระยะห่าง หรือคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุระหว่างแผ่นตัวนำดังที่มีการกล่าวถึงในหัวข้อที่ 2.1.1 ขึ้นกับข้อจำกัดในการนำไปใช้งาน โดยทางผู้ออกแบบ MEMS (Micro-electro mechanical system) ได้นำหนึ่งในสามของทฤษฎีโครงสร้างที่ถูกกล่าวถึงไปใช้และสามารถบรรลุวัตถุประสงค์การออกแบบได้ เช่น เซนเซอร์วัดความดันส่วนมากจะมีการทำงานโดยอาศัยหลักการพื้นฐานการโก่งตัวของเมมเบรน ซึ่งเป็นคุณลักษณะหนึ่งของความดัน โดยเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุที่ทำงานในลักษณะดังกล่าวจะอาศัยการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้า ซึ่งเกิดจากผลของการเปลี่ยนแปลงระหว่างเมมเบรนและแผ่นตัวนำที่มีค่าคงที่ การเคลื่อนที่ในด้านข้างองค์ประกอบของค่าความจุไฟฟ้าถูกกำหนดด้วยค่าความหนาของ โครงสร้าง MEMS (ซึ่งมีขนาดโดยทั่วไปอยู่ที่ $1\mu\text{m}$ และ $100\mu\text{m}$ การเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าตามโครงสร้างจึงมีค่าที่ค่อนข้างน้อย) การเพิ่มประสิทธิภาพของพื้นที่ระหว่างแผ่นตัวนำโดยที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงกระบวนการผลิตในระดับจุลภาค [24] โครงสร้างที่เป็นรูปแบบซี่หวี (Comb capacitor) จึงถูกนำมาใช้เพื่อประโยชน์ในการเพิ่มพื้นที่ซ้อนทับ และผลลัพธ์ที่เป็นเชิงเส้นมากขึ้น

ตัวเก็บประจุแบบซี่หวีใช้สำหรับการวัดการเคลื่อนที่ในแนวด้านขวาง [25] ด้านข้าง [26] และแนวบิด [27] การเคลื่อนที่ในแนวด้านขวาง แผ่นระนาบเคลื่อนเข้าใกล้หรือออกจากกัน ดังรูปที่ 2.10 เมื่อด้านบนของแผ่นตัวนำเคลื่อนที่เข้าใกล้แผ่นตัวนำที่อยู่กับที่ด้านล่าง ทำให้ค่าความจุไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำมีค่ามากขึ้น โดยค่าความจุไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น สามารถอธิบายดังนี้

$$C = N \left(\frac{\epsilon t L}{g_0} + C_{fringe} \right) \quad (2.2)$$

เมื่อ	t	คือ ความสูงของก้าน
	L	คือ ช่วงที่ความยาวแกนซี่หวีทั้งสองซ้อนทับกัน
	C_{fringe}	คือ ค่าประจุไฟฟ้าเมื่อ N แทนจำนวนของก้านทั้งหมด
	g_0	คือ ระยะห่างระหว่างซี่หวี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

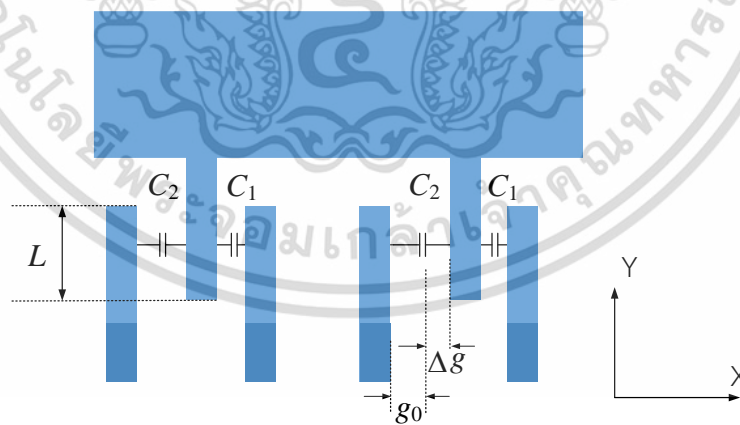


รูปที่ 2.10 การเคลื่อนที่ในแนวขวาง (แนวแกน Y) ของโครงสร้างแบบซีทีวี

สำหรับการเคลื่อนที่ด้านข้างดังรูปที่ 2.11 [28] ที่เคลื่อนที่ตามแกนในแนวแกน X ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าประจุไฟฟ้า ดังสมการที่ (2.3) และ (2.4)

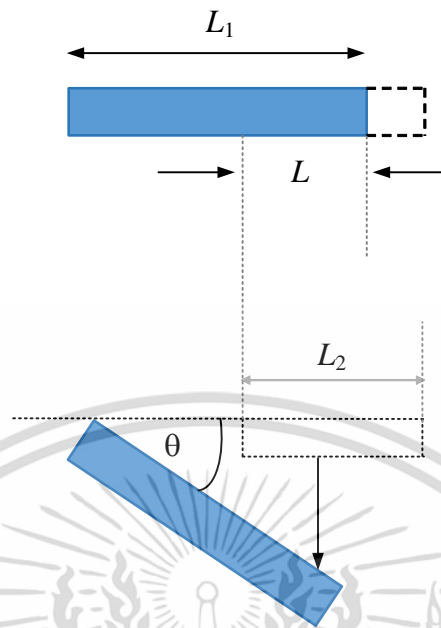
$$C_1 = C_{suf} + C_{fringe} = \frac{\epsilon L t}{g_0 + \Delta g} + C_{fringe} \tag{2.3}$$

$$C_2 = \frac{\epsilon L t}{g_0 + \Delta g} + C_{fringe} \tag{2.4}$$



รูปที่ 2.11 การเคลื่อนที่ในแนวด้านข้าง (แนวแกน x) ของเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุในรูปแบบของซีทีวี

รูปที่ 2.12 แสดงโครงสร้างลักษณะการบิด แผ่นตัวนำหนึ่งหมุนรอบด้านหนึ่งของแกน ด้านซ้อนทับที่แตกต่างกันของแผ่นตัวนำส่งผลให้ค่าทั้งสองเปลี่ยนแปลงไป โดยที่มุมเล็กๆ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความจุไฟฟ้าซึ่งกันและกันของโครงสร้างแบบซีทีวี สามารถแทนได้ด้วยสมการที่ 2.5 [27] เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

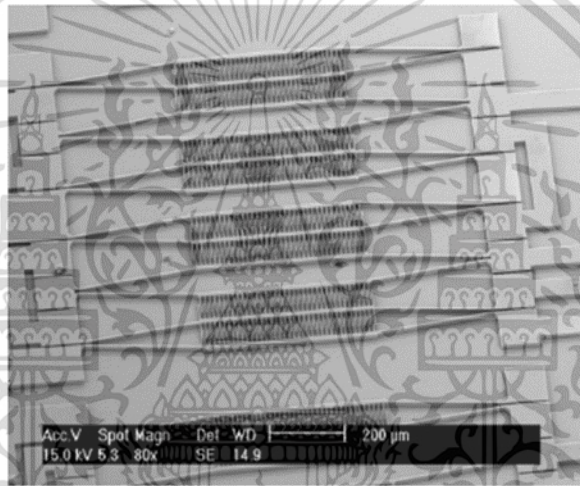
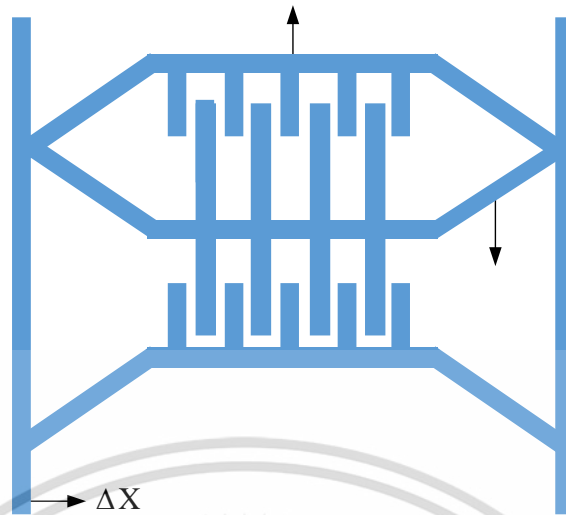


รูปที่ 2.12 ภาพตัดขวางของโครงสร้างแบบซีพรีก่อนการหมุน (แกนบน) และหลังการหมุน (แกนล่าง)

$$C_2 = N \left(\frac{eL_2(2L_1 + L_2)\theta}{g} \right) \quad (2.5)$$

เมื่อ L_1 คือ ความยาวของแกนส่วนที่อยู่นิ่งกับที่
 L_2 คือ ความยาวของแกนส่วนที่หมุน
 g คือ ระยะห่างระหว่างซีพรี
 θ คือ องศาการหมุน

ดังที่กล่าวก่อนหน้านี้ โครงสร้างชนิดซีพรีนี้สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย เช่น เซอร์ซันด์วัดความเค้นถูกนำมาใช้ในการวัดระยะทางของแกน ที่เกิดเนื่องจากความเค้นภายนอก สำหรับการนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม เช่น การวัดค่าทอร์คการหมุนของเพลลา ใบพัด และลูกแบร์ริง (Spinal fusion detection) [23], [29] เซอร์ซันด์นี้ยังถูกนำมาใช้ในทางชีวกลศาสตร์ (Biomechanical application) เช่น การตรวจสอบฟิวชั่นกระดูกสันหลัง [25] โดยความเค้นของโครงสร้างด้านข้าง เซอร์ซันด์ในรูปแบบซีพรีที่ประกอบด้วย ตัวขยาย 3 ตัวเพื่อปรับปรุงความไวของอุปกรณ์ ดังรูปที่ 2.13 [30]



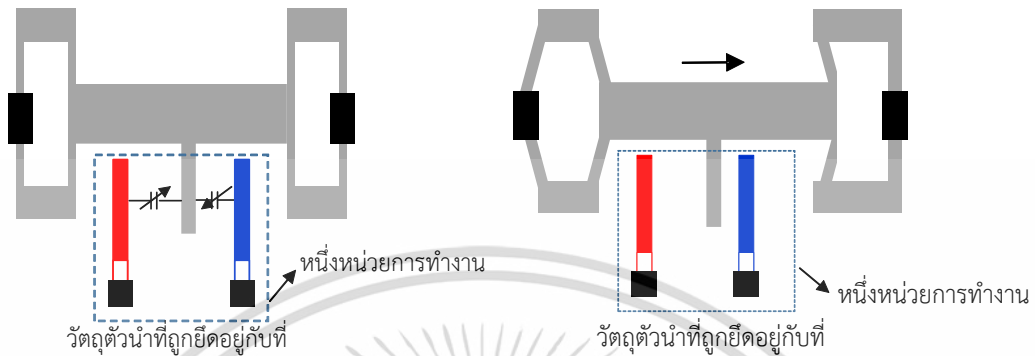
รูปที่ 2.13 โครงสร้างอย่างง่ายของเซนเซอร์วัดค่าความจุไฟฟ้าและรูปแบบอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น

โครงสร้างแบบซีวีทีที่แผ่นตัวนำเคลื่อนที่แนวด้านข้าง (แกน X) มีการนำมาประยุกต์ใช้หลากหลาย ตัวอย่างเช่น เซนเซอร์วัดแรงกดจากภายนอกจะทำให้ซีวีทีที่เป็นแผ่นตัวนำเคลื่อนที่ที่ทำให้ค่าความจุไฟฟ้าเปลี่ยน สำหรับหนึ่งเซลล์ของเซนเซอร์แบบเก็บประจุแสดงในรูปที่ 2.14 แรงทำให้คานด้านบนเคลื่อนที่ทำให้ค่าความจุไฟฟ้าด้านซ้ายลดลง ในขณะที่ค่าความจุไฟฟ้าด้านขวาเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มเซลล์ของเซนเซอร์ให้มากขึ้นจะทำให้ความไวของระบบตรวจจับไวขึ้น

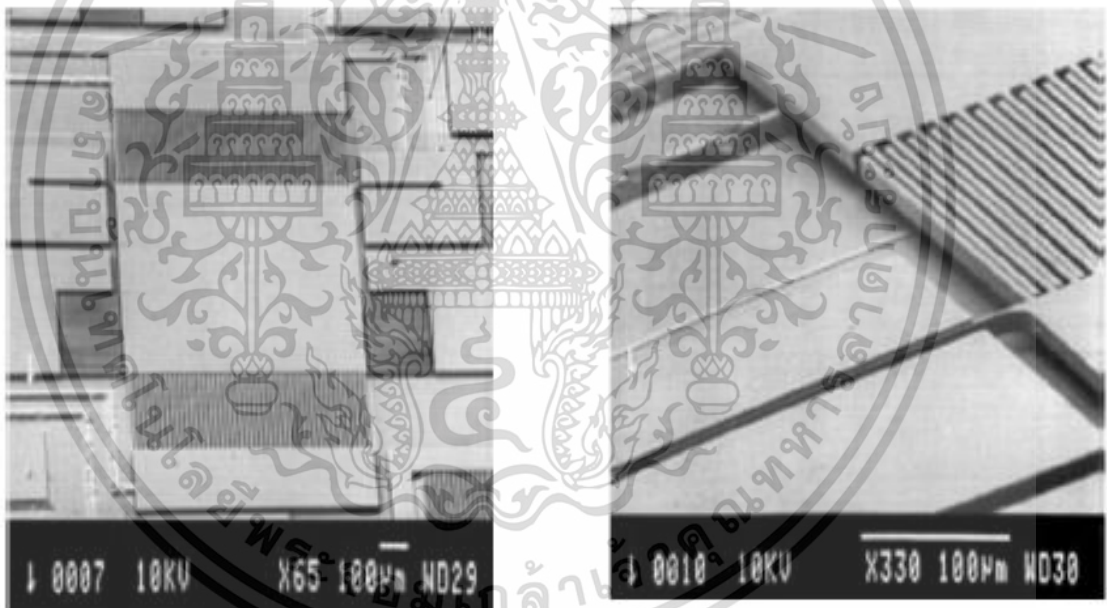
โครงสร้างแบบซีวีทีที่แผ่นตัวนำบิดตัว สามารถนำมาใช้ในการวัดความเร่ง [25] ค่าความจุไฟฟ้าในตัววัดความเร่ง MEMS ใช้การเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าในการวัดระยะของน้ำหนักเพื่อยืนยันความเร่งที่เกิดภายนอก [30]-[32] รูปที่ 2.15 แสดงการทำงานของมิเตอร์วัดความเร่งชนิดเก็บประจุที่ทำงานโดยอาศัยพื้นฐานของการบิดตัว โดยการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าเกิดจากพื้นที่ที่ซ้อนทับกันของแผ่นตัวนำที่แตกต่างกันออกไป ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับพื้นที่ซ้อนทับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้สามารถออกแบบเซนเซอร์ที่มีย่านกว้างเต็มช่วงโดยไม่มีข้อกำหนดในเรื่องของช่วงการเคลื่อนที่ของขั้วไฟฟ้า



รูปที่ 2.14 การเคลื่อนไหวแนวด้านข้างของเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุที่มีโครงสร้างแบบซี่หวี



(ก)

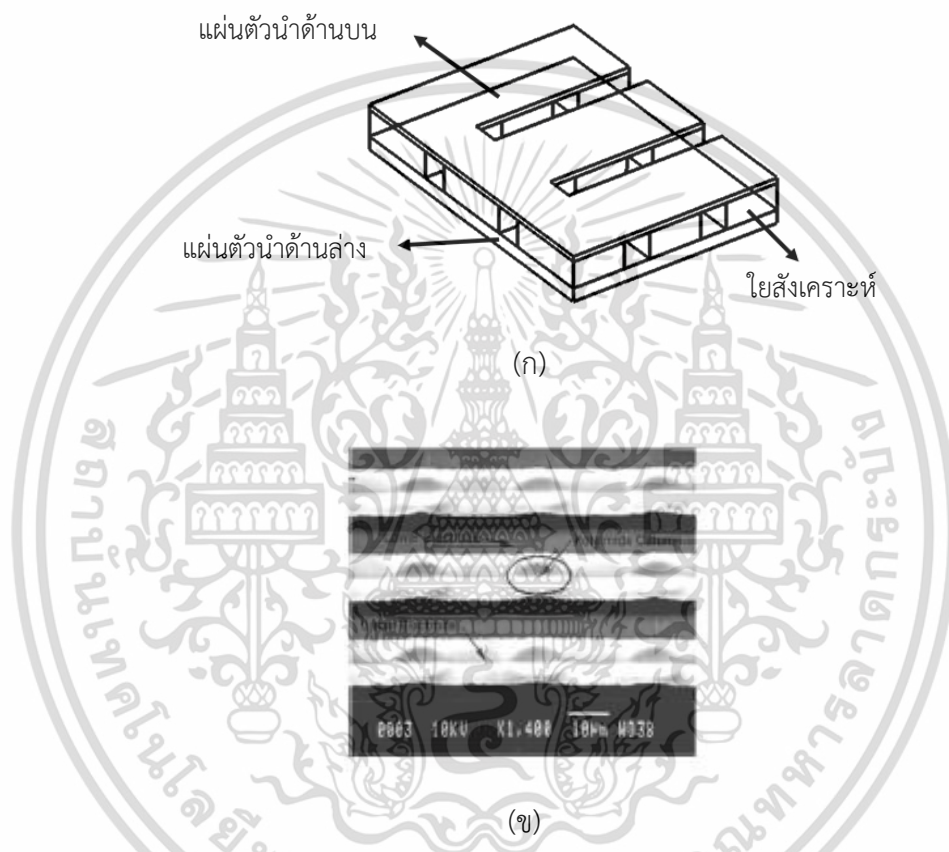
(ข)

รูปที่ 2.15 (ก) ภาพถ่ายการปิดตัวของมิเตอร์วัดความแรงในระดับจุลภาค

(ข) ภาพถ่ายแบบซูม [27]

