วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันโดยใช้เทคนิคการสุ่มและคงค่า

CAPACITANCE TO VOLTAGE CONVERTER CIRCUIT

USING SAMPLE AND HOLD TECHNIQUE

ภิราพงศ์ พันธ์กำเหนิด

PHIRAPONG PHANKAMNERD

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2566

KMITL-2023-EN-M-087-162

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CAPACITANCE TO VOLTAGE CONVERTER CIRCUIT USING SAMPLE AND HOLD TECHNIQUE

PHIRAPONG PHANKAMNERD

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF

MASTER OF ENGINEERING IN CONTROL ENGINEERING

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2023

KMITL-2023-EN-M-087-162

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2023
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT’S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันโดยใช้เทคนิคการสุ่มและคงค่า
นักศึกษา	นายภิราพงศ์ พันธ์กำเหนิด
รหัสประจำตัว	62601185
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมระบบควบคุม
พ.ศ.	2566
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. อภินัย ฤกษ์รัตน์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันโดยใช้วิธีการสุ่มและคงค่า โดยวงจรที่นำเสนอนี้ใช้เพื่อแปลงค่าความจุไฟฟ้าจากเซนเซอร์เป็นแรงดันเอาต์พุตในรูปแบบไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งโครงสร้างพื้นฐานของวงจรประกอบด้วย วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม วงจรอนุพันธ์ วงจรขยายสัญญาณ วงจรโมโนสเตเบิล 2 วงจร และวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ โดยเทคนิคที่นำเสนออาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงค่าคงตัวเวลาของวงจรอนุพันธ์ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าความจุไฟฟ้าที่ทำการวัด วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณจะถูกใช้ในการอ่านค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรอนุพันธ์ ณ จุดเวลาที่เหมาะสม ทำให้ได้ค่าแรงดันเอาต์พุตที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความจุไฟฟ้าที่ทำการวัด จากการทดสอบประสิทธิภาพของวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันที่สร้างขึ้นด้วยตัวเก็บประจุมาตรฐานที่มีค่าความจุไฟฟ้าต่างกัน แสดงให้เห็นว่าวงจรที่นำเสนอสามารถแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันเอาต์พุตที่มีความเป็นเชิงเส้นและความไวในการวัดที่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Capacitance to Voltage Converter Circuit Using Sample and Hold Technique
Student	Mr. Phirapong Phankamnerd
Student ID	62601185
Degree	Master of Engineering
Program	Control Engineering
Year	2023
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Apinai Rerkratn

ABSTRACT

This thesis presents a capacitance to voltage converter circuit using the sample and hold technique. The proposed converter converts the capacitance of the sensor to DC (Direct Current) voltage output. The basic structure of the converter consists of a pulse generator circuit, a differentiator circuit, an amplifier circuit, two monostable circuits, and a sample and hold circuit. The proposed technique is based on the change of time constant from the differentiator circuit corresponding to the measuring capacitance. The sample and hold circuit is used for sampling the output voltage from the differentiator circuit at the appropriate point in time. The output voltage of the proposed converter is proportional to measuring capacitance. The standard capacitors with different capacitance are used to test the proposed converter performance. Experimental results show that the proposed converter can convert measuring capacitance to output voltage with good linearity and high sensitivity.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จด้วยดีข้าพเจ้าขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.อภินัย ฤกษ์รัตน์ ที่ได้ให้ความรู้และคำแนะนำแนวทางการวิเคราะห์เนื้อหาสาระของงานวิจัย ที่เคยนำเสนอในอดีต เพื่อให้เกิดความเข้าใจในการทำงานและศึกษางานวิจัย ตลอดจนให้คำปรึกษาและแก้ปัญหาต่างๆ เพื่อนำความรู้และทฤษฎีต่างๆ มาประยุกต์ให้เกิดประโยชน์ในการนำมาใช้ในงานวิจัยฉบับนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ศ.ดร.วันชัย ริ้วรุจา ที่คอยให้คำปรึกษา ให้คำชี้แนะ เพื่อที่จะสามารถทำงานวิจัยออกมาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อนุชา แก้วพลูสุข หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ในการแนะนำแนวทางหลักคิดทฤษฎีต่างๆ เพื่อนำมาปรับปรุงแก้ไขการศึกษาพัฒนางานวิจัยฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.วรรณดี เพชรมณีล้ำค่า อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมหุ่นยนต์และปัญญาประดิษฐ์ และ ผศ.ดร.สิริชัย ธรรมรักษ์วัฒนะ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม ที่คอยให้คำแนะนำช่วยเหลือในการทำวิจัย รวมถึงฝึกฝนทักษะต่างๆ

ขอขอบคุณพี่ๆน้อง ๆ ห้องปฏิบัติการทุกท่าน ที่ได้ให้กำลังใจและช่วยเหลือสำหรับการทดลองพัฒนาแก้ปัญหาร่วมกัน ตลอดจนน้ำใจเอื้อเฟื้อที่มีให้ในทุกๆ ด้าน และคอยเป็นกำลังใจ ให้คำแนะนำที่ดีในหลายๆ ด้าน จนผ่านอุปสรรคไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และบุคคลสำคัญในครอบครัวอีกหลายท่านที่คอยเป็นกำลังใจ เป็นแรงผลักดันให้ข้าพเจ้าด้วยดีเสมอมา ด้วยความซาบซึ้งและยินดียิ่ง

ภิราพงศ์ พันธ์กำเหนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย........I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ........II

กิจกรรมประกาศ........III

สารบัญ........IV

สารบัญตาราง........VIII

สารบัญรูป........IX

บทที่ 1 บทนำ........12

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา........12

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา........13

1.3 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย........13

1.4 ขอบเขตของการทำวิทยานิพนธ์........14

1.5 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์........14

บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานและหลักการที่เกี่ยวข้อง........15

2.1 กล่าวนำ........15

2.2 หลักการที่เกี่ยวข้อง........15

2.3 เซนเซอร์และทรานสดิวเซอร์........17

2.3.1 เซนเซอร์ชนิดเก็บประจุ........19

2.3.2 หลักการเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ........20

2.3.3 หลักการตรวจจับค่าความจุไฟฟ้าด้วยระยะห่างระหว่างแผ่นเพลท........22

2.3.4 หลักการตรวจจับค่าความจุไฟฟ้าด้วยการเปลี่ยนขนาดพื้นที่........23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.5 หลักการตรวจจับค่าความจุไฟฟ้าตามการเปลี่ยนค่าไดอิเล็กตริก....24

2.3.6 การประยุกต์ใช้หลักการตรวจจับค่าความจุไฟฟ้าแบบ 3 แผ่นเพลท....25

2.4 วงจรอ่านข้อมูล....27

2.4.1 วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดัน....27

2.4.2 วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นดิวตี้ไซเคิล....30

2.4.3 วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นความถี่....30

2.4.4 วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นความกว้างของสัญญาณพัลส์....33

2.4.5 องค์ประกอบของวงจรอ่านข้อมูลที่นำเสนอ....33

2.5 บทสรุป....37

บทที่ 3 การออกแบบและการดำเนินงานวิจัย....38

3.1 บทนำ....38

3.2 รูปแบบทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงค่าความจุเป็นแรงดันไฟฟ้าที่นำเสนอ....38

3.3 การจำลองโปรแกรมเพื่อหาค่าความต้านทานและอินพุตที่เหมาะสม....51

3.4 การทดลองเพื่อออกแบบอุปกรณ์ในวงจรอ่านค่าความจุไฟฟ้าในรูปแรงดัน....53

3.5 สร้างโมเดลความสัมพันธ์ระหว่างตัวเก็บประจุในวงจรอนุพันธ์กับแรงดันเอาต์พุต....60

3.6 บล็อกไดอะแกรม และรายละเอียดของวงจร....67

3.7 วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันโดยใช้เทคนิคการสุ่มและคงค่าที่นำเสนอ....67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง ... 69

4.1 รายการอุปกรณ์แยกตามบล็อกไดอะแกรม ... 69

4.1.1 วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ... 69

4.1.2 วงจรอนุพันธ์และส่วนประกอบ ... 70

4.1.3 วงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ ... 71

4.1.4 วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ ... 73

4.2 รายละเอียดการทดลอง ... 74

4.3 ผลการทดลอง ... 75

4.3.1 ผลการวัดค่าเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณ ... 75

4.3.2 ผลการวัดค่าเอาต์พุตวงจรอนุพันธ์ ... 76

4.3.3 ผลการวัดค่าเอาต์พุตวงจรวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ ชุดที่ 1 ... 77

4.3.1 ผลการวัดค่าเอาต์พุตวงจรวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ ชุดที่ 2 ... 78

4.3.2 ผลการอ่านค่าแรงดันเอาต์พุตจากวงจรที่นำเสนอ ... 80

4.3.3 ผลการวิเคราะห์ความผิดพลาดสัมพัทธ์ (Relative error) ... 81

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ ... 84

5.1 บทสรุป ... 84

5.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยต่อ ... 85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

เอกสารอ้างอิง..86

ภาคผนวกกบทความวิจัยที่ได้เผยแพร่...89

ประวัติผู้เขียน..97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบเชิงตัวเลขของเอ็กโพแนนเชียลในรูปอนุกรมแมคลอรินพจน์ต่างๆ 42

ตารางที่ 3.2 ตัวอย่างการเปลี่ยนค่าช่วงเวลาสำหรับการออกแบบวงจร..48

ตารางที่ 3.3 ผลการจำลองวัดค่าแรงดันไฟฟ้าในวงจรอนุพันธ์ในเวลาที่กำหนด............................60

ตารางที่ 3.4 ผลการวัดค่าจากวงจรจำลอง proteus กรณีมีตัวเก็บประจุอ้างอิง...........................64

ตารางที่ 3.5 ผลที่เกิดจากการมีตัวเก็บประจุอ้างอิงต่อขนานกับประจุทดสอบ..............................66

ตารางที่ 4.1รายการอุปกรณ์ วงจรกำเนิดสัญญาณ...70

ตารางที่ 4.2 รายการอุปกรณ์ของวงจรอนุพันธ์ 70

ตารางที่ 4.3 รายการอุปกรณ์ของวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ 71

ตารางที่ 4.4 รายการอุปกรณ์วงจรสุ่มและคงค่า...73

ตารางที่ 4.5 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบวงจรจริง 74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 วงจรอนุพันธ์ทั่วไปและอินพุต-เอาต์พุต 15

รูปที่ 2.2 สัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงจากการอ่านข้อมูลโดยวงจรที่เสนอ....................16

รูปที่ 2.3 กระบวนการแปลงปริมาณทางกายภาพเป็นปริมาณทางไฟฟ้าแบบพื้นฐาน 18

รูปที่ 2.4 ทรานสดิวเซอร์ชนิดแอกทีฟ....................18

รูปที่ 2.5 ทรานสดิวเซอร์ชนิดพาสซีฟ....................18

รูปที่ 2.6 ภาพรวมการตรวจวัดปริมาณทางกายภาพ 19

รูปที่ 2.7 ตัวเก็บประจุแบบง่าย 20

รูปที่ 2.8 หลักการตรวจจับปริมาณทางกายภาพตามการเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้า 22

รูปที่ 2.9 ค่าความจุไฟฟ้าและค่าอิมพีแดนซ์เมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างแผ่นเพลท 23

รูปที่ 2.10 ค่าความจุไฟฟ้าและค่าอิมพีแดนซ์เมื่อเปลี่ยนขนาดพื้นที่....................24

รูปที่ 2.11 ผลกระทบต่อค่าความจุไฟฟ้าและอิมพีแดนซ์เมื่อเปลี่ยนไดอิเล็กตริก....................24

รูปที่ 2.12 เทคนิคการเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้าแบบ 3 แผ่นเพลท 26

รูปที่ 2.13 ตัวอย่างวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดัน....................29

รูปที่ 2.14 ตัวอย่างวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นดิวตี้ไซเคิล 30

รูปที่ 2.15 ตัวอย่างวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นความถี่....................32

รูปที่ 2.16 วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันที่นำเสนอในอดีต....................32

รูปที่ 2.17 วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นความกว้างของสัญญาณพัลส์ [7] 33

รูปที่ 2.18 การต่อวงจรโมโนสเตเบิล โดยใช้ ไอซี 555 และวิธีคำนวณความกว้างคาบเวลา 35

รูปที่ 2.19 การต่อวงจรอะสเตเบิล โดยใช้ ไอซี 555 และวิธีคำนวณความกว้างคาบเวลา....................35

รูปที่ 2.20 การต่อวงจรไบสเตเบิล โดยใช้ ไอซี 555....................36

รูปที่ 2.21 โครงสร้างวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ....................37

รูปที่ 3.1 ลักษณะสัญญาณเอาต์พุตของวงจรอนุพันธ์ เมื่ออินพุตเปลี่ยนสถานะในรูปแบบต่างๆ 39

รูปที่ 3.2 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรอนุพันธ์เมื่อคาบเวลาน้อยกว่า 5RC....................40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.3 แรงดันเอาต์พุตของวงจรอนุพันธ์เทียบกับเวลา....41
รูปที่ 3.4 ค่า e-x ในรูปแบบอนุกรมแมคลอรินที่ค่าพจน์ต่างๆ....41
รูปที่ 3.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดตัวเก็บประจุ เวลา และแรงดัน....43
รูปที่ 3.6 กราฟแสดงค่า Voc เมื่อทดลองเปลี่ยน Cmin ค่าต่างๆ....44
รูปที่ 3.7 ดัดแปลงจากรูปที่ 3.6 โดยทดลองแบ่งค่า C(pF) เป็น 2 ช่วง....45
รูปที่ 3.8 กราฟแรงดันในรูปของตัวเก็บประจุเมื่อเลือก Cmin ที่เหมาะสม....45
รูปที่ 3.9 ทดลองสร้างสมการเส้นตรงเทียบเคียง $V_o(t)$....46
รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Vo, C เมื่อแบ่งเป็นหลายช่วงวัด....47
รูปที่ 3.11 รูปแบบอินพุตที่สอดคล้องกับเอาต์พุตตามที่ต้องการ....48
รูปที่ 3.12 วงจรกำเนิดความถี่ที่ใช้ไอซีเบอร์ 555....50
รูปที่ 3.13 วงจรอนุพันธ์ที่ออกแบบและ สัญญาณอินพุต-เอาต์พุต....51
รูปที่ 3.14 ลักษณะเอาต์พุตเมื่อตัวเก็บประจุในวงจรอนุพันธ์เก็บประจุเต็ม....51
รูปที่ 3.15 การออกแบบคาบเวลาอินพุตเพื่อให้ตัวเก็บประจุในวงจรอนุพันธ์เก็บประจุได้เต็ม....52
รูปที่ 3.16 การกำหนดอินพุตเมื่อต้องการค่าเอาต์พุตเฉพาะช่วงที่มีความเป็นเชิงเส้น....52
รูปที่ 3.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง t,R,C ในวงจรอนุพันธ์....53
รูปที่ 3.18 องค์ประกอบของวงจรอ่านค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันโดยใช้เทคนิคการสุ่มและคงค่า..54
รูปที่ 3.19 วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมโดยใช้ไอซีเบอร์ 555....55
รูปที่ 3.20 เอาต์พุตของวงจรกำเนิดรูปคลื่นสี่เหลี่ยมเมื่อเลือกอุปกรณ์ตามที่คำนวณ....56
รูปที่ 3.21 ลักษณะของเอาต์พุตของวงจรอนุพันธ์ที่เวลาใดๆ....56
รูปที่ 3.22 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรอนุพันธ์ C=10pF....57
รูปที่ 3.23 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรอนุพันธ์ C=100pF....57
รูปที่ 3.24 เอาต์พุตเมื่อผ่านวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส....58
รูปที่ 3.25 จุดวัดสัญญาณที่ $t = Ton + 0.2RxCmin$....59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.26 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่อ่านได้จากจุดวัดสัญญาณ..59

รูปที่ 3.27 โมเดลความสัมพันธ์ของตัวเก็บประจุ 10pF-100pF กับแรงดันเอาต์พุต......................61

รูปที่ 3.28 โมเดลความสัมพันธ์ของตัวเก็บประจุ 10pF-30pF กับแรงดันเอาต์พุต........................61

รูปที่ 3.29 โมเดลความสัมพันธ์ของตัวเก็บประจุ 30pF-60pF กับแรงดันเอาต์พุต........................62

รูปที่ 3.30 โมเดลความสัมพันธ์ของตัวเก็บประจุ 60pF-100pF กับแรงดันเอาต์พุต 62

รูปที่ 3.31 Model ที่มีค่าเก็บประจุอ้างอิงต่อขนานกับตัวเก็บประจุที่นำมาทดสอบ 65

รูปที่ 3.32 บล็อกไดอะแกรมวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันที่นำเสนอ 67

รูปที่ 3.33 วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันโดยใช้เทคนิคการสุ่มและคงค่าที่นำเสนอ 68

รูปที่ 4.1 วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม และรายการอุปกรณ์ 69

รูปที่ 4.2 วงจรอนุพันธ์ รายการอุปกรณ์...70

รูปที่ 4.3 วงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์และรายการอุปกรณ์...71

รูปที่ 4.4 ข้อมูลของ IC CD4528 สำหรับกำหนดค่า R,C ในวงจร...72

รูปที่ 4.5 เอกสารอ้างอิง IC CD4528 สำหรับกำหนดค่า R,C ในกรณีคาบเวลามีหน่วยเป็น ns......72

รูปที่ 4.6 วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณและรายการอุปกรณ์ 73

รูปที่ 4.7 แรงดันเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณ..75

รูปที่ 4.8 เอาต์พุตของวงจรอนุพันธ์ที่ถูกกลับด้านโดยวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส................76

รูปที่ 4.9 สัญญาณโมโนสเตเบิลที่ชุดที่ 1 เทียบกับสัญญาณจากวงจรกำเนิดสัญญาณ....................77

รูปที่ 4.10 เอาต์พุตของวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ชุดที่2 เทียบกับสัญญาณอินพุต 78

รูปที่ 4.11 จุดวัดเอาต์พุตของวงจรอนุพันธ์..79

รูปที่ 4.12 ค่าแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้ สำหรับค่าความจุ Cx ตั้งแต่ 10 pF ถึง 100 pF..................80

รูปที่ 4.13 ค่าแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้สำหรับ Cx ตั้งแต่ 100pF ถึง 1000 pF 80

รูปที่ 4.14 ความผิดพลาดสัมพัทธ์ สำหรับค่าความจุ Cx ตั้งแต่ 10pF ถึง 100pF 81

รูปที่ 4.15 ความผิดพลาดสัมพัทธ์ สำหรับค่าความจุ Cx ตั้งแต่ 100pF ถึง 1000pF 82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เซนเซอร์ชนิดเก็บประจุ (Capacitive sensor) เป็นเซนเซอร์แบบไม่มีการสัมผัสชนิดหนึ่งที่พัฒนาขึ้นมาโดยอาศัยคุณลักษณะพื้นฐานของตัวเก็บประจุ ซึ่งสามารถตรวจจับปริมาณทางกายภาพต่างๆ ทั้งที่เป็นวัสดุและวัตถุที่เป็นสื่อกระแสไฟฟ้าหรือมีค่าคงที่การเป็นฉนวนทางไฟฟ้า (Dielectric constant) แตกต่างจากอากาศ เทคโนโลยีการตรวจจับประจุไฟฟ้า ถูกนำไปใช้ในการพัฒนาเซนเซอร์หลากหลายชนิด รวมถึงเซนเซอร์เพื่อวัดค่าพารามิเตอร์ทางกายภาพและทางเคมี เช่น ตรวจวัดระยะ ความดัน ตำแหน่งและการเคลื่อนไหว แรง ความชื้น ระดับของเหลว ความเร่ง คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แอมโมเนีย (NH3) ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO2) ไอระเหยอินทรีย์พิษ ความเข้มข้นไอออน คุณสมบัติของวัสดุ เป็นต้น โครงสร้างของเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุทำจากสื่อไฟฟ้าต่างๆ อาทิ โพลีซิลิกอน ทองแดง ดีบุกออกไซด์ ฟิล์มนำไฟฟ้า เป็นต้น เซนเซอร์ชนิดเก็บประจุ 3 รูปแบบ ที่นิยมนำมาใช้ในการแปลงข้อมูลซึ่งประกอบด้วย ตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน (Parallel plate capacitors) ตัวเก็บประจุแกนร่วมทรงกระบอก (Cylindrical co-axial capacitors) และตัวเก็บประจุแบบไขว้ทรงกระบอก (Cylindrical cross capacitors) โดยทั่วไปย่านของค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุจะอยู่ที่ประมาณ 50pF ถึง 100 pF โดยค่าที่วัดได้มีการเปลี่ยนแปลงค่าเพียงไม่กี่พิโคฟารัด (picofarads; pF) [1-3] จะเป็นผลทำให้การออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการอ่านข้อมูลปริมาณความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุ จะต้องมีความไวในการวัดสูง มีลักษณะเชิงเส้นที่ดี และมีความต้านทานการรบกวนใดๆ สูง มีนักวิจัยหลายท่านได้เสนอเทคนิคการแปลงค่าความจุเป็นปริมาณทางไฟฟ้า ด้วยค่าเอาต์พุตแบบต่างๆ เช่น N. Kanjanapart และ P. Bruschi ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับเทคนิคในการวัดความจุไฟฟ้าด้วยวิธีวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของเอาต์พุตในรูปของเวลา [4-5], D.Y. Shin, C.T. Chiang และ V. P. Parusov ได้เสนอเทคนิคในการวัดความจุไฟฟ้าด้วยวิธีวิเคราะห์ความถี่เอาต์พุตที่เปลี่ยนแปลง [6-8] , J. P. Sanjurjo และ C. Rogi เสนอเทคนิคการวัดความจุด้วยวิธีวิเคราะห์สัญญาณดิจิตอลเอาต์พุต [9-10] วิธีการวัดความจุที่แพร่หลาย คือการวัดแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ตัวแปลงความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันไฟฟ้ามี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลากหลายรูปแบบ เช่นในบทความ [11-13] ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอเทคนิคในการแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันในรูปแบบไฟฟ้ากระแสตรงและประเมินค่าความจุไฟฟ้าจากแรงดันที่วัดได้ โดยใช้วงจรอนุพันธ์ และวิธีการอ่านแรงดันและคงค่าไว้ซึ่งจะกลายเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยวงจรที่จัดทำขึ้นมุ่งเน้นการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีจำหน่ายทั่วไปในท้องตลาดมาจัดทำ

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะนำเสนอเทคนิคในการออกแบบและจัดทำวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าไปเป็นแรงดัน ในแบบไฟฟ้ากระแสตรงเพื่ออ่านค่าแรงดันแล้วประเมินกลับเพื่อหาค่าปริมาณความจุไฟฟ้าที่เซนเซอร์ตรวจจับ โดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่หาซื้อได้ตามร้านขายอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั่วไปและมีราคาไม่แพง ซึ่งวงจรแปลงค่าที่เสนอนี้จะมีผลทำให้ค่าแรงดันที่อ่านได้แปรผันตรงกับค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้จากเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุ และวงจรที่นำเสนอนี้มีเป้าหมายให้สามารถอ่านค่าความจุตั้งแต่ 10 pF ถึง 1000PF ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

1.3 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

แนวคิดที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คือ ใช้หลักการของวงจรอนุพันธ์ ซึ่งประกอบด้วยตัวต้านทาน (R) และตัวเก็บประจุ (C) ต่ออนุกรมกันและเมื่อจ่ายแรงดันอินพุตเป็นสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม จะเป็นผลให้ได้สัญญาณแรงดันเอาต์พุตโดยวัดคร่อมตัวต้านทาน (R) มีลักษณะเป็นเส้นโค้งแบบเอ็กโพแนนเชียล (e^{-x}) และเมื่อพิจารณาจากคุณลักษณะทั่วไปของสมการเอ็กโพแนนเชียล จะมีช่วงหนึ่งมีลักษณะเป็นเชิงเส้น สามารถพิสูจน์ได้โดยการเปลี่ยนรูปสมการเอ็กโพแนนเชียล ให้อยู่ในรูปอนุกรมแมคคลอรีน จากหลักการนี้เมื่อนำมาใช้กับสมการของแรงดันเอาต์พุตของวงจรอนุพันธ์ซึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานและค่าความจุของตัวเก็บประจุ ในขณะเวลาต่างๆ ดังนี้ $V_o(t) = V_i(t)\left(e^{\frac{-t}{RC}}\right)$ และพบว่าเมื่ออ่านค่า V_o ณ จุดที่ค่า (t) มีค่าน้อยกว่าผลคูณของค่า RC มากๆ ณ จุดนี้มีผลทำให้สามารถแทนสมการคณิตศาสตร์ $V_i(t)\left(e^{\frac{-t}{RC}}\right)$ ด้วยสมการคณิตศาสตร์ของวงจรอนุพันธ์ใหม่ซึ่งมีลักษณะเป็นเชิงเส้นคือ $V_o(t) = V_i(t)\left(1 - \frac{t}{RC}\right)$ ได้ และเมื่อกำหนดให้ค่า $t, R, V_i(t)$ เป็นค่าคงที่ สามารถมองในรูปสมการใหม่เป็น $C = kV_o$ เมื่อ k คือค่าคงที่ใดๆ ซึ่งสามารถนำแนวคิดนี้มาจัดทำเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพื่ออ่านค่าความจุไฟฟ้า (C) ที่ไม่ทราบค่า โดยใช้วิธีประเมินตามสมการที่กล่าวมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขอบเขตของการทำวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการศึกษาการออกแบบและพัฒนา วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันแบบไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั่วไปที่สามารถหาซื้อได้ตามท้องตลาด ที่ทำให้ต้นทุนการผลิตต่ำและมีความสะดวกในการจัดทำ เพื่อเป็นวงจรอ่านค่าจากเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุ โดยใช้หลักการของวงจรอนุพันธ์และเทคนิคการอ่านข้อมูลแบบสุ่มและคงค่าสัญญาณ จากนั้นก็ทำการวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของวงจร ทำการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานในหลาย ๆ เงื่อนไข รวมทั้งการทดสอบ โดยใช้ตัวเก็บประจุมาตรฐานขนาด 10pF - 100pF เพื่อเป็นการยืนยันให้เห็นว่าหลักการที่นำเสนอสามารถนำไปใช้งานได้จริง

1.5 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีเนื้อหาทั้งหมด 6 บท และภาคผนวก ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

บทที่ 1 บทนำ ในบทนี้จะนำเสนอถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของการทำวิทยานิพนธ์รวมถึงรายละเอียดของการทำวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานและหลักการที่เกี่ยวข้อง บทนี้จะกล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาวิจัยในหัวข้อของวิทยานิพนธ์ฉบับบนี้

บทที่ 3 การออกแบบและการดำเนินงานวิจัย สำหรับบทนี้จะนำเสนอหัวข้อหลักการและทฤษฎีในวิธีการที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาวิจัย

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง เป็นส่วนของการแสดงวิธีการทดลอง การคำนวณ และผลการทดลองที่ได้จากการศึกษาที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ ในส่วนนี้เป็นการสรุปผลการทำวิจัยที่ได้จากการทดลองรวมถึงแนวทางและข้อเสนอแนะในการนำผลที่ได้ไปประยุกต์ใช้หรือพัฒนาวิธีการอื่นๆ เพื่อการวิจัยต่อไป

บทที่ 6 เอกสารอ้างอิง สำหรับบทนี้จะรวบรวมที่มาของงานวิจัยต่างๆ หนังสือ สื่ออิเล็กทรอนิกส์ ที่ได้นำมาอ้างอิงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ในส่วนท้ายของวิทยานิพนธ์นี้ คือ ภาคผนวก ซึ่งกล่าวถึงบทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ และการอธิบายวงจรที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์เพิ่มเติม ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ภาคผนวก ก บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ

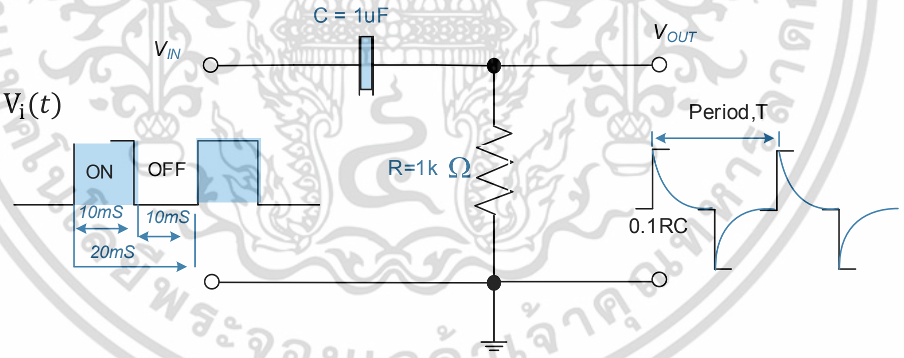
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีพื้นฐานและหลักการที่เกี่ยวข้องเกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะนำเสนอ หลักการที่เกี่ยวข้อง และทฤษฎีพื้นฐาน ซึ่งถูกนำมาใช้ในการออกแบบและจัดทำวงจรแปลงค่าความจุเป็นแรงดันไฟฟ้าแบบกระแสตรง สำหรับใช้อ่านค่าความจุไฟฟ้าที่ไม่ทราบค่าซึ่งเป็นองค์ประกอบในวงจรอนุพันธ์ โดยการอ่านค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรอนุพันธ์ แล้วประเมินกลับเพื่อหาค่าความจุไฟฟ้าที่ไม่ทราบค่านั้น ซึ่งวงจรประกอบด้วย ชุดจ่ายอินพุตแบบคลื่นสี่เหลี่ยม ชุดวงจรอนุพันธ์ (รูปที่ 2.1) ชุดวงจรกำหนดช่วงเวลาเพื่ออ่านค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรอนุพันธ์ ที่มีรูปแบบเป็นสัญญาณเอ็กโพแนนเชียล โดยการอ่านค่าแรงดันเอาต์พุตเพียงจุดใดจุดหนึ่งที่เหมาะสมแล้วคงค่านั้นไว้ โดยวงจรเบื้องต้นและสัญญาณอินพุต-เอาต์พุต มีลักษณะตาม รูปที่ 2.2

2.2 หลักการที่เกี่ยวข้อง



รูปที่ 2.1 วงจรอนุพันธ์ทั่วไปและอินพุต-เอาต์พุต

วิทยานิพนธ์เรื่อง “วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันไฟฟ้าโดยใช้วิธีการสุ่มและคงค่า” ฉบับนี้เป็นการนำเสนอการออกแบบและพัฒนาวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันแบบไฟฟ้ากระแสตรงโดยที่แรงดันเอาต์พุตที่อ่านได้ มีลักษณะสัมพันธ์กับตัวเก็บประจุเป็นองค์ประกอบในวงจร เพื่อนำวงจรส่วนนี้ไปใช้เป็นตัวแปลงในวงจรแปลงค่าปริมาณทางกายภาพใดๆ ไปเป็นปริมาณทางไฟฟ้าในลักษณะของค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความจุไฟฟ้าจากเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุ โดยที่ตัวแปลงที่นำเสนอนี้สามารถอ่านค่าความจุไฟฟ้าในช่วงความจุตั้งแต่ 10 pF จนถึง 100 pF ซึ่งเป็นค่าความจุไฟฟ้าที่อยู่ในย่านของเซนเซอร์ที่ใช้งานทั่วไป

จากหลักการของวงจรอนุพันธ์ซึ่งอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาในการเก็บและคายประจุของตัวเก็บประจุ (Capacitor) กับตัวต้านทาน (Resistor) ซึ่งสามารถเขียนในรูปสมการคณิตศาสตร์คือ

$$V_o(\mathrm{t})=V_i(\mathrm{t})\left(\mathrm{e}^{\frac{-\mathrm{t}}{\mathrm{RC}}}\right) \tag{2.1}$$

เมื่อ

$V_i(t)$ คือ แรงดันอินพุตป้อนเข้าวงจรอนุพันธ์ (V)

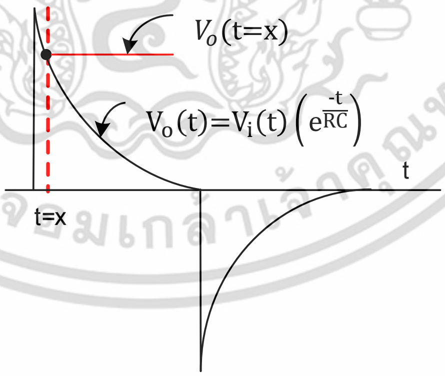
$Vo(t)$ คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรอนุพันธ์ (V)

t คือ เวลาที่ใช้ไปตั้งแต่เริ่มป้อนอินพุต

R คือ ค่าความต้านทาน (Ω)

C คือ ค่าความจุทางไฟฟ้า (Farads)

โดยที่สมการที่ (2.1) สามารถเขียนกราฟในรูปความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันเอาต์พุตที่เปลี่ยนไปที่เวลาต่างๆ ได้ตามรูปที่ 2.2 และที่เวลาใดๆ (t=x) สามารถอ่านค่าแรงดันและคงค่านั้นไว้ซึ่งจะทำให้ค่าที่ได้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 2.2 สัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงจากการอ่านข้อมูลโดยวงจรที่เสนอ

จากรูปที่ 2.2 สามารถคำนวณค่าแรงดันที่ $\mathrm{V_o(t=x)}$ ณ จุดเวลาที่กำหนด ซึ่งจะได้ค่าแรงดันเอาต์พุตเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงตาม รูปที่ 2.2 และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ทางเวลาของสัญญาณอินพุต

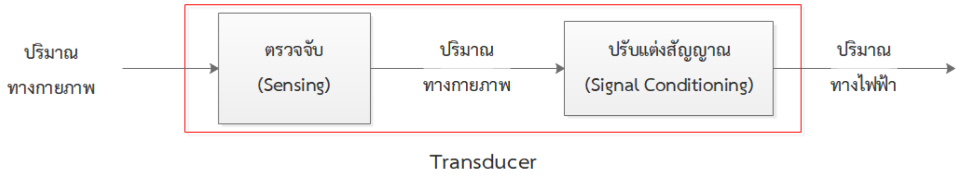
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$V_i(t)$ ที่มีลักษณะเป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม โดยพิจารณาจากช่วงเวลาที่สัญญาณเปลี่ยนจากระดับ จาก 0 เป็น $V_{max}(t)$ และค้างค่าไว้ที่แรงดันสูงสุด การเปลี่ยนแปลงนี้มีผลทำให้สัญญาณเอาต์พุตที่วัดคร่อมตัวต้านทานในวงจรตามรูปที่ 2.1 มีค่าสูงสุดเท่า$V_{max}(0)$ ในทันทีจากนั้นจะค่อยๆ ลดลงเรื่อยๆ ไปจนกระทั่งค่าเวลา(t) มากว่า 5 เท่าของค่า RC ปริมาณไฟฟ้าในตัวเก็บประจุก็จะหมดไป หรือจะพิจารณาที่สัญญาณเปลี่ยนจาก $V_{max}(t)$ เป็น 0 แล้วค้างค่าไว้ ก็จะมีลักษณะเป็นแบบเดียวกันแต่จะกลับด้านเป็นด้านลบ ตามทฤษฎีแล้วความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของค่า RC ตามสมการที่ (2.1) กล่าวถึงกับช่วงเวลาการเก็บและคายประจุซึ่งมีผลที่ทำให้สัญญาณ $V_o(t)$ มีลักษณะรูปสัญญาณแตกต่างกัน เช่นค่า RC มากมีผลทำให้ใช้เวลาในการคายประจุนานกว่าค่า RC น้อย ความสัมพันธ์ระหว่างค่า RC กับขนาดความกว้างของสัญญาณอินพุตที่มีลักษณะเป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยมก็มีผล เช่นผลคูณระหว่าง 5RC มากกว่าช่วง T_{on} มีผลทำให้ขณะกคายประจุในช่วง T_{on} ยังไม่หมดมีสัญญาณอินพุตใหม่ในช่วง T_{off} เข้ามาแทรกตัวเก็บประจุที่ยังคายประจุไม่หมดก็มีประจุใหม่อีกขั้วเติมเข้ามา ในงานวิจัยนี้ให้ความสนใจกับเวลาที่เหมาะสมในการอ่านค่าแรงดันเอาต์พุตเพื่อนำไปทำวงจรแปลงค่า ปัจจัยสำคัญที่ทำให้การแปลงค่าแม่นยำคือจุดเวลา (t) ในสมการที่ (2.1) ซึ่งเป็นจุดที่จะอ่านค่าแรงดัน จะต้องเป็นค่าเวลาที่ผลคูณระหว่างค่า C (ไม่ทราบค่า) กับค่า R (กำหนดค่าได้) และคาบเวลาของอินพุตสัญญาณสี่เหลี่ยมอยู่ในช่วงเวลาที่เหมาะสมและช่วงการเปลี่ยนแปลงของ V_o มีลักษณะเป็นเชิงเส้นที่สุดเนื้อหาในบทนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาค้นคว้า โดยอ้างจากทฤษฎีพื้นฐาน เอกสาร บทความ งานวิจัยและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องทั้งในประเทศและต่างประเทศ ซึ่งเนื้อหาจะประกอบไปด้วย ส่วนของเซนเซอร์ ส่วนของวงจรแปลงปริมาณทางกายภาพเป็นปริมาณไฟฟ้า วงจรอนุพันธ์ช่วงเวลาที่เหมาะสมที่จะทำให้ผลการอ่านค่า V_o ในรูปแบบไฟฟ้ากระแสตรงและค่าที่อ่านได้สามารถคำนวณกลับเพื่อหาค่า C ซึ่งถูกรับสัญญาณมาจากเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุ ได้แม่นยำที่สุด

2.3 เซนเซอร์และทรานสดิวเซอร์

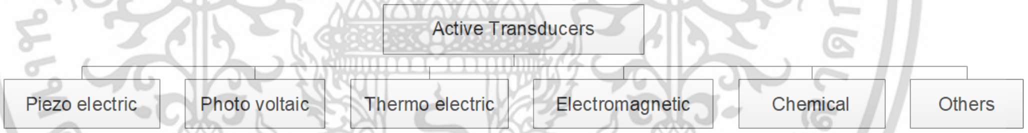
เซนเซอร์ (Sensor) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเปลี่ยนปริมาณทางกายภาพให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งมีขั้นตอนการทำงาน 2 ขั้นตอนคือการตรวจจับและการแปลงปริมาณทางกายภาพที่ตรวจจับได้ไปเป็นปริมาณทางไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 2.3 ทรานสดิวเซอร์ (Transducer) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานจากรูปแบบหนึ่งไปเป็นอีกรูปแบบหนึ่ง หรืออาจจะกล่าวได้ว่าทรานสดิวเซอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แปลงข้อมูลหรือพลังงานรูปแบบต่างๆ ให้เป็นข้อมูลหรือพลังงานไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

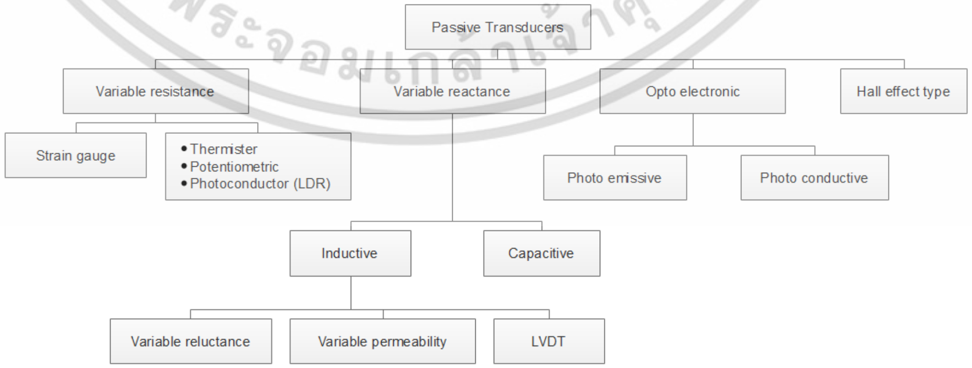


รูปที่ 2.3 กระบวนการแปลงปริมาณทางกายภาพเป็นปริมาณทางไฟฟ้าแบบพื้นฐาน

ในการตรวจจับปริมาณทางกายภาพนั้นจะมีปริมาณทางกายภาพบางอย่างสามารถตรวจจับและแปลงเป็นปริมาณทางไฟฟ้าได้โดยไม่ต้องมีการกระตุ้นเรียกว่า ทรานสดิวเซอร์ชนิดแอกทีฟ (Active Transducers) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 เช่น เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) เพียโซอิเล็กทริค (Piezoelectric) เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell) อุปกรณ์เชื่อมต่อทางแสง หรือออปโต้คัปเปลอร์ (Opto-Isolator) เป็นต้น อุปกรณ์เหล่านี้ไม่ต้องมีแหล่งจ่ายกำลังจากภายนอกก็สามารถให้สัญญาณแรงดันหรือกระแสที่แปรตามตัวแปรกายภาพได้เอง ส่วนอุปกรณ์ตรวจจับปริมาณทางกายภาพที่ต้องการแหล่งพลังงานจากภายนอกมากระตุ้นและรอรับผลตอบสนอง เช่น เซนเซอร์ที่ใช้หลักการเปลี่ยนค่าความต้านทาน ค่าความจุไฟฟ้า ค่าความเหนี่ยวนำ อุปกรณ์เหล่านี้จะเรียกว่า ทรานสดิวเซอร์ชนิดพาสซีฟ (Passive Transducers) ตัวอย่างทรานสดิวเซอร์ชนิดพาสซีฟ แสดง ดังรูปที่ 2.5



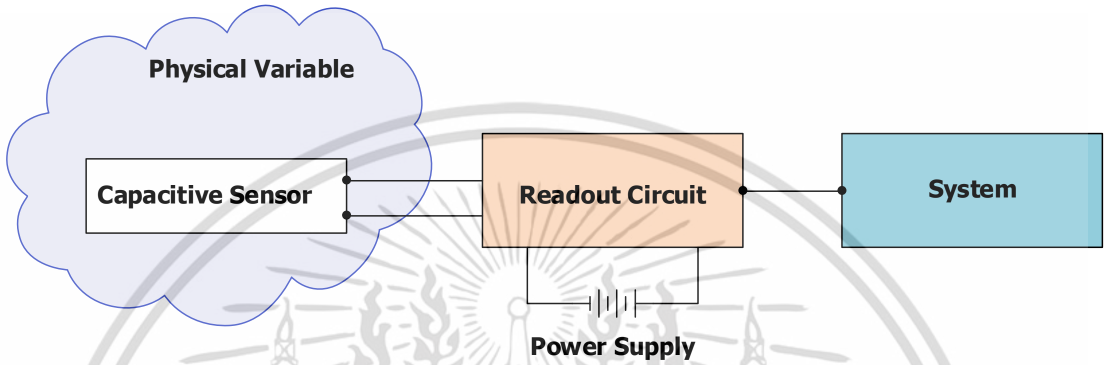
รูปที่ 2.4 ทรานสดิวเซอร์ชนิดแอกทีฟ



รูปที่ 2.5 ทรานสดิวเซอร์ชนิดพาสซีฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นการศึกษาเซนเซอร์ที่ใช้หลักการเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้า ซึ่งเป็นทรานสดิวเซอร์ชนิดพาสซีฟ รูปแบบหนึ่ง เรียกว่า เซนเซอร์ชนิดเก็บประจุ สามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานได้ดังนี้



รูปที่ 2.6 ภาพรวมการตรวจวัดปริมาณทางกายภาพ

จากรูปที่ 2.6 การทำงานส่วนแรกเป็นส่วนของการตรวจจับปริมาณทางกายภาพโดยใช้เซนเซอร์ชนิดตรวจจับความเปลี่ยนแปลงค่าประจุทางไฟฟ้า ซึ่งมีหลักในการตรวจจับคือ ผลกระทบของปริมาณทางกายภาพที่มีต่อปัจจัย 3 อย่าง คือ ระยะระหว่างแผ่นเพลท พื้นที่ของแผ่นเพลทและไดอิเล็กตริกระหว่างแผ่นเพลท หลักการตรวจจับทั้ง 3 ปัจจัยนี้จะมีการแสดงรายละเอียดในหัวข้อเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุ และส่วนที่สองคือ วงจรแปลงค่าปริมาณทางกายภาพเป็นปริมาณทางไฟฟ้า หรือที่เรียกกันว่าวงจรอ่านข้อมูล ส่วนที่สามเรียกส่วนนี้ว่าระบบ (System) เป็นกระบวนการหลังจากการอ่านค่าความเปลี่ยนแปลงและแปลงค่าเป็นปริมาณทางไฟฟ้าแล้ว ซึ่งจะเป็นการนำค่าที่ได้ไปประยุกต์ใช้งาน โดยงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาส่วนนี้เฉพาะการแปลงค่าปริมาณทางกายภาพที่อ่านได้จากตัวตรวจจับประเภทความเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้า ซึ่งก็คือวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นปริมาณทางไฟฟ้า โดยจะแสดงรายละเอียดในหัวข้อวงจรอ่านข้อมูลต่อไป

2.3.1 เซนเซอร์ชนิดเก็บประจุ

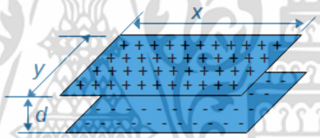
เซนเซอร์ชนิดเก็บประจุ เซนเซอร์ประเภทนี้มีโครงสร้างทั้งภายนอกและภายในคล้ายกับเซนเซอร์แบบเหนี่ยวนำ แต่อาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงค่าความจุ เนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของวัตถุที่เข้าใกล้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

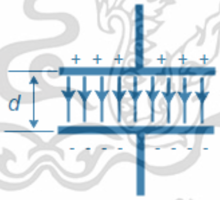
สนามไฟฟ้าของเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุ เซนเซอร์ชนิดนี้สามารถตรวจจับปริมาณทางกายภาพได้โดยการปล่อยสนามไฟฟ้าผ่านสิ่งที่ต้องการตรวจวัดโดยไม่จำเป็นต้องสัมผัส จัดอยู่ในกลุ่มทรานสดิวเซอร์ชนิดพาสซีฟ ที่มีความสำคัญและถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในการวัดสัญญาณทางกายภาพต่างๆ มากมาย [1] เช่น ระยะการกระจัด ความเร่ง ความดัน ความชื้น และระดับของของเหลว ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ ปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ ปริมาณไนโตรเจนไตรไฮไตรด์ ไอระเหยพิษจากอินทรียวัตถุ คุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุ ฯลฯ และเซนเซอร์ชนิดนี้สามารถตรวจจับวัสดุทั้งอโลหะและโลหะได้

2.3.2 หลักการเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุอย่างง่ายประกอบด้วยแผ่นโลหะอย่างน้อยสองแผ่นเรียกว่าแผ่นเพลท และมีฉนวนหรือไดอิเล็กตริกคั่นระหว่างแผ่นเพลทดังแสดงใน รูปที่ 2.7 (ก) และเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าจะทำให้เกิดสนามแม่ไฟฟ้าไหลผ่านไดอิเล็กตริก มีผลทำให้เกิดการเก็บประจุไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.7 (ข)



(ก) โครงสร้างตัวเก็บประจุอย่างง่าย



(ข) สัญลักษณ์การเกิดสนามไฟฟ้าเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านไดอิเล็กตริก

รูปที่ 2.7 ตัวเก็บประจุแบบง่าย

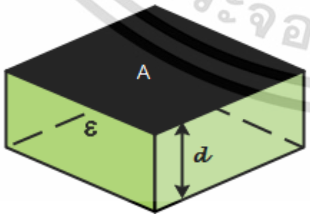
จาก รูปที่ 2.7 สามารถอธิบายหลักการทำงานโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ของตัวเก็บประจุบนแผ่นเพลทแบบขนานได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

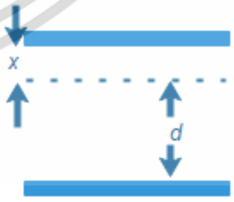
$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d} \tag{2.2}$$

เมื่อ	C	คือ	ค่าความจุไฟฟ้า
	ε_0	คือ	ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของสุญญากาศ *(Permittivity of free space)* มีค่าเท่ากับ *8.85x10^{-12} (farad/m)*
	ε_r	คือ	ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์ *(Relative Permittivity)* ของวัสดุอื่นๆ หรือเรียกว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก
	A	คือ	ค่าพื้นที่เพลทที่ร่วมกัน *(m^2), A = xy*
	d	คือ	ระยะห่างที่เพลทแยกห่างจากกัน *(m)*

จากสมการที่ (2.2) จะเห็นว่าค่าความจุไฟฟ้าแปรผันตรงกับค่าของไดอิเล็กตริกและขนาดของพื้นที่แผ่นเพลทที่ร่วมกัน และมีค่าแปรผกผันกับระยะห่างที่แผ่นเพลทแยกห่างจากกัน การเปลี่ยนแปลงค่าของทั้ง 3 ปัจจัยนี้มีผลทำให้ค่าความจุไฟฟ้าและค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) มีการเปลี่ยนค่าในลักษณะต่างๆ สามารถใช้หลักการนี้ประยุกต์ใช้ในการออกแบบตัวตรวจจับปริมาณทางกายภาพโดยใช้การเปลียนแปลงคุณสมบัติของตัวเก็บประจุได้ 3 รูปแบบคือ ตัวตรวจจับปริมาณทางกายภาพที่อาศัยหลักการเปลี่ยนค่าความจุตามการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างเพลท (d) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 (ข) ตัวตรวจจับปริมาณทางกายภาพที่อาศัยหลักการเปลี่ยนค่าความจุตามการเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่ (A) ดังแสดงใน รูปที่ 2.8 (ค) ตัวตรวจจับปริมาณทางกายภาพที่อาศัยหลักการเปลี่ยนค่าความจุตามการเปลี่ยนค่าของไดอิเล็กตริก (ε_r) ดังแสดงใน รูปที่ 2.8 (ง)

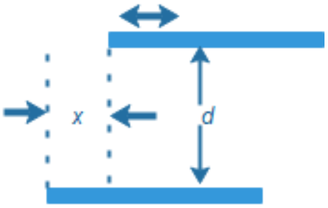


(ก) หลักการพื้นฐานของค่าความจุไฟฟ้า

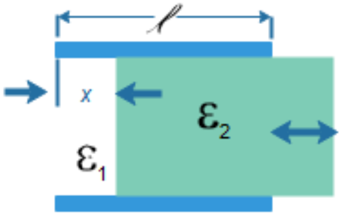


(ข) หลักการเปลี่ยนระยะห่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) หลักการเปลี่ยนพื้นที่



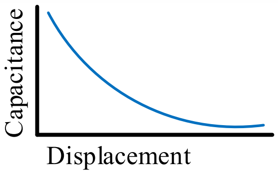
(ง) หลักการเปลี่ยนค่าไดอิเล็กตริก

รูปที่ 2.8 หลักการตรวจจับปริมาณทางกายภาพตามการเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้า [2]

2.3.3 หลักการตรวจจับค่าความจุไฟฟ้าด้วยระยะห่างระหว่างแผ่นเพลท

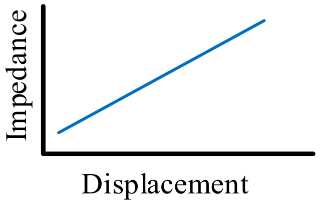
ตัวตรวจค่าความจุไฟฟ้าโดยอาศัยหลักการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างแผ่นเพลทประกอบด้วยแผ่นเพลทตัวนำ 2 แผ่นวางขนานกันโดยมีแผ่นเพลทที่ยึดกับที่กับอีกแผ่นที่เคลื่อนที่ได้ ตัวตรวจจับแบบนี้มักใช้สำหรับตรวจสอบความเปลี่ยนแปลงของแผ่นตัวนำที่เคลื่อนที่ เช่น การตรวจสอบการกด ที่ทำให้ระยะระหว่างแผ่นเพลททั้งสองลดลง มีผลทำให้ค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นในลักษณะที่ไม่สม่ำเสมอ คือ เมื่อระยะระหว่างแผนเพลทยิ่งอยู่ใกล้กันค่าความจุทางไฟฟ้าก็จะมีค่ามาก และจะมีค่าน้อยลงในช่วงเวลาหนึ่งหลังจากนั้นจะเริ่มมีค่าคงที่ ตามคุณลักษณะในรูปที่ 2.9 (ข) ในขณะที่ค่าอิมพีแดนซ์จะมีค่าน้อยลงในลักษณะสม่ำเสมอคือ ยิ่งระยะมากขึ้นค่าอิมพีแดนซ์ก็จะเพิ่มมากขึ้นตามรูปแสดงคุณลักษณะในรูปที่ 2.9 (ค) ซึ่งสามารถนำคุณสมบัติในการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างแผ่นแพลทดังที่กล่าวนี้ไปใช้ในการออกแบบวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นสัญญาณไฟฟ้ารูปแบบต่างๆ และต้องนำคุณสมบัติด้านค่าอิมพีแดนซ์มาพิจารณาในการออกแบบด้วย

(ก) ระยะระหว่างแผ่นเพลทที่เปลี่ยนแปลง



(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุทางไฟฟ้าและระยะห่างระหว่างเพลท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์และระยะห่างระหว่างเพลท