ดังที่กล่าวถึงก่อนหน้านี้สำหรับเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุที่มีโครงสร้างแบบซี่หวีมีพื้นฐานการทำงานมาจากการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หรือช่องว่าง ในการนำไปใช้งาน การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติไดอิเล็กทริกระหว่างแผ่นตัวนำที่มีโครงสร้างคล้ายซี่หวี การเคลือบด้วยโพลีเมอร์ทำให้เซนเซอร์มีความไวต่อความชื้นเช่นเดียวกับการเคลือบด้วยสารเคมี เช่น โพลีเอทิลีน ไวนิลแอลกอฮอล์ (PEVA) ซึ่งจะเกิดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

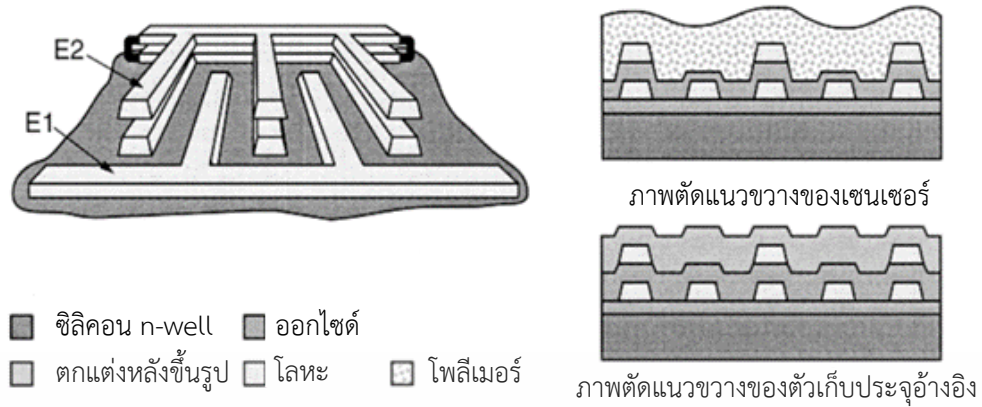
การโป่งพองเมื่อสัมผัสกับเบนซีน จึงสามารถนำมาใช้เป็นไดอิเล็กตริกของเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุในการตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของเบนซีนในอากาศได้ ดังนั้น เซนเซอร์ชนิดเก็บประจุจึงสามารถใช้ในการวัดความสัมพันธ์ของความชื้นและการจำแนกวัสดุแวดล้อม ดังในรูปที่ 2.16 เซนเซอร์ชนิดวัดความชื้นประกอบไปด้วยเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุที่มีแผ่นตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าแยกจากกันสองชั้น ด้านบนของแผ่นตัวนำเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมด้านขนานกับอีกชั้นด้านล่าง ที่ชั้นของไดอิเล็กตริกจะประกอบด้วยโพลีเอทิลีนจำนวนนับพันช่องที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับน้ำ



รูปที่ 2.16 (ก) โครงสร้างของเซนเซอร์วัดความชื้นชนิดเก็บประจุ
(ข) ภาพจุลทรรศน์ด้านบนและล่างของแผ่นตัวนำ [33]

ในรูปที่ 2.17 แสดงถึงองค์ประกอบทางเคมีของเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุซึ่งประกอบด้วยส่วนที่ใช้ทำการตรวจวัดและส่วนที่เป็นตัวเก็บประจุอ้างอิงโดยที่แต่ละส่วนโครงสร้างแบบสี่เหลี่ยมที่ทำจากโลหะสองชั้น การเปรียบเทียบของโครงสร้างแบบสี่เหลี่ยมในแต่ละชั้นโลหะ เมื่อเซนเซอร์ตรวจวัดค่าของวัตถุเป้าหมาย การซึมซับค่าจากวัสดุไปยังสารที่เป็นไดอิเล็กตริกในแผ่นฟิล์มจะส่งผลให้โพลีเมอร์ (Polymer) เกิดการพองตัวทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเพิ่มขึ้น โดยสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในเรื่องความไวในการตรวจสอบได้โดยการเพิ่มโพลีเมอร์ในย่านที่มีสนามไฟฟ้าเข้มข้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 โครงร่างของการวัดและอ้างอิงถึงตัวเก็บประจุที่สร้างจากแผ่นโลหะสองชั้นในกระบวนการ CMOS (IEEE 2002) [35]



รูปที่ 2.18 เซนเซอร์ชนิดความดันและภาพตัดขวาง (IEEE 2011) [15]

ในส่วนเพิ่มเติมสำหรับเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุที่มีโครงสร้างแบบชีทวิ การที่แผ่นตัวนำสองชั้นวางขนานกันยังคงเป็นทางเลือกที่ดีที่สุดสำหรับการวัดค่าความจุไฟฟ้าจำนวนมากๆ โดยเฉพาะเมื่อระยะช่องว่างของทั้งสองแผ่นเปลี่ยนแปลงตอบสนองกับแรงกระทำจากภายนอก ชั้นตอนนี้สามารถใช้ได้ในเซนเซอร์ MEMS ชนิดความดันดังในรูปที่ 2.18 ซึ่งแสดงภาพถ่ายด้านบนของเซนเซอร์ชนิดวัดความดันและภาพตัดขวางขององค์ประกอบของเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุประกอบด้วยแผ่นตัวนำสองแผ่น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วางตัวขนานกัน [15] สำหรับการเพิ่มหรือลดขนาดความหนาของไดอะแฟรม ลดพื้นที่ช่องว่างล้าวนแต่เป็นการทำให้เซนเซอร์ชนิดความดันสามารถทำงานได้ที่ความดันที่มีค่ามากขึ้น โดยในทางตรงกันข้าม การลดพื้นที่ช่องว่างจะทำให้ผลที่ได้ของเซนเซอร์ไม่เป็นเชิงเส้น และเกิดข้อจำกัดในการวัดกับระบบที่ไม่คงที่

2.4 บทสรุป

ในบทนี้กล่าวถึงหลักการทำงานและโครงสร้างพื้นฐานของเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุ ซึ่งรูปแบบโครงสร้างของวงจรถือเป็นส่วนหนึ่งที่สำคัญในการวัดค่าความจุทางไฟฟ้า โดยที่การนำไปประยุกต์ใช้งานจำเป็นต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ของสิ่งที่จะทำการตรวจวัดเป็นหลัก เช่น การเลือกใช้พรีอักษิมีตี้เซนเซอร์ในงานตรวจวัดที่ต้องการการวัดการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย อาทิเช่น ระดับความเข้มข้นของสารเคมี หรือการเลือกใช้เซนเซอร์ที่มีโครงสร้างแบบซีวีวีสำหรับการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงจำพวกความเค้น ที่เกิดขึ้นในงานที่ต้องตรวจวัดความดัน

บทที่ 3

การเชื่อมต่อทางอิเล็กทรอนิกส์สำหรับเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุ

3.1 บทนำ

จากที่ได้กล่าวถึงโครงสร้างและหลักการพื้นฐานของเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุในบทที่ 2 ค่าที่ได้จากเซนเซอร์เป็นค่าความจุไฟฟ้า ในการนำเซนเซอร์ไปใช้งานนั้น ต้องมีส่วนเชื่อมต่อค่าความจุไฟฟ้าที่ได้ไปเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าในรูปแบบต่างๆ ให้เหมาะกับการประยุกต์ใช้งาน ซึ่งวงจรที่ใช้เชื่อมต่อค่าความจุไฟฟ้า ควรมีคุณสมบัติดังนี้

- มีการทำงานที่เป็นเชิงเส้น
- มีการแยกกราวด์ของอินพุตจากสนามไฟฟ้า
- ไม่ไวต่อค่าความจุไฟฟ้าแฝงที่อยู่ที่ขั้วของเซนเซอร์ลงกราวด์
- สัญญาณรบกวนต่ำ
- ช่วงการทำงานของสัญญาณที่กว้างเพียงพอ
- เลือกความถี่ที่เหมาะสมกับการใช้งาน

ได้มีการนำเสนอเทคนิคการเชื่อมต่อสำหรับเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุไว้หลายรูปแบบด้วยกัน โดยในบทนี้ขอกล่าวถึงเทคนิคที่มีการนำเสนอในอดีต ซึ่งประกอบด้วย การแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดัน [1], [37] การแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นความถี่ [38] การแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นความกว้างพัลส์ [39] และการแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นกระแส [42] โดยได้กล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

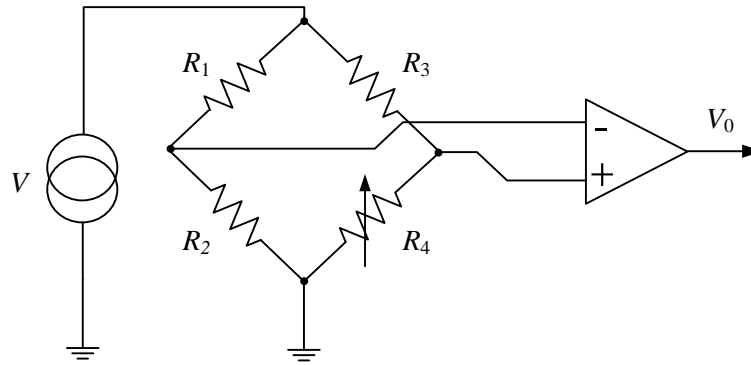
3.2 การแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดัน

ในการแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันนั้นมีเทคนิคหลายวิธีด้วยกัน ซึ่งในหัวข้อนี้ขอกล่าวถึง การนำวงจรบริดจ์และนำวงจรเรียงกระแสมาใช้ในการแปลงค่า ดังได้อธิบายในหัวข้อถัดไป

3.2.1 วงจรบริดจ์

วงจรวีทสโตนบริดจ์ (Wheatstone bridge) เป็นวงจรที่นิยมนำมาใช้ในการวัดสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนต่ำๆ แสดงดังรูปที่ 3.1 โดยที่ถ้าบริดจ์สมดุล $R_1 / R_3 = R_2 / R_4$ จะทำให้เอาต์พุตมีค่าเท่ากับศูนย์ ความแตกต่างที่มีขนาดเล็กที่เกิดขึ้นในวงจรบริดจ์จะถูกขยายด้วยอัตราขยายที่สูง ข้อดีของวงจรบริดจ์คือไม่มีผลของอุณหภูมิเนื่องจากองค์ประกอบที่เท่ากันของ $R_1 - R_2$ และ $R_3 - R_4$

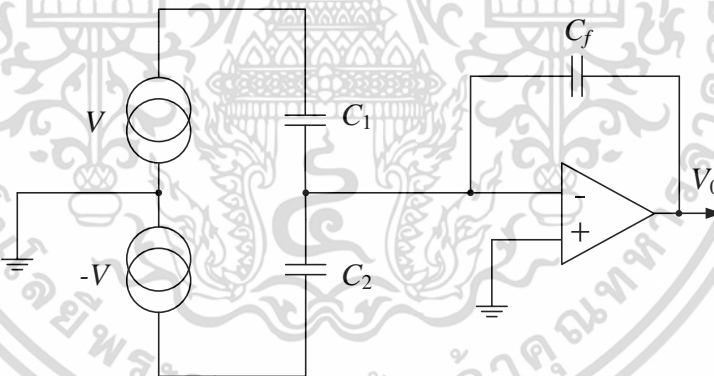
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 วงจรบริดจ์

สำหรับวงจรบริดจ์ที่สร้างขึ้นจากตัวเก็บประจุสามารถทำได้โดยการแทนที่ตัวต้านทานด้วยตัวเก็บประจุ แสดงในรูปที่ 3.2 จากวงจรในรูปที่ 3.2 แรงดันเอาต์พุต V_0 มีค่าเป็น

$$V_0 = -V \left(\frac{C_1 - C_2}{C_f} \right) \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.2 วงจรบริดจ์แบบค่าความจุไฟฟ้า

จากสมการที่ (3.1) อัตราขยายของวงจรขยายสัญญาณควรมีค่ามากเพื่อให้ได้วงจรที่มีความแม่นยำ โดยที่ค่าความจุไฟฟ้าแฝงที่อยู่ที่ขั้วอินพุตของวงจรขยายสัญญาณไม่มีผลต่อแรงดันเอาต์พุต V_0 แต่ทำให้อัตราขยายของวงจรขยายสัญญาณที่ความถี่สูงมีข้อจำกัด ค่าความจุไฟฟ้า C_1 และ C_2 ควรมีค่าเท่ากันเพื่อให้วงจรเกิดความสมดุล สำหรับวงจรบริดจ์ประเภทนี้จะใช้ตัวขับสมดุล (V และ $-V$) มากกว่าการใช้ความสามารถในการตัดสัญญาณที่โหมตรงร่วม (Common mode rejection) ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรขยายสัญญาณ ซึ่งหม้อแปลงไฟฟ้าหรือวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส สามารถใช้เป็นแหล่งจ่ายสำหรับวงจรตัวขับสมดุได้ [1]

3.2.2 วงจรเรียงกระแส

โครงสร้างของวงจรวัดผลต่างของค่าความจุไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 3.3 [37] โดยวัดค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปจากค่าตั้งต้น ซึ่งประกอบด้วยตัวเก็บประจุ 2 ตัว โดยตัวที่ 1 เป็นตัวเก็บประจุจากเซนเซอร์และตัวที่ 2 เป็นตัวเก็บประจุอ้างอิง สัญญาณกระตุ้น $V = V_{amp} \cos(\omega t + \phi)$ ถูกป้อนเข้าไปในวงจร บนพื้นฐานของการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าทำให้เกิดกระแสขึ้น ถ้าตัวเก็บประจุอ้างอิงและตัวเก็บประจุจากเซนเซอร์แทนด้วย C กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุทั้ง 2 แสดงได้ดังนี้

$$i_r = C \frac{dV_{amp}}{dt} \quad (3.2)$$

$$i_s = (C + \Delta C) \frac{dV_{amp}}{dt} \quad (3.3)$$

เมื่อ V_{amp} คือ แอมพลิจูดของแรงดันกระตุ้น

ΔC คือ การเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้

กระแส i_s และ i_r ต่างถูกป้อนเข้าไปยังวงจรขยาย ซึ่งวงจรขยายแต่ละวงจรประกอบด้วยออปแอมป์ 1 ตัว ตัวเก็บประจุ C_f 1 ตัวและตัวต้านทาน R_f 1 ตัว โดยกำหนดความถี่ของสัญญาณกระตุ้นมีค่า $\omega \gg \frac{1}{C_f R_f}$ จะทำให้ได้แรงดันเอาต์พุตจากตัวเก็บประจุอ้างอิง $V_{out,r}$ และแรงดันเอาต์พุตจากเซนเซอร์ $V_{out,s}$ ดังนี้

$$V_{out,r} = -\frac{C}{C_f} V \quad (3.4)$$

$$V_{out,s} = -\frac{(C + \Delta C)}{C_f} V \quad (3.5)$$

จากนั้นนำแรงดัน $V_{out,r}$ และ $V_{out,s}$ ผ่านไดโอดเพื่อทำการเรียงกระแส ซึ่งในบทความนี้ใช้ PMOS และ NMOS ทำหน้าที่เป็นไดโอด สัญญาณที่ได้หลังผ่านไดโอดจะเป็นแรงดันผลต่าง $V_{diff} = V_1 - V_2$ ซึ่งมีค่าเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{diff} = \pm \frac{\Delta C}{C_f} \alpha V_{amp} \quad (3.6)$$

เมื่อ α คือ แฟคเตอร์ลดทอนสัญญาณจากวงจรเรียงกระแส

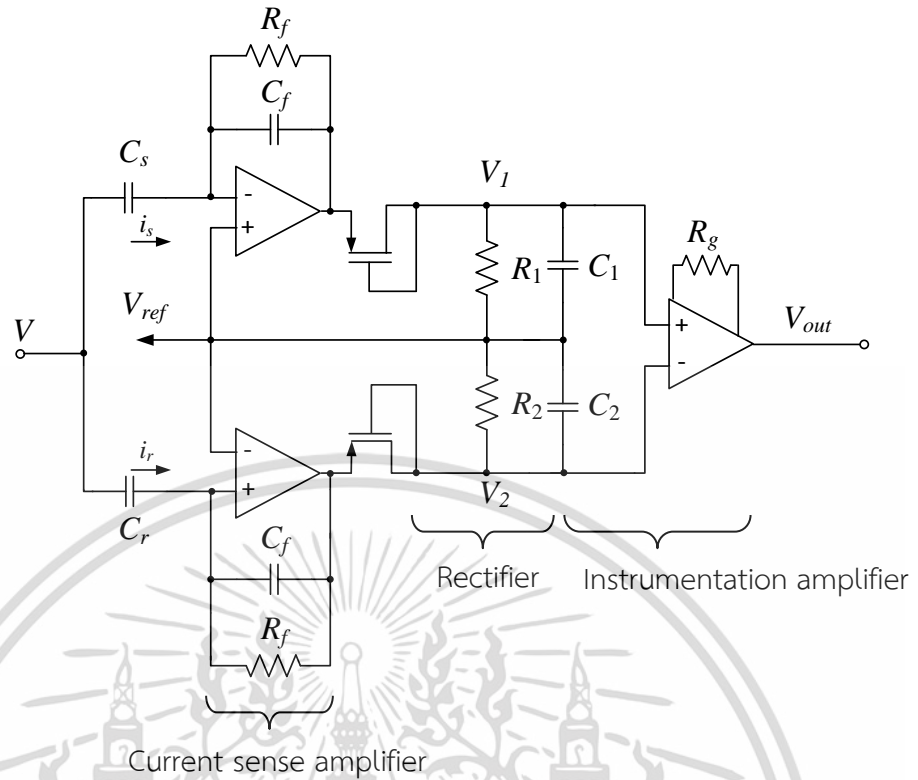
แรงดัน V_{diff} ถูกป้อนเข้าไปยังวงจรขยายอินสตรูเมนต์ (Instrumentation amplifier) ซึ่งประกอบด้วย ออปแอมป์ 3 ตัว ตัวต้านทานคงที่ 6 ตัว และตัวต้านทานปรับค่าได้ 1 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 3.4 เพื่อทำหน้าที่ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของผลต่าง V_1 และ V_2 โดยสมการแรงดันเอาต์พุตของวงจรขยายอินสตรูเมนต์แสดงได้ดังนี้

$$V_{out} = \left(1 + \frac{2R}{R_g}\right) V_{diff} \quad (3.7)$$

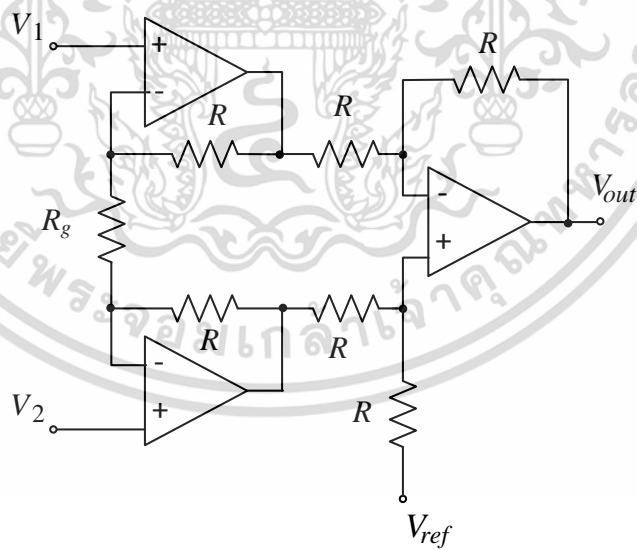
และเมื่อแทนค่า V_{diff} ในสมการที่ (3.6) ลงในสมการที่ (3.7) จะได้

$$V_{out} = \left(1 + \frac{2R}{R_g}\right) \left(\pm \frac{\Delta C}{C_f} \alpha V_{amp}\right) \quad (3.8)$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่าการปรับค่าอัตราขยายของวงจรขยายอินสตรูเมนต์และการเพิ่มหรือลดความไวของวงจรสามารถทำได้โดยการปรับค่า R_g โดยที่ค่าความไวของวงจรยังสามารถเพิ่มหรือลดได้ด้วยการปรับค่า C_f ด้วยเช่นกัน แต่ในกรณีนี้จำเป็นต้องมีการปรับค่าแรงดันกระตุ้นให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม เนื่องจากการที่ค่า C_f น้อยๆ จะทำให้ค่าความจุไฟฟ้าแฝงที่อยู่ที่ขั้วของเซนเซอร์ลงกราวด์มีผลมากขึ้นต่อวงจรโดยรวม