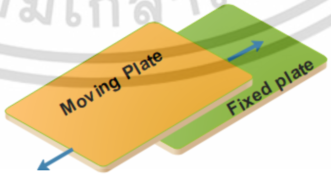
รูปที่ 2.9 ค่าความจุไฟฟ้าและค่าอิมพีแดนซ์เมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างแผ่นเพลท

การเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าตามการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างเพลท ที่ทำให้ระยะ d ในสมการที่ (2.2) เปลี่ยนเป็น d+x หรือ d-x มีผลทำให้ค่าของ C ตามสมการที่ (2.2) จะมีสมการใหม่เป็น

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \left(\frac{A}{d + x} \right) \tag{2.3}$$

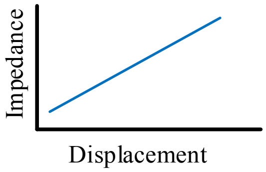
2.3.4 หลักการตรวจจับค่าความจุไฟฟ้าด้วยการเปลี่ยนขนาดพื้นที่

ตัวตรวจจับแบบนี้ประกอบด้วยแผ่นเพลทตัวนำ 2 แผ่น วางขนานกันโดยมีแผ่นเพลทที่ยึดติดกับที่และแผ่นเพลทที่เคลื่อนที่ได้โดยที่การเคลื่อนที่นั้นจะไม่ทำให้ระยะห่างระหว่างแผ่นเพลท เปลี่ยน ไป แต่จะมีผลทำให้พื้นที่ซ้อนทับของแผ่นเพลทเปลี่ยนไปตามลักษณะในรูปที่ 2.10(ก) เมื่อพื้นที่ซ้อนทับมีขนาดเปลี่ยน ก็มีผลทำให้ค่าความจุไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงในลักษณะเชิงเส้นตามคุณลักษณะตามรูปที่ 2.10(ข) และค่าอิมพีแดนซ์มีการเปลี่ยนแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้นตามคุณลักษณะใน รูปที่ 2.10 (ค)

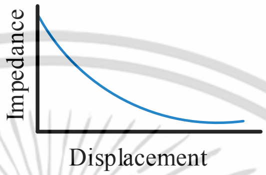


(ก) ระยะการซ้อนทับของแผ่นเพลทที่เปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและระยะซ้อนทับแผ่นเพลท



(ค) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์และระยะซ้อนทับของแผ่นเพลท

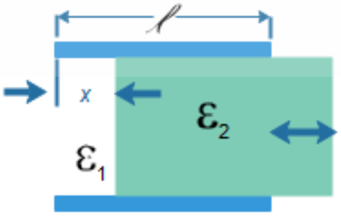
รูปที่ 2.10 ค่าความจุไฟฟ้าและค่าอิมพีแดนซ์เมื่อเปลี่ยนขนาดพื้นที่

เมื่อพิจารณาค่าความจุไฟฟ้าตามสมการที่ (2.2) ในกรณีพื้นที่ซ้อนทับมีการเปลี่ยนแปลงและกำหนดให้ $\Delta A = xy$ อ้างอิงตาม รูปที่ 2.7 (ก) จะได้สมการคณิตศาสตร์ใหม่เป็นดังนี้

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \left(\frac{A + \Delta A}{d}\right) \tag{2.4}$$

ซึ่งจะสังเกตได้ว่าค่าความจุไฟฟ้าจะแปรผันตรงกันกับการเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่ซ้อนทับ แต่ค่าอิมพีแดนซ์จะมีค่าสูงในขณะที่พื้นที่ซ้อนทับน้อยๆ นั่นหมายความว่าที่ค่าความจุไฟฟ้าต่ำจะมีผลทำให้ค่าอิมพีแดนซ์สูง

2.3.5 หลักการตรวจจับค่าความจุไฟฟ้าตามการเปลี่ยนค่าไดอิเล็กตริก



รูปที่ 2.11 ผลกระทบต่อค่าความจุไฟฟ้าและอิมพีแดนซ์เมื่อเปลี่ยนไดอิเล็กตริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไดอิเล็กตริก (Dielectric) คือ สารที่ภายในไม่มีประจุไฟฟ้าอิสระหรือถ้ามีก็มีน้อยมาก หากนำไปวางภายในสนามไฟฟ้า จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระ และหากเพิ่มความเข้มของสนามไฟฟ้าขึ้นถึงระดับหนึ่งจะสามารถเปลี่ยนวัสดุไดอิเล็กตริกให้เป็นตัวนำได้ การเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติไดอิเล็กตริกตรงกลางระหว่างแผ่นตัวนำส่งผลต่อค่าของความจุไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามสมการที่ (2.2) โดยที่สารไดอิเล็กตริกแต่ละชนิดมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่แตกต่างกัน และมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกันกับค่าความจุไฟฟ้า เมื่อระยะ x ตาม รูปที่ 2.11 เปลี่ยนจะมีผลทำให้ไดอิเล็กตริก $\boldsymbol{\varepsilon_2}$ ระหว่างเพลตเปลี่ยนไป ($\varepsilon_2 > \varepsilon_1$) ค่าความจุรวมของเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุหาได้จากผลรวมของตัวเก็บประจุสองส่วนคือ ส่วนที่มีพื้นที่ A_1 ของไดอิเล็กตริก $\boldsymbol{\varepsilon_1}$ คือ wx และพื้นที่ A_2 ของไดอิเล็กตริก $\boldsymbol{\varepsilon_2}$ คือ w(l-x) สามารถสรุปในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ได้ ตามสมการที่ (2.5)

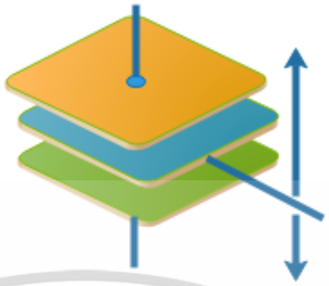
$$C = \varepsilon_0 \frac{w}{d}[\varepsilon_2 l - x(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)] \tag{2.5}$$

เมื่อ	w	คือ	ความกว้างของแผ่นเพลท
	ε_1	คือ	ไดอิเล็กตริกที่ชนิดที่ 1
	ε_2	คือ	ไดอิเล็กตริกที่ชนิดที่ 2
	l	คือ	ความยาวของแผ่นเพลท
	d	คือ	ระยะห่างระหว่างเพลทที่ซ้อนทับ

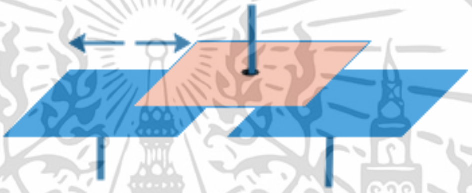
2.3.6 การประยุกต์ใช้หลักการตรวจจับค่าความจุไฟฟ้าแบบ 3 แผ่นเพลท

นอกจากการประยุกต์ใช้เซนเซอร์ชนิดเก็บประจุตามหลักการทั่วไปที่อาศัยการเปลี่ยนแปลงของ 3 ตัวแปรตามที่กล่าวไว้ข้างต้นแล้ว ยังมีการประยุกต์ใช้หลักการตรวจจับตามคุณสมบัติของตัวเก็บประจุแบบเปรียบเทียบความแตกต่าง โดยในการใช้งานแบบนี้จะใช้แผ่นเพลท 3 แผ่น เปรียบได้เหมือนตัวเก็บประจุ 2 ตัว ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนค่าของระยะห่างระหว่างแผ่นเพลทพื้นที่ซ้อนทับของแผ่นเพลท และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกระหว่างแผ่นเพลทที่เปลี่ยนไป แต่ในการประยุกต์ใช้แบบนี้ทำให้มีมิติในการประมวลผลเพิ่มมากขึ้นดังรูปที่ 2.12

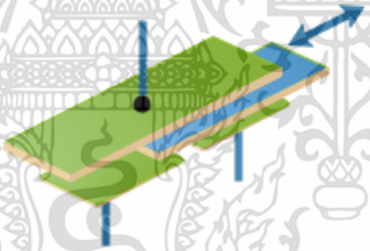
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) หลักการเปลี่ยนระยะห่าง



(ข) หลักการเปลี่ยนพื้นที่



(ค) หลักการเปลี่ยนค่าไดอิเล็กตริก

รูปที่ 2.12 เทคนิคการเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้าแบบ 3 แผ่นเพลท [2]

จากรูปที่ 2.12 (ก) หลักการเปลี่ยนระยะห่าง ในรูปแบบนี้จะมีแผ่นเพลทแบบคงที่ 2 แผ่น และมีแผ่นเพลทที่ 3 อยู่ระหว่างกลางเป็นแผ่นเพลทที่เคลื่อนที่ได้ โดยรูปแบบการเคลื่อนที่จะเป็นการเพิ่มระยะห่างจากแผ่นเพลทหนึ่งแต่ในขณะเดียวกันก็จะเป็นการเข้าใกล้แผ่นเพลทอีกแผ่นหนึ่ง รูปที่ 2.12 (ข) แสดงหลักการเปลี่ยนขนาดพื้นที่ซ้อนทับ และจากรูปที่ 2.12 (ค) แสดงหลักการเปลี่ยนค่าคงที่ ไดอิเล็กตริก ระหว่างแผ่นแพลต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 วงจรอ่านข้อมูล [2]

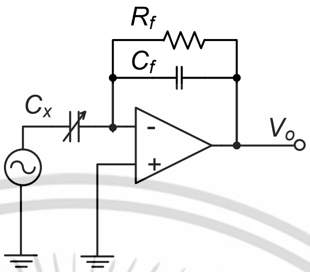
จากหัวข้อที่ 2.3 ซึ่งได้กล่าวไว้ว่าเซนเซอร์ทั้งหมดรวมถึงเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุไฟฟ้า จะอาศัยหลักกลไกในการวัดปริมาณทางกายภาพและแปลงเป็นปริมาณทางไฟฟ้าที่เหมาะสม จากหลักการทำงานของเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุและวิธีการตรวจจับค่าความความจุไฟฟ้าโดยเทคนิคต่างๆ ที่ได้กล่าวมานั้น ค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์เป็นค่าความจุไฟฟ้าจำเป็นต้องมีกลไกในการแปลงสัญญาณเพื่อแปลงค่าความจุไฟฟ้าซึ่งเป็นปริมาณทางกายภาพให้เป็นปริมาณทางไฟฟ้าในรูปแบบต่างๆ ที่เหมาะสมกับรูปแบบการใช้งาน ซึ่งกลไกนี้เรียกว่าวงจรอ่านข้อมูล (Read out circuit) ซึ่งเป็นหัวข้อกว้างๆ ในการใช้งานจริงยังมีการจำแนกตามประเภทเซนเซอร์ที่เป็นตัวตรวจจับอีกซึ่งแตกต่างกันไป เช่นกรณีของเซนเซอร์แบบตรวจจับการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าก็จะเรียกว่าวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นสัญญาณไฟฟ้าด้วยวิธีต่างๆ ซึ่งสามารถจำแนกแยกย่อยตามหมวดหมู่ที่แยกย่อยขึ้น โดยมีการจัดหมวดหมู่ตามรูปแบบสัญญาณเอาต์พุตที่ได้ หรือตามวิธีการในการแปลงค่า และผลการป้อนกลับในเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุ หรือการเปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้านั้น เพื่อให้ได้ผลการวัดที่เหมาะสมยังสามารถเลือกใช้วงจรการแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นสัญญาณไฟฟ้าหลายรูปแบบซึ่งแต่ละรูปแบบควรมีคุณสมบัติประกอบด้วย มีการทำงานที่เป็นเชิงเส้น, มีการแยกกราวด์ของอินพุตออกจากสนามไฟฟ้า, ไม่ไวต่อค่าความจุไฟฟ้าแฝงที่ขั้วของเซนเซอร์, สัญญาณรบกวนต่ำ, มีช่วงการทำงานของสัญญาณที่กว้างเพียงพอ, มีช่วงความถี่เหมาะสมกับการใช้งาน ได้มีการเสนองานวิจัยที่เกี่ยวกับเทคนิคการแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นสัญญาณไฟฟ้าในอดีต โดยใช้เทคนิคต่างๆซึ่งประกอบด้วยการแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดัน (Capacitance to Voltage Converter), วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นดิวตี้ไซเคิล (Capacitance to Duty Cycle Converter), วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นความถี่ (Capacitance to Frequency Converter), วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นความกว้างของสัญญาณพัลส์ (Capacitance to pulse width converter)

2.4.1 วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดัน

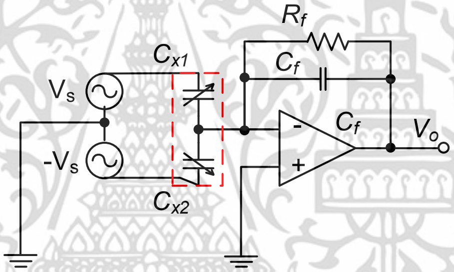
โดยทั่วไปวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดัน (CVC) ที่ออกแบบมาสำหรับเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุมักเป็นการดัดแปลงวงจรมาจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั่วๆไป โดยวิธีการแทนที่เซนเซอร์ชนิดเก็บประจุแทนลงในวงจรเดิมที่เป็นตัวเก็บประจุแบบคงที่ เช่น วงจรในกลุ่ม วงจรบริดจ์ หรือ วีทสโตนบริดจ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

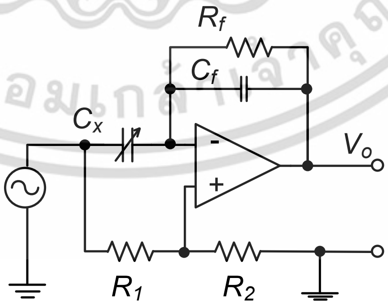
(Wheatstone bridge) หรือวงจรที่มีการดัดแปลงมาจากวงจรขยายแบบป้อนกลับ เช่นในรูปที่ 2.13 เป็นตัวอย่างการนำวงจรแอมพลิฟายเออร์ (Amplifier) แบบต่างๆ มาดัดแปลงเป็นวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดัน [2]



(ก) วงจรชาร์จแอมพลิฟายเออร์แบบเดี่ยวที่นำมาประยุกต์เป็นวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดัน สำหรับเซนเซอร์เก็บประจุทั่วไป (single-end charge amplifier for single variable capacitor)

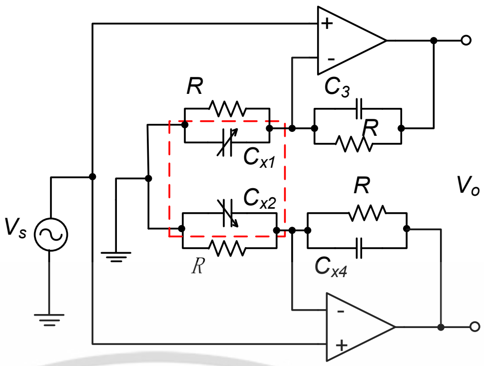


(ข) วงจรชาร์จแอมพลิฟายเออร์แบบเดี่ยวที่นำมาประยุกต์เป็นวงจรแปลงค่าความจุทางไฟฟ้าเป็นแรงดันไฟฟ้า สำหรับเซนเซอร์เก็บประจุแบบเปรียบเทียบค่า) single-end charge amplifier for differential capacitive sensor

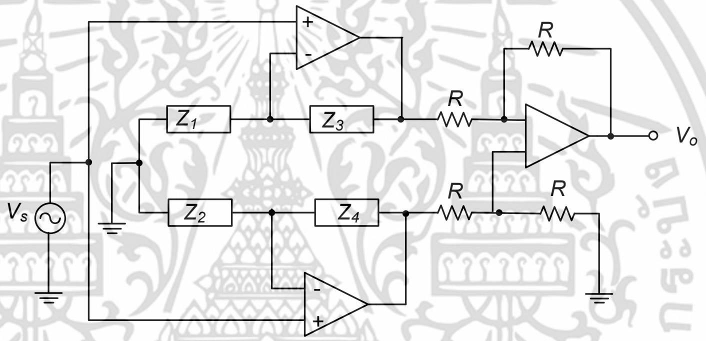


(ค) วงจรบริดจ์แอมพลิฟายเออร์ที่นำมาประยุกต์เป็นวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดัน สำหรับเซนเซอร์เก็บประจุแบบทั่วไป (bridge amplifier for single variable capacitive sensor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง) วงจรขยายความต่างที่นำมาประยุกต์เป็นวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดัน สำหรับเซนเซอร์เก็บประจุแบบเปรียบเทียบค่า (differential amplifier for differential capacitive sensor)



(จ) วงจรอินทรูเมนต์แอมป์พลิฟายเออร์ ที่นำมาประยุกต์เป็นวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดัน สำหรับเซนเซอร์เก็บประจุแบบเปรียบเทียบค่า (instrumentation amplifier for differential capacitive sensor)

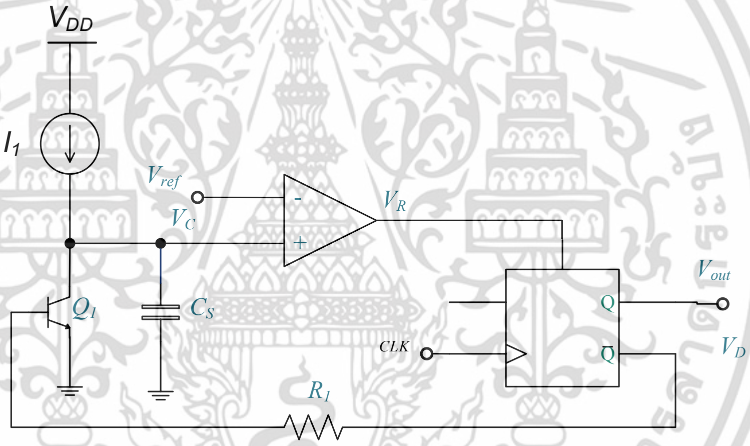
รูปที่ 2.13 ตัวอย่างวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดัน

นอกจากนี้แล้ว Shao Lichun, Moorthi Palaniapan and Tan Woei Wan ได้มีการนำเสนอการนำวงจรชาร์จแอมพลิฟายเออร์ รูปที่ 2.13 (ก) และ (ข) ประยุกต์ใช้เป็นวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันแบบต่อเนื่องในหัวข้อ A continuous-time capacitance to voltage converter for micro capacitive pressure sensors [1] ในขณะที่ S. Sakalauskas, Z. Vaitonis and R. Puras, ก็ได้มีการนำเสนอวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันแบบความเร็วสูง ในหัวข้อ A high-speed capacitance-to-voltage converter [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นดิวตี้ไซเคิล

วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นดิวตี้ไซเคิล (Capacitance to Duty Cycle Converter) โดยมีรายละเอียดการต่อวงจรตาม รูปที่ 2.14 เป็นเทคนิคการมอดูเลต (Modulation Technique) แบบความกว้างพัลส์ (Pulse) ซึ่งวงจรประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่ I_1 จ่ายกระแสไหลผ่านวงจรเปรียบเทียบทำหน้าที่เปรียบเทียบแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างตัวเก็บประจุ C_s เทียบกับแรงดันอ้างอิง V_{ref} โดยเมื่อแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_S มีค่าน้อยกว่าแรงดัน V_{ref} มีผลทำให้แรงดัน V_R มีค่าเป็น “0” มีผลทำให้สัญญาณไปกระตุ้นการทำงานของฟลิบฟลอปเป็น “0” FF_1 ไม่มีค่าแรงดันป้อนขาเบสของทรานซิสเตอร์ Q_1 ซึ่งจะเป็นตัวควบคุมกระแสคงที่ I_1 เพื่อชาร์จตัวเก็บประจุ C_s ทำให้มีค่าแรงดัน V_c ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_s มีค่าเพิ่มขึ้นสามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้เป็น $V_c=\frac{I_1}{C_s}\, t_1$



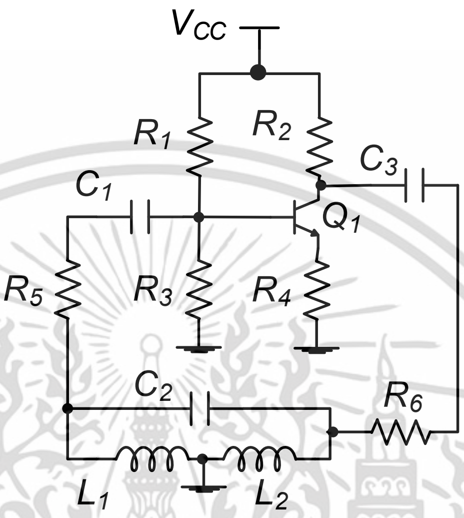
รูปที่ 2.14 ตัวอย่างวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นดิวตี้ไซเคิล

2.4.3 วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นความถี่

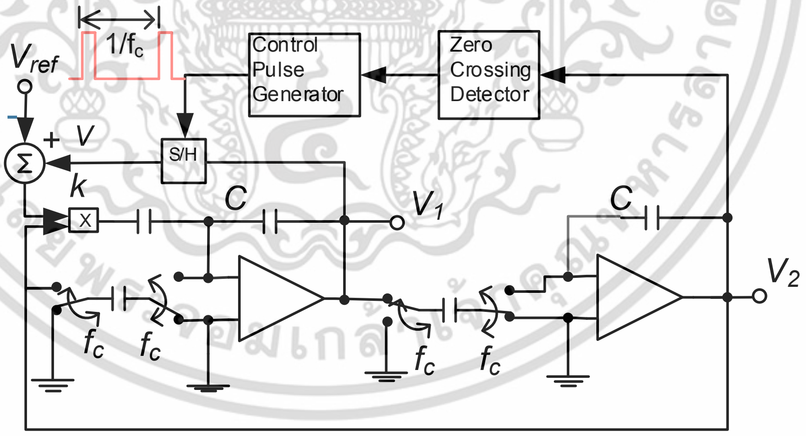
วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นความถี่มักถูกสร้างจากวงจรกำเนิดความถี่ที่มีตัวเก็บประจุเป็นองค์ประกอบสำคัญ การเปลี่ยนขนาดของตัวเก็บประจุมีผลต่อความถี่เอาต์พุต หรืออาจสร้างจากวงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่ โดยใช้วิธีเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันมาก่อนแล้วจึงแปลงแรงดันนั้นเป็นความถี่อีกทอด จากรูปที่ 2.15 เป็นวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นความถี่แบบต่างๆ [2] ดังนี้ รูปที่ 2.15 (ก) เป็นวงจรกำเนิดแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นความถี่โดยดัดแปลงมาจากวงจร Hartley Oscillator วงจรกำเนิดความถี่แบบนี้จะสามารถหาค่าความถี่เอาต์พุตได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย $f_{osc} = \frac{1}{(2\pi\sqrt{C_2 L_T})}$ เมื่อ $L_T = L_1 + L_2$ ส่วนรูปที่ 2.15 (ข) ถูกเสนอไว้ในปี ค.ศ.1985 [4] เป็นการออกแบบวงจรแปลงความจุไฟฟ้าเป็นความถี่ โดยใช้วงจรอินทีเกรท (Integrated loop circuit) 2 ชุดต่อเข้าด้วยกัน โดยใช้คาปาซิเตอร์สวิตช์ ส่วนรูปที่ 2.15 (ค) ถูกเสนอในปี ค.ศ.1991 [5]

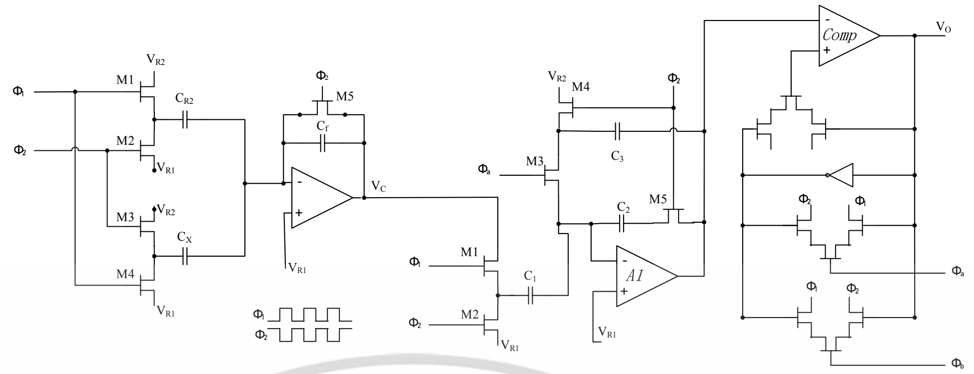


(ก) วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นความถี่โดยใช้วงจรออสซิลเลเตอร์แบบ ฮาร์ทเลย์ (CFC base on simple Hartley oscillator)



(ข) วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นความถี่โดยใช้วงจรออสซิลเลเตอร์แบบสวิตช์ฮาร์โมนิคและมีวงจรควบคุมอัตราการขยายแบบอัตโนมัติ (Switched-capacitor harmonic oscillator with AGC)

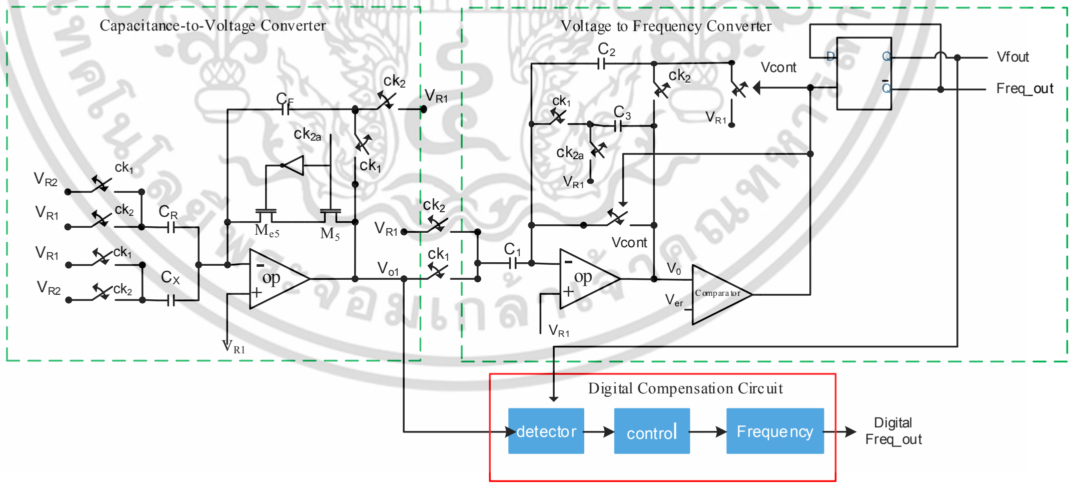
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นความถี่โดยใช้วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันก่อนจากนั้นจึงแปลงแรงดันที่ได้นั้นเป็นความถี่อีกที (CFC based on CVC cascaded with VFC)

รูปที่ 2.15 ตัวอย่างวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นความถี่

นอกจากนั้นแล้วยังมีวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันที่เสนอโดย Cheng-Ta Chiang, Chi-Shen Wang and Yu-Chung Huang [6] รูปที่ 2.16 ซึ่งเป็นการนำ 3 วงจรซึ่งประกอบด้วยวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดัน วงจรแปลงแรงดันไฟฟ้าเป็นความถี่และวงจรชดเชยแบบดิจิตอล (Digital compensation circuit) มาประยุกต์ใช้งานด้วยกัน

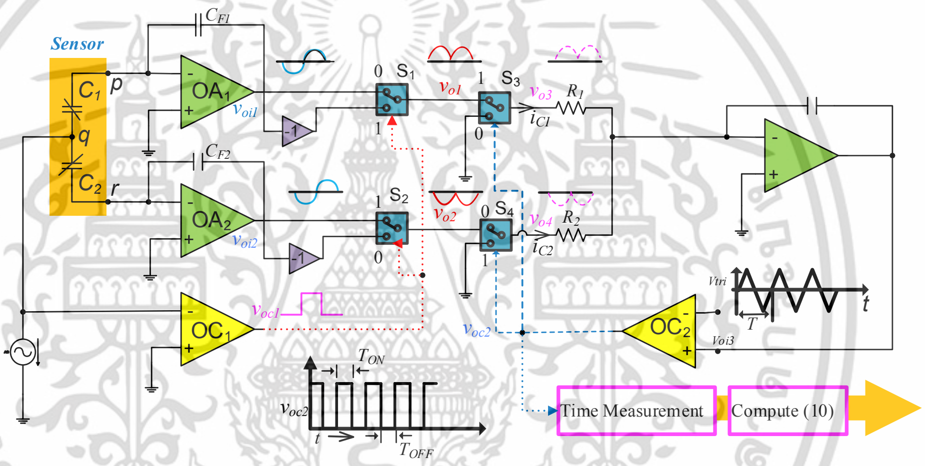


รูปที่ 2.16 วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันที่นำเสนอโดย Cheng-Ta Chiang, Chi-Shen Wang and Yu-Chung Huang [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.4 วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นความกว้างของสัญญาณพัลส์

โครงสร้างของวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นความกว้างของสัญญาณพัลส์ (Capacitance to pulse width converter) แสดงดัง รูปที่ 2.17 โดยมีตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 ทำหน้าที่เป็นตัวแทนเซนเซอร์แบบตัววัดความแตกต่างของค่าประจุ (Differential capacitive sensor) วงจรนี้มีสัญญาณอินพุตเป็นลักษณะคลื่นซายน์ $v_S = \sqrt{2}V_s \sin \omega t$ โดยมีออบแอมป์ OC_1 ซึ่งมีเอาต์พุตเป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมเป็นตัวควบคุมสวิตช์ S_1 และ S_2 เพื่อเลือกรับอินพุตคนละด้านกันเช่น กรณี OC_1 มีสถานะเป็น “0” S_1 จะถูกเชื่อมต่อเข้ากับ OA_1 เพื่อรับสัญญาณด้านบวกส่วน S_2 จะถูกต่อเข้ากับ OA_2 โดยมีการกลับขั้วเพื่อรับสัญญาณด้านลบ



รูปที่ 2.17 วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นความกว้างของสัญญาณพัลส์ [7]

ส่วนสวิตช์ S_3 กับ S_4 จะถูกควบคุมโดย OC_2 ซึ่งมีเอาต์พุตเป็นสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมเหมือนกัน โดยที่ถ้า OC_2 มีสถานะเป็น “0” จะทำให้ S_3 ต่อ R_1 ลงกราวด์ และ S_4 เชื่อมต่อกับ V_{o2} เป็นอินพุตของ OA_3 ซึ่งเอาต์พุตของ OA_3 จะเป็นอินพุตของ OC_2 อีกทอดและเอาต์พุตของ OC_2 นอกจากจะเป็นสัญญาณควบคุม S_3 และ S_4 แล้วยังเป็นเอาต์พุตของวงจรด้วย

2.4.5 องค์ประกอบของวงจรอ่านข้อมูลที่นำเสนอ

วงจรอ่านข้อมูลที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นี้ใช้หลักการแปลงค่าความจุเป็นแรงดันแบบไฟฟ้ากระแสตรง โดยอาศัยหลักการของวงจรอนุพันธ์ โดยแทนค่าตัวเก็บประจุในวงจรอนุพันธ์ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

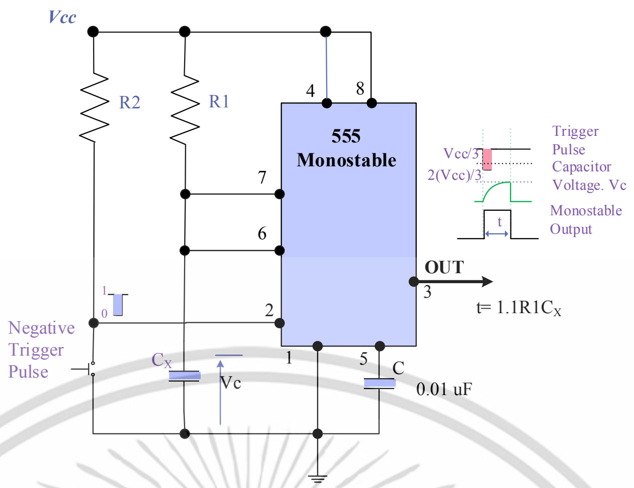
เซนเซอร์ชนิดตัวเก็บประจุต้องการวัดค่า จากนั้นจึงจ่ายอินพุตเป็นสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม แล้วอ่านค่าแรงดันเอาต์พุตซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นโค้งแบบเอ็กโพแนนเชียล(e^{-x}) โดยอ่านค่าจุดที่เหมาะสมเพียงจุดเดียวด้วยวิธีการสุ่มและคงค่าสัญญาณเพื่อให้แรงดันมีลักษณะเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง องค์ประกอบของวงจรมีวงจรย่อยเป็นองค์ประกอบดังนี้

2.4.5.1 วงจรกำเนิดสัญญาณ

วงจรกำเนิดสัญญาณ (Oscillator หรือ Waveform Generator) เป็นวงจรที่มีความสำคัญในทางอิเล็กทรอนิกส์และการสื่อสารอย่างมาก วงจรกำเนิดสัญญาณสามารถแบ่งออกได้เป็นสองกลุ่มใหญ่ๆ ด้วยกันคือ วงจรกำเนิดสัญญาณรูปซายน์ (Sinusoidal waveform) และวงจรกำเนิดสัญญาณรูปอื่นๆ ที่ไม่ใช่สัญญาณซายน์ (Non-Sinusoidal Waveform) อาทิ สัญญาณรูปสามเหลี่ยม (Triangular) และสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม (Square) เป็นต้น โดยในงานวิจัยนี้ใช้ไอซีเบอร์ 555 เป็นตัวสร้างสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม ซึ่งไอซีเบอร์ 555 จัดเป็นไอซีประเภทไทเมอร์สามารถนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวางและหลากหลายรูปแบบ ไอซีนี้ เป็นที่นิยมใช้ในการนำไปสร้างสัญญาณรูปคลื่นแบบต่างๆ เช่น สัญญาณสี่เหลี่ยม สัญญาณพัลส์ สัญญาณฟันเลื่อย และวงจรตั้งเวลา โดยที่ไอซีเบอร์ 555 เป็นไอซีแบบวงจรรวมที่มีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ อยู่ภายใน และมีส่วนที่ต้องต่อกับวงจรภายนอกเพื่อควบคุมการทำงาน และใช้งานเป็นลักษณะต่างๆ มีความสะดวกต่อการออกแบบและง่ายต่อการสร้างสัญญาณพัลส์ความถี่ต่างๆ อีกทั้งสามารถเข้าใจการทำงานได้ง่าย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงจึงใช้ไอซีเบอร์ 555 เป็นวงจรกำเนิดความถี่แบบคลื่นสี่เหลี่ยม ไอซี 555 มีโหมดการทำงานทั้งหมด 3 โหมด ดังนี้

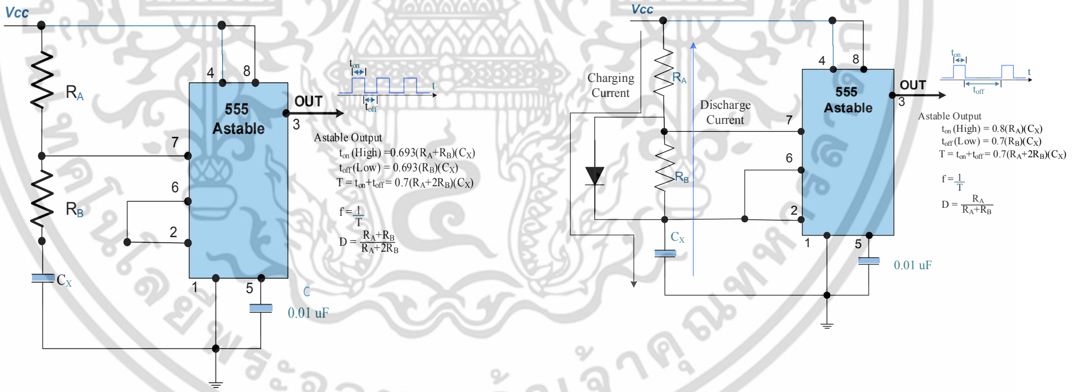
โหมดที่1. โมโนสเตเบิล (Monostable) การทำงานจะเป็นแบบที่สร้างสัญญาณพัลส์ขึ้นมา 1 ลูก หลังจากมีการกระตุ้น ให้วงจรเกิดสัญญาณ มีความกว้างที่สามารถกำหนดได้ด้วยค่า R_1C_1 รายละเอียดตาม รูปที่ 2.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 การต่อวงจรโมโนสเตเบิล โดยใช้ ไอซี 555 และวิธีคำนวณความกว้างคาบเวลา

โหมดที่ 2 อะสเตเบิล (Astable) การทำงานจะเป็นแบบที่สร้างสัญญาณสี่เหลี่ยม ที่สามารถกำหนดความถี่ได้ตามความต้องการ ด้วยค่าคาปาซิสเตอร์ *C* และค่าความต้านทาน R_A และ R_B รายละเอียดตามรูปที่ 2.19

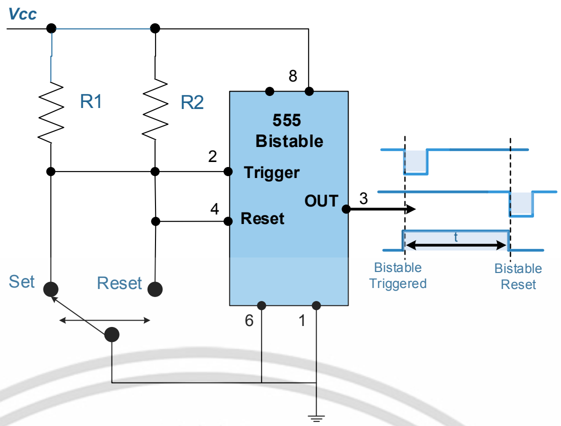


(ก) วงจรอะสเตเบิล (ข) วงจรอะสเตเบิลแบบปรับปรุง

รูปที่ 2.19 การต่อวงจรอะสเตเบิล โดยใช้ ไอซี 555 และวิธีคำนวณความกว้างคาบเวลา

โหมดที่ 3 ไบสเตเบิล (Bistable) การทำงานจะเป็นแบบที่จะเปลี่ยนสถานะจาก High ไปเป็นสถานะ Low ได้ และจะยังคงอยู่ที่สถานะนั้นตลอดจนกว่า จะมีการเปลี่ยนแปลงสัญญาณที่เข้ามากระตุ้นที่เรียกว่า ฟลิปฟล็อป (Flip-Flop) รายละเอียดตามรูปที่ 2.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 การต่อวงจรไบสเตเบิล โดยใช้ ไอซี 555

2.4.5.2 วงจรอนุพันธ์

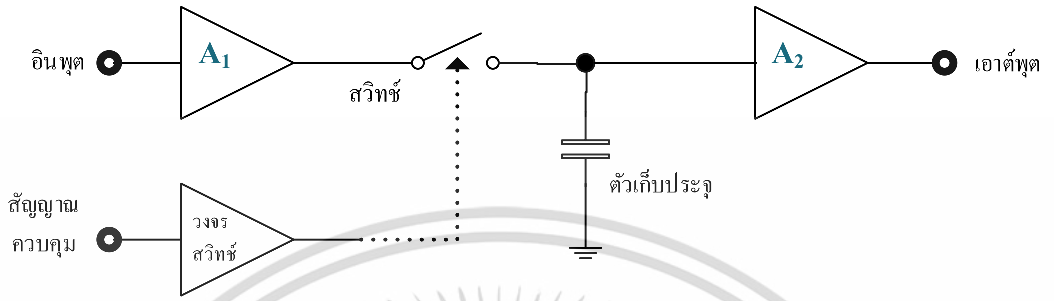
วงจรอนุพันธ์ หรือวงจรอาร์ซีดิฟเฟอเรนติเอเตอร์ (RC Differentiator) ก็คือวงจรที่ประกอบไปด้วยตัวต้านทานและตัวเก็บประจุต่อขนานกับแหล่งจ่ายแรงดัน โดยที่เอาต์พุตจะวัดจากแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน โดยป้อนสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม ส่วนสัญญาณเอาต์พุตที่ได้ก็มีลักษณะเป็นเอ็กโพแนนเชียล มีลักษระเปลี่ยนไปตามช่วงการเก็บและคายประจุของตัวเก็บประจุซึ่งวงจรและสัญญาณอินพุต เอาต์พุตมีลักษณะดัง รูปที่ 2.1

2.4.5.3 วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ

วงจรสุ่มและค่าคงสัญญาณ (Sample and Hold Circuit) วงจรประกอบไปด้วยทั้งหมด 4 ส่วน คือ ส่วนจัดการสัญญาณอินพุต ส่วนคงค่าสัญญาณแบบตัวเก็บประจุ (Hold Capacitor) ส่วนจัดการสัญญาณเอาต์พุต และวงจรสวิตซ์ ส่วนสำคัญของวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ คือ ส่วนที่ใช้คงค่าสัญญาณซึ่งจะใช้ตัวเก็บประจุ (Capacitor) ในการทำหน้าที่คงค่าสัญญาณอินพุตที่จะถูกส่งผ่านไปยังตัวบัฟเฟอร์ (Buffer) และเก็บไว้ที่ตัวเก็บประจุในช่วงสวิตซ์ปิด ซึ่งเป็นช่วงเวลาการสุ่มหรือการรับค่าอินพุต และมีสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งถูกควบคุมการเปิด/ปิดด้วยสัญญาณควบคุม V_{con} การทำงานของวงจรจะแบ่งออกเป็น 2 สภาวะ โดยสภาวะแรก คือ สภาวะการสุ่ม (V_{con} = 1) แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรจะมีค่าเท่ากับค่าแรงดันไฟฟ้าอินพุตของวงจรในขณะนั้นอย่างต่อเนื่อง สภาวะที่สอง คือ สภาวะการคงค่าสัญญาณ (V_{con} =

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0) ซึ่งแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรจะมีค่าคงที่เท่ากับค่าแรงดันไฟฟ้าอินพุตของวงจรในช่วงเวลาสุดท้ายก่อนจะเข้าสู่ช่วงการคงค่าสัญญาณ



รูปที่ 2.21 โครงสร้างวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ

2.5 บทสรุป

ในบทนี้กล่าวถึงหลักการทำงานทฤษฎีพื้นฐาน และองค์ประกอบของเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุ โดยมุ่งเน้นไปที่วงจรแปลงค่าปริมาณทางกายภาพในรูปแบบความจุไฟฟ้าเป็นสัญญาณไฟฟ้าในรูปแบบต่างๆ เช่นแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดัน แปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นความถี่ เปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นคาบเวลา เพื่อเป็นข้อมูลประกอบของงานวิจัยที่เสนอซึ่งเกี่ยวกับวงจรแปลงค่า ความจุเป็นแรงดันแบบไฟฟ้ากระแสตรง นอกจากนั้นแล้วในบทนี้ยังมีการสรุปวงจรหลักที่จะใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย การนำไอซีเบอร์ 555 มาใช้งานในโหมดต่างๆ โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ไอซีเบอร์ 555 ในโหมด อะสเตเบิล สำหรับสร้างอินพุต นอกจากนั้นยังมีวงจรอนุพันธ์ และวงจรสุ่มตัวและคงค่าสัญญาณ (Sample and hold)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

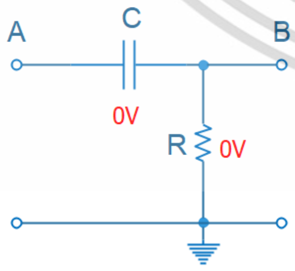
บทที่ 3
การออกแบบและการดำเนินงานวิจัย

3.1 บทนำ

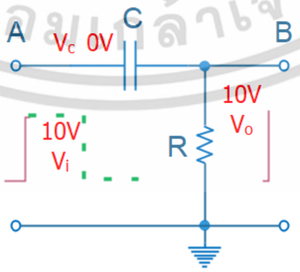
ขั้นตอนการออกแบบและดำเนินงานวิจัยแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนหลักคือ ขั้นตอนแรกเป็นการนำเสนอหลักคิดในการแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงโดยนำเสนอในลักษณะสมการคณิตศาสตร์ ขั้นตอนที่สองเป็นการออกแบบวงจรและการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมและทดลองโดยโปรแกรมจำลอง ขั้นตอนที่สามเป็นการทดลองโดยการต่อวงจรทดสอบ และขั้นตอนที่สี่เป็นการทดสอบวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงโดยการทดลองวัดค่าตัวเก็บประจุมาตรฐาน

3.2 รูปแบบทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงค่าความจุเป็นแรงดันไฟฟ้าที่นำเสนอ

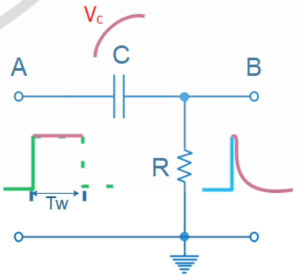
รูปแบบของวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ อ้างอิงจากหลักการของวงจรอนุพันธ์ แสดงดังรูปที่ 2.1 ซึ่งวงจรประกอบด้วยตัวต้านทาน (R) และตัวเก็บประจุไฟฟ้า (C) ต่ออนุกรมกันและเมื่อป้อนอินพุตเป็นสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยมจะได้สัญญาณแรงดันเอาต์พุตวัดที่ตัวต้านทาน (R) มีลักษณะเป็นเส้นโค้งแบบเอ็กโพเนนเชียล (Exponential) (e^{-x}) ซึ่งมีแรงดันเอาต์พุตเปลี่ยนตามเวลาดังสมการที่ (2.1) และสามารถสรุปเป็นภาพการเปลี่ยนลักษณะสัญญาณได้ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งช่วงเวลาและเงื่อนไขต่างๆ สามารถอธิบายเป็นภาพแยกการเปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลาได้ดังต่อไปนี้



(ก)

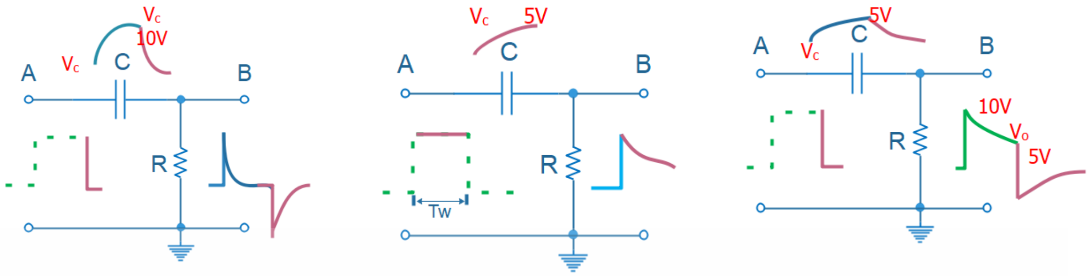


(ข)



(ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง) (จ) (ฉ)

รูปที่ 3.1 ลักษณะสัญญาณเอาต์พุตของวงจรอนุพันธ์ เมื่ออินพุตเปลี่ยนสถานะในรูปแบบต่างๆ

(ก) สถานะสัญญาณเอาต์พุตก่อนป้อนอินพุต

(ข) สถานะสัญญาณเอาต์พุตเมื่ออินพุตเปลี่ยนเป็นขอบขาขึ้น

(ค) สถานะสัญญาณเอาต์พุตเมื่ออินพุตมี $Tw \geq 5RC$

(ง) สถานะสัญญาณเอาต์พุตเมื่ออินพุตเปลี่ยนเป็นขอบขาลง

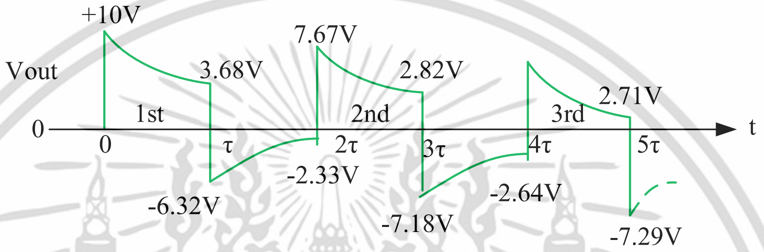
(จ) สถานะสัญญาณเอาต์พุตก่อนอินพุตจะเปลี่ยนเป็นขอบขาลงขณะ $Tw < 5RC$

(ฉ) สถานะสัญญาณเอาต์พุตเมื่ออินพุตเปลี่ยนเป็นขอบขาลงขณะ $Tw < 5RC$

จากสมการที่ (2.1) เมื่อนำมาพิจารณาในช่วงอินพุตจุดต่างๆ จะพบว่าสัญญาณเอาต์พุตช่วงต่างๆ เป็นดังรูปที่ 3.1 โดยที่จุดก่อนจะมีการป้อนอินพุต แรงดันที่ตัวเก็บประจุ (C) และตัวต้านทานในวงจรจะมีค่าเป็น 0 ตามรูปที่ 3.1 (ก) เมื่อป้อนอินพุตที่มีลักษณะเป็นคลื่นสี่เหลี่ยม และเมื่ออินพุตเปลี่ยนสถานะเป็นขอบขาขึ้น แรงดันที่ตัวต้านทานจะขึ้นเป็นสูงสุดทันทีเป็นตามรูปที่ 3.1 (ข) จากนั้นจะค่อยๆ ลดลง การลดลงของแรงดันที่ตัวต้านทาน ขึ้นอยู่กับช่วงเวลาของคาบอินพุต (Tw) และค่าของตัวเก็บประจุและตัวต้านทานในวงจร ถ้าหากค่า Tw มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 5 เท่าของผลคูณของตัวเก็บประจุและค่าความต้านทาน จะทำให้ตัวเก็บประจุเก็บประจุคายประจุได้สมบูรณ์ตามตามรูปที่ 3.1 (ค) จากนั้นเมื่อสัญญาณอินพุตเปลี่ยนค่าจากสูงสุดเป็น 0 สัญญาณเอาต์พุตก็จะเป็นดังรูปที่ 3.1 (ง) เริ่มจากสูงสุดด้านลบก่อนจากนั้นค่อยๆ เพิ่มขึ้นจากค่าติดลบไปหาค่า 0 ในกรณีช่วงเวลาคาบอินพุต (Tw) มีค่าน้อยกว่า 5 เท่าของผลคูณของตัวเก็บประจุและค่าความต้านทาน ลักษณะของสัญญาณเอาต์พุตจะเป็นดังตามรูปที่ 3.1 (จ) คือขณะตัวเก็บประจุยังคายประจุไม่หมดก็จะมีสัญญาณอินพุตเปลี่ยนแปลงกะทันหันจากสูงสุดเป็นต่ำสุดทำให้ประจุไฟฟ้าในตัวเก็บประจุมี 2 ส่วนคือส่วนที่ยังคายประจุไม่หมดและอีกส่วนที่เพิ่มเข้ามาจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นคนละขั้วตามรูปที่ 3.1 (จ) และ (ฉ) ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าตัวเก็บประจุจะต้องใช้เวลาในการเก็บประจุอย่างน้อย 5 เท่าของผลคูณของค่าขนาดตัวเก็บประจุและค่าความต้านทาน ในขณะที่คาบเวลาของสัญญาณอินพุตมีค่าน้อยกว่า มีผลทำให้ขอบขาลงของอินพุตเกิดขึ้นในตอนที่การเก็บประจุยังไม่สมบูรณ์ กระบวนการจะเข้าสู่การเปลี่ยนขั้ว มีข้อสังเกตคือแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน ที่ขอบขาขึ้น และขอบขาลงในกรณี เก็บประจุสมบูรณ์ จะมีขนาดเท่ากันแต่สลับขั้ว ในขณะที่กรณีเก็บประจุไม่สมบูรณ์ สลับขั้วเหมือนกันแต่ด้านลบและบวกไม่เท่ากันดังรูปที่ 3.2



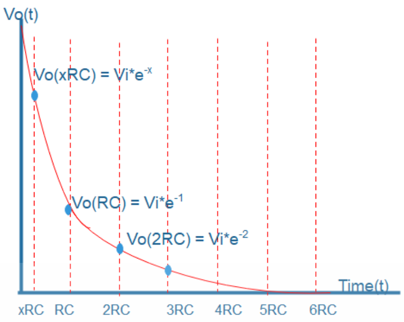
รูปที่ 3.2 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรอนุพันธ์เมื่อคาบเวลาน้อยกว่า 5RC

จากรูปที่ 3.2 สังเกตได้ว่าเมื่อ Tw < 5RC ยิ่งน้อยเท่าไหร่แรงดันที่ขอบขาลงในด้านบวกจะมีค่ามากขึ้นส่วนในด้านลบจะมีระดับน้อยลงแต่ความต่างของแรงดันทั้งสองด้านยังคงเท่าเดิม เช่น ที่จุดขอบขาลงเมื่อ t=RC ค่า Vout จะเท่ากับ $(10 * e^{-1})$ แรงดันด้านบวกจะเป็น 3.68 ส่วนแรงดันด้านลบจะเป็น -6.32 แต่ 3.68-(-6.32) ก็เท่ากับ 10 คงเดิม และพบว่าเมื่อใช้สมการที่ (2.1) หาค่า $V_o(t)$ ที่จุด t ใดๆ ซึ่งมีความสัมพันธ์เป็นสัดส่วนกับผลคูณของค่าความต้านทานและขนาดของตัวเก็บประจุ (RC) และกำหนดให้ $t = xRC$ แรงดันเอาต์พุตที่ได้ก็จะเป็น $V_o(t) = V_i(t)\left(e^{\frac{-xRC}{RC}}\right)$ หรือสามารถเขียนเป็นสมการในรูปสัดส่วนได้ดังนี้

$$V_o(t) = V_i(t)(e^{-x}) \tag{3.1}$$

โดยที่ x มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 5 ดังแสดงรายละเอียดตามรูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แรงดันเอาต์พุตของวงจรอนุพันธ์เทียบกับเวลา