รูปที่ 3.3 วงจรวัดค่าความจุไฟฟ้าโดยใช้วงจรเรียงกระแส

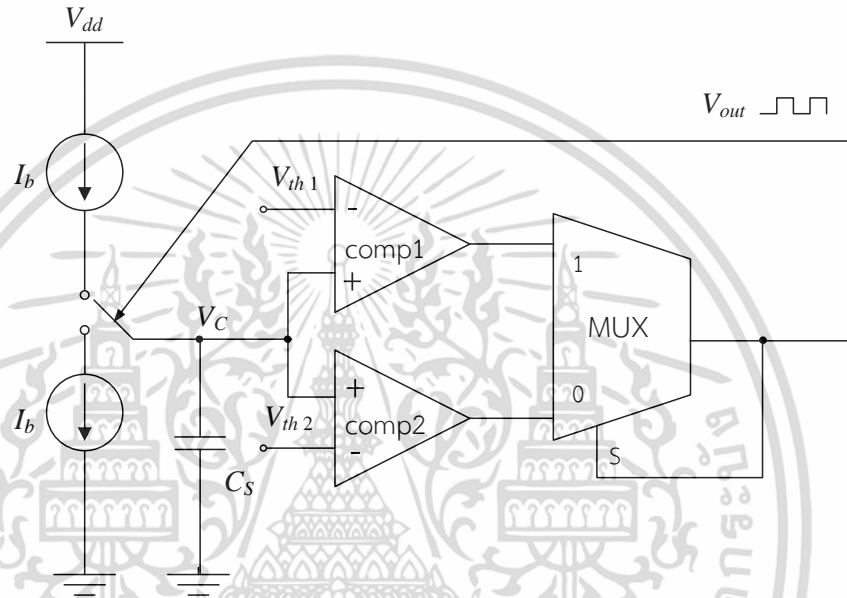


รูปที่ 3.4 วงจรขยายอินสทรูเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นความถี่

การเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้าเป็นความถี่เป็นเทคนิคอย่างง่ายและใช้พลังงานน้อยกว่าการแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดัน สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะเหมือนสัญญาณดิจิทัล จึงไม่ต้องแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล ตัวอย่างของวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นความถี่แสดงในรูปที่ 3.5 [38]



รูปที่ 3.5 วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นความถี่

แหล่งจ่ายกระแส I_b ทำหน้าที่ประจุและคายประจุ C_S ซึ่งเป็นค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากเซนเซอร์ แรงดันเอาต์พุต V_{out} ทำหน้าที่ควบคุมสวิตช์ วงจรเปรียบเทียบทำหน้าที่เปรียบเทียบแรงดัน V_C ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_S โดยประกอบด้วยวงจรเปรียบเทียบ 2 วงจร ทำการเปรียบเทียบแรงดันขีดเริ่มต้นด้านบน V_{th2} และแรงดันขีดเริ่มต้นด้านล่าง V_{th1} เพื่อการแปลงค่าแรงดัน V_C ที่เป็นสัญญาณสามเหลี่ยมให้เป็นสัญญาณสี่เหลี่ยมและค่าตัวชี้เซลล์สามารถปรับได้โดยกระแส I_b ความถี่เอาต์พุต f_{osc} ของแรงดัน V_{out} สามารถเขียนได้เป็น

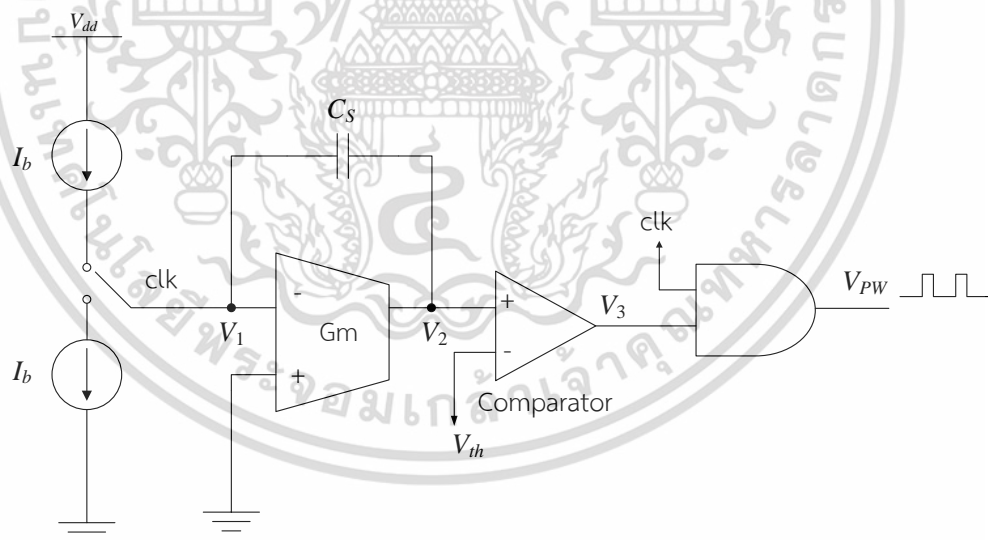
$$f_{osc} = \frac{1}{2(V_{th2} - V_{th1})} \frac{1}{C_S} \quad (3.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอาต์พุตจากวงจรเปรียบเทียบทั้งสองตัวถูกต่อเข้ากับมัลติเพล็กซ์เซอร์ โดยเมื่อแรงดัน V_C มีค่าลดลง เนื่องจากการคายประจุ มัลติเพล็กซ์เซอร์จะเลือกสัญญาณจากวงจรเปรียบเทียบ comp1 เป็นแรงดันเอาต์พุต V_{out} ในทางกลับกันเมื่อแรงดัน V_C มีค่าเพิ่มขึ้นจากการประจุ มัลติเพล็กซ์เซอร์จะเลือกสัญญาณจากวงจรเปรียบเทียบ comp2 ซึ่งการทำงานของวงจรจะอย่างต่อเนื่องทำให้ได้สัญญาณในรูปแบบของความถี่ที่เปลี่ยนแปลงตามค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์ที่เปลี่ยนไป

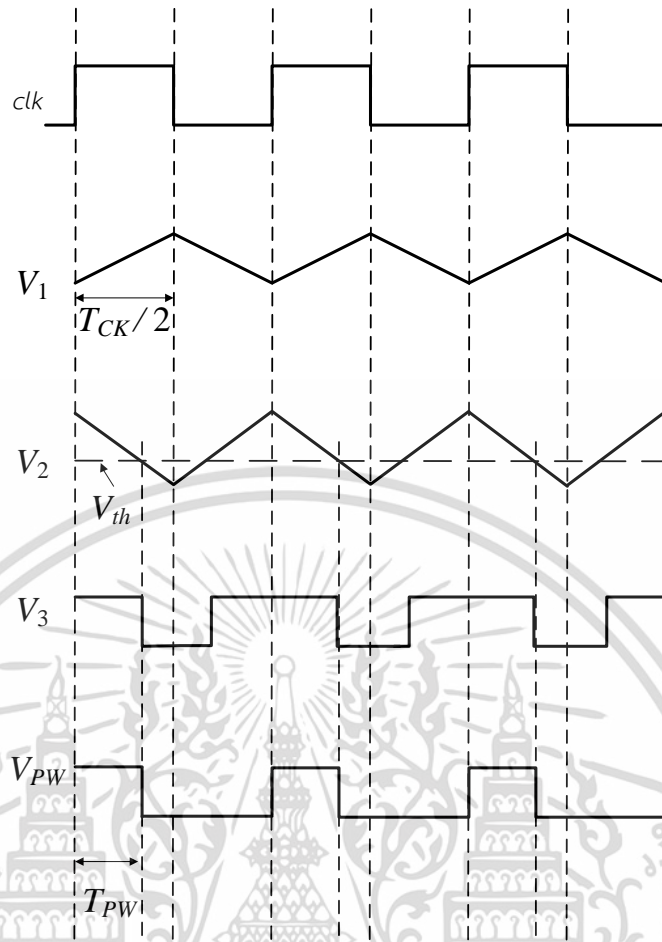
3.4 การแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นความกว้างพัลส์

โครงสร้างอย่างง่ายของวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นความกว้างพัลส์แสดงรูปที่ 3.6 [39] โดยความกว้างพัลส์มีค่าเป็นสัดส่วนเชิงเส้นกับค่าความจุไฟฟ้า จากวงจรในรูปที่ 3.6 กระแส I_b ใช้ทำหน้าที่ประจุและคายประจุให้กับตัวเก็บประจุ C_s ทำให้ได้แรงดัน V_1 มีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้แรงดัน V_2 มีค่าตรงกันข้ามกับแรงดัน V_1 และเมื่อนำแรงดัน V_2 มาเปรียบเทียบกับแรงดันขีดจำกัดเริ่ม V_{th} ด้วยวงจรเปรียบเทียบสัญญาณซึ่งได้แรงดันเอาต์พุต V_3 ของวงจรเปรียบเทียบเป็นสัญญาณสี่เหลี่ยม ที่สัญญาณนาฬิกา clk มีสถานะเป็น “1” แอนเดท (AND gate) จะให้เอาต์พุต V_{PW} ตามแรงดัน V_3 เมื่อสัญญาณนาฬิกา clk มีสถานะเป็น “0” ตัวเก็บประจุ C_s จะถูกคายประจุ ที่เอาต์พุต V_{PW} ของแอนเดท จะให้แรงดันเป็นศูนย์ โดยกราฟการทำงานของวงจรในรูปที่ 3.6 แสดงได้ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.6 วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นความกว้างพัลส์อย่างง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 กราฟการทำงานของวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นความกว้างพัลส์อย่างง่าย

โดยค่าความกว้างพัลส์ T_{PW} ของแรงดันเอาต์พุต V_{PW} มีความสัมพันธ์กับค่าความจุไฟฟ้า C_S เป็น

$$T_{PW} = \frac{C_S}{I_b} V_{th} \quad (3.10)$$

ข้อดีของวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นความกว้างพัลส์คือสัญญาณที่ได้เป็นสัญญาณดิจิทัล จึงไม่จำเป็นต้องมีวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล ทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายในการออกแบบวงจร นอกจากนี้สัญญาณเอาต์พุตที่ได้อยังสามารถนำไปใช้งานกับไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ง่ายอีกด้วย ส่วนข้อเสียของวงจรงี้กล่าวคือความถี่ที่ได้ไม่สูงมากนัก ซึ่งส่วนมากจะไม่เกิน 100kHz

3.5 การแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นกระแส

โครงสร้างอย่างง่ายของหลักการนี้แสดงอยู่ในรูปที่ 3.8 ในวงจรนี้สวิตช์จะถูกควบคุมโดยสัญญาณนาฬิกา clk ที่มีคาบเวลา $T = (T_D + T_M)$ โดยช่วงเวลาคายประจุ T_D สวิตช์ S_1 และ S_2 จะอยู่ในสถานะปิด กระแส i_1 และ i_2 จะมีค่าเท่ากัน ทำให้ i_{out} มีค่าเท่ากับศูนย์ วงจรขยายผลต่างกระแสกำหนดให้กราวด์เสมือนที่อินพุต ทำให้ตัดผลกระทบจากค่าความจุไฟฟ้าแฝงที่โหนดนี้ [42] เมื่อสวิตช์ 2 ตัว (S_1 และ S_2) อยู่ในสถานะเปิดซึ่งเป็นช่วงเวลาการวัด T_M กระแสอินพุต i_{in} จะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนตามอัตราส่วนของตัวเก็บประจุทั้งสอง และกระแสเอาต์พุตของวงจขยายกระแสผลต่างมีค่าเป็น

$$i_{out} = i_{in} \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} \quad (3.14)$$

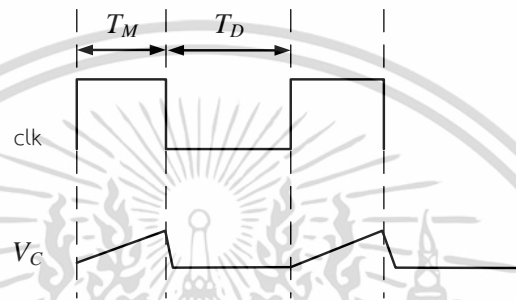
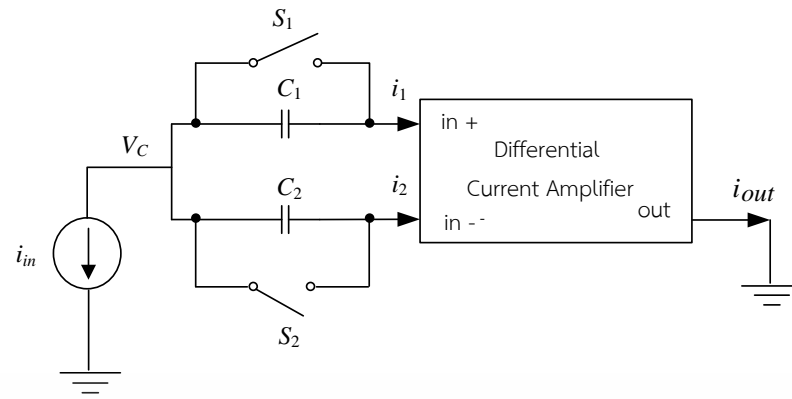
เมื่อ C_1 และ C_2 คือ ตัวเก็บประจุที่ใช้สำหรับการวัด

i_{in} คือ กระแสอินพุต

i_{out} คือ กระแสเอาต์พุต

โดยที่สวิตช์ S_1 และ S_2 จะเปิดและปิดเป็นช่วงเวลาเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดสถานะอิมิตัวของวงจร ซึ่งเกิดจากการเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นของแรงดันที่ตกคร่อมเซนเซอร์ เนื่องจากกระแสอินพุต i_{in} คงที่

ข้อดีของวงจรนี้คือ การบวกหรือการลบสัญญาณกระแสไฟฟ้าสามารถทำได้ง่าย นอกจากนี้การขยายกระแสทำได้โดยการใช้วงจรสะท้อนกระแสเพื่อเพิ่มความไว [40] ดังนั้นการแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นกระแสจึงถูกนำไปใช้ในการเพิ่มความไวและลดความซับซ้อนของวงจร สามารถทำงานได้ด้วยแรงดันไฟต่ำและใช้กำลังไฟต่ำ [41] ในทางกลับกันค่าความไวต่อการตอบสนองค่าความจุไฟฟ้าแฝงที่โหนดร่วมของซัวอิเล็กทรอนิกส์ ควรมีค่าน้อยกว่าค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้สำหรับการใช้งานที่เหมาะสม ข้อเสียของวงจรดังกล่าวคือ การที่กระแสสามารถรั่วไหลออกไปยังสวิตช์ ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้ไม่เป็นเชิงเส้น



รูปที่ 3.8 วงจรแปลงค่าความจุเป็นกระแส

3.6 บทสรุป

ในบทนี้กล่าวถึงเทคนิคการแปลงค่าความจุทางไฟฟ้าในรูปแบบต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย การแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดัน การแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นความถี่ การแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็น ความกว้างพัลส์และการแปลงค่าความจุทางไฟฟ้าเป็นกระแส ซึ่งแต่ละวิธีต่างมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกัน สามารถสรุปข้อดีข้อเสียแต่ละเทคนิคได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ข้อดีข้อเสียของแต่ละเทคนิคการแปลงค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุ