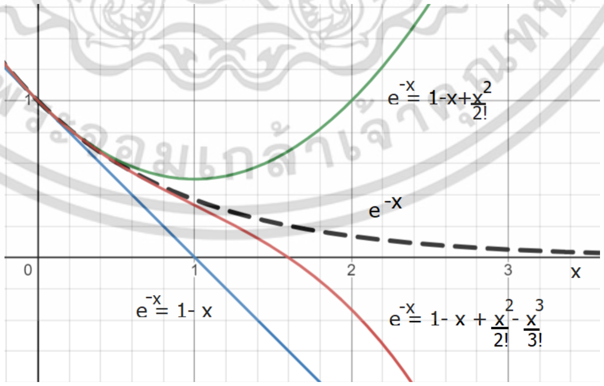
แรงดันเอาต์พุตของวงจรอนุพันธ์ที่เป็นสัดส่วนระหว่างผลคูณค่าความต้านทานกับขนาดตัวเก็บประจุไฟฟ้าและเมื่อกระจาย e^{-x} ในลักษณะอนุกรมของแมคลอริน (Maclaurin Series) แล้วจะได้เป็น

$$e^{-x} = 1 - x + \frac{x^2}{2!} - \frac{x^3}{3!} + \cdots \quad (3.2)$$

เมื่อพิจารณาเฉพาะส่วนที่สามารถประเมินค่าได้ด้วยสมการเชิงเส้นจะได้เป็น

$$e^{-x} = 1 - x \quad (3.3)$$

โดยที่ค่า x ในสมการที่ (3.3) จะมีขอบเขตเฉพาะในช่วงแรกที่เส้นกราฟทับกัน สามารถพิจารณาความสัมพันธ์ในรูปแบบกราฟเปรียบเทียบได้ดัง รูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ค่า e^{-x} ในรูปแบบอนุกรมแมคลอรินที่ค่าพจน์ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.4 เป็นการเปรียบเทียบกราฟจาก 4 สมการประกอบด้วย $y = e^{-x}$ เป็นสมการหลักส่วนอีก 3 สมการเกิดจากการเปลี่ยนค่าสมการหลักในรูปแบบอนุกรมแมคคลอรินที่มีพจน์ n ต่างๆ เมื่อ $n = 1$ จะได้ $y = 1 - x$,เมื่อ $n = 2$ จะได้ $y = 1 - x + \frac{x^2}{2!}$ เมื่อ $n = 3$จะได้ $y = 1 - x + \frac{x^2}{2!} - \frac{x^3}{3!}$ เมื่อเปรียบเทียบแล้วพบว่าสมการ $y = e^{-x}$ สามารถใช้แทนด้วยสมการ $y = 1 - x$ เมื่อค่า $x \leq 0.2$ ที่ค่า $x > 0.2$ ไม่สามารถประเมินค่าด้วย $e^{-x} = 1 - x$ ได้เมื่อทดลองแทนค่า x ด้วยค่าจาก 0.1 ถึง 1.0 จะได้ค่าตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบเชิงตัวเลขของเอ็กโพแนนเชียลในรูปอนุกรมแมคลอรินพจน์ต่างๆ

x		e^{-x}	$1 - \frac{x}{1!}$ n=1	$1 - \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!}$ n=2	$1 - \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} - \frac{x^3}{3!}$ n=3
0.1		0.904837	0.9	0.905	0.904833
0.2		0.818731	0.8	0.82	0.818667
0.3		0.740818	0.7	0.745	0.7405
0.4		0.67032	0.6	0.68	0.669333
0.5		0.606531	0.5	0.625	0.604167
0.6		0.548812	0.4	0.58	0.544
0.7		0.496585	0.3	0.545	0.487833
0.8		0.449329	0.2	0.52	0.434667
0.9		0.40657	0.1	0.505	0.3835
1		0.367879	0	0.5	0.333333

จากตารางที่ 3.1 เมื่อพิจารณาร่วมกับกราฟในรูปที่ 3.4 ที่ค่า $x < 0.2$ จะพบว่าค่าของ e^{-x} มีค่าใกล้เคียงกับ $x - 1$ จึงสรุปได้ว่า $e^{-x} = 1 - x$ เมื่อค่า $x \leq 0.2$ และจากสมการที่ (3.3) เมื่อแทนค่า x ที่ $x = \frac{t}{RC}$ และ $x \leq 0.2$ จะได้ $0.2 \geq x = \frac{t}{RC}$ ซึ่งก็คือ $0.2 \geq \frac{t}{RC}$ เมื่อแทนค่า$e^{-x} = 1 - x$ และ $x = \frac{t}{RC}$ ในสมการที่ (3.3) จะได้

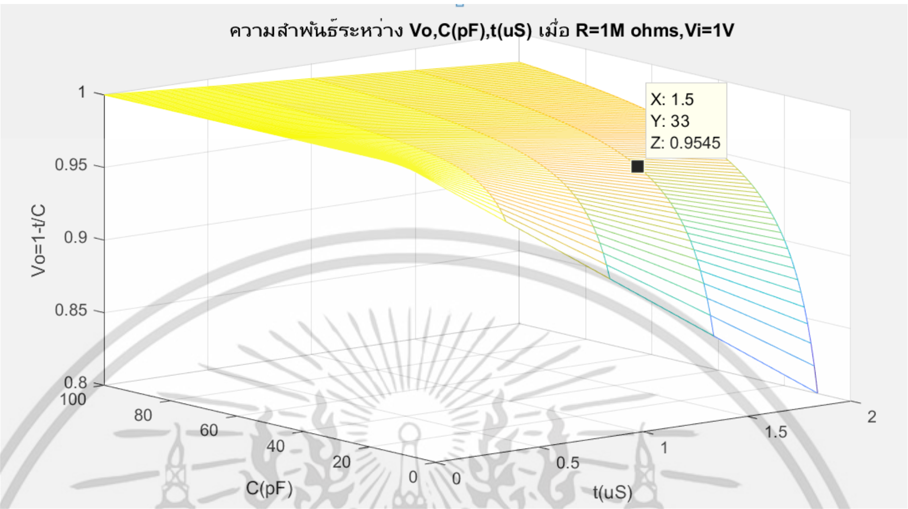
$$V_o = V_i \,(1 - \frac{t}{RC}) \tag{3.4}$$

เมื่อ $t \leq 0.2RC$

จากที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า วงจรอนุพันธ์แบบ RC differentiator สามารถหาค่าเอาต์พุตได้ด้วยสมการ $V_o = V_i \,(1 - \frac{t}{RC})$ เมื่อค่า $\frac{t}{RC}$ น้อยกว่า 0.2 หรือ $t \leq 0.2RC$ เมื่อทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำสมการที่ (3.4) ไปสร้างกราฟ โดยทดลองกำหนดให้ ค่า $V_i = 1, R = 1M\Omega, t \leq 0.2RC$ โดยค่า C มีค่าตั้งแต่ 0-100 pF จะได้กราฟดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดตัวเก็บประจุ เวลา และแรงดัน

จากกราฟรูปที่ 3.5 จะเห็นว่าเมื่อกำหนดค่า $t \leq 0.2RC$ และค่า R เป็นค่าคงที่ $1M\Omega$ และเลือกค่า C ที่น้อยที่สุดคือ 10pF จะทำให้ได้ค่าของ t ซึ่งต้องน้อยกว่า 0.2RC มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง $2\mu s$ จะมีผลทำให้ค่า V_o อยู่ในช่วง 0.8 ถึง 1 เป็นไปตามขอบเขต ถ้าหากค่า V_o น้อยกว่า 0.8 จะถือว่าอยู่นอกขอบเขตสมการที่ (3.4) ซึ่งมีผลทำให้ค่า V_o มีความคลาดเคลื่อนสูงขึ้น และเมื่อสังเกตความสัมพันธ์ระหว่าง V_o กับ t จะเห็นว่าเส้นกราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรงสามารถใช้สมการที่ (3.4) ได้โดยแปลงรูปใหม่เป็น

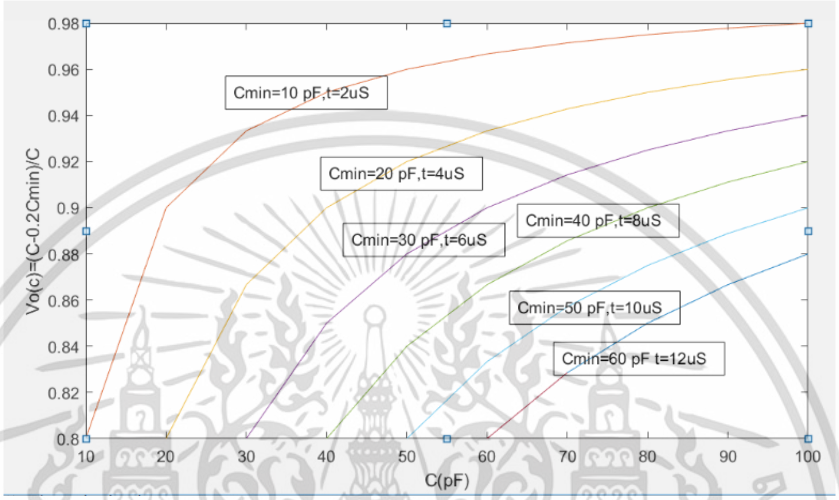
$$V_o(t) = V_i(1 - kt) \tag{3.5}$$

เมื่อ k เป็นค่าคงที่เท่ากับ $\frac{1}{RC}$ โดยที่ผลคูณของ RC จะต้องไม่มีการเปลี่ยนค่า และค่า t ยังต้องเป็นไปตามเงื่อนไข $t \leq 0.2RC$ แต่ในการใช้สมการที่ (3.4) กับค่า C ที่เปลี่ยนไปเพื่อใช้เป็นเครื่องมืออ่านค่าประจุไฟฟ้าจากเซนเซอร์นั้นจะได้สมการเป็น $V_o(C) = V_i * (1 - \frac{t}{RC})$ ในขอบเขตที่ค่า $t \leq 0.2RC$ และค่า C จะต้องเป็นค่าที่น้อยที่สุดที่ต้องการวัดค่ากำหนดเป็น C_{min} จะได้สมการใหม่เป็น $V_o(C) = V_i * (1 - \frac{0.2RC_{min}}{RC})$ จากสมการนี้จะพบว่าค่า R สามารถหักล้างกันไปไม่มีผลต่อ $V_o(C)$ จึงสรุปได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_o(C) = V_i\left(\frac{C - 0.2C_{min}}{C}\right) \tag{3.6}$$

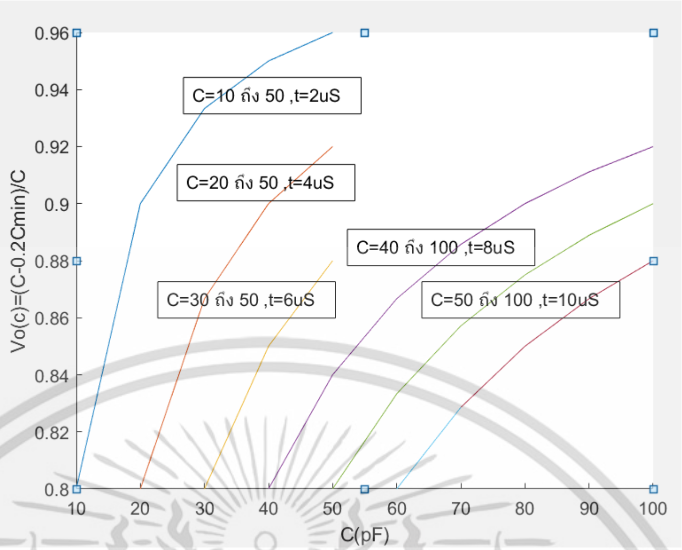
โดยที่กำหนดให้ t เป็นจุดอ่านค่าซึ่งเป็นค่าคงที่มีค่าเท่ากับ $t = 0.2C_{min}$ สามารถแสดงในรูปกราฟได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 กราฟแสดงค่า Vo(c) เมื่อทดลองเปลี่ยน C_{min} ค่าต่างๆ

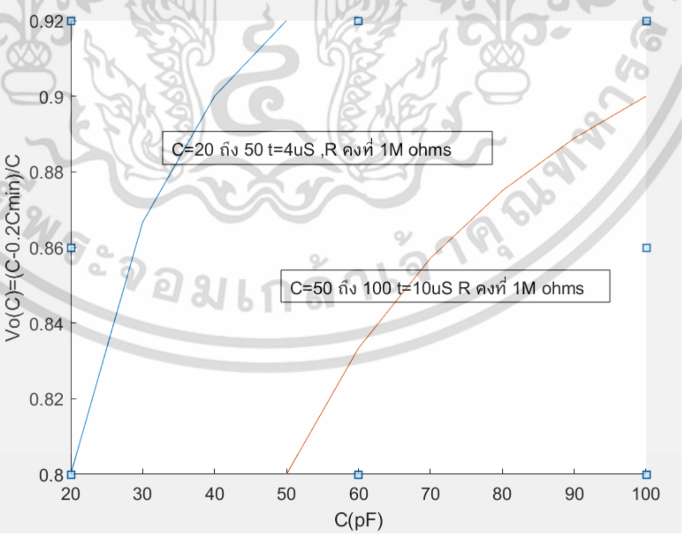
จากรูปที่ 3.6 เมื่อ Cmin = 10pF ซึ่งเป็นค่าน้อยสุดในย่านที่ต้องการอ่านค่า C จะเห็นได้ว่าเส้นกราฟ $V_o(C)$ ที่ ได้มีลักษณะเป็นเส้นโค้ง ซึ่งจะมีความยุ่งยากในการประเมินค่า C จากค่า $V_o(C)$ ที่อ่านได้ และสังเกตได้ว่า เมื่อเปลี่ยนค่า C_{min} = 20pF ลักษณะของเส้นกราฟจะมีความโค้งลดลง และมีความเป็นเส้นตรงมากขึ้นเมื่อเปลี่ยน C_{min} = 40pF , C_{min} = 60pF ตามลำดับ จากจุดนี้สันนิษฐานได้ว่าถ้ากำหนดช่วงการวัดให้สั้นลงและแบ่งเป็นหลายช่วงยิ่งช่วงสั้นก็จะยิ่งได้เส้นกราฟที่มีลักษณะความเป็นเชิงเส้นมากขึ้น จึงทดลองแบ่งช่วงการอ่านค่า โดยการกำหนดค่าวัดสูงสุดเป็น 0-50pF และ 50-100pF โดยในช่วงจาก 0-50pF ก็มีการแบ่งเส้นกราฟเป็น C_{min} =10pF,20pF,30pF และในช่วงจาก 50-100pF ก็มีการแบ่งเส้นกราฟเป็น C_{min} = 40pF, 50pF, 60pF แสดงดังรูปที่ 3.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ดัดแปลงจากรูปที่ 3.6 โดยทดลองแบ่งค่า C(pF) เป็น 2 ช่วง

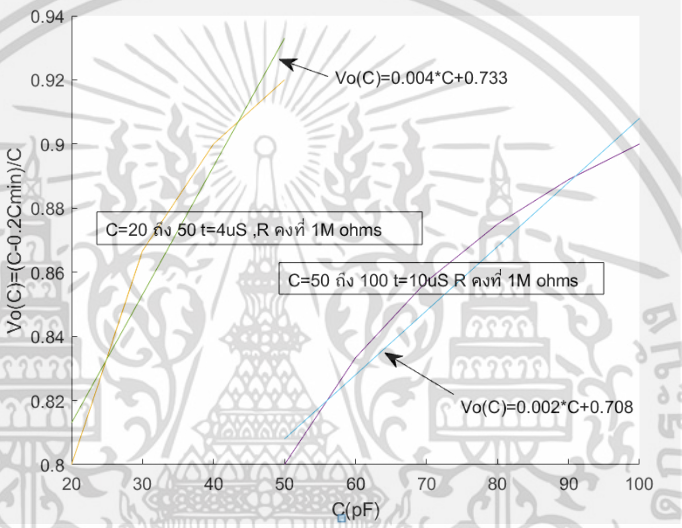
เมื่อพิจารณาเส้นกราฟจากการทดลองในรูปที่ 3.7 สังเกตได้ว่าเส้นกราฟ $C_{min} = 20pF$ ซึ่งสามารถอ่านค่า C ได้ในช่วง 20pF – 50pF มีความเป็นเชิงเส้นและมีช่วงกว้างที่สุดในกลุ่ม ส่วนค่า $C_{min} = 50pF$ ซึ่งสามารถอ่านค่า C ได้ในช่วง 50pF – 100pF มีลักษณะความเป็นเชิงเส้นในระดับที่สามารถนำมาใช้ประเมินค่าระหว่าง $V_o(C)$ กับ ค่า C ได้ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 กราฟแรงดันในรูปของตัวเก็บประจุเมื่อเลือก Cmin ที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

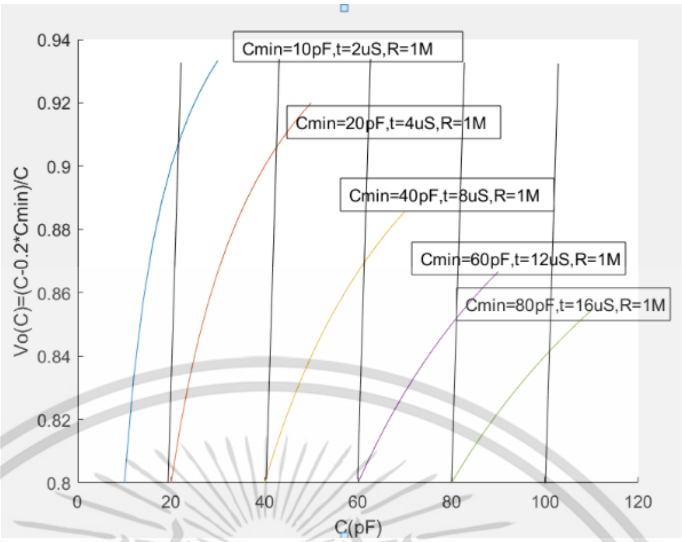
จากเส้นกราฟในรูปที่ 3.8 เมื่อแบ่งช่วงการหาอ่านค่าแรงดันขาเอาต์พุตโดยมีตัวเปลี่ยนแปลงเฉพาะค่า C ซึ่งกราฟเส้นแรกกำหนดให้ค่า C เริ่มจาก $20pF$-$50pF$ โดยยึดจุดอ่านเมื่อ $t = 4\mu s$ และเส้นกราฟอีกเส้นจะใช้สำหรับอ่านค่า V_o เมื่อค่า C เริ่มจาก $50pF - 100pF$ โดยยึดจุดอ่านเมื่อ $t{=}10\ \mu s$ ซึ่งเส้นกราฟทั้งสองเส้นนี้จะนำมาใช้ในการประเมินค่า C ที่ไม่ทราบค่าซึ่งนำมาต่อร่วมกับ R ตามที่กำหนด แล้วหาค่า $V_0(C)$ จากนั้นจึงนำไปประเมินกลับเพื่อหาค่า C ซึ่งก็มีหลายวิธีแต่ในงานวิจัยนี้จะเสนอวิธีการใช้เส้นตรงเทียบเคียงเพื่อหาสมการความสัมพันธ์ระหว่าง $V_0(C)$กับ ค่า C ที่นำมาวัด ตามรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ทดลองสร้างสมการเส้นตรงเทียบเคียง $V_o(t)$

จากเส้นกราฟตามรูปที่ 3.8 เมื่อหาค่าความชันของเส้นกราฟแต่ละเส้น และสร้างเส้นตรงที่มีความไกล้เคียงกับเส้นโค้งเดิมที่สุด ก็จะได้เส้นตรงความสัมพันธ์ของ $V_0(C)$กับ ค่า C ที่เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 20pF – 100pF จากเส้นตรงที่ได้สามารถนำไปประเมินค่าตามที่ต้องการได้ แต่ในกรณีต้องการความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น สามารถแบ่งช่วงให้ละเอียดขึ้นตาม รูปที่ 3.10 เป็นการแบ่งช่วง ค่า C จาก 10pF-100pF ออกเป็น 5 ช่วงคือ 10pF-20pF ,20pF-40pF ,40pF-60pF,60pF-80pF,80pF-100pF จากเส้นกราฟที่ได้จะเห็นได้ว่าแต่ละเส้นมีลักษณะความเป็นเส้นตรงมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า V_o, C เมื่อแบ่งเป็นหลายช่วงวัด

จากสมการที่ (3.6) สามารถจัดใหม่อยู่ในรูปของ $C\ (V_o)$ ได้ดังนี้

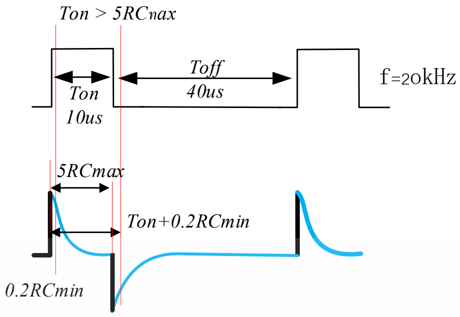
$$C\ (V_o) = \frac{-0.2V_i}{V_o - V_i}(C_{min}) \tag{3.7}$$

หรือจัดให้อยู่ในรูปของ $C\ (V_o, t)$ โดยการแทนค่า $0.2C_{min}$ด้วย $\frac{t}{R}$ จะได้สมการใหม่ดังนี้

$$C\ (V_o, t) = \frac{-tV_i}{R(V_o - V_i)} \tag{3.8}$$

ซึ่งสมการที่ (3.8) นี้ใช้สำหรับการประเมินค่า C ในวงจรอนุพันธ์ที่ป้อนอินพุตเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม และอ่านค่าแรงดันเอาต์พุตในช่วง T_{on} เมื่อ $t \leq 0.2RC_{min}$ และต้องมีการกำหนดย่านการวัดโดยจุดวัด t จะต้องกำหนดให้อยู่ในช่วง $t \leq 0.2RC_{min}$ ซึ่งมีผลทำให้ $0.8 \leq e^{-\frac{t}{RC}} \leq 1$ เมื่อปรับปรุงสมการนี้สำหรับการวัดในช่วง T_{off} เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3.2 จะเห็นได้ว่าอินพุตในช่วงเริ่มต้น T_{off} คือเอาต์พุต $V_o(t=T_{on})$-$V_o(t=0)$ ซึ่งหมายถึงแรงดันที่ถูกชาร์จไว้ในตัวเก็บประจุในช่วงอินพุตหักออกด้วยสัญญาณสูงสุดของอินพุต เช่น ป้อนสัญญาณเข้าวงจรอนุพันธ์เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม 10V เมื่อตัวเก็บประจุเก็บประจุได้ 5V อินพุตเปลี่ยนเป็นขอบขาลง นั่นหมายความว่าอินพุตในช่วง T_{off} ซึ่งหมายถึง V_i จะกลายเป็น 5V-10V = -5V ลักษณะของเอาต์พุตในช่วง T_{on} และ T_{off} สามารถดูภาพประกอบได้ในรูปที่ 3.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 รูปแบบอินพุตที่สอดคล้องกับเอาต์พุตตามที่ต้องการ

ในงานวิจัยที่นำเสนอนี้เป็นการนำเสนอเทคนิคที่นำหลักการของวงจรอนุพันธ์ มาใช้เป็นตัวอ่านค่าความจุไฟฟ้าจากเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุโดยการแทนเซนเซอร์เก็บประจุลงในวงจรอนุพันธ์และกำหนดค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ที่เหมาะสมเพื่อให้สามารถอ่านค่าเอาต์พุตเฉพาะช่วงที่มีความเป็นเชิงเส้น โดยตัดเอาต์พุตช่วงที่ไม่เกี่ยวข้องออกไป โดยการกำหนดให้อินพุตในช่วง T_{on} เป็นตัวกำหนดช่วงเวลาของเอาต์พุต โดยกำหนดให้ เอาต์พุตในช่วง $t<0.2RC$ หรือ ในการออกแบบจะเผื่อไปเป็น $0.4RC$ แต่เนื่องจากค่า C_x เป็นค่าที่ได้จากเซนเซอร์ซึ่งจะมีค่าเปลี่ยนไปตามสิ่งที่ทำการวัดโดยจะมีช่วงอยู่ระหว่าง 10pF ถึง 100pF แต่เมื่อมองตามเงื่อนไข $t<0.2RC$ ค่าผลคูณของ R_xC_x มากจะทำให้ช่วง $0.2R_xC_x$ มีค่ามากตามไปด้วยดังแสดงใน ตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ตัวอย่างการเปลี่ยนค่าช่วงเวลาสำหรับการออกแบบวงจร

C_x(pF)	R_x(MΩ)	$0.2R_xC_x$(μs)
10	1	2
20	1	4
30	1	6
40	1	8
50	1	10
60	1	12
70	1	14
80	1	16
90	1	18
100	1	20

C_x(pF)	R_x(MΩ)	$0.2R_xC_x$(μs)
10	2	4
20	2	8
30	2	12
40	2	16
50	2	20
60	2	24
70	2	28
80	2	32
90	2	36
100	2	40

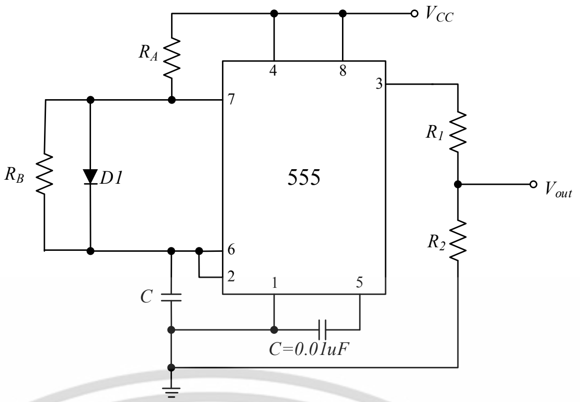
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 3.2 จะเห็นว่าค่า 0.2 RC จะมีค่ามากขึ้นทั้งในมิติของ R และ C ซึ่งหมายความว่า ยิ่งใช้ค่า R มากก็จะมีผลทำให้ช่วงระยะความเป็นเชิงเส้นมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วยมีผลต่อจุดอ่านสัญญาณทำให้การอ่านง่ายขึ้น เนื่องจากการพิจารณาขอบเขตช่วงเวลาแบ่งเป็นช่วง T_{on}และช่วง T_{off} ในการออกแบบเพื่อกำหนดลักษณะของเอาต์พุตของวงจรอนุพันธ์แบบอาร์ซีดิฟเฟอเรนชิเอเตอร์ (RC Differentiator) ในงานที่นำเสนอนี้ผู้วิจัยขอพิจารณาอินพุตช่วงสัญญาณ T_{on} ซึ่งมีเป้าหมายการออกแบบคือ เพื่อประมาณค่าตัวเก็บประจุ (C_x) ในวงจรตาม รูปที่ 3.13 ซึ่งไม่ทราบค่าแต่ทราบขอบเขตมีค่าอยู่ในช่วง 10pF ถึง 100pF โดยกำหนดให้สัญญาณอินพุต ช่วง T_{on} เท่ากับ $0.2R_xC_x$เมื่อทดลองกำหนดค่า R_x รูปที่ 3.13 ต่างๆ เพื่อหาค่า T_{on} ที่เหมาะสมจะพบว่าเมื่อค่า C_x มีค่ามากขึ้นจะทำให้ค่าของ T_{on} เพิ่มขึ้นตามด้วย

ที่กล่าวมาข้างต้นทั้งหมดเป็นการกล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับค่าความต้านทาน ขนาดความจุของตัวเก็บประจุ เวลาที่จะอ่านแรงดันเอาต์พุตในรูปที่ 3.11 จะเป็นการกล่าวถึงอินพุตและผลของอินพุตต่อเอาต์พุต การออกแบบอินพุตมีความสัมพันธ์กับลักษณะเอาต์พุต โดยพิจารณาจากเวลาที่จะอ่านแรงดันเอาต์พุตเป็นหลัก เช่น ถ้าต้องการอ่านค่าแรงดันเอาต์พุตขณะเวลาเท่ากับ $0.2R_xC_x$ แบบนี้จะยึด T_{on}เป็นหลักแต่การอ่านแรงดันในขณะ T_{on}จะเป็นผลทำให้การควบคุมเวลาในการอ่านขึ้นอยู่กับผลคูณของค่า RC_{min} เพียงอย่างเดียวถ้าต้องการระยะเวลาให้นานขึ้นก็ต้องเพิ่มค่า R มากๆ การเพิ่ม C_{min} มีผลต่อค่า C ที่นำมาวัดไม่เหมาะสมที่จะเพิ่ม ต่างกับการอ่านค่าแรงดันขณะ T_{off} เพราะการอ่านค่าแรงดันขณะ T_{off} เราสามารถออกแบบ T_{on}ให้เป็นระยะรอได้ แต่ขนาดของ T รวมควรมากกว่าค่า 6RC ไว้ก่อนเพื่อป้องกันปัญหาด้านอื่นซึ่งเป็นปัจจัยภายนอก และในการพิจารณาในงานวิจัยนี้จะใช้เฉพาะอินพุต 1 สัญญาณ เพราะฉะนั้นจะต้องทิ้งระยะให้อินพุตที่ 2 ไม่มีผลในการวิจัยจากรายละเอียดที่กล่าวมาสามารถสรุปได้ว่าอินพุตจะมีลักษณะ T_{on} และ T_{off} ไม่เท่ากัน โดยที่สัญญาณ T_{on} มีขนาดเล็กกว่าสัญญาณ T_{off} มากๆ การสร้างสัญญาณ อินพุตจึงต้องเป็นสัญญาณที่มีคุณสมบัติของ Duty Cycle ซึ่งจะต้องออกแบบวงจรกำเนิดความถี่เป็นคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีขนาด T_{on} น้อยกว่า T_{off} มากๆ

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ IC 555 เป็นวงจรกำเนิดความถี่ เพื่อสร้างเป็นวงจรอะสเตเบิล (Astable) และเพื่อให้วงจรนี้สามารถกำเนิดความถี่ที่มีค่าวัฏจักรหน้าที่ (Duty cycle) น้อยกว่า 50% จึงจำเป็นต้องมีการต่อไดโอด (Diode) คร่อม R2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 วงจรกำเนิดความถี่ที่ใช้ไอซีเบอร์ 555

กล่าวโดยสรุปเราสามารถหาจุดอ่านค่า t ใดๆ ที่เป็นค่าคงที่และสามารถอ่านค่าแรงดันเอาต์พุต ในช่วง 20% แรกของการเก็บประจุซึ่งเป็นช่วงที่มีพฤติกรรมการเก็บประจุเป็นแบบเชิงเส้นซึ่งเป็นช่วงเดียวกันกับการลดลงของกระแสจาก 100% เหลือ 80% โดยคิดจากค่า C ที่น้อยที่สุดในย่านที่ต้องการวัด เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$t = 0.2RC_{min} \tag{3.9}$$

โดยที่ t หมายถึงจุดวัดสัญญาณที่จะมีผลทำให้ค่าของแรงดันอยู่ในช่วง 80% ถึง 100% ซึ่งในช่วงนี้ค่าเวลาจะมีความสัมพันธ์ C เป็น $t= 0.2RC$ ซึ่งในงานวิจัยนี้ต้องออกแบบให้รองรับค่า C ตั้งแต่ 10pF จนถึง 100pF เพราะฉะนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ค่า C ค่าที่น้อยที่สุดในการกำหนดเวลา เพราะถ้ากำหนดให้ค่า C มากจะทำให้การอ่านค่าที่ค่า C น้อยอยู่นอกช่วง 80% ถึง 100% ซึ่งค่า C ที่น้อยที่สุดในย่านจะมีค่าเท่ากับ 0.2RCmin (ค่า C ที่น้อยที่สุดในช่วงการวัด) ส่วนค่าC ที่มีค่ามากขึ้นค่า $0.2RCmin < 0.2RC$ ซึ่งจะเป็นผลทำให้แรงดันยังมีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.8-1V เมื่อ V_i=1V ในส่วนของค่าคาบเวลาของอินพุต(Tw) ตามรูปที่ 3.1 (ค) คาบเวลาซึ่งใช้ความถี่เดียวกันสำหรับทุกการวัดค่า C เพราะฉะนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ค่า Cmax จะได้ค่าตามสมการที่ (3.10)

$$Tw \geq 0.2R_xC_{max} \tag{3.10}$$

ค่า Cmax ในงานวิจัยที่นำเสนอนี้คือค่าC สูงสุดที่ต้องการทดสอบซึ่งมีค่าเป็น 100 pF เพราะฉะนั้นค่า Tw จึงมีค่าเป็น

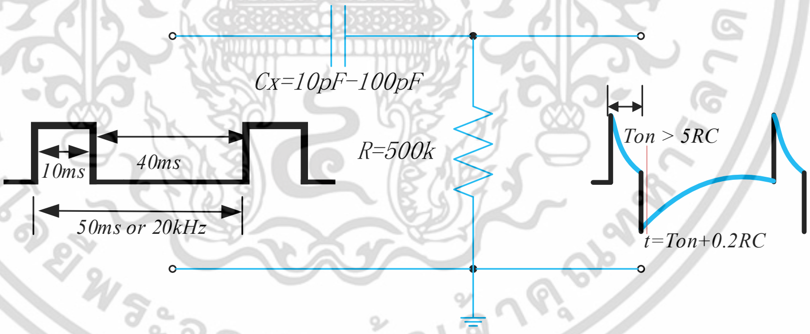
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Tw(\mu s) \geq 20R(M\Omega) \qquad (3.11)$$

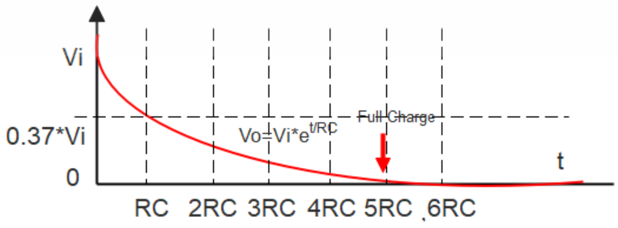
เมื่อ ค่า C_{max} คือ 100pF

3.3 การจำลองโปรแกรมเพื่อหาค่าความต้านทานและอินพุตที่เหมาะสม

จากหัวข้อ 3.2 เป็นการพิสูจน์เกี่ยวกับช่วงเวลาที่สัญญาณเอาต์พุตของวงจรอนุพันธ์มีลักษณะเป็นเชิงเส้น โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ ในหัวข้อนี้จะเป็นการนำสมการคณิตศาสตร์ที่ได้มาปรับใช้และออกแบบวงจรอนุพันธ์ที่สอดคล้องตามเงื่อนไข ซึ่งค่าที่ต้องนำมาพิจารณา อ้างอิงจากรูปที่ 3.13 ประกอบด้วย C_x คือย่านของตัวเก็บประจุที่ต้องการวัดมีค่าตั้งแต่ 10pF จนถึง 100pF ค่าของ R_x คือค่าความต้านทางซึ่งจะต้องออกแบบค่าที่เหมาะสมเพื่อให้สามารถใช้ได้กับทั้งย่านของตัวเก็บประจุ สุดท้ายคือค่าของคาบเวลาของอินพุตของวงจรอนุพันธ์ (T) ซึ่งแบ่งออกเป็นช่วงเวลา T_{on} และช่วงเวลา T_{off} ซึ่งจะต้องเลือกค่า T_{on} และ T_{off} ที่เหมาะสม โดยที่ช่วงเวลาที่ต้องอ่านค่าจะต้องอยู่ในเวลาที่น้อยกว่า 0.2 RC ซึ่งมีผลทำให้ ค่า T_{on} และ T_{off} ที่เหมาะสมจะต้องมากว่าค่าผลคูณของ RC นอกจากนั้นแล้วเพื่อให้วงจรกำหนดค่าเวลาไม่กระชั้นจนเกินไปจึงออกแบบให้การอ่านค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเกิดขึ้นในช่วงเวลา T_{off} ซึ่งผลของการออกแบบคือได้ค่าสัญญาณอินพุตรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 20kHz รายละเอียดดัง รูปที่ 3.13



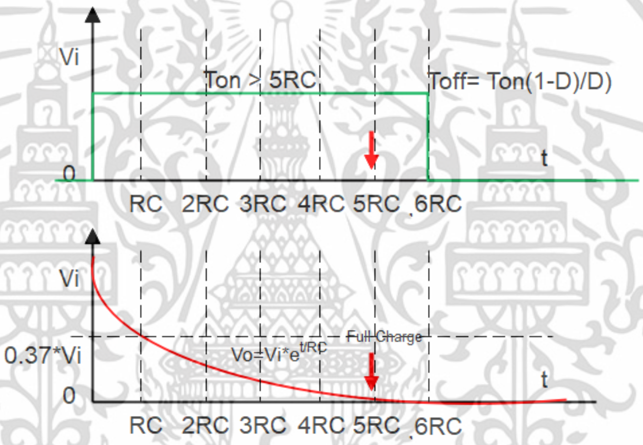
รูปที่ 3.13 วงจรอนุพันธ์ที่ออกแบบและ สัญญาณอินพุต-เอาต์พุต



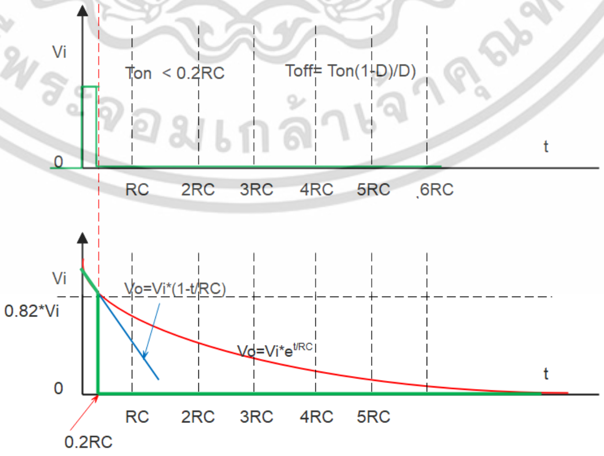
รูปที่ 3.14 ลักษณะเอาต์พุตเมื่อตัวเก็บประจุในวงจรอนุพันธ์เก็บประจุเต็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.14 เป็นกราฟแสดงเอาต์พุตที่วัดคร่อม R_x ในวงจรอนุพันธ์ตาม รูปที่ 3.13 โดยเมื่อให้อินพุตเปลี่ยนสถานะจาก off เป็น on หรือ จาก “0” เป็น “1” ค้างไว้ จนกระทั่งตัวเก็บประจุเก็บประจุเต็มซึ่งจะใช้เวลาเท่ากับ $5^*R_xC_x$ ซึ่งจะเป็นช่วงเวลาที่สั้นที่สุดสำหรับช่วง T_{on} หรือ T_{off} ในการเก็บประจุของตัวเก็บประจุจนเต็ม แต่ในการออกแบบวงจรโดยทั่วไปอาจจะต้องมีการเผื่อเป็น $6R_xC_x$ หรือมากกว่านั้น หรือในกรณีในงานวิจัยนี้ จะต้องออกแบบอินพุตให้รองรับกับการเปลี่ยนตัวเก็บประจุหลายๆ ค่าโดยยังใช้ค่าความต้านทานตัวเดิม โดยที่การหาค่าคาบเวลาของอินพุต (T) จะต้องพิจารณา Duty Cycle (D) ด้วย โดย ค่า $D=\frac{T_{on}}{T_{on}+T_{off}}$ ซึ่งหมายถึง สัดส่วนของ T_{on} เทียบกับเวลาทั้งหมดในขณะเดียวกันช่วงเวลาช่วงที่เหลือเรียกว่า T_{off} สามารถหาค่าได้จาก $T_{off}=\frac{T_{on}(1\text{-}D)}{D}$

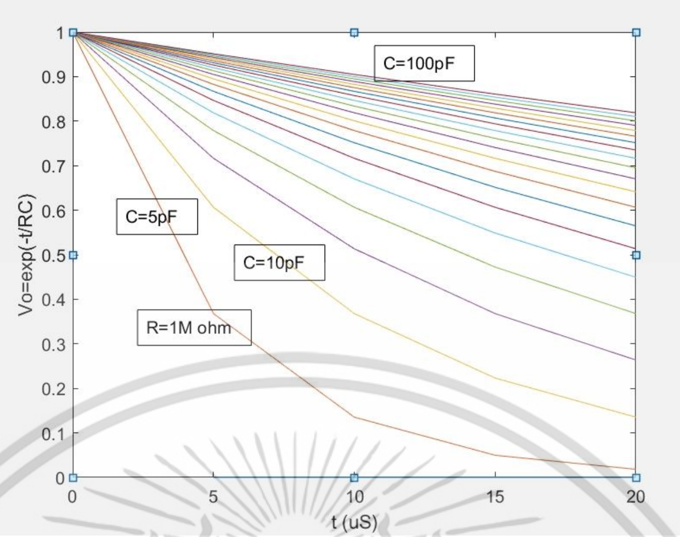


รูปที่ 3.15 การออกแบบคาบเวลาอินพุตเพื่อให้ตัวเก็บประจุในวงจรอนุพันธ์เก็บประจุได้เต็ม



รูปที่ 3.16 การกำหนดอินพุตเมื่อต้องการค่าเอาต์พุตเฉพาะช่วงที่มีความเป็นเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง t,R,C ในวงจรอนุพันธ์

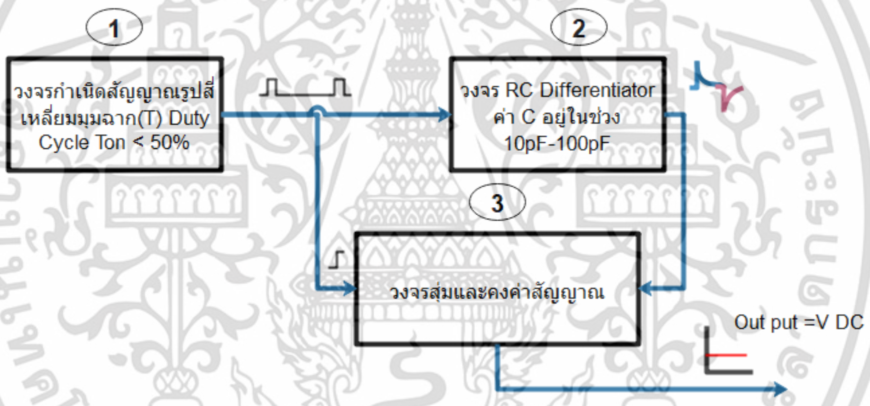
จากรูปที่ 3.17 เป็นผลการทดลองสร้างกราฟเส้นจาก สมการ $Vo(t) = e^{\frac{-t}{RC}}$ โดยกำหนดให้ค่า R เป็นค่าคงที่ 1MΩ t คือจุดเวลาที่อ่านแรงดันมีค่าตั้งแต่ 0-20μs ,C คือค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 10-100pF ผลการทดลองนี้สรุปได้ว่า จากสมการที่ (2.1) เมื่อกำหนดให้ $V_i = 1$ และ $t = 0.2RC$ จะได้ค่า Vo=0.8 สำหรับทุกๆ ค่า C และที่ค่า $t < 0.2RC$ ค่า Vo จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนมากสุดที่ 1V จากรูปที่ 3.17 สังเกตว่าที่ Vo=0.8 สำหรับค่า C แต่ละค่า จะมีค่า t ไม่เท่ากันยิ่งค่า C มากก็จะมีค่า t มากขึ้น เพราะฉนั้นการจะใช้ค่า t เพียงค่าเดียวสำหรับการอ่านค่าทุกๆ ค่า C ในย่านที่ต้องการวัด จะต้องเลือกค่า t ที่ทำให้ค่า C ที่น้อยที่สุดมีค่า Vo=0.8 ซึ่งจะทำให้ทุกๆ ค่า C จะมีช่วงเวลาที่สามารถอ่านแรงดันเอาต์พุตที่มีลักษณะเป็นเชิงเส้น สำหรับค่า R ในวงจรอนุพันธ์ในงานวิจัยนี้จะเป็นค่าคงที่ ใช้ค่าเดียวกันสำหรับทุกๆ ค่า C เพราะฉะนั้น ค่า R จะมีผลเฉพาะในการออกแบบสัญญาณอินพุตโดยที่ 5 เท่าของผลคูณของ RC (ใช้ค่า C ที่มากที่สุด) จะต้องไม่น้อยกว่าค่าเวลาช่วง T_{on} หรือ T_{off} ส่วนสัญญาณเอาต์พุตจะไม่มีผล

3.4 การทดลองเพื่อออกแบบอุปกรณ์ในวงจรอ่านค่าความจุไฟฟ้าในรูปแรงดัน

จากหัวข้อที่กล่าวมาข้างต้นเป็นการกล่าวถึงคุณลักษณะของอินพุตและคุณลักษณะของเอาต์พุต รวมทั้งความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรอนุพันธ์ที่จะออกแบบขึ้นมาเพื่อให้สามารถอ่านค่าแรงดันเอาต์พุตในจุดเวลาที่กำหนดได้ โดยที่จุดเวลาที่กำหนดนั้นจะต้องสามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อ่านค่าเอาต์พุตได้ทุกๆ ค่า C ที่มีค่าตั้งแต่ 10pF จนถึง 100pF ซึ่งเมื่อพิจารณาตามโมเดลทางคณิตศาสตร์แล้วจะพบว่าค่าของจุดเวลาที่เหมาะสมคือ $t \leq 0.2RCmin$ ซึ่งค่า Cmin ก็คือค่า C ที่มีค่าน้อยสุดในที่นี้หมายถึง 10pF แต่จาก โมเดลทางคณิตศาสตร์พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตวัดที่จุดใดๆ ในช่วงที่ $t \leq 0.2RCmin$ จะมีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้น แต่ความสัมพันธ์ระหว่างค่า C ที่เปลี่ยนแปลงจาก 10pF-100pF มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น จึงต้องมีการแบ่งช่วงที่มีความเป็นเชิงเส้นมาพิจารณาเป็นช่วงๆ ทำให้ค่า C_{min} ในแต่ละช่วงแตกต่างกันซึ่งเมื่อค่า C_{min} เปลี่ยนไปทำให้จุดเวลาวัดค่าเปลี่ยนไปด้วยตามสมการคณิตศาสตร์ $t \leq 0.2RC_{min}$ ในขณะที่ค่าความต้านทาน (R) ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุต แต่มีผลกับค่าเวลาตามสมการที่ (3.4) ซึ่งทั้งหมดนี้เป็นส่วนหนึ่งขององค์ประกอบพื้นฐานของวงจรอ่านค่าความจุไฟฟ้าในรูปแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งถูกกำกับไว้เป็นเลข (2) ตามรูปที่ 3.18 ในหัวข้อนี้จะเป็นการขยายความส่วนของวงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (1) ตามรูปที่ 3.18

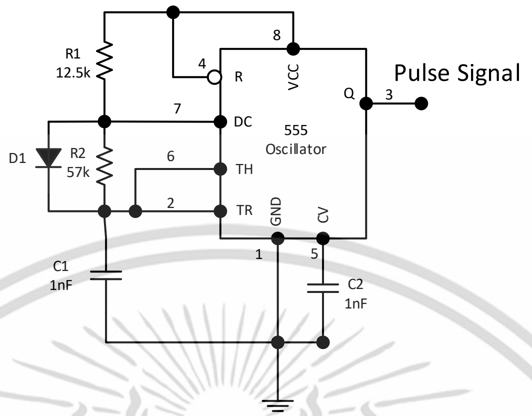


รูปที่ 3.18 องค์ประกอบของวงจรอ่านค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันโดยใช้เทคนิคการสุ่มและคงค่า

จากรูปที่ 3.18 ผังเบื้องต้นของวงจรอ่าค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันโดยใช้เทคนิคการสุ่มและคงค่าประกอบด้วย วงจรวงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม เป็นวงจรมัลติไวเบรเตอร์ชนิดหนึ่ง (Multivibrator Circuit) มีชื่อเรียกว่าวงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ (Astable Multivibrator) ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ไอซีเบอร์ 555 มาจัดทำเป็นวงจรกำเนิดความถี่รูปคลื่นสี่เหลี่ยม วงจรกำเนิดสัญญาณโดยใช้ไอซีเบอร์ 555 นี้การทำงานของวงจรต้องใช้ R และ C และไดโอด ต่อร่วมกับไอซีเบอร์ 555 ลักษณะการต่อวงจร R และ C ไดโอดเป็นดังรูปที่ 3.19 วงจรนี้ทำหน้าที่สร้างความถี่ โดยตัววงจรเองสามารถทำงานและหยุดทำงานได้ด้วยตัวเองการทำงานจะสลับกันไปมาตลอดเวลา วงจรนี้สามารถทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยไม่จำเป็นต้องมีสัญญาณมากระตุ้นคาบเวลา ความถี่ และลักษณะของวงจรตามมีรายละเอียดตาม รูปที่ 3.19

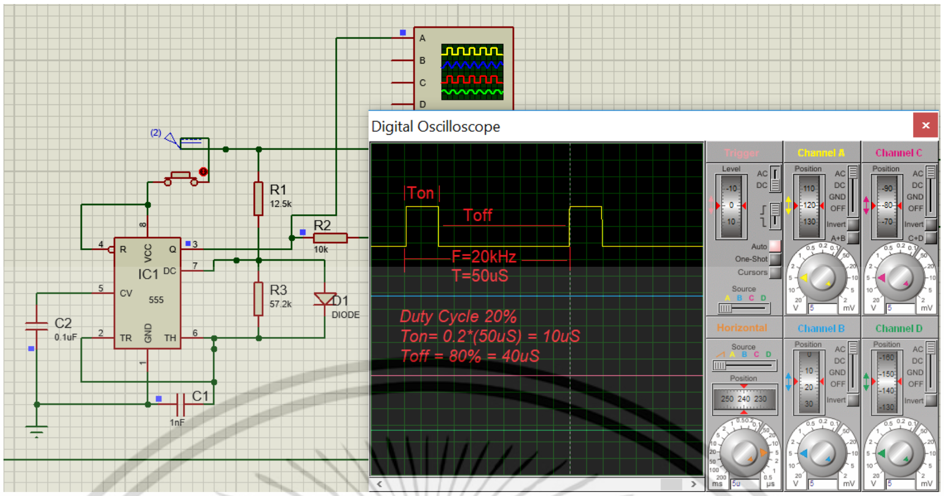


รูปที่ 3.19 วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมโดยใช้ไอซีเบอร์ 555

โดยมีสูตรในการคำนวณค่าช่วงเวลาของสัญญาณในช่วง T_{on} และ T_{off} เป็น $\mathrm{T_{on}}$=0.8(R1)*C และ$\mathrm{T_{off}}$=0.7R2C ซึ่งค่า Duty Cycle ของวงจรซึ่งสามารถคำนวณค่าได้จากค่าตัวต้านทานในวงจร คือ Duty Cycle=$\frac{\mathrm{R1}}{\mathrm{R1+R2}}$ ในงานวิจัยนี้ต้องการสร้างความถี่ 20 kHz มี Duty Cycle 20% จาก Duty Cycle = $\frac{\mathrm{Ton}}{\mathrm{Ton+Toff}}$ แทนค่า $\mathrm{T_{on}+T_{off}}$ ด้วย $\frac{1}{\mathrm{20kHz}}$ จะได้ $\mathrm{T_{on}}$ = 0.2*(50μs) =10 μs ซึ่งหมายความว่า $\mathrm{T_{off}}$ มีค่าเป็น 80% เท่ากับ 40μs จาก $\mathrm{T_{on}}$ = 0.8(R1)C และ Toff = 0.7R2C

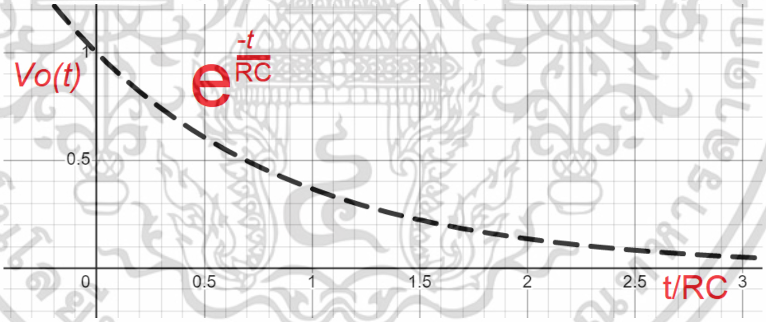
หลักในการออกแบบจะพิจารณาจากค่า C ที่เหมาะสมโดยพิจารณาที่ค่า C น้อยๆ ที่มีขายทั่วไปเมื่อค่า C น้อยจะมีผลทำให้ค่า R มากเมื่อค่า $\mathrm{T_{on}}$ ถูกกำหนดไว้เป็นค่าคงที่เป็นผลทำให้กระแสต่ำเป็นการประหยัดพลังงงาน ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ค่า C =1 nF มีผลทำให้ค่า $\mathrm{R2} = \frac{\mathrm{Toff}}{0.7*(1\mathrm{nF})} = \frac{40\mu s}{0.7*(1\mathrm{nF})}$ = 57143 Ω และค่า $\mathrm{R1} = \frac{10\mu s}{0.8*(1\mathrm{nF})}$ =12500Ω เมื่อนำค่าต่างๆ ที่คำนวณได้ของวงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรมจำลองชื่อ Proteus จะได้เอาต์พุตเป็นไปตามที่ต้องการตาม รูปที่ 3.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.20 เอาต์พุตของวงจรกำเนิดรูปคลื่นสี่เหลี่ยมเมื่อเลือกอุปกรณ์ตามที่คำนวณ