เทคนิคแปลงค่าความจุไฟฟ้า	ข้อดี	ข้อเสีย
การแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดัน	- วงจรมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน	- วงจรถูกรบกวนด้วยสภาพแวดล้อมได้ง่าย
การแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นความถี่	- มีโครงสร้างที่ง่าย ใช้พลังงานต่ำ - เอาต์พุตของวงจรเสมือนสัญญาณดิจิทัล	- วงจรถูกรบกวนด้วยสภาพแวดล้อมได้ง่าย
การแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นความกว้างพัลส์	- ใช้พลังงานน้อย เมื่อเทียบกับชนิดแรงดัน - มีความแม่นยำสูง	- ความถี่ใช้งานไม่สูงมาก (ประมาณ 100 kHz)
การแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นกระแส	- มีโครงสร้างอย่างง่าย - การเพิ่ม/ลดกระแสเพื่อปรับค่าความไวของวงจรสามารถทำได้ง่าย	- กระแสอาจมีการรบกวน ทำให้การทำงานของเซนเซอร์ไม่เป็นเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นดิวตี้ไซเคิลที่นำเสนอ

4.1 บทนำ

จากการที่เซนเซอร์ชนิดเก็บประจุมีบทบาทสำคัญในการวัดปริมาณทางกายภาพต่างๆ อาทิ เช่น ระยะทาง ความเร่ง แรงดัน ความชื้น อัตราการไหลหรือกระทั่งระดับของของเหลว จึงมีการนำเสนอเทคนิคต่างๆ มากมายเพื่อที่จะนำค่าที่ได้จากเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุออกมาใช้ ตามที่มีการกล่าวถึงไปแล้วในบทก่อนหน้า อย่างไรก็ตาม เทคนิคดังกล่าวจำเป็นต้องอาศัยอุปกรณ์พิเศษเฉพาะที่ไม่สามารถหาซื้อได้ตามท้องตลาด ทำให้วงจรดังกล่าวมีราคาที่สูงเกินไป อีกทั้งสมรรถนะการทำงานของวงจรในรูปแบบของดิวตี้ไซเคิลยังทำได้เพียงแค่ 50% เท่านั้น [13]

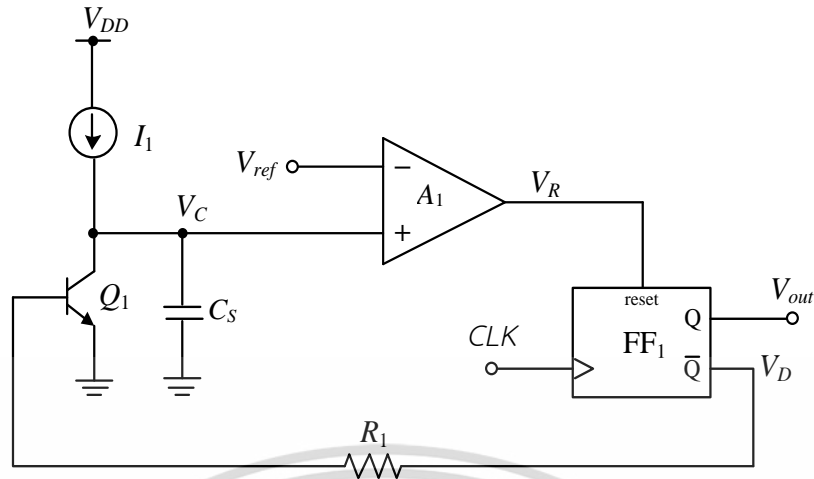
การนำเสนอในบทนี้จึงกล่าวถึงการออกแบบวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นดิวตี้ไซเคิลสำหรับเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยวงจรที่นำเสนอมีโครงสร้างอย่างง่าย ไม่มีความซับซ้อน ค่าดิวตี้ไซเคิลที่ได้สามารถมีค่าได้มากกว่า 50% โดยไม่ต้องมีการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของวงจร อีกทั้งอุปกรณ์ยังสามารถหาซื้อได้ง่ายในท้องตลาด พร้อมทั้งวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของวงจร รวมถึงการทดสอบการทำงานของวงจรด้วยการต่อวงจรจริง

4.2 หลักการทำงานของวงจร

วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นดิวตี้ไซเคิลโดยอาศัยเทคนิคการมอดูเลตแบบความกว้างพัลส์ แสดงดังรูปที่ 4.1 วงจรที่นำเสนอประกอบด้วย แหล่งจ่ายกระแสคงที่ I_1 ตัวเปรียบเทียบ A_1 ที่ทำหน้าที่ในการเปรียบเทียบแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างตัวเก็บประจุ C_s เทียบกับแรงดันอ้างอิง V_{ref} ฟลิปฟลอป FF_1 และทรานซิสเตอร์ Q_1 สามารถอธิบายวงจรได้ดังนี้

ค่ากระแสคงที่ I_1 ถูกใช้เพื่อชาร์จตัวเก็บประจุ C_s โดยค่าแรงดัน V_C ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_s มีค่าเพิ่มขึ้นดังสมการที่ (4.1)

$$V_C = \frac{I_1}{C_s} t \quad (4.1)$$



รูปที่ 4.1 วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นดิจิทัลที่ใช้เคล็ดสำหรับเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุ

วงจรเปรียบเทียบแรงดัน A_1 ทำหน้าที่เปรียบเทียบแรงดันอ้างอิง V_{ref} กับ V_C โดยเมื่อแรงดัน V_C มีค่าน้อยกว่าแรงดันอ้างอิง V_{ref} ค่าแรงดันเอาต์พุต V_R ของวงจรเปรียบเทียบ A_1 จะมีสถานะเป็น “0” เอาต์พุต Q และ \bar{Q} ของฟลิปฟล็อป FF_1 มีค่าเป็น “1” และ “0” ตามลำดับ ตัวต้านทาน R_1 และทรานซิสเตอร์ Q_1 ต่อเข้ากับเอาต์พุต \bar{Q} ที่สถานะ $\bar{Q} = “0”$ ทรานซิสเตอร์ Q_1 ไม่ทำงาน ทำให้ทำหน้าที่เหมือนสวิตช์เปิด กระแส I_1 จึงชาร์จตัวเก็บประจุ C_S จนกระทั่งแรงดัน V_C ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับแรงดัน V_{ref} ค่าแรงดันเอาต์พุต V_R ของวงจรเปรียบเทียบ A_1 จะมีสถานะเป็น “1” ทำให้เขียนสมการได้เป็น

$$V_C = V_{ref} = \frac{I_1}{C_S} t_1 \quad (4.2)$$

เมื่อ V_{ref} คือ แรงดันอ้างอิง ที่ใช้เปรียบเทียบกับค่าแรงดัน V_C

t_1 คือ เวลาในการชาร์จตัวเก็บประจุ C_S

เมื่อแรงดัน V_R มีสถานะเป็น “1” ทำให้ฟลิปฟล็อป FF_1 มีสถานะรีเซ็ต เอาต์พุตของ FF_1 มีสถานะเป็น $Q = “0”$ และ $\bar{Q} = “1”$ ซึ่งที่สถานะ $\bar{Q} = “1”$ ทรานซิสเตอร์ Q_1 จะทำงานทำหน้าที่เหมือนสวิตช์ปิด ทำให้ตัวเก็บประจุ C_S คายประจุ แรงดัน V_C จึงมีค่าเป็นศูนย์ และที่ขอบขาขึ้นของสัญญาณนาฬิกาถูกกักไปทำให้สถานะเอาต์พุตของฟลิปฟล็อป FF_1 เป็น $Q = “1”$ และ $\bar{Q} = “0”$ ทรานซิสเตอร์ Q_1 จะหยุดทำงาน ทำให้กระแส I_1 ชาร์จเข้าตัวเก็บประจุ C_S อีกครั้ง โดยจะเห็นได้ว่าความถี่ของแรงดันเอาต์พุตของ V_{out} จะมีค่าเท่ากับความถี่ของสัญญาณนาฬิกา ขณะที่ ΔT คือค่าเวลาในการชาร์จที่สามารถเขียนได้เป็นสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta T = \frac{C_S}{I_1} V_{ref} \quad (4.3)$$

จากสมการที่ (4.3) จะเห็นได้ว่า ΔT มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับค่าความจุไฟฟ้า C_S ที่วัดได้จากเซนเซอร์ โดยมีค่าแฟคเตอร์ V_{ref}/I_1 ซึ่งสามารถปรับค่าแฟคเตอร์ให้เหมาะกับช่วงการใช้งานของวงจรได้ จากรูปที่ 4.2 การหาค่าดิวิตีไซเคิล D สามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$D = \frac{T_1}{T_2} \times 100\% \quad (4.4)$$

เมื่อ T_1 คือ ความกว้างพัลส์ของสัญญาณ
 T_2 คือ คาบเวลาของสัญญาณสี่เหลี่ยม



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของการหาค่าดิวิตีไซเคิล

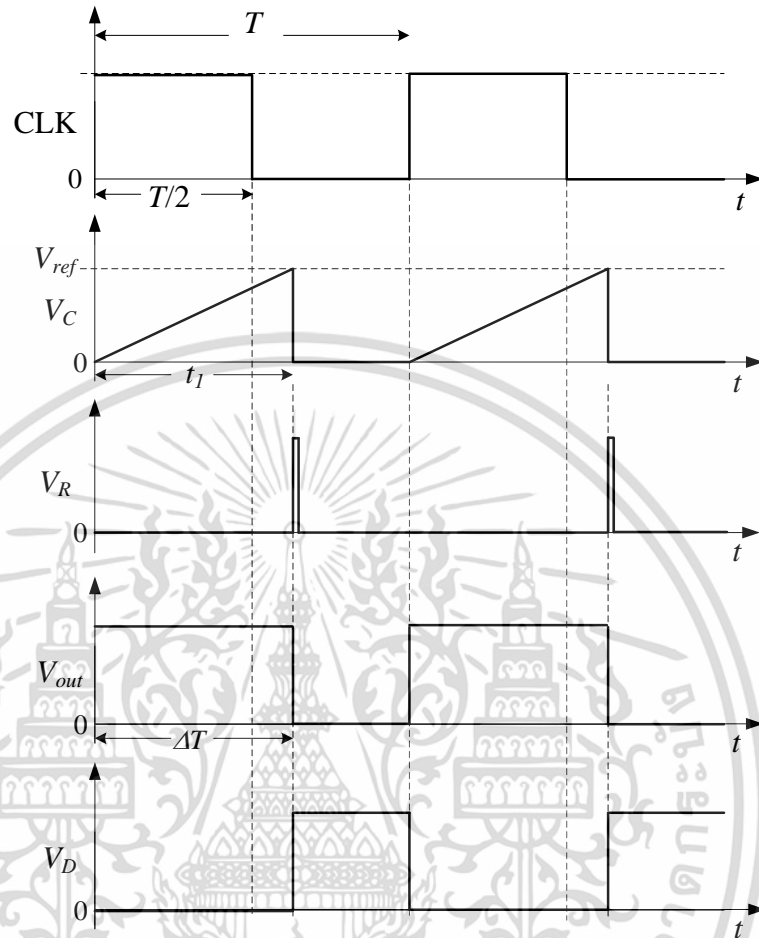
ถ้ากำหนดให้ T เป็นคาบเวลาของสัญญาณนาฬิกา CLK ในรูปที่ 4.1 และจากสมการที่ (4.3) ดังนั้นค่าดิวิตีไซเคิลของแรงดันเอาต์พุต V_{out} สามารถเขียนได้เป็น

$$D = \frac{\Delta T}{T} \times 100\% = \frac{C_S V_{ref}}{I_1 T} \times 100\% \quad (4.5)$$

จากสมการที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าค่าดิวิตีไซเคิลมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้จากเซนเซอร์ C_S นอกจากนี้ยังสามารถปรับเปลี่ยนช่วงของค่าความจุไฟฟ้า C_S ได้โดยการปรับค่าแฟคเตอร์ V_{ref}/I_1 ซึ่งสามารถปรับค่าแฟคเตอร์ให้เหมาะกับช่วงการใช้งานของวงจรได้ จากรูปที่ 4.2 การหาค่าดิวิตีไซเคิล D สามารถหาได้จากความสัมพันธ์

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เตอร์ (V_{ref}/I_1) หรือความถี่ของสัญญาณนาฬิกา ($1/T$) ได้อีกด้วย สำหรับสัญญาณแสดงการทำงานในแต่ละจุดของวงจรแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 สัญญาณในแต่ละจุดของวงจรในรูปที่ 4.1

4.3 การวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของวงจร

จากหลักการทำงานของวงจรที่นำเสนอในหัวข้อที่ 4.2 เอาต์พุตที่ได้อยู่ในรูปของดิวิตีไซเคิล ที่มีค่าเป็นสัดส่วนกับค่าความจุไฟฟ้า C_s โดยสามารถปรับแฟคเตอร์ (V_{ref}/I_1) หรือความถี่ของสัญญาณนาฬิกาเพื่อปรับเปลี่ยนช่วงการใช้งานค่าความจุไฟฟ้า C_s โดยแรงดัน V_{ref} ที่เหมาะสมในการนำมาใช้เปรียบเทียบกับแรงดัน V_C ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_s ควรอยู่ในช่วง

$$V_{ref(max)} < V_{CC} - V_{om} \quad (4.6ก)$$

และ

$$V_{ref(min)} > \frac{1}{3} V_{CC} \quad (4.6ข)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ V_{om} คือ แรงดันต่ำสุดที่ยังคงทำให้แหล่งจ่ายกระแสคงที่ทำงาน
 V_{CC} คือ แรงดันจากแหล่งจ่ายแรงดันที่จ่ายให้กับวงจร

และจากสมการที่ (4.5) ค่าดิวิตีไซเคิลเป็นเปอร์เซ็นต์ของสัดส่วนความกว้างพัลส์ต่อคาบเวลาของสัญญาณนาฬิกาซึ่งมีค่าไม่เกิน 100% ดังนั้นเงื่อนไขในการกำหนดค่าพารามิเตอร์จะเป็นดังนี้

$$\frac{C_S V_{ref}}{I_1 T} < 1 \quad (4.7ก)$$

หรือ
$$\frac{C_S V_{ref} f_{CK}}{I_1} < 1 \quad (4.7ข)$$

เมื่อ f_{CK} คือ ความถี่ของสัญญาณนาฬิกา

4.4 การทดสอบและผลการทดสอบวงจรที่นำเสนอ

วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นดิวิตีไซเคิลของเซนเซอร์แบบเก็บประจุในรูปที่ 4.1 ได้ถูกนำมาต่อเพื่อทดสอบสมรรถนะในการใช้งานจริง โดยใช้อุปกรณ์ตามตารางที่ 4.1 กำหนดเงื่อนไขในการทดสอบเป็น 4 กรณีตามตารางที่ 4.2 ใช้แหล่งจ่ายแรงดัน $V_{CC} = +5V$ โดยในแต่ละกรณีที่ทำกรทดสอบได้มีการเปลี่ยนค่าแรงดันอ้างอิง V_{ref} กระแส I_1 และความถี่ของสัญญาณนาฬิกาซึ่งมีผลต่อช่วงการวัดค่าความจุไฟฟ้าตามสมการที่ (4.5)

ตารางที่ 4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบวงจรรูปที่ 4.1

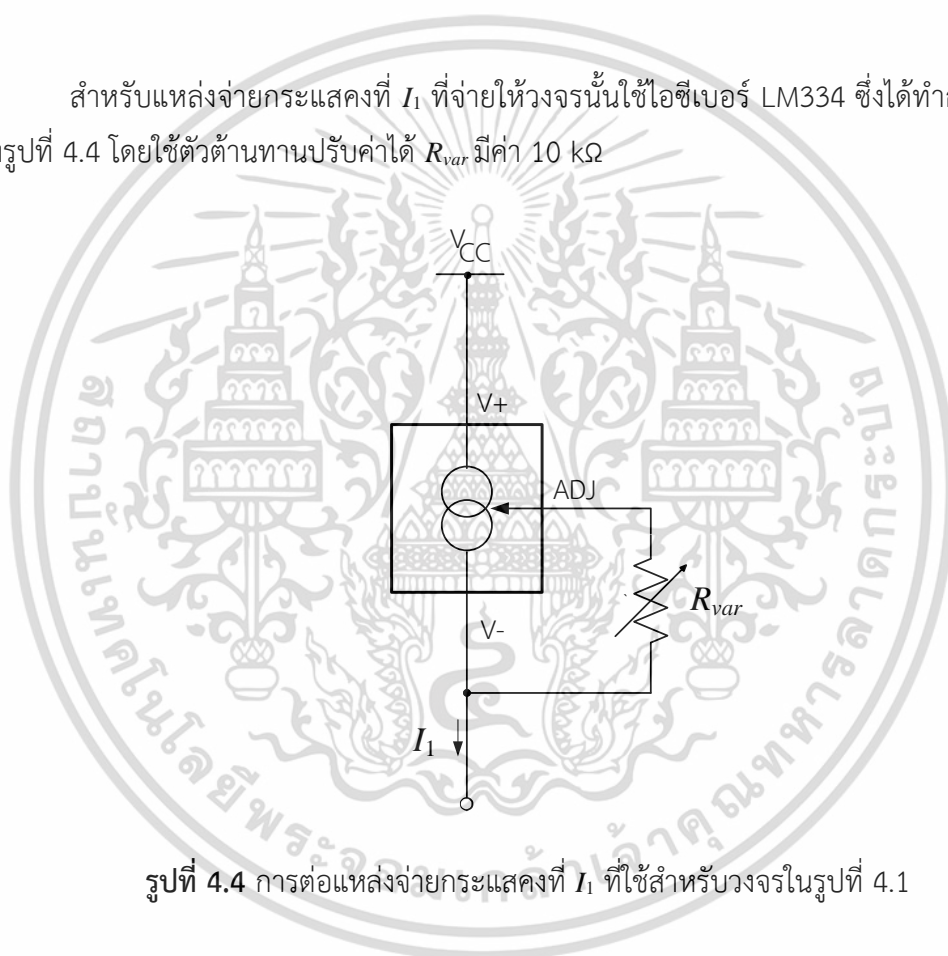
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	เบอร์
แหล่งจ่ายกระแสคงที่	LM334
วงจรเปรียบเทียบ	LM358
ฟลิปฟล็อป	CD4027
ทรานซิสเตอร์	C9013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์สำหรับเลือกย่านการทำงานของค่าความจุไฟฟ้า (C_s)