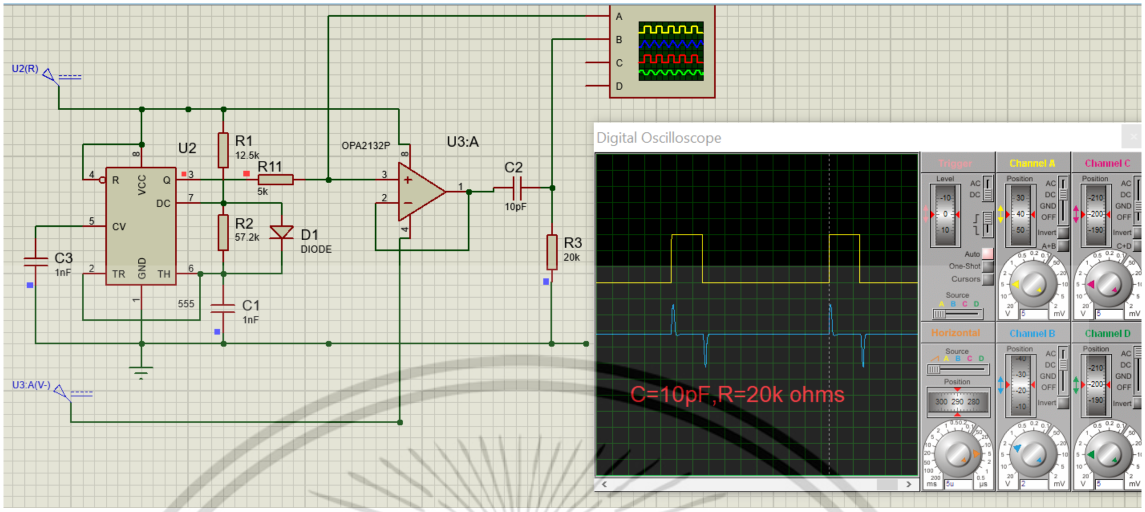
เมื่อได้สัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมจากวงจรกำเนิดสัญญาณที่จำลองขึ้นมาแล้วจึงนำสัญญาณที่ได้ป้อนเข้าเป็นอินพุตของวงจรอนุพันธ์ เมื่อพิจารณาที่สมการของวงจรอนุพันธ์ $Vo = e^{\frac{-t}{RC}}$ ซึ่งมีกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุต ($V_o(t)$) กับเวลา (t) จะได้ลักษณะดัง รูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 ลักษณะของเอาต์พุตของวงจรอนุพันธ์ที่เวลาใดๆ

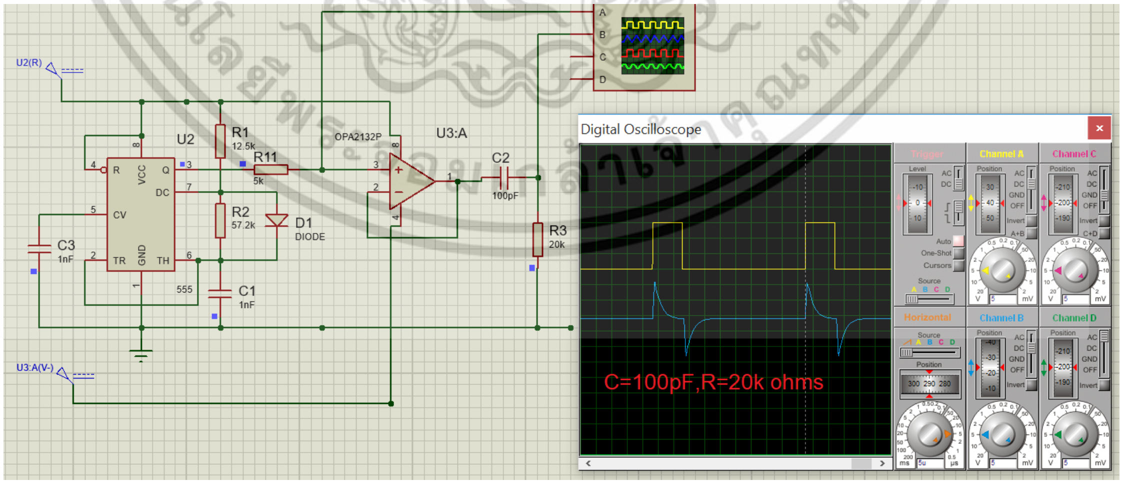
จะพบว่าค่า $\frac{t}{RC}$ ยิ่งมากค่า Vo ก็ยิ่งมีค่าน้อยซึ่งหมายความว่าค่า t สูงจะมีผลทำให้ค่า Vo มีค่ายิ่งน้อยในขณะที่ผลคูณของ RC ยิ่งต่ำยิ่งมีผลทำให้ค่า Vo สูง ซึ่งในงานวิจัยนี้ต้องการวัดค่า C ที่เปลี่ยนแปลงจาก 10PF-100pF และมีจุดวัด (t) คงที่และต้องการใช้ R ค่าเดียวกันในวัดค่า C และที่สำคัญจุดวัด (t) สำหรับทุกค่า C ตั้งแต่ 10pF-100pF จะต้องเป็นจุดที่ทำให้ค่า Vo มากกว่า 80% ซึ่งหมายความว่าค่า $\frac{t}{RC}$ ต้องน้อยกว่า 0.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.22 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรอนุพันธ์ C=10pF

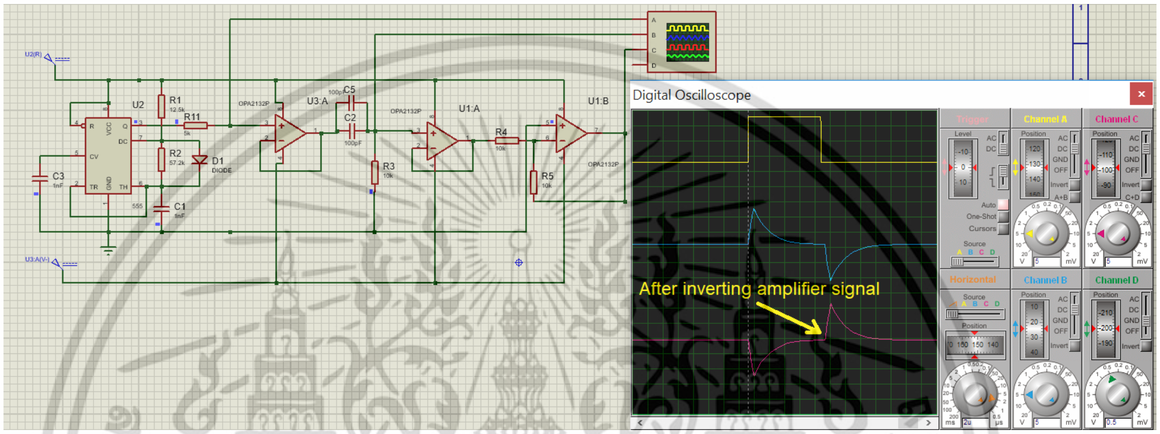
จากวงจรจำลอง เมื่อทดลองใช้ค่า R=0.02 MΩ, C=10 pF ซึ่งเป็นค่า C ที่น้อยที่สุดเมื่อพิจารณาถึงจุดอ่านค่าเอาต์พุตตามสมการที่ (3.9) จุดอ่านค่าแรงดันเอาต์พุตที่ $t = 0.2RCmin$ ซึ่งในที่นี้จะได้จุด $t = 0.2 * 0.02M\ Ohms * 10\ pF$ =0.04 μs ส่วนในกรณีของค่า C ที่มากที่สุดคือ 100pF เมื่อใช้ค่า R=0.02 MΩ, C= 100pF เมื่อพิจารณาถึงจุดอ่านค่าเอาต์พุตตามสมการที่ (3.9) จุดอ่านค่าแรงดันเอาต์พุตที่ $t = 0.2RCmin$ ซึ่งในที่นี้จะได้จุด $t = 0.2 * 0.02M\ Ohms * 100\ pF$ =0.4 μs ซึ่งได้สัญญาณดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรอนุพันธ์ C=100pF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

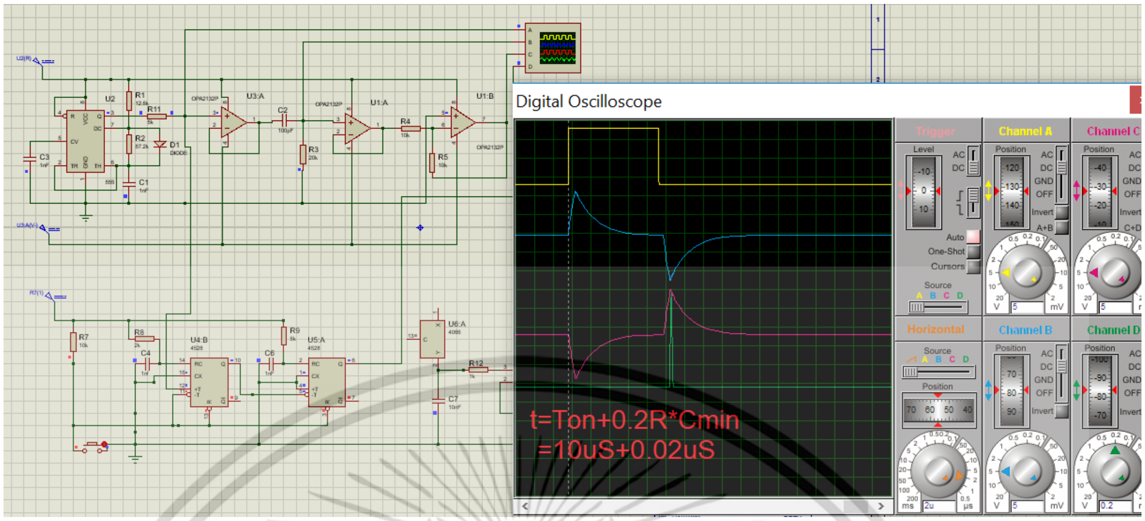
จากรูปที่ 3.22 จะเห็นว่าเวลาในการอ่านค่าสัญญาณเอาต์พุตของวงจรอนุพันธ์เพื่อให้ได้ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเร็วเกินไป จึงต้องดัดแปลงวงจรให้เปลี่ยนจุดอ่านโดยกำหนดให้จุดอ่านค่าเป็นช่วง T_{off} ซึ่งจะได้ค่าใหม่เป็นเป็น $T_{on} + 0.2RC_{min}$ โดยการดัดแปลงทำได้โดยการเพิ่มวงจรกลับเฟสสัญญาณข้างหลังวงจรอนุพันธ์ทำให้สัญญาณกลับด้านส่วนของ T_{off} ซึ่งปกติมีเฟสอยู่ด้านลบจะถูกกลับขึ้นมาด้านบวก



รูปที่ 3.24 เอาต์พุตเมื่อผ่านวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส

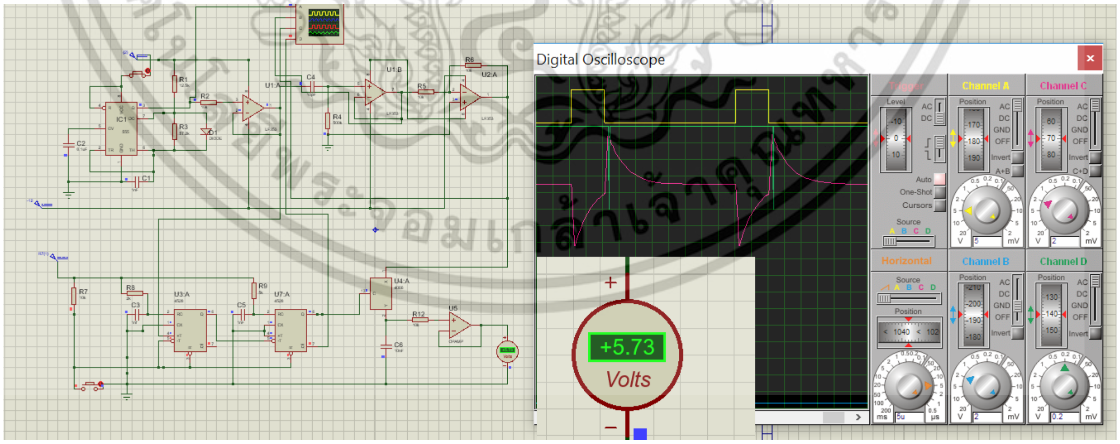
นอกจากวงจรกำเนิดสัญญาณ วงจรอนุพันธ์ แล้วยังมีวงจรตั้งเวลาเพื่อส่งสัญญาณอ่านค่าแรงดันเอาต์พุต วงจรตั้งเวลาใช้ ไอซี โมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ 2 ชุด โดยขั้นแรกเป็นการจำลองโดยใช้โปรแกรม Proteus ซึ่งในโปรแกรมสามารถตั้งค่าเวลาที่กำหนดได้โดยไม่ต้องคำนวณจากตัวเก็บประจุและตัวต้านทานตาม รูปที่ 2.18 โดยตั้งค่าเวลาไว้ที่ $t = T_{on} + 0.2RCmin$ =10.04 μs หรือ 10040ns จากนั้นต่อเอาต์พุตของโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ ชุดที่ 1 เป็นอินพุตของวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ชุดที่ 2 ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวสร้างสัญญาณกระตุ้นเป็นแท่งขนาด 200ns ผลการจำลองเป็นดังรูปที่ 3.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.25 จุดวัดสัญญาณที่ $t = T_{on} + 0.2R_xC_{min}$

เมื่อได้สัญญาณกระตุ้นในเวลาตามที่กำหนดแล้วก็ ต่อเข้ากับไอซีแบบสวิทช์ โดยใช้สัญญาณกระตุ้นที่ได้จาก โมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ 2 เป็นสัญญาณเปิดและปิดสวิทช์เพื่อปล่อยค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรอนุพันธ์ขณะนั้นโดยใช้ตัวเก็บประจุเก็บค่าแรงดันนั้นไว้เมื่อวัดแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุก็จะได้เป็นแรงดันแบบไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งสามารถนำไปประเมินกลับเพื่อหาค่าตัวเก็บประจุในวงจรอนุพันธ์ข้างต้นได้ ดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่อ่านได้จากจุดวัดสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามรูปที่ 3.26 เมื่อสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม 20kHz หรือ ขนาด 50 μs ที่มี Duty Cycle 20% หรือความกว้างของ $T_{on=10}$ μs โดยมีแรงดันอินพุตที่ 10V ป้อนสัญญาณเข้าวงจรอนุพันธ์ที่มีการเปลี่ยนค่า C_X ตั้งแต่ 10pF จนถึง 100pF และค่า R_X คงที่ 20kΩ และเมื่อพิจารณาแรงดันเอาต์พุตในช่วง T_{off} (10 μs <t<50 μs) ของสัญญาณอินพุต และรอจนกระทั่งเวลาตั้งแต่เริ่มต้นสัญญาณอินพุตจนกระทั่ง เมื่อ $t = T_{on} + 0.2R_xC_{min}$ จึงอ่านค่าแรงดันที่ตกคร่อม R_X และเมื่อจำลองกับทุกค่า C ในย่านที่ต้องการวัดก็จะได้ข้อมูลดังตารางที่ 3.3

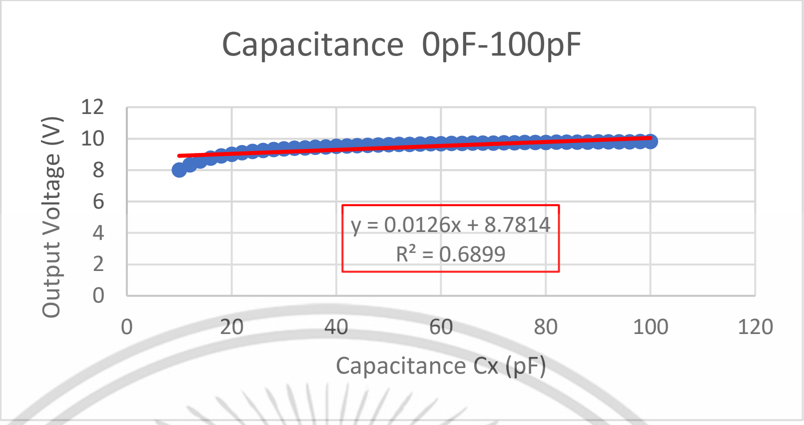
ตารางที่ 3.3 ผลการจำลองวัดค่าแรงดันไฟฟ้าในวงจรอนุพันธ์ในเวลาที่กำหนด

C(pF)	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28
Voltage (V)	8.00	8.33	8.57	8.75	8.89	9.00	9.09	9.17	9.23	9.29
C(pF)	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48
Voltage (V)	9.33	9.38	9.41	9.44	9.47	9.50	9.52	9.55	9.57	9.58
C(pF)	50	52	54	56	58	60	62	64	66	68
Voltage (V)	9.60	9.62	9.63	9.64	9.70	9.67	9.68	9.69	9.70	9.71
C(pF)	70	72	74	76	78	80	82	84	86	88
Voltage (V)	9.71	9.72	9.73	9.74	9.74	9.75	9.80	9.76	9.77	9.77
C(pF)	90	92	94	96	98					
Voltage (V)	9.78	9.78	9.79	9.79	9.80					

3.5 สร้างโมเดลความสัมพันธ์ระหว่างตัวเก็บประจุในวงจรอนุพันธ์กับแรงดันเอาต์พุต

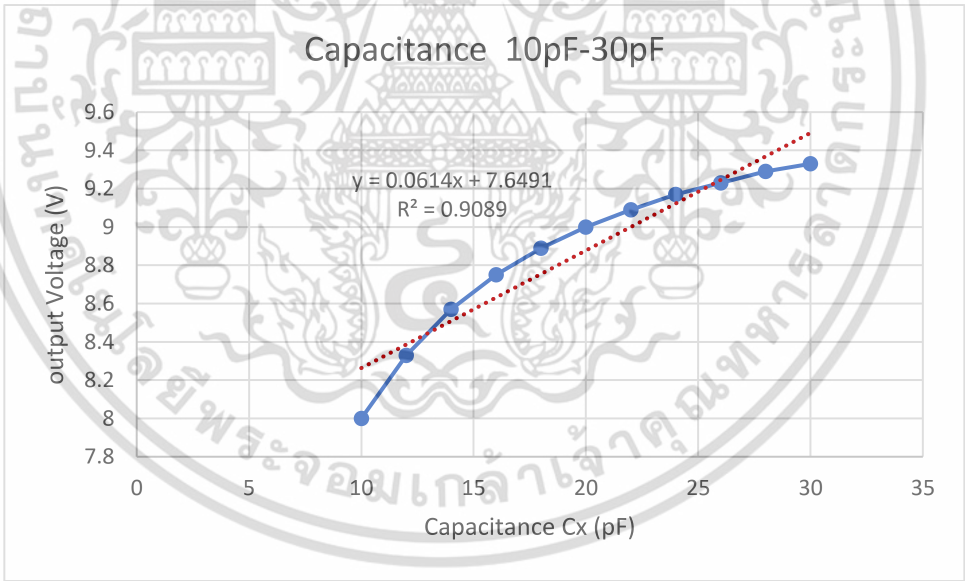
เมื่อนำข้อมูลจากการวัดโดยโปรแกรมจำลอง Proteus มาสร้างโมเดล โดยใช้วิธี Linear regression เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุต กับค่าของตัวเก็บประจุของวงจรอนุพันธ์ที่เปลี่ยนแปลงจาก 10pF-100pF โดยเพิ่มค่าขึ้นขั้นละ 2pF จะได้ความสัมพันธ์และสมการเส้นตรงตามรูปที่ 3.27 ซึ่งมีค่า R-Squared เท่ากับ 0.6899 ซึ่งถือว่าค่าความแม่นยำต่ำ และเมื่อสังเกตจากข้อมูลพบการใช้วิธีแบ่งช่วงและสร้างโมเดลสำหรับแต่ละช่วงจะทำให้ได้ค่าความแม่นยำสูงกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.27 โมเดลความสัมพันธ์ของตัวเก็บประจุ 10pF-100pF กับแรงดันเอาต์พุต

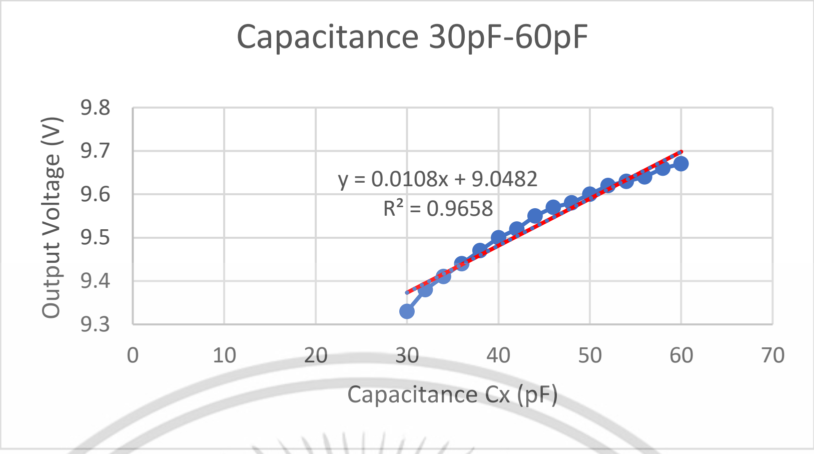
จึงใช้วิธีแบ่งช่วง เป็น 3 ช่วงเพื่อสร้าง โมเดลโดยแบ่งเป็นช่วง 10pF-30pF ก็จะได้ โมเดลตามรูปที่ 3.28 ซึ่งมีค่า R-Squared 0.9089 ซึ่งค่าความแม่นยำเพิ่มขึ้น



รูปที่ 3.28 โมเดลความสัมพันธ์ของตัวเก็บประจุ 10pF-30pF กับแรงดันเอาต์พุต

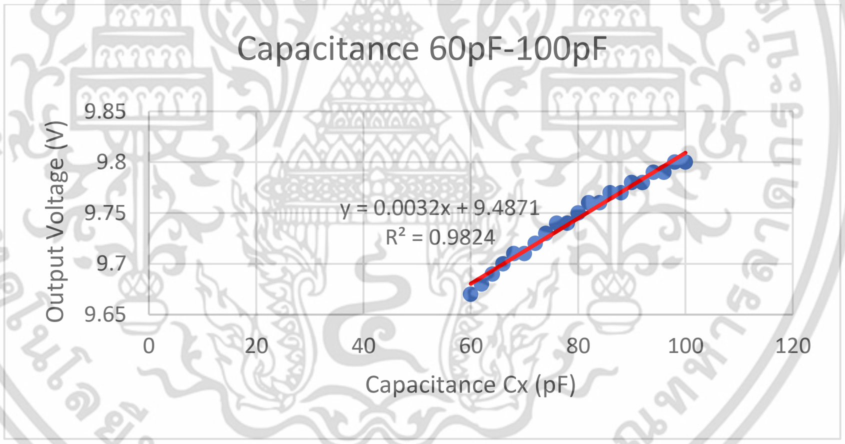
และช่วงที่ 2 ค่าตัวเก็บประจุระหว่าง 30pF-60pF ตามโมเดลรูปที่ 3.29 ซึ่งมีค่า R-Squared 0.9658

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.29 โมเดลความสัมพันธ์ของตัวเก็บประจุ 30pF-60pF กับแรงดันเอาต์พุต

ช่วงสุดท้าย ค่าตัวเก็บประจุระหว่าง 60pF-100pF มี โมเดลตามรูปที่ 3.30 มีค่า R-Squared 0.9824



รูปที่ 3.30 โมเดลความสัมพันธ์ของตัวเก็บประจุ 60pF-100pF กับแรงดันเอาต์พุต

จะสังเกตว่าเมื่อแบ่ง โมเดลเป็นช่วงจะทำให้ค่า R-Squared มีค่ามากกว่า 0.9 ทุกช่วง ซึ่งหมายถึงสมการเส้นตรงที่เกิดจากการทำ Linear Regression สามารถนำมาใช้ทำนายขนาดของตัวเก็บประจุอื่นๆ โดยวิธีวัดค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่เอาต์พุตของวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันโดยใช้เทคนิคการสุ่มและคงค่า ที่นำเสนอได้ โดยเทคนิคการตัดช่วงนี้สามารถขยายผลโดยการเพิ่มตัวเก็บประจุอ้างอิง โดยการต่อขนานตัวเก็บประจุอ้างอิงเข้ากับตัวเก็บประจุที่ใช้เป็นตัวทดสอบ เช่นต้องการวัดค่าแรงดันที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอาต์พุตโดยใช้วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันโดยใช้เทคนิคการสุ่มและคงค่าที่นำเสนอนี้ ตั้งแต่ 10pF-100pF ก็จะใช้ตัวเก็บประจุอ้างอิงขนาด 100pF ต่อขนานกับตัวเก็บประจุที่ต้องการวัดทำให้ค่าที่ได้จะกลายเป็น 100pF+ค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ทดสอบ โดยที่ตัวเก็บประจุตัวสุดท้ายที่ใช้ทดสอบซึ่งมีค่าความจุเป็น 100pF จะทำให้ค่าตัวเก็บประจุรวมของวงจรอนุพันธ์กลายเป็น 200pF จะสังเกตุได้ว่าตัวเก็บประจุอ้างอิงที่ใช้กับตัวเก็บประจุตัวสุดท้ายที่ใช้ทดสอบ มีขนาดต่างกันแค่ 2เท่า ซึ่งแตกต่างกับการใช้ตัวเก็บประจุทดสอบโดยไม่มีการขนานตัวเก็บประจุอ้างอิง การต่อวงจรแบบนี้ตัวเก็บประจุทดสอบเริ่มต้น 10pF กับตัวเก็บประจุทดสอบตัวสุดท้ายซึ่งมีค่า 100pF ที่ใช้ทดสอบจะมีขนาดต่างกัน 10 เท่า เมื่อใช้เทคนิคนี้ในการสร้าง Model จะต้องมีการคำณวนค่าใหม่ โดยที่ค่าของตัวเก็บประจุที่น้อยสุดในวงจรแบบนี้จะมีขนาดเป็น 100pF ค่ามากสุดจะเป็น 200pF (ค่าตัวเก็บประจุอ้างอิง+ค่าตัวเก็บประจุมากสุดที่ใช้ทดสอบ) สามารถหาค่า ตัวต้านทานในวงจรอนุพันธ์ได้จากค่า $T_{on} = 5RC_{Max}$ (กำหนดให้ช่วง Ton มีค่าเป็น 5 เท่าของผลคูณ RC) โดยที่ T_{on} ในวงจรนี้มีค่าเท่ากับ 10 μs ในขณะที่ C_{Max} มีค่าเป็น 200pF จะทำให้ได้ค่าตัวต้านทานเท่ากับ 10kΩ จากนั้นหาค่าช่วงเวลาในการอ่านค่าแรงดันโดยกำหนดให้ช่วงเวลาต้องน้อยกว่า $t \leq 0.2RC_{min}$ เมื่อคิดที่ค่า $t = 0.2RC_{min}$ จะได้ค่า t เป็น 0.2 μs เมื่อจำลองข้อมูลโดยใช้โปรแกรม Proteus จะได้แรงดันเอาต์พุตเทียบกับค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ทดสอบเป็นดังนี้ (ค่าตัวเก็บประจุที่แสดงในตารางนี้เป็นค่าที่หักค่าของตัวเก็บประจุอ้างอิงในวงจรออกแล้ว)