กรณี	V_{ref}	I_1	Clock frequency	Minimum		Maximum	
				C_s	Duty cycle	C_s	Duty cycle
1	3V	250 μ A	1kHz	6 nF	9.2%	70 nF	89.6%
2	3V	400 μ A	1kHz	5.8 nF	6%	128.6 nF	98%
3	3V	400 μ A	5kHz	0.1 nF	6.5%	22.78 nF	93.5%
4	3.5V	500 μ A	5kHz	1.15 nF	12%	25.1 nF	97.5%

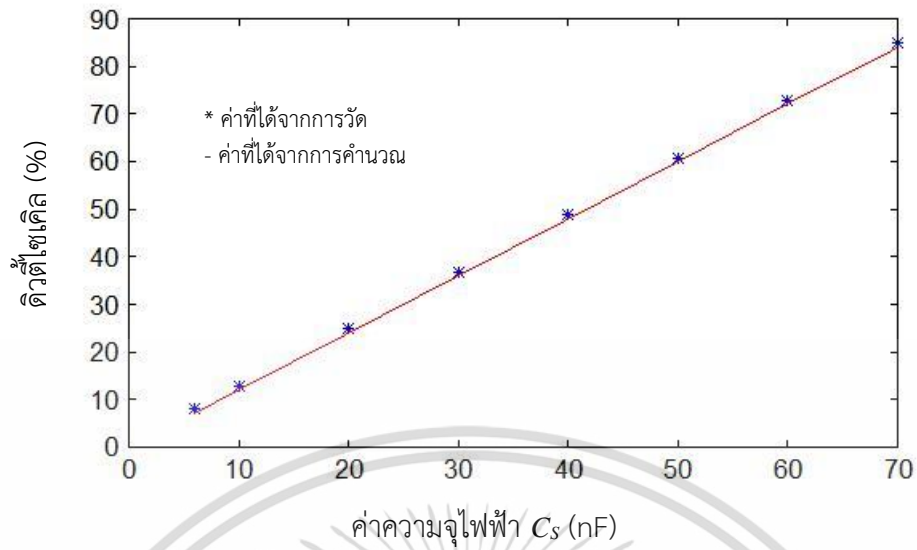
สำหรับแหล่งจ่ายกระแสคงที่ I_1 ที่จ่ายให้วงจรนั้นใช้ไอซีเบอร์ LM334 ซึ่งได้ทำการต่อวงจรดังรูปที่ 4.4 โดยใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้ R_{var} มีค่า 10 k Ω



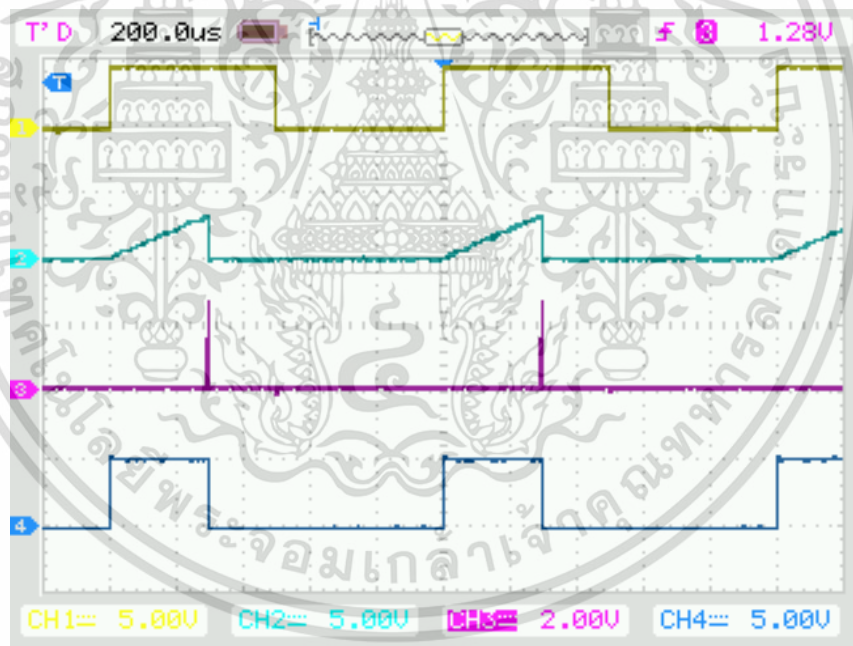
รูปที่ 4.4 การต่อแหล่งจ่ายกระแสคงที่ I_1 ที่ใช้สำหรับวงจรในรูปที่ 4.1

จากกรณีที่ 1 ในตารางที่ 4.2 กำหนดค่าแรงดันอ้างอิง $V_{ref}=3V$ กระแส $I_1 = 250\mu A$ และความถี่ของสัญญาณนาฬิกา $f=1kHz$ ทำการแปรค่าความจุไฟฟ้า C_s ตั้งแต่ 6nF ถึง 70nF จะพบว่าค่าดิวิตีไซเคิลที่วัดได้มีค่าสูงสุดประมาณ 89.6% ยังคงมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับค่าความจุไฟฟ้า C_s ดังแสดงในรูปที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



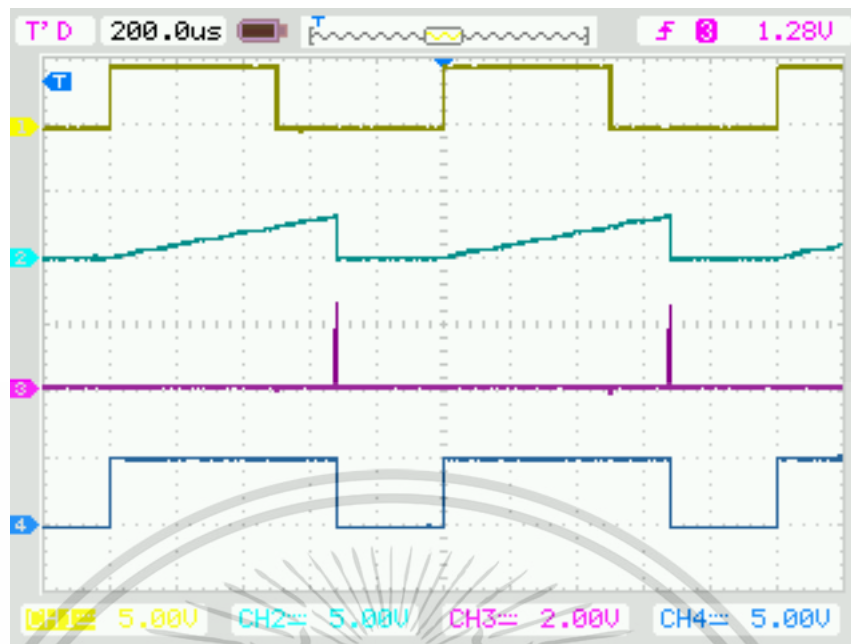
รูปที่ 4.5 ผลการแปรค่าความจุไฟฟ้า C_s ในกรณีที่ 1



(ก) สำหรับ $C_s = 25\text{nF}$ (29.6% ของดิวตี้ไซเคิล)

รูปที่ 4.6 ผลการตอบสนองทางเวลาในแต่ละจุดของกรณีที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) สำหรับ $C_S = 58\text{nF}$ (68% ของคิวดั้ไซเคิล)

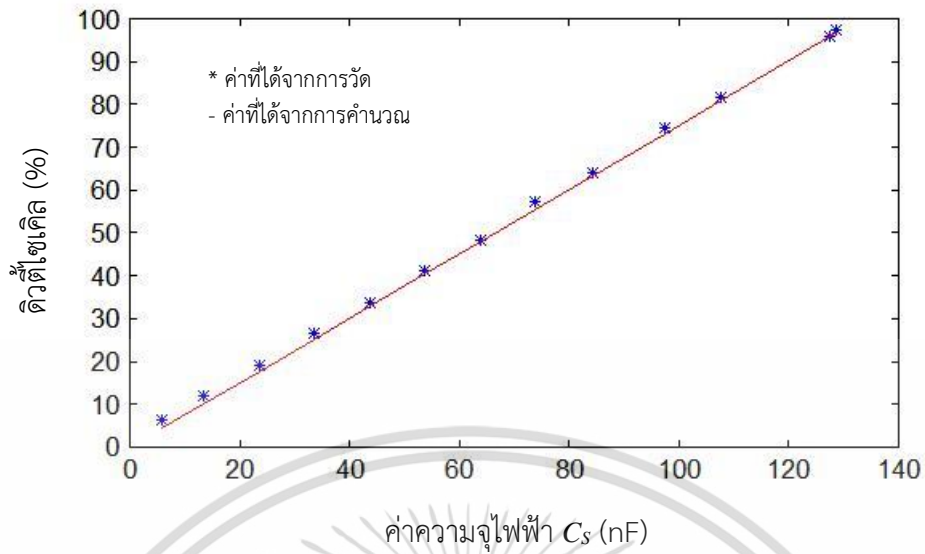
รูปที่ 4.6 ผลการตอบสนองทางเวลาในแต่ละจุดของกรณีที่ 1 (ต่อ)

CH1 : สัญญาณนาฬิกา CH2 : แรงดัน V_C

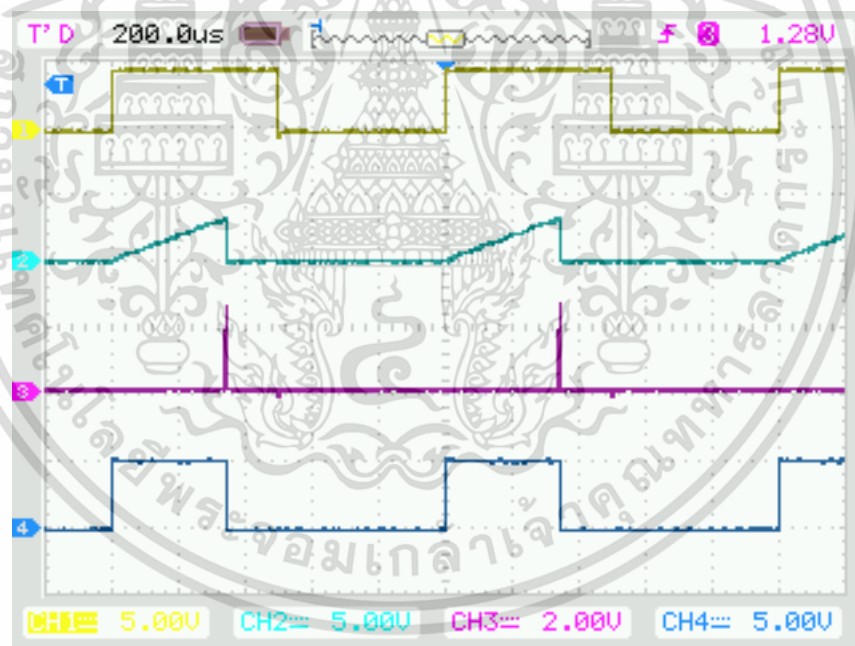
CH3 : สัญญาณ Reset CH4 : แรงดัน V_{out}

รูปที่ 4.6(ก) – 4.6(ข) แสดงผลตอบสนองทางเวลาในแต่ละจุด ของวงจรรูปที่ 4.1 โดยกรณี
ที่ 1 จากตารางที่ 4.2 คือที่ค่าความจุไฟฟ้า $C_S = 25\text{nF}$ และ 58nF ตามลำดับ สังเกตได้ว่า
คิวดั้ไซเคิลของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้สามารถแสดงค่าได้ที 29.6% และ 68% ตามลำดับ

สำหรับกรณีที 2 กำหนดค่าแรงดันอ้างอิง $V_{ref} = 3\text{V}$ กระแส I_1 เพิ่มจาก $250\mu\text{A}$ เป็น $400\mu\text{A}$
และความถี่ของสัญญาณนาฬิกา $f = 1\text{kHz}$ ทำการแปรค่าความจุไฟฟ้า C_S ตั้งแต่ 5.8nF ถึง 128.6nF
จะพบว่าค่าคิวดั้ไซเคิลที่วัดได้มีค่าสูงสุดประมาณ 98% ยังคงมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับค่าความจุ
ไฟฟ้า C_S ดังแสดงในรูปที่ 4.7



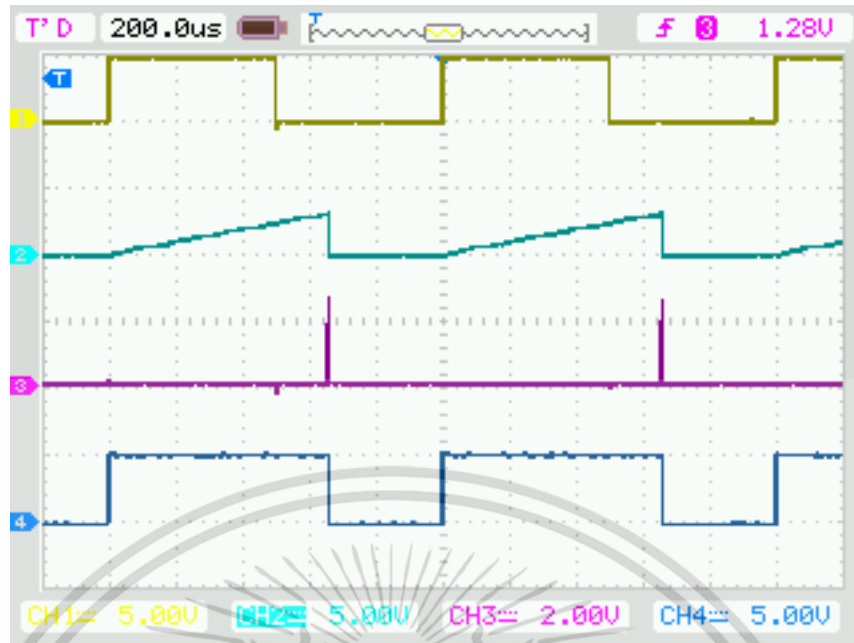
รูปที่ 4.7 ผลการแปรค่าความจุไฟฟ้า C_s ในกรณีที่ 2



(ก) สำหรับ $C_s = 46\text{nF}$ (34% ของดิวตี้ไซเคิล)

รูปที่ 4.8 ผลการตอบสนองทางเวลาในแต่ละจุดของกรณีที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

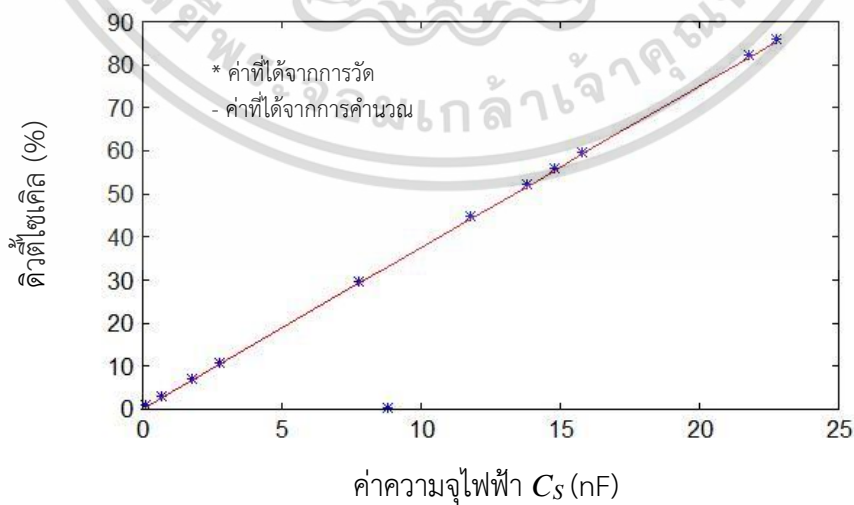


(ข) สำหรับ $C_s = 88\text{nF}$ (66% ของคิวดัไซเคิล)

รูปที่ 4.8 ผลการตอบสนองทางเวลาในแต่ละจุดของกรณีที่ 2 (ต่อ)

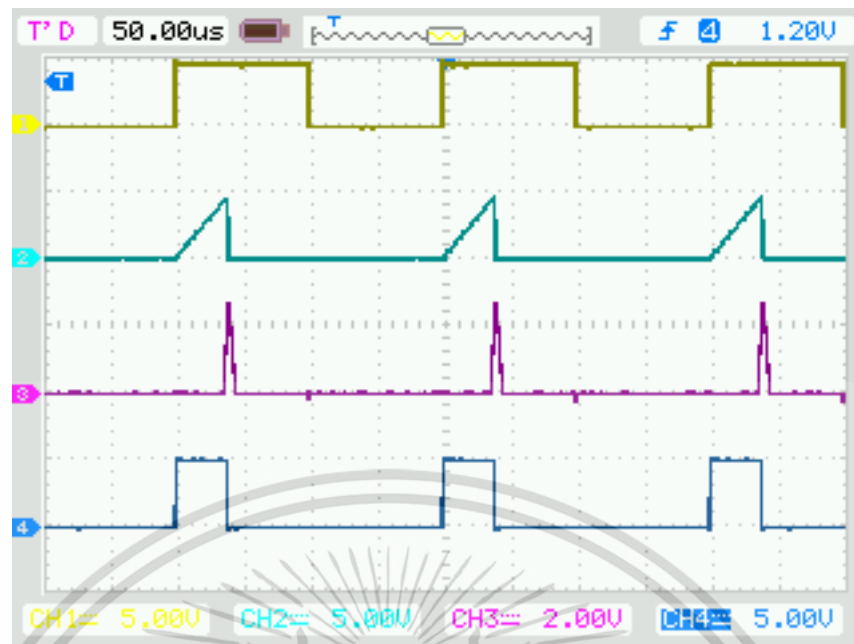
CH1 : สัญญาณนาฬิกา CH2 : แรงดัน V_c
 CH3 : สัญญาณ Reset CH4 : แรงดัน V_{out}

สำหรับกรณีที่ 3 กำหนดค่าแรงดันอ้างอิง $V_{ref} = 3\text{V}$ กระแส $I_1 = 400\mu\text{A}$ และความถี่ของสัญญาณนาฬิกาเปลี่ยนเป็น $f = 5\text{kHz}$ ทำการแปรค่าความจุไฟฟ้า C_s ตั้งแต่ 0.1nF ถึง 22.78nF จะพบว่าค่าคิวดัไซเคิลที่วัดได้มีค่าสูงสุดประมาณ 93.5% ยังคงมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับค่าตัวความจุไฟฟ้า C_s ดังแสดงในรูปที่ 4.9

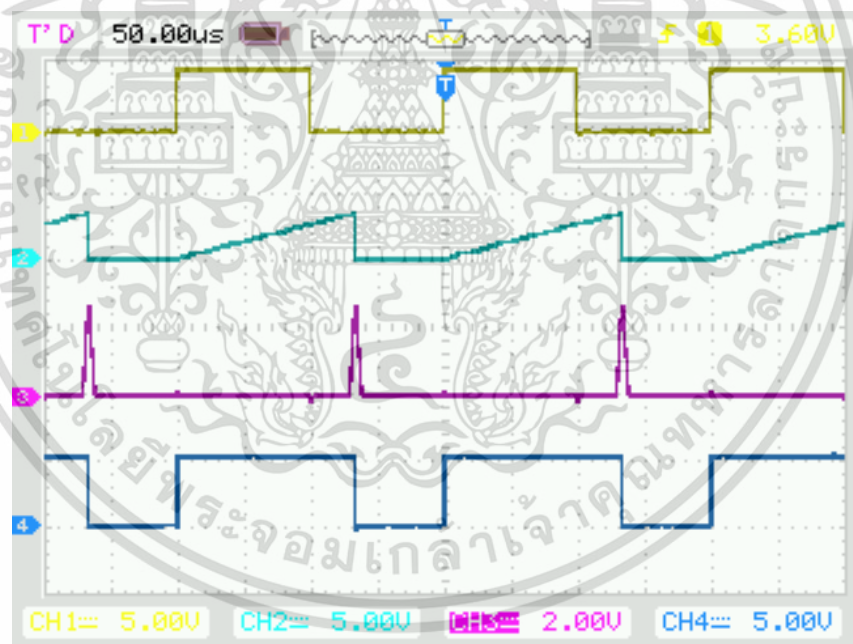


รูปที่ 4.9 ผลการแปรค่าความจุไฟฟ้า C_s ในกรณีที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) สำหรับ $C_s = 6\text{nF}$ (20% ของดิวตี้ไซเคิล)



(ข) สำหรับ $C_s = 15\text{nF}$ (56% ของดิวตี้ไซเคิล)

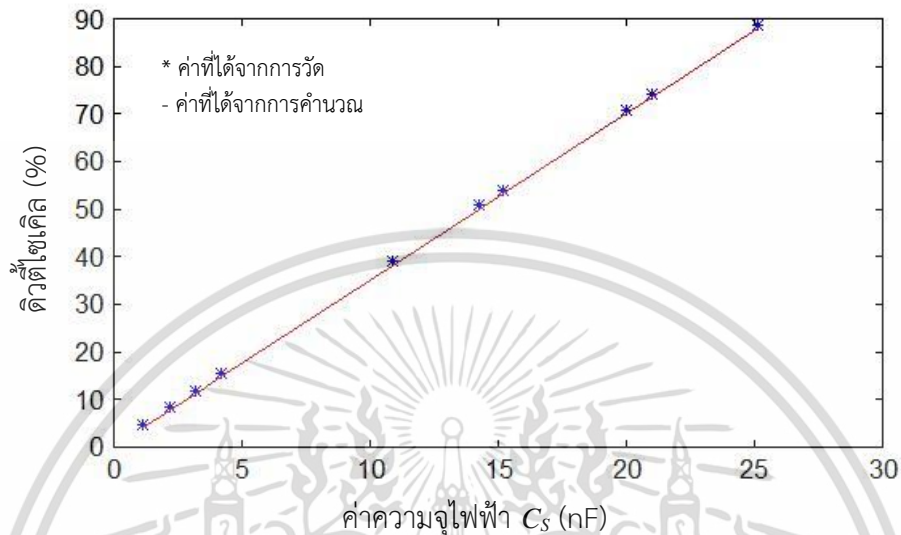
รูปที่ 4.10 ผลการตอบสนองทางเวลาในแต่ละจุดของกรณีที่ 3

CH1 : สัญญาณนาฬิกา CH2 : แรงดัน V_c

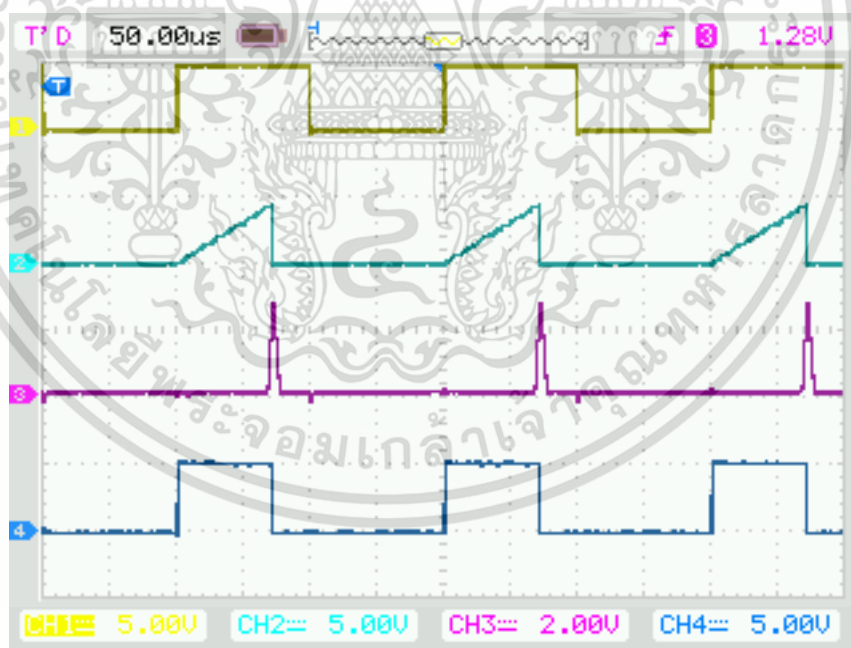
CH3 : สัญญาณ Reset CH4 : แรงดัน V_{out}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับกรณีที่ 4 กำหนดค่าแรงดันอ้างอิง $V_{ref} = 3.5V$ กระแส $I_1 = 500\mu A$ และความถี่ของสัญญาณนาฬิกา $f = 5kHz$ ทำการแปรค่าความจุไฟฟ้า C_s ตั้งแต่ $1.15nF$ ถึง $25.1nF$ จะพบว่าค่าตัวชี้เซลล์ที่วัดได้มีค่าสูงสุดประมาณ 97.5% ดังแสดงในรูปที่ 4.11



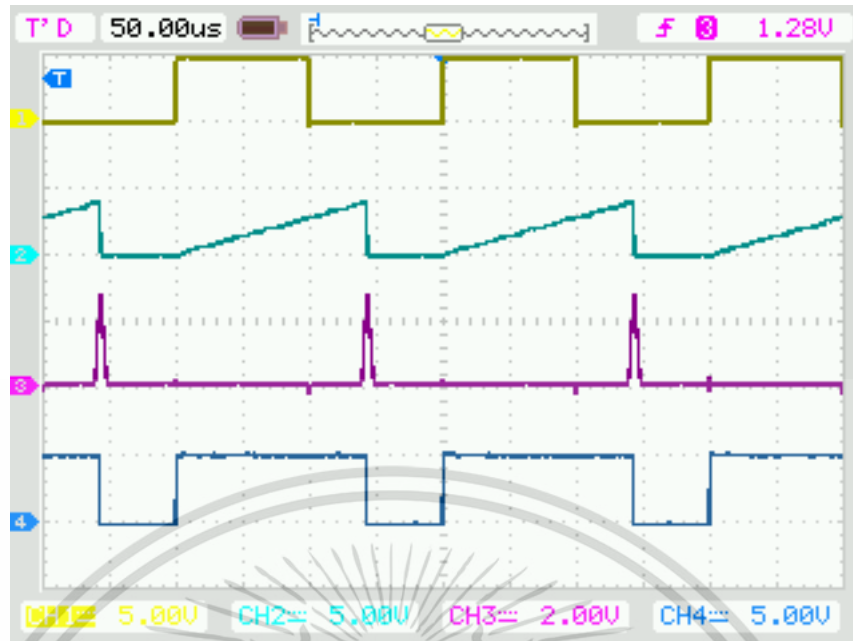
รูปที่ 4.11 ผลการแปรค่าความจุไฟฟ้า C_s ในกรณีที่ 4



(ก) สำหรับ $C_s = 10nF$ (35% ของตัวชี้เซลล์)

รูปที่ 4.12 ผลการตอบสนองทางเวลาในแต่ละจุดของกรณีที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



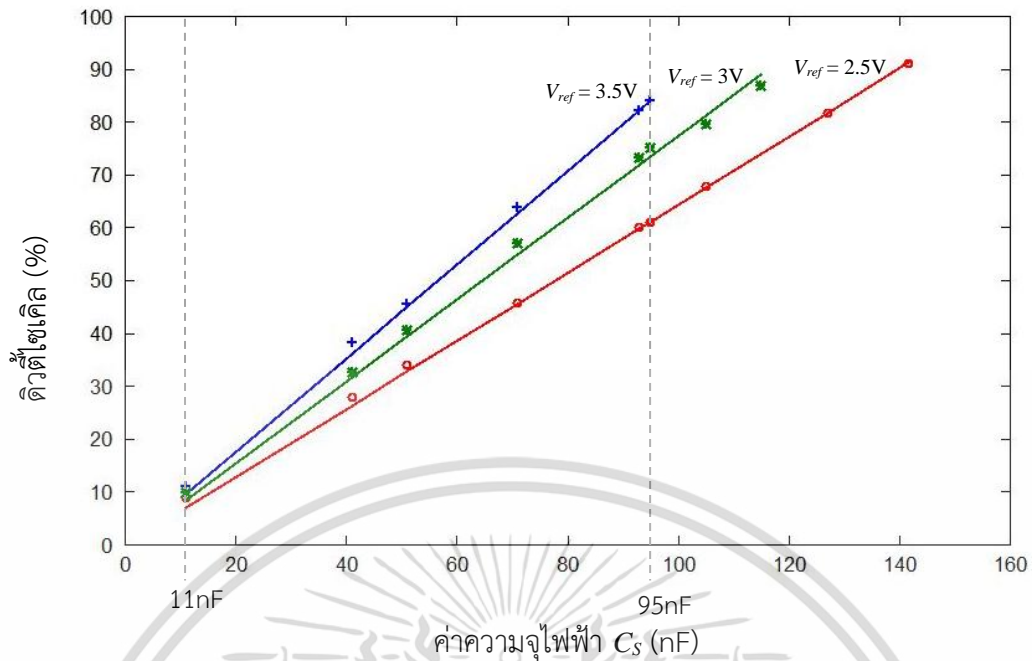
(ข) สำหรับ $C_S = 20\text{nF}$ (72% ของคิวดั้ไซเคิล)

รูปที่ 4.12 ผลการตอบสนองทางเวลาในแต่ละจุดของกรณีที่ 4 (ต่อ)

CH1 : สัญญาณนาฬิกา CH2 : แรงดัน V_C
 CH3 : สัญญาณ Reset CH4 : แรงดัน V_{out}

จากรูปที่ 4.5-4.12 จะเห็นได้ว่าวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นคิวดั้ไซเคิลที่น่าเสนอสามารถทำงานได้ตามเงื่อนไขที่กำหนด ค่าคิวดั้ไซเคิลสัมพันธ์กับค่าความจุไฟฟ้าอย่างเป็นเชิงเส้นตามสมการที่ (4.5) โดยสามารถเลือกย่านการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากเซนเซอร์โดยการปรับค่าแฟคเตอร์ (V_{ref}/I_1) หรือความถี่ของสัญญาณนาฬิกา

นอกจากนี้ยังได้ทำการทดสอบอัตราขยายของวงจรในรูปที่ 4.1 โดยการคงค่ากระแส $I_1 = 400 \mu\text{A}$ และความถี่ของสัญญาณนาฬิกา $f = 1\text{kHz}$ ทำการเปลี่ยนค่าแรงดันอ้างอิง V_{ref} 3 ค่า เป็น 2.5V 3V และ 3.5V



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ของดิวตี้ไซเคิลกับค่าความจุไฟฟ้า C_S เมื่อเปลี่ยนค่าแรงดันอ้างอิง V_{ref} 3 ค่า

รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดิวตี้ไซเคิลที่ได้เทียบกับค่าความจุไฟฟ้า C_S ที่เปลี่ยนไป จากกราฟในรูปที่ 4.13 จะเห็นได้ว่าค่าความจุไฟฟ้า C_S ในช่วง 11nF – 95nF แรงดันอ้างอิง V_{ref} ที่เปลี่ยนไปมีผลกับอัตราขยายของวงจร โดยอัตราขยายมีค่าเพิ่มขึ้นตามแรงดันอ้างอิง V_{ref} ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ (4.5) นอกจากนี้ที่แรงดันอ้างอิง V_{ref} ที่ค่า 3V และ 2.5V ยังมีย่านการวัดค่าความจุไฟฟ้าได้ถึง 115nF และ 141.5nF ตามลำดับ อีกด้วย

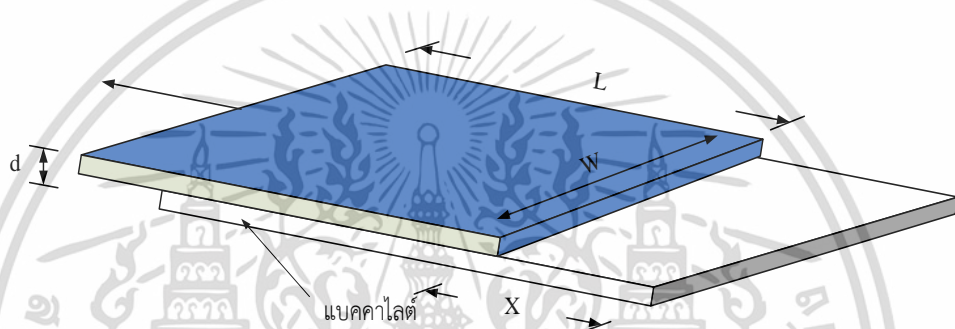
4.5 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นดิวตี้ไซเคิลที่นำเสนอ

ทำการทดสอบวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นดิวตี้ไซเคิลที่นำเสนอกับเซนเซอร์วัดระยะทางที่ทำขึ้นเองโดยการนำแผ่นทองแดง 2 แผ่นขนาดกว้าง W 174 มิลลิเมตร ยาว L 355 มิลลิเมตร วางขนานกันโดยระยะห่างระหว่างแผ่นทองแดง d มีค่า 3 มิลลิเมตร การคำนวณค่าความจุไฟฟ้าที่ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ตามสมการที่ (2.1) ที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อที่ 2.2

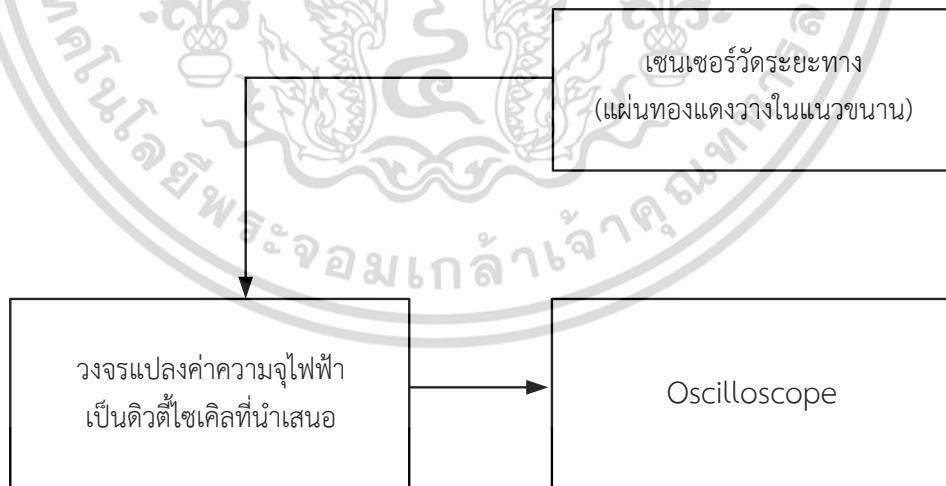
$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \tag{4.8}$$

เมื่อ ϵ_0 คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของสุญญากาศ (Permittivity of free space)
 มีค่า 8.85×10^{-12} (farad/m)
 ϵ_r คือ ค่าค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์หรือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของแบคคาไลต์
 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.5

จากนั้นเลื่อนแผ่นทองแดงด้านบนในแนวขนานกับแผ่นด้านล่างโดยเลื่อนระยะ (X) ครึ่งละ 2.5 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.14 สำหรับไดอะแกรมการทำงานแสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.14 รูปแบบการเคลื่อนที่ของแผ่นทองแดงที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 4.15 ไดอะแกรมการนำวงจรที่นำเสนอไปประยุกต์ใช้งานกับเซนเซอร์วัดระยะทาง

ความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้า C_s จากเซนเซอร์วัดระยะทางที่ทำงานกับระยะทางที่ทำการเลื่อนแผ่นทองแดงแสดงในตารางที่ 4.3 และกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับใช้งานกับเซนเซอร์ที่ทำงานตามตารางที่ 4.4

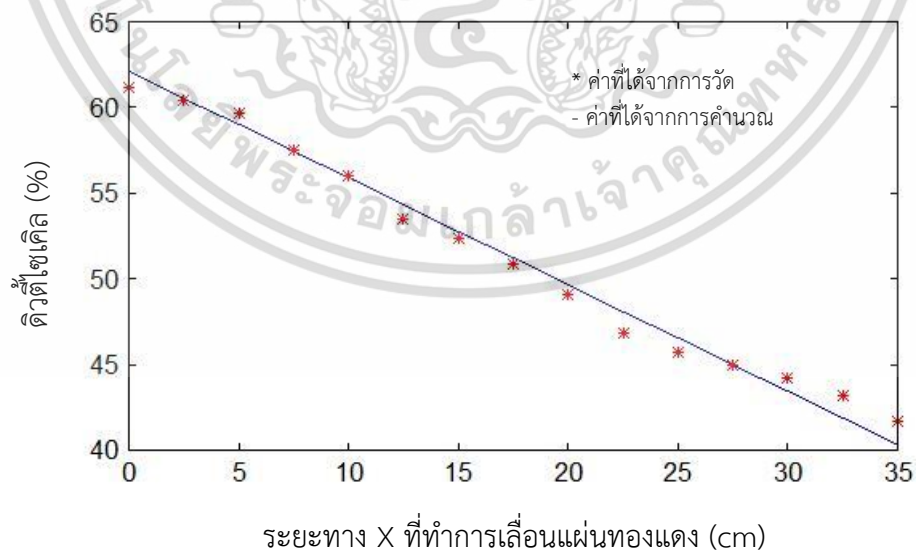
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ค่าความจุไฟฟ้า C_s ที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะทางของเซนเซอร์ที่ทำขึ้น

ระยะทางที่ทำให้การเลื่อนแผ่นทองแดง (cm)	ค่าความจุไฟฟ้า (pF)	ระยะทางที่ทำให้การเลื่อนแผ่นทองแดง (cm)	ค่าความจุไฟฟ้า (pF)
0	573	20	142
2.5	534	22.5	110
5	524	25	106
7.5	431	27.5	80
10	423	30	69
12.5	335	32.5	40
15	242	35	0
17.5	166		

ตารางที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้กับเซนเซอร์วัดระยะทางที่ทำขึ้น

V_{ref}	I_1	Clock frequency
2.5V	400 μ A	40kHz



รูปที่ 4.16 คิตวีไซเคิลที่ตรวจวัดได้เมื่อแปรค่าระยะทาง X เทียบกับค่าทางทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.16 จะเห็นได้ว่าตัวตีไซเคิลที่ได้แปรผกผันกับระยะทางที่เพิ่มขึ้นของเซนเซอร์ที่ทำงานตามค่าความจุไฟฟ้า C_s ที่ลดลง ซึ่งมีความสอดคล้องกับทฤษฎี

4.6 บทสรุป

วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นตัวตีไซเคิลที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ใช้หลักการมอดูเลตแบบความกว้างพัลส์ ที่มีโครงสร้างของวงจรง่ายไม่ซับซ้อน อุปกรณ์ที่ใช้เป็นอุปกรณ์พื้นฐานที่สามารถหาซื้อได้ง่าย โดยค่าของตัวตีไซเคิลที่ได้จากวงจรที่นำเสนอมีค่าเป็นสัดส่วนเชิงเส้นกับค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากเซนเซอร์ นอกจากนี้ยังมีช่วงการทำงานที่กว้าง กล่าวคือค่าตัวตีไซเคิลสามารถมีค่าสูงสุดได้ถึง 98% โดยไม่ต้องทำการปรับเปลี่ยนวงจร โดยทำการยืนยันสมรรถนะการทำงานของวงจรด้วยการต่อวงจรจริง รวมถึงการทดสอบกับเซนเซอร์วัดระยะทางที่ทำงานอีกด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะแนวทางในการทำวิจัยต่อ

5.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นดิวตี้ไซเคิลสำหรับ เซนเซอร์ชนิดตัวเก็บประจุ อาศัยหลักการพื้นฐานการมอดูเลตแบบความกว้างพัลส์ โดยการนำค่า แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุมาเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิง โดยวงจรที่ใช้เป็นวงจรที่มีโครงสร้างไม่ ซับซ้อน อีกทั้งยังใช้อุปกรณ์ที่หาซื้อได้ง่ายในท้องตลาด จึงทำให้วงจรที่ถูกนำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับ นี้มีข้อได้เปรียบอย่างมาก ในเรื่องของราคาเมื่อเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้า นอกจากนี้เมื่อเทียบในแง่ ของสมรรถนะของวงจร ทั้งในด้านการวิเคราะห์การทำงานด้วยทฤษฎี การทดสอบวงจรด้วยการต่อ จริง และการนำไปประยุกต์ใช้งานกับเซนเซอร์ชนิดตัวเก็บประจุ วงจรที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถให้เอาต์พุตที่อยู่ในรูปแบบดิวตี้ไซเคิลได้เกิน 50% ของสัญญาณดิวตี้ไซเคิลโดยไม่ต้อง ปรับเปลี่ยนวงจร ซึ่งงานวิจัยที่ได้มีการนำเสนอในอดีตสามารถทำงานได้เพียง 50% เท่านั้น

5.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยต่อ

จากวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นดิวตี้ไซเคิลสำหรับเซนเซอร์ชนิดตัวเก็บประจุที่นำเสนอใน วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ยังคงมีข้อจำกัดในเรื่องของย่านการอ่านค่าความจุไฟฟ้า C_s ที่ค่อนข้างกว้างเมื่อ เทียบกับค่าดิวตี้ไซเคิลที่ได้ ทำให้การวัดค่าความจุไฟฟ้า C_s ที่ต้องการความละเอียด หรือการ เปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าที่มีค่าน้อยในระดับพิโกฟารัด (pF) มีความผิดพลาดสูง ดังนั้นแนวทาง หนึ่งในการทำวิจัยต่อในอนาคตคือ การปรับปรุงให้วงจรมีความสามารถในการอ่านค่าความจุไฟฟ้าที่มี การเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยได้ดี จะทำให้สามารถนำวงจรที่ปรับปรุงไปใช้งานได้ในอุตสาหกรรมที่มี การใช้งานเซนเซอร์ที่หลากหลายและครอบคลุมมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Larry K. Baxter, Capacitive sensors design and applications, **IEEE Press series of electronics technology**, 1997.
- [2] Andreea De Marcellis and Giuseppe Feeri, Analog circuits and systems for voltage-mode and current mode and current-mode sensor interfacing applications, **Springer**, 2011.
- [3] Fatemeh Aezinia, Design of interface circuits for capacitive sensing applications, **Simon Fraser University**, 2014.
- [4] J.C. Lotters, W. Olthuis, P.H. Veltink and P. Bergveld, “A sensitivity differential capacitance to voltage converter for sensor applications”, **IEEE transactions on Instrumentation and measurement**, vol. 48, no.1, 1999, pp.89-96.
- [5] Shuyu Lei, Christian A. Zoman and Steven L. Garverick, “An oversampled capacitance-to-voltage converter IC with application to time-domain characterization of MEMS resonators”, **IEEE Sensors Journal**, vol.5, no.6, 2005, pp. 1353-1361
- [6] H. Furuichi and R.S. Fearing, “A Planer capacitive micro positioning sensor in micro machine and human science”, **Proceeding the seventh international symposium**, 1996, pp.85-90.
- [7] A.D. Marcellis, G. Ferri, P. Mantenuto, F.Valente, C. Cantalini and L. Giancaterini, “CCII-Based interface for capacitive/resistive sensors”, **IEEE Sensors 2011 Conference**, 2011, pp.1133-1136.
- [8] I. Ramfos and S. Chatzandroulis, “A 16-channel capacitance to period converter with offset compensation for sensor applications”, **Electronics Circuits and Systems (ICECS)**, 2010, pp. 819-822.
- [9] A. Heidary and G.C.M. Meijer, A Low-cost universal integrated Interface for capacitive sensors, **Delft University of Technology**, 2010.
- [10] F.M.L. Van der Goes and A.H.M. Van Roermund, Low-cost smart sensor interfacing, **Delft University of Technology**, 1996.
- [11] B. George and V.J. Kumar, “Switched capacitor signal conditioning for differential capacitive sensors”, **IEEE Trans. Instrument and Measurement Society**, vol.56, no.3, 2007, pp. 913-917.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] Giuseppe Scotti, Salvatore Pennisi, Pietro Monsurri and Alessandro Trifiletti, “88- μ A 1-MHz stray-insensitive CMOS current-mode interface IC for differential capacitive sensors”, **IEEE Circuits and Systems Society**, vol.61, no.7, 2014, pp.1905-1919.
- [13] Paolo B., Nicolo N. and Massimo P, “A Current-mode dual slope integrated capacitance-to-pulse duration converter”, **IEEE Journal of Solid-State Circuits Society**, vol.42, no.9, 2007, pp. 1884-1891.
- [14] M. Tartagni and R. Guerrieri, “A fingerprint sensor based on the feedback capacitive sensing scheme”, **IEEE Solid-state Circuits Society**, vol.33, no.1, 1998, pp.133-142.
- [15] Y. Zhang, R. Howver, B. Gogoi, and N. Yazdi, “A high-sensitivity ultra-thin MEMS capacitive pressure sensor in solid-state sensors”, **Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference (TRANSDUCERS)**, 2011, pp. 112-115.
- [16] L.L. Chu and Y.B. Gianchandani, “A micromachined 2D positioner with electrothermal actuatuion and sub-nanometer capacitive sensing”, **Journal of Micromechanics and Microengineering**, vol.13, no.2, 2003 p.279-285.
- [17] N. Lazarus, S. Bedair, C. Lo and G. Fedder, “CMOS-MEMS capacitive humidity sensor”, **Journal of Microelectromechanical Systems**, vol.19, 2009, pp.183-191.
- [18] M. Kitsara, D. Goustouridis, S. Chatzandroulis, M. Chatzichristidi, I. Raptis, T. Genetsos, R. Igreja and C. J. Dias, “Single chip interdigitated electrode capacitive chemical sensor arrays”, **Sensors and Actuators B-Chemical**, vol.127, 2007, pp.186-192.
- [19] N. Yazdi, F. Ayazi, and K. Najafi, “Micromachined inertial sensors”, **Proceedings of the IEEE**, vol.86, no.8, 1998, pp.1640-1659.
- [20] F.N. Toth, G. C. M. Meijer and M. van der Lee, “A planar capacitive precision gauge for liquid-level and leakage detection”, **IEEE Instrumentation and Measurement Society**, vol.46, no.2, 1997, pp.644-646.
- [21] H. Lee, S.-I. Chang and E. Yoon, “Dual-mode capacitive proximity sensor for robot application: Implementation of tactile and proximity sensing capability on a single polymer platform using shared electrodes”, **IEEE Sensors Journal**, vol.9, no.12, 2009, pp.1748-1755.
- [22] Z. Chen and R.C. Luo, “Design and implementation of capacitive proximity sensor using microelectromechanical systems technology”, **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, vol.45, no.6, 1998, pp.886-894.

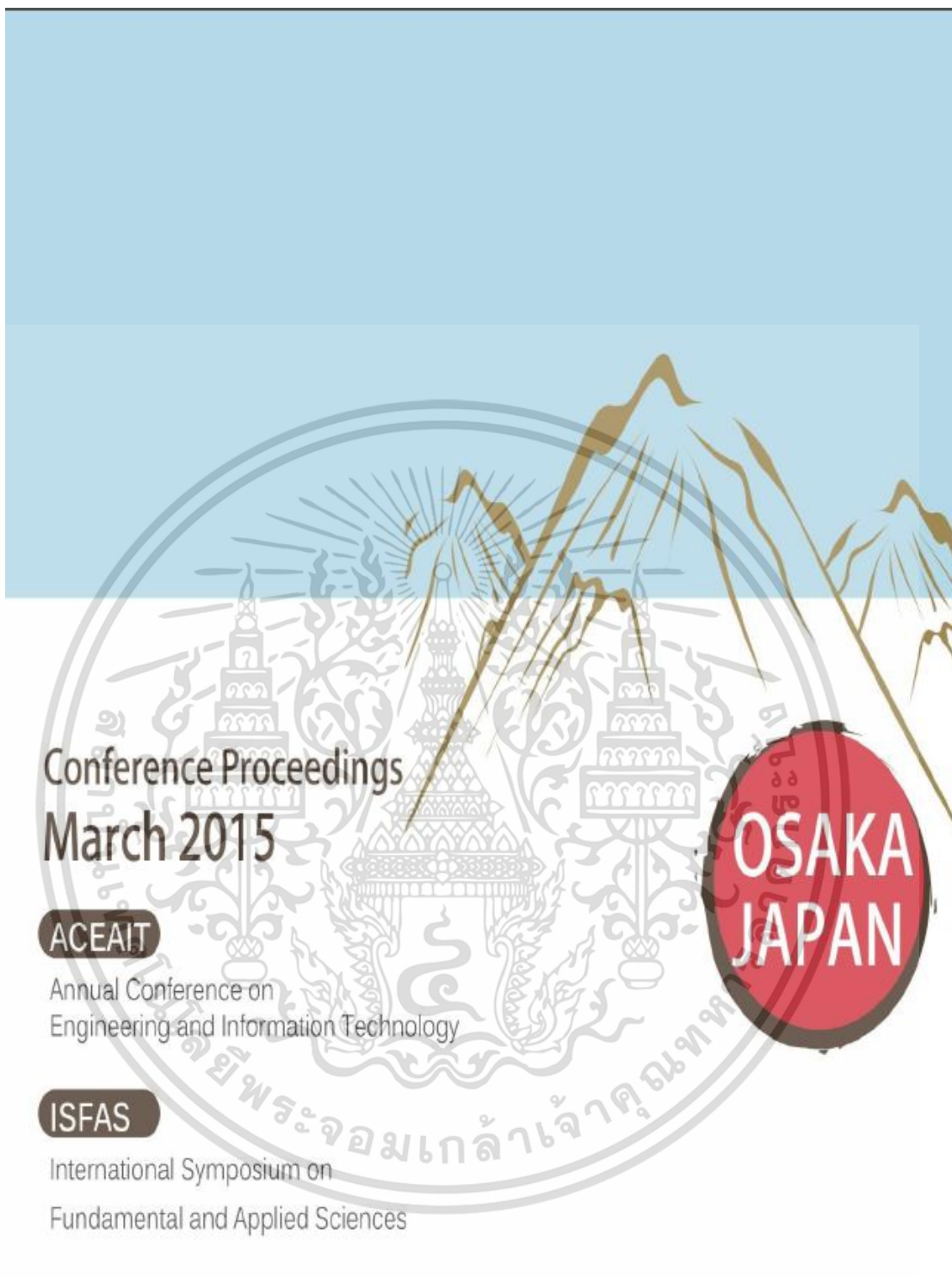
- [23] F. Aezinia, M. Alexiuk, B. Bahreyni, M. Fallah-Rad and L. Petropoulos, “A capacitive proximity sensor for enhanced clinical workflow with Intra-operative MRI”, **Annual IOIS Meeting-Gateway to Surgery of the future**, 2013.
- [24] W. C. Tang, T.-C. H. Nguyen and R.T. Howe, “Laterally driven polysilicon resonant microstructures”, **Micro Electro Mechanical Systems**, 1989, pp. 53-59.
- [25] W. Tang, Electrostatic comb drive for resonant sensor and actuator applications, **University Microfilms**, 1990.
- [26] Y. Sun, B. J. Nelson, D.P. Potasek and E. Enikov, “A bulk microfabricated multi-axis capacitive cellular force sensor using transverse comb drives”, **Journal of Micromechanics and Microengineering**, vol. 12, no.6, 2002, pp.832-840.
- [27] A. Selvakumar and K. Najafi, “A high-sensitivity z-axis capacitive silicon microaccelerometer with torsional suspension,” **Journal of Microelectromechanical Systems**, vol.7, no.2, 1998, pp.192-200.
- [28] Y. Sun, S. N. Fry, D. P. Potasek, D. J. Bell and B. J. Nelson, “Characterizing fruit fly flight behavior using a microforce sensor with a new comb-drive configuration”, **Journal of Microelectromechanical Systems**, vol.14, no.1, 2005 pp.4-11.
- [29] M. Suster, J. Guo, N. Chaimanonart, W.H. Kom and D. J. Young, “Low-noise CMOS integrated sensing electronics for capacitive MEMS strain sensors”, **IEEE 2004 Custom Integrated Circuits Conference**, 2004. pp. 693-696.
- [30] M. Suster, J. Guo, N. Chaimanonart, W.H. Ko. and D. J. Yong, “A high-performance MEMS capacitive strain sensing system”, **Journal of Microelectromechanical Systems**, vol.15, no.5, 2006, pp. 1069-1077.
- [31] N. Yazdi, H. Kulah and K. Najafi, “Precision readout circuits for capacitive microaccelerometers”, **IEEE Sensors**, vol.1, 2004, pp. 28-31.
- [32] J. M. Gomez, S.A. Bota, S. Marco and J. Samitier, “Force-balance interface circuit based on floating MOSFET capacitors for micro-machined capacitive accelerometers”, **IEEE Transactions on Circuits and Systems II**, vol.53, no.7, 2006, pp. 546-552.
- [33] U. Kang and K. D. Wise, “A high-speed capacitive humidity sensor with on-chip thermal reset”, **IEEE Transactions on Electron Devices**, vol.47, no.4, 2000, pp. 702-710.

- [34] H. Kulah, J. Chae and K. Najafi, “Noise analysis and characterization of a sigma-delta capacitive silicon microaccelerometer”, **TRANSDUCERS, Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems**, vol.1, 2003, pp.95-98.
- [35] C.-K. Chan, S.-C. Lo, Y.-C. Huang, M.-Y. Wang and W. Fang, “Poly-Si based two axis differential capacitive-sensing accelerometer”, **IEEE Sensors Journal**, vol.12, no.12, 2012, pp. 3301-3308.
- [36] C. Hagleitner, D. Lange, A. Hierlemann, O. Brand and H. Baltes, “CMOS single-chip gas detection system comprising capacitive calorimetric and mass-sensitive microsensors”, **IEEE Journal of Solid-State Circuits**, vol.37, no.12, 2002, pp.1867-1878.
- [37] M.R. Haider, M.R. Mahfouz, S. K. Islam, S.A. Eliza, W. Qu and E. Pritchard, “A low-power capacitance measurement circuit with high resolution and high degree of linearity”, **Midwest Symposium on Circuits and System**, 2008, pp. 261-264.
- [38] G. Ferri and P. De Laurentiis, “A novel low voltage low power oscillator as a capacitive sensor interface for portable applications”, **Sensors and Actuators A: Physical**, vol.76, no.1-3, 1999, pp. 437-441.
- [39] P. Bruschi, D. Navarrini, G. Barillaro and A. Gola, “A Precise capacitance to-pulse width converter for integrated sensors”, **Analog Integrated Circuits and Signal Processing**, vol.41, no.1, 2004, pp.93-97.
- [40] C. Wang, “A simple scheme of current amplification for sensor applications”, **IEEE Conference on Electron Device and Solid-State Circuits**, 2005, pp.647-650.
- [41] S. Pennisi, “High-performance and simple CMOS interface circuit for differential capacitive sensors”, **IEEE Transactions on Circuits and Systems II**, vol.52, no.6, 2005, pp. 327-330.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Electrical Engineering and Technology (3)

Room C, 2F

2015/3/24 Tuesday 13:00-14:30

Session Chair: *Wandee Petchmaneelumka*

ACEAIT-3787

Simple Design Technique for NMOS-Based Analog Current Multiplier Realization Suitable for Low-Voltage Application

Sorapong Wachirattananornkul | *King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang*

Worapong Tangsirat | *King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang*

ACEAIT-3800

The Integrated Able Unity Gain Inverter Using CMOS OTA

Thanaprasroeth Phatikitanan | *King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang*

Jirawath Paraklang | *King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang*

ACEAIT-3811

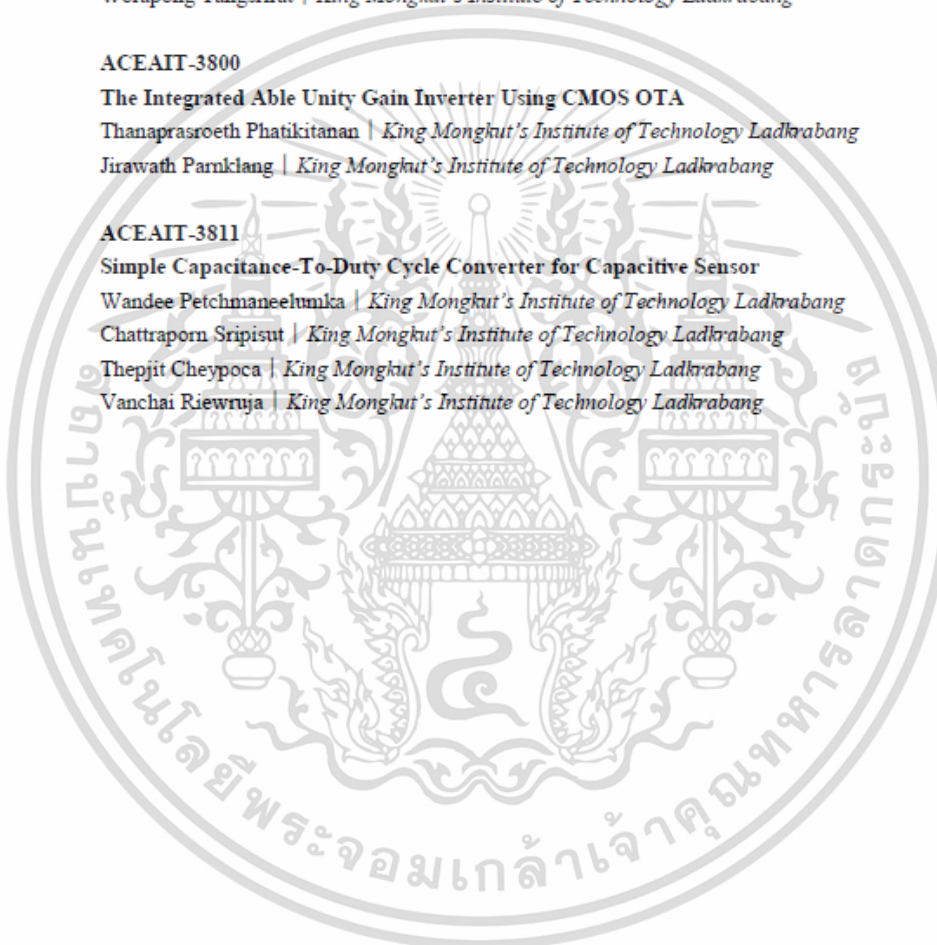
Simple Capacitance-To-Duty Cycle Converter for Capacitive Sensor

Wandee Petchmaneelumka | *King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang*

Chattraporn Sripisit | *King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang*

Thepjit Cheypoca | *King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang*

Vanchai Riewruja | *King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang*



ACEAIT-3811
Simple Capacitance-To-Duty Cycle Converter for Capacitive Sensor

Wandee Petchmaneelunka*

Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
 Bangkok, Thailand

*E-mail: kpwandee@kmitlac.th

Chattraporn Sripisut, Thepjit Cheypoca and Vanchai Riewruja

Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
 Bangkok, Thailand

ABSTRACT

A simple design technique for realization of the capacitance interfacing circuit is presented in this paper. The capacitance of sensor is converted to duty cycle of reference signal based on pulse width modulation (PWM) technique. The proposed circuit provides simple configuration and low cost. In addition, the scheme requires only commercial available devices. Maximum duty cycle of about 95% can be achieved from the proposed technique without disturbing basic performance. Experimental results showing the circuit performance are agreed with the expected values.

Keyword: Capacitive Sensor, Duty Cycle, Pulse Width Modulation, Interfacing Circuit.

1. Introduction

Capacitive sensor is one of the important roles for measuring the physical quantities such as displacement, acceleration, pressure, humidity, flow, and liquid level [1-4]. Many techniques to interface the obtained capacitance from sensor can be found in the literature [2, 5-9]. Method for interfacing capacitive sensor using capacitance to voltage converter [2, 5] has been introduced. The alternative technique based on capacitance to time interval or frequency converter [6-9] has been reported. The technique for converting the capacitance of sensor to frequency has been presented in the literature [6-7]. Pulse width modulation (PWM) technique based approaches [8-9] have been reported. Nevertheless, these approaches require specific design building blocks that are uncommercial available devices. Moreover, the maximum obtained output of the literature [8] in the form of duty cycle is about 50%. In addition, the output signal of the scheme design in [9] depends on the clock signal. Therefore, the aim of this paper is to introduce a simple design technique to implement interfacing circuit for capacitive sensor. The achieved output in the form of duty cycle is proportional to the measured value from sensor. The proposed converter requires only commercial available device. Maximum duty cycle of the proposed circuit can be obtained about 95%. Experimental results confirming the circuit performance are agreed with the expected values.

2. Circuit Description

The proposed capacitance-to-duty cycle converter based on PWM technique is shown in figure 1. The principle of circuit in figure 1 is implemented using the constant current I_1 , comparator A_1 , Toggle flip-flop FF_1 and transistor Q_1 . The operation of the proposed scheme can be explained as follow.

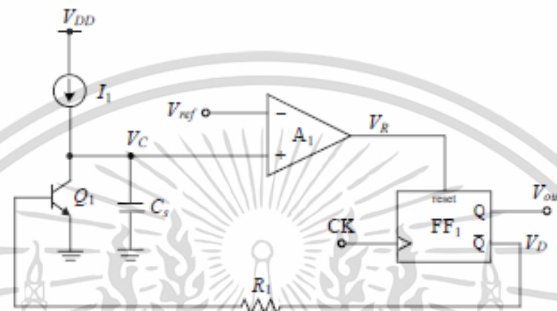


Figure 1 Simple proposed capacitance-to-duty cycle converter.

The constant current I_1 is used for charging into the capacitor C_S . The voltage V_C across capacitor C_S is rising up as

$$V_C = \frac{I_1}{C_S} \Delta T \quad (1)$$

where ΔT denotes the charged time of capacitor C_S . The reference voltage V_{ref} is employed to compare with the voltage V_C . If voltage V_C is less than V_{ref} , then the output voltage V_R of comparator A_1 is low state "0". Until the voltage V_C equals V_{ref} , V_R becomes high state "1". Thus, equation (1) can be rewritten as

$$V_C = V_{ref} = \frac{I_1}{C_S} \Delta T \quad (2)$$

The high state of voltage V_R forces to reset flip flop FF_1 . Then the inverted output V_D of FF_1 is set to high state. Resistor R_1 and transistor Q_1 connected to the inverted output of FF_1 provide for discharge the capacitor C_S . The voltage V_C becomes recharge after the next clock pulse. It should be noted that the frequency of the V_{out} is equal the clock frequency, while the pulse width ΔT is the charged time duration. The pulse width ΔT can be state as

$$\Delta T = \frac{C_S V_{ref}}{I_1} \quad (3)$$

It can be seen that pulse width ΔT is linearly proportional to the sensing capacitance C_S with the scale factor V_{ref}/I_1 . Consequently, the scale factor can be tuned to appropriate value to control the operating range of the proposed circuit. If T is the period of clock CK, then the duty cycle of output V_{out} can be written as

$$\text{duty cycle} = \frac{\Delta T}{T} \times 100\% = \frac{C_S V_{ref}}{I_1 T} \times 100\% \quad (4)$$

It is evident that the obtained duty cycle is also linearly proportional to the sensing capacitance C_S . Moreover, the change of sensing capacitance C_S range can be achieved by adjusting the scale factor and clock frequency ($1/T$). Example of parameter setting for choosing the range of sensing capacitance C_S is shown in Table 1. Figure 2 shows the operating signal waveforms of each point.

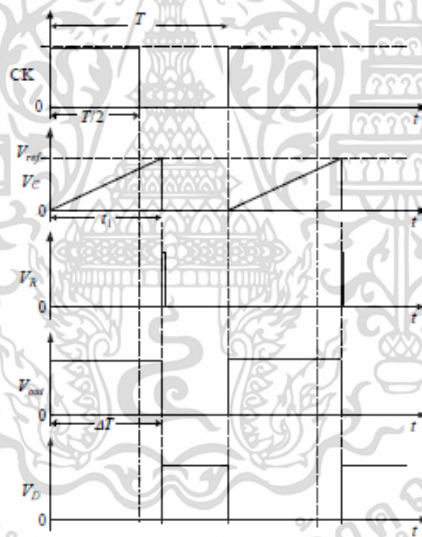


Figure 2 Signal waveforms of each point.

Table 1 Example of parameter setting for choosing the range of C_S .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	V_{ref}	I_1	Clock frequency	Minimum		Maximum	
				C_S	Duty cycle	C_S	Duty cycle
Case I	3.5V	250 μ A	1kHz	0.5nF	0.7%	70nF	98%
Case II	3.5V	250 μ A	5kHz	0.1nF	0.7%	14nF	98%
Case III	3V	400 μ A	1kHz	1nF	0.75%	130nF	97.5%
Case IV	3V	400 μ A	5kHz	0.2nF	0.75%	26nF	97.5%

3. Experimental Results

To verify the performance of proposed converter, the circuit in figure 1 was experimentally implemented using LM334, LM358, CD4027 and C9013 devices for the constant current, comparator, toggle flip flop and switch for discharging the capacitor C_S , respectively. From Case I in Table 1, the plots of duty cycle against the sensing capacitance C_S varied from 1nF to 70nF are demonstrated in figure 3. It clearly seen that the measured duty cycle about 95% is linearly proportional to the sensing capacitance C_S .

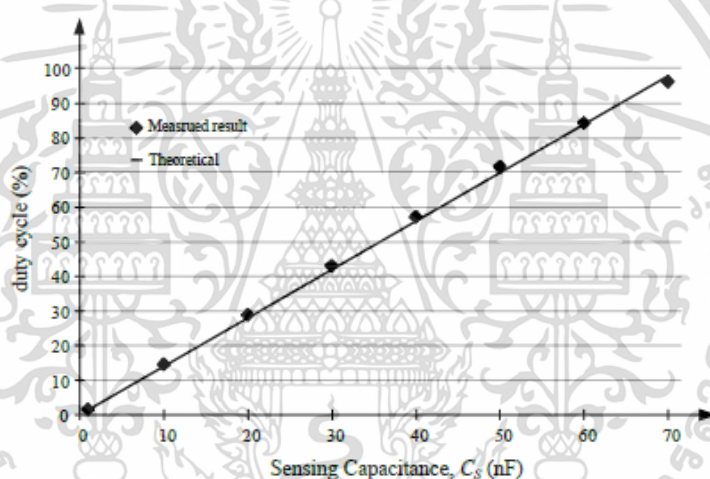


Figure 3 The plots of duty cycle versus sensing capacitance C_S .

Figures 4(a) – 4(b) illustrate time response of each point in figure 1 with Case I, where the sensing capacitance $C_S = 15$ nF and 60nF, respectively. The pulse widths of about 210 μ s and 840 μ s for figure 4(a) and 4(b), respectively, are observed. It can be seen that the duty cycles at 21% and 84% for sensing capacitance $C_S = 15$ nF and 60nF are achieved.

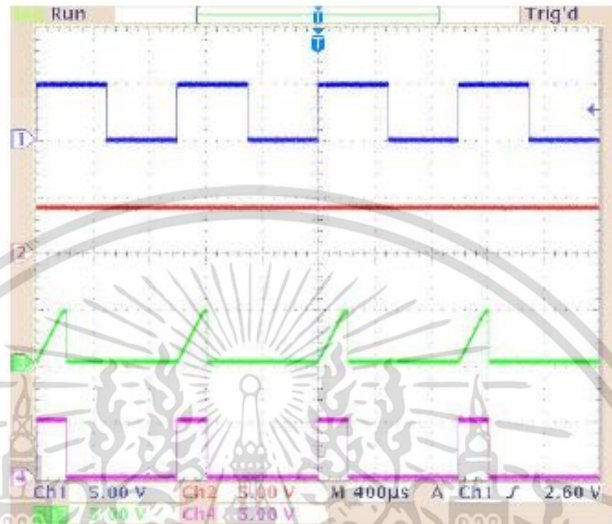
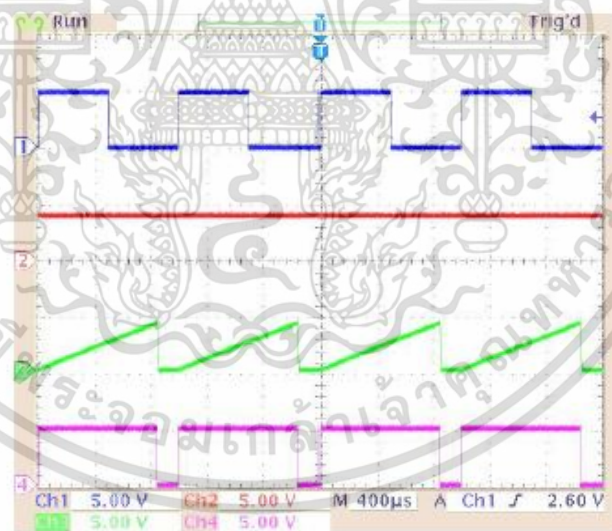
(a) For $C_S = 15\text{nF}$ (21% duty cycle)(b) For $C_S = 60\text{nF}$ (84% duty cycle)

Figure 4 Time response of the operation signal of each point from Case I

CH1 : Clock signal CH2 : Reference signal V_{ref} CH3 : Voltage V_C CH4 : Voltage V_{out}

4. Conclusion

Simple capacitance-to-duty cycle converter based on PWM technique has been introduced in this paper. The circuit configuration is simple and employs commercial available devices. The

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

obtained value in form of duty cycle is linearly proportional to the measured capacitance from sensor. The sensing capacitance C_S range can be also changed by varying the clock frequency and scale factor. In addition, maximum duty cycle of about 95% is observed. The proposed circuit performance is confirmed by experimental implementation.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to acknowledge the support by a grant No. KREF115701 from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang of Thailand.

REFERENCES

- [1] W.C. Heerens, 1986, Application of capacitance techniques in sensor design, *Phys. E: Sci. Instrum.*, 19, 897-906.
- [2] Shao Lichun, Moorthi Palaniapan, and Tan Woei Wan, 2006, A continuous-time capacitance to voltage converter for microcapacitive pressure sensors, *Journal of Physics: Conference Series*, 34, 1014–1019.
- [3] N.B. Yusof, N. Soin, and S.Z. Md. Dawal, 2009, Capacitive interfacing for MEMS humidity and accelerometer sensors, 2009 *International Conference for Technical Postgraduates (TECHPOS)*, 82-86.
- [4] Ferran Reverter, [Xiujun Li](#), and [Gerard C.M. Meijer](#), 2007, Liquid-level measurement system based on a remote grounded capacitive sensor, *Sensors and Actuators A: Physical*, 138 (1), 1–8.
- [5] Shuyu Lei, Christian A. Zorman, and Steven L. Garverick, 2005, An oversampled capacitance-to-voltage converter IC with application to time-domain characterization of MEMS resonators, *IEEE Sensors Journal*, 5 (6), 1353-1361.
- [6] C.T. Chiang, C.S. Wang, and Y.C. Huang, 2007, A CMOS integrated capacitance-to-frequency converter with digital compensation circuit designed for sensor interface applications, *IEEE Sensors 2007 Conference*, 954-957.
- [7] [Yucai Wang](#) and [Chodavarapu, V.P.](#), 2013, Design of CMOS capacitance to frequency converter for high-temperature MEMS sensors, *IEEE sensors 2013 Conference*, 1-4.
- [8] Paolo B., Nicolò N. and Massimo P., 2007, A Current-Mode, Dual Slope, Integrated Capacitance-to-Pulse Duration Converter, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 42 (9), 1884-1891.
- [9] Julia H.L.L., Mac I., Sanghoon J., Jong K.K. and Byunghoo J., 2011, A Low-Power, Wide-Dynamic-Range Semi-Digital Universal Sensor Readout Circuit Using Pulsewidth Modulation, *IEEE sensors Journal*, 11 (5), 1134-1144.