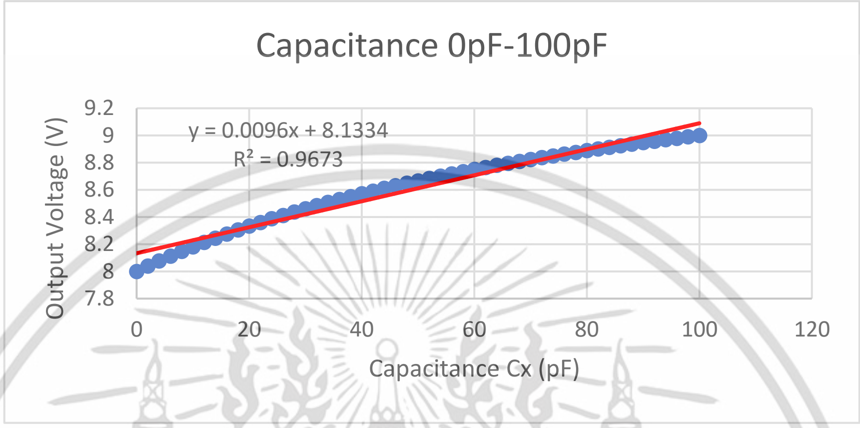
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 ผลการวัดค่าจากวงจรจำลอง proteus กรณีมีตัวเก็บประจุอ้างอิง

C(pF)	0	2	4	6	8	10	12
Output(V)	8.00	8.00	8.10	8.10	8.10	8.20	8.20
C(pF)	14	16	18	20	22	24	26
Output(V)	8.20	8.30	8.30	8.33	8.36	8.39	8.41
C(pF)	28	30	32	34	40	36	38
Output(V)	8.44	8.46	8.48	8.51	8.57	8.53	8.55
C(pF)	42	44	46	48	50	52	54
Output(V)	8.59	8.61	8.63	8.65	8.67	8.68	8.70
C(pF)	56	58	60	62	64	66	68
Output(V)	8.72	8.73	8.75	8.77	8.78	8.80	8.81
C(pF)	70	72	74	76	78	80	82
Output(V)	8.82	8.84	8.85	8.86	8.88	8.89	8.90
C(pF)	84	86	88	90	92	94	96
Output(V)	8.91	8.92	8.94	8.95	8.96	8.97	8.98
C(pF)	98	100					
Output(V)	8.99	9.00					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำค่าที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม Proteus มาสร้าง Model โดยใช้ Linear Regression ก็จะได้กราฟดังรูปที่ 3.31 ซึ่งสามารถใช้เพื่อประเมินค่าตัวเก็บประจุที่อ่านค่าแรงดันที่วัดโดยวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันโดยใช้เทคนิคการสุ่มและคงค่า ที่นำเสนอนี้



รูปที่ 3.31 Model ที่มีค่าเก็บประจุอ้างอิงต่อขนานกับตัวเก็บประจุที่นำมาทดสอบ

จากรูปที่ 3.31 จะเห็นได้ว่าการใช้ตัวเก็บประจุค่าคงที่มาต่อขนานตัวเก็บประจุที่ต้องการทดสอบค่าในวงจรอนุพันธ์มีผลทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่วัดได้ในช่วงตัวเก็บประจุตั้งแต่ 10pF-100pF มีความเป็นเชิงเส้นมากขึ้น นอกจากนั้นแล้วการใช้ตัวเก็บประจุคงที่มาขนานในลักษณะนี้ยังมีผลต่อช่วงเวลาในการเก็บประจุในช่วง $5RC_{min}$ และช่วงเวลา (t) ในการอ่านค่าแรงดันด้วยซึ่งถ้าหากเลือกตัวเก็บประจุที่มาขนานน้อยเกินไปจะทำให้ตัวเก็บประจุทดสอบที่มีค่าน้อยใช้เวลาน้อยเกินไปในการเก็บประจุทำให้อ่านค่ายากแต่มีข้อดีคือย่านของแรงดันเอาต์พุตระหว่างตัวเก็บประจุทดสอบน้อยที่สุดกับมากที่สุดจะกว้าง ส่วนกรณีเลือกตัวเก็บประจุที่มาขนานมากไปจะมีผลทำให้ย่านของแรงดันเอาต์พุตแคบ เพราะฉนั้นแล้วจึงต้องเลือกค่าที่เหมาะสมซึ่ง ตารางที่ 3.5 ได้จำลองค่าตัวเก็บประจุต่อขนานและค่าอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องในการพิจารณาไว้ตามข้างล่างนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 ผลที่เกิดจากการมีตัวเก็บประจุอ้างอิงต่อขนานกับประจุทดสอบ

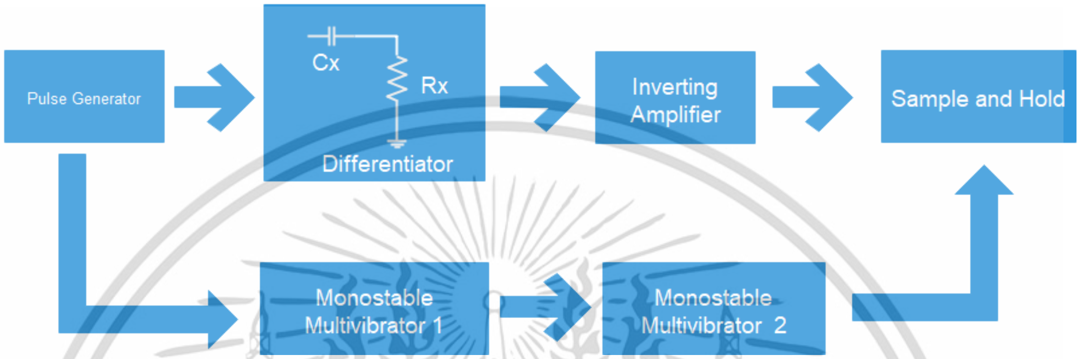
$C_{ref}(pF)$	$\frac{C_{ref}+C_{max}}{C_{ref}+C_{min}}$	R-Squared	Range	$t(\mu s)$	$5R(C_{ref}+C_{min})$	$5R(C_{ref}+C_{max})$
20	4	น้อยลง	กว้าง	0.1	2.5	10
40	2.8	น้อยลง		0.143	3.57	10
50	2.5	น้อยลง		0.16	4	10
100	1.82	0.967	กลาง	0.22	5.5	10
200	1.43	มากขึ้น		0.28	7	10
500	1.18	มากขึ้น	แคบ	0.34	8.5	10

จากตารางที่ 3.5 ในช่วงการทดสอบ 10pF-100pF พบว่าเมื่อใช้ตัวเก็บประจุมาตรฐาน 100pF ต่อขนานกับตัวเก็บประจุทดสอบตั้งแต่ 10pF-100pF แล้วทำการทดสอบเมื่อนำค่าที่ได้มา linear regression พบว่าได้ค่า R-Squared ที่ 0.967 และช่วงเวลาตั้งแต่เริ่มสัญญาณอินพุตจนถึงค่า 0.2RC ซึ่งจะเป็นจุดที่เมื่อใช้ตัวเก็บประจุน้อยที่สุดจะต้องได้ค่าแรงดันเอาต์พุตไม่ต่ำกว่า 80% มีค่า t=0.22 และเมื่อทดลองเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุอ้างอิงให้น้อยลงและทำการทดสอบจะพบว่าค่า R-Squared น้อยลงซึ่งหมายถึงความแม่นยำในการอ่านค่าลดลง ค่าเวลา 0.2RC ก็น้อยลงด้วยซึ่งหมายถึงจุดอ่านค่าจะยิ่งไกล้กับจุดเริ่มต้นซึ่งทำให้โอกาสผิดพลาดเพิ่มขึ้น แต่มีข้อดีคือ Range จะกว้างขึ้นสังเกตจากค่าเวลาในการเก็บประจุของตัวเก็บประจุตัวที่น้อยที่สุด $5R(C_{ref}+C_{min})$ กับ เวลาในการเก็บประจุของตัวเก็บประจุมากสุดที่ใช้ในการทดสอบ $5R(C_{ref}+C_{max})$ มีช่วงกว้างซึ่งหมายความว่าค่าแรงดันเอาต์พุตของแต่ละค่าตัวเก็บประจุซึ่งอยู่ในช่วงที่เป็นเชิงเส้นจะมีโอกาสซ้ำกันน้อยกว่า แต่ถ้าช่วงระหว่างค่าเวลาการเก็บประจุของตัวเก็บประจุน้อยสุดกับมากสุดไกล้เคียงกันจะทำให้โอกาสที่ค่าแรงดันเอาต์พุตไกล้เคียงกันหรือซ้ำกันได้ เพราะฉะนั้น จากจุดนี้สรุปได้ว่า ตัวเก็บประจุอ้างอิงที่ขนานกับตัวเก็บประจุทดสอบเท่ากับตัวเก็บประจุทดสอบตัวสุดท้าย และ มีขนาดรวมประจุทดสอบตัวสุดท้ายกับตัวเก็บประจุอ้างอิงเป็น 2 เท่าของขนาดรวมประจุทดสอบตัวแรกกับตัวเก็บประจุอ้างอิง จะเป็นค่าที่ดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 บล็อกไดอะแกรม และรายละเอียดของวงจร

จากการทดลองโดยใช้โปรแกรมจำลอง Proteus สามารถสรุป วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดัน โดยใช้เทคนิคการสุ่มและคงค่าเป็นบล็อกไดอะแกรม ดังนี้

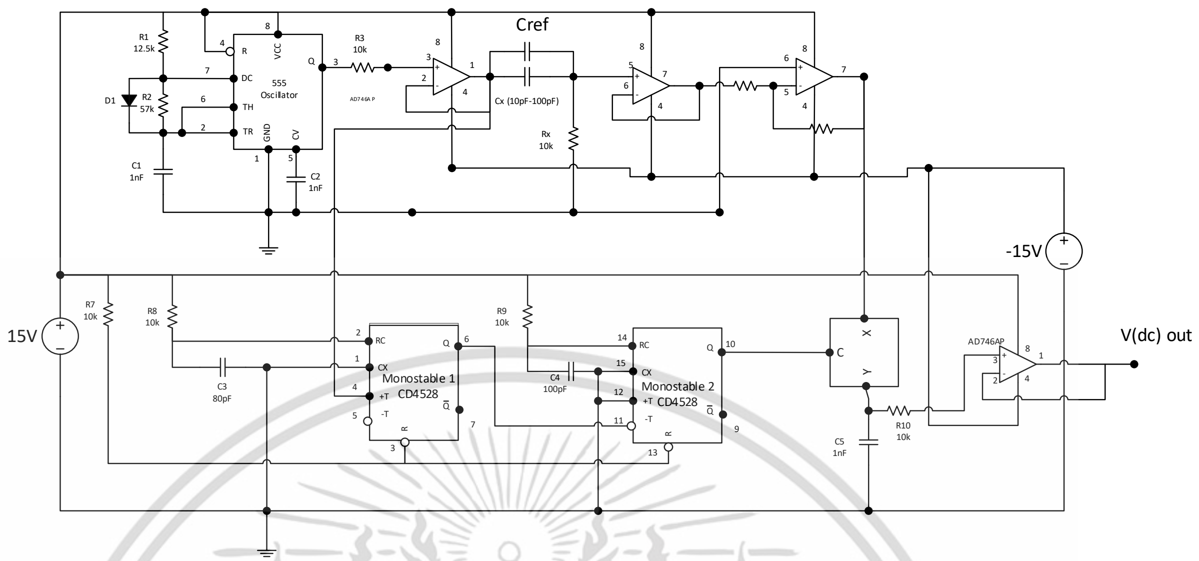


รูปที่ 3.32 บล็อกไดอะแกรมวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันที่นำเสนอ

3.7 วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันโดยใช้เทคนิคการสุ่มและคงค่าที่นำเสนอ

จากกระบวนการคำนวณองค์ประกอบค่าอุปกรณ์แต่ละส่วน และจำลองโดยใช้โปรแกรม Proteus เพื่อดูค่าการตอบสนองในแต่ละจุด พบว่าวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันโดยใช้เทคนิคการสุ่มและคงค่าที่ออกแบบไว้สามารถปรับปรุงเพื่อให้เหมาะสม โดยวงจรอนุพันธ์จะรับสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมจากวงจรกำเนิดสัญญาณ และใช้วงจรตามแรงดันเพื่อคั่นระหว่างวงจรกำเนิดสัญญาณและวงจรอนุพันธ์ เพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบต่อกัน และด้านหลังวงจรอนุพันธ์ก็จะมีวงจรขยายแบบกลับเฟสสัญญาณ เพื่อให้สัญญาณช่วง T_{off} เปลี่ยนจากด้านลบเป็นด้านบวกส่วนสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะต่อเข้าเป็นอินพุตของวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณซึ่งถูกควบคุมโดยวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ 2ชุด ชุดแรกทำหน้าที่กำหนดช่วงเวลาโดยรับสัญญาณอินพุตจากวงจรกำเนิดสัญญาณซึ่งเป็นอินพุตเดียวกันกับวงจรอนุพันธ์ จากนั้นก็กำหนดค่าเวลาโดยใช้ค่า RC ในวงจรโดยสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะถูกใช้เป็นอินพุตของวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ ชุดที่ 2 ซึ่งทำหน้าที่สร้างแท่งสัญญาณกระตุ้นเล็กๆ ช่วงเวลาสั้นๆ 200 ns เพื่อควบคุมให้วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณเปิดรับสัญญาณ โดยสรุปแล้วจะได้วงจรเป็นดังรูปที่ 3.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.33 วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันโดยใช้เทคนิคการสุ่มและคงค่าที่นำเสนอ

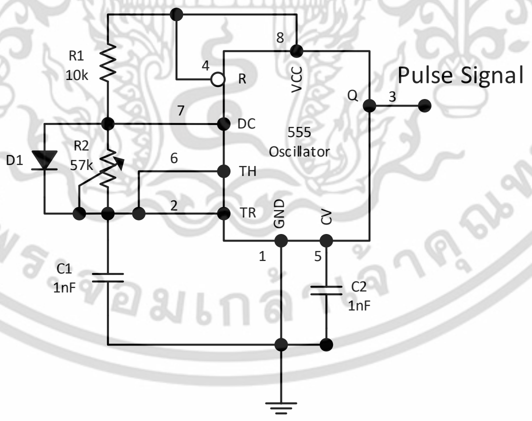
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
การทดลองและผลการทดลอง

จากการทดลองต่อวงจรโดยใช้โปรแกรมจำลอง Proteus ในบทที่ผ่านมาและจำลองหาค่าของอุปกรณ์ที่เหมาะสม โดยสรุปแยกส่วนตามบล็อกไดอะแกรม คือส่วนที่ 1 วงจรกำเนิดสัญญาณ, ส่วนที่ 2 วงจรอนุพันธ์และส่วนประกอบ, ส่วนที่ 3 เป็นชุดวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ และส่วนสุดท้ายเป็นส่วนของวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ ซึ่งในการจำลองโดยใช้โปรแกรม Proteus วงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ สามารถกำหนดพารามิเตอร์ของช่วงเวลาที่ต้องการได้โดยการป้อนค่าแต่ในการทดลองจริงจะต้องหาค่าโดยการอ่านเอกสารข้อมูล ในรายละเอียดบทนี้จะมีการแยกกลุ่มรายการอุปกรณ์ตามบล็อกไดอะแกรม และจะมีการอธิบายวิธีอ่านข้อมูลจาก เอกสารข้อมูลเพื่อกำหนดรายการอุปกรณ์ มีการแสดงรายละเอียดการทดลองและสรุปผลการทดลองแยกเป็นหัวข้อดังนี้

4.1 รายการอุปกรณ์แยกตามบล็อกไดอะแกรม

4.1.1 วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม



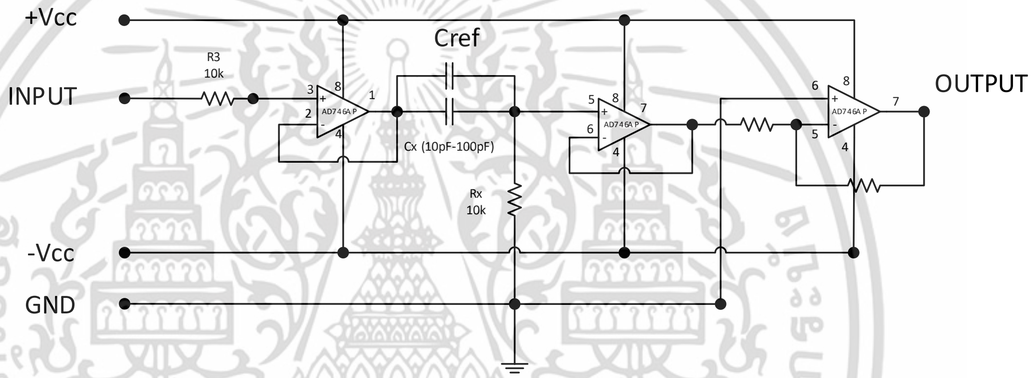
รูปที่ 4.1 วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม และรายการอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1รายการอุปกรณ์ วงจรกำเนิดสัญญาณ

รายการอุปกรณ์	**จำนวน**
IC LM555	1
R1 12.5kΩ	1
R2 Trim pot 100 kΩ	1
Diode	1
C 1 nF	2

4.1.2 วงจรอนุพันธ์และส่วนประกอบ



รูปที่ 4.2 วงจรอนุพันธ์ รายการอุปกรณ์

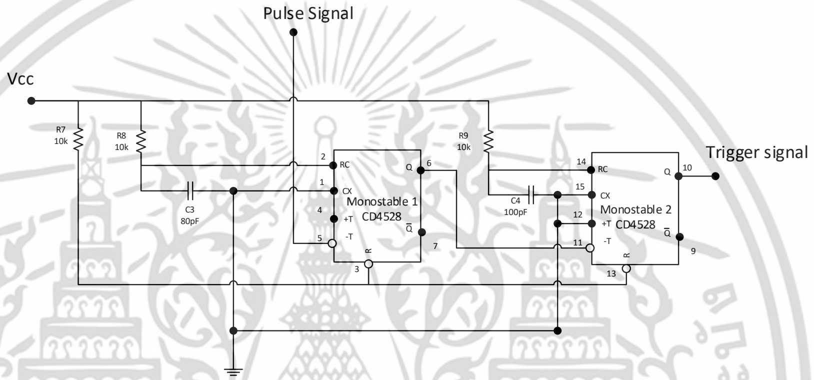
ตารางที่ 4.2 รายการอุปกรณ์ของวงจรอนุพันธ์

รายการอุปกรณ์	**จำนวน**
Op-Amp(AD746AP)	1
R3 10kΩ	1
R 40kΩ	3
Rx 10kΩ	1
Cx(10pF-100pF)	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อให้วงจรอนุพันธ์สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงมีการใช้วงจรขยายสัญญาณแบบวงจรตามแรงดันขยายสัญญาณ 1 เท่าต่อป้องกันไว้ทั้งด้านหน้าและด้านหลังวงจรอนุพันธ์ และจากนั้นเพื่อเปลี่ยนให้ช่วง T_{off} ที่ปกติอยู่ด้านลบถูกกลับด้านเป็นด้านบวก จึงมีการต่อวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส โดยใช้ IC AD746AP นอกจากนั้นแล้วยังมีการต่อตัวเก็บประจุขนานกับตัวเก็บประจุในวงจรอนุพันธ์ซึ่งเป็นตัวเก็บประจุสำหรับทดสอบซึ่งมีรายละเอียดตามที่เสนอไว้ในหัวข้อ 3.5

4.1.3 วงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์



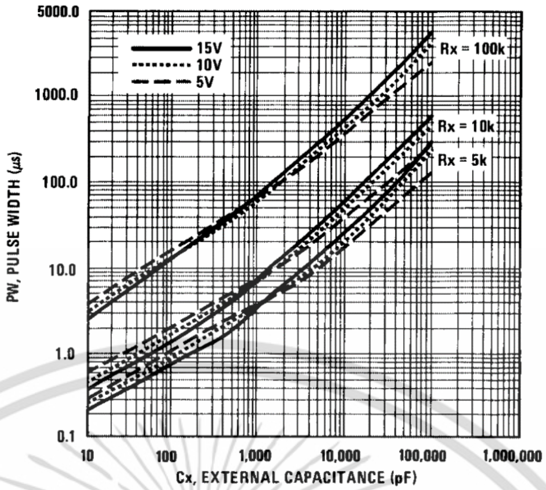
รูปที่ 4.3 วงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์และรายการอุปกรณ์

ตารางที่ 4.3 รายการอุปกรณ์ของวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์

รายการอุปกรณ์	**จำนวน**
CD4528	1
R3 10kΩ	1
C3 80 pF	3
C4 100pF	1

วงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ ที่ 1 เป็นสัญญาณสำหรับวัดช่วงเวลาตั้งแต่สถานะขาขึ้นของสัญญาณ T_{on} ที่ 1 จนกระทั่งถึงขอบขาลงและรวมกับช่วงเวลา $0.2R_x(C_{min} + C_{ref})$ ซึ่งเป็นจุดกำหนดในการอ่านค่าแรงดันสามารถออกแบบองค์ประกอบค่า R,C ในวงจรได้โดยใช้ตารางใน รูปที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ข้อมูลของ IC CD4528 สำหรับกำหนดค่า R,C ในวงจร

จาก รูปที่ 4.4 จะพบว่าการกำหนดค่า R_x, C_x สำหรับวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ ทำได้โดยการเทียบค่าช่วงเวลาที่ต้องการเพื่อกำหนดค่า R_x, C_x โดยที่จุดความกว้างของสัญญาณเดียวกันค่า R_x ที่มีค่ามากจะมีผลทำให้ค่า C_x ต่ำ การเลือก R_x สูง C_x ต่ำมีผลทำให้กระแสต่ำตามไปด้วย ในงานวิจัยนี้จึงเลือกค่า R_x ที่ $10k\Omega$ และค่าความกว้างของ Pulse ที่ต้องการคือ $10\mu s$ + 0.2*10 k*(10+100)pF =$10.22\mu s$ จากความสัมพันธ์ในตารางรูปที่ 4.4 จะได้ค่า C_x ทีประมาณ 80pF สำหรับวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ที่ 2 เป็นการสร้างสัญญาณช่วงแคบๆ โดยใช้ขอบขาลงของเอาต์พุตจากวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ที่ 1 เป็นอินพุตเพื่อสร้างสัญญาณควบคุมเพื่อควบคุมให้สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ในวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณเปิดและปิดเพื่อรับสัญญาณ การเลือกค่าอุปกรณ์สามารถดูค่าเทียบได้จาก CD4528 โดยวิธีหาค่า R,C จะใช้เอกสารข้อมูลตาม รูปที่ 4.5

CD4528BC

AC Electrical Characteristics (Note 5)

T_A = 25°C, C_L = 50 pF, R_L = 200 kΩ, Input t_r = t_f = 20 ns, unless otherwise specified

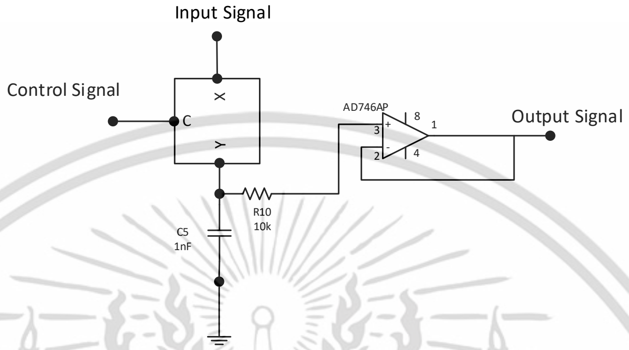
Symbol	Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Units
t_r	Output Rise Time	t_r = (3.0 ns/pF) C_L + 30 ns, V_{DD} = 5.0V		180	400	ns
		t_r = (1.5 ns/pF) C_L + 15 ns, V_{DD} = 10.0V		90	200	ns
		t_r = (1.1 ns/pF) C_L + 10 ns, V_{DD} = 15.0V		65	160	ns
t_f	Output Fall Time	t_f = (1.5 ns/pF) C_L + 25 ns, V_{DD} = 5.0V		100	200	ns
		t_f = (0.75 ns/pF) C_L + 12.5 ns, V_{DD} = 10V		50	100	ns
		t_f = (0.55 ns/pF) C_L + 9.5 ns, V_{DD} = 15.0V		35	80	ns
t_{PLH}	Turn-Off, Turn-On Delay	t_{PLH}, t_{PHL} = (1.7 ns/pF) C_L + 240 ns, V_{DD} = 5.0V		230	500	ns
t_{PHL}	A or B to Q or $\overline{Q}$	t_{PLH}, t_{PHL} = (0.66 ns/pF) C_L + 8 ns, V_{DD} = 10.0V		100	250	ns
	Cx = 15 pF, Rx = 5.0 kΩ	t_{PLH}, t_{PHL} = (0.5 ns/pF) C_L + 65 ns, V_{DD} = 15.0V		65	150	ns
	Turn-Off, Turn-On Delay	t_{PLH}, t_{PHL} = (1.7 ns/pF) C_L + 620 ns, V_{DD} = 5.0V		230	500	ns
	A or B to Q or $\overline{Q}$	t_{PLH}, t_{PHL} = (0.66 ns/pF) C_L + 257 ns, V_{DD} = 10.0V		100	250	ns
	Cx = 100 pF, Rx = 10 kΩ	t_{PLH}, t_{PHL} = (0.5 ns/pF) C_L + 185 ns, V_{DD} = 15.0V		65	150	ns

รูปที่ 4.5 เอกสารอ้างอิง IC CD4528 สำหรับกำหนดค่า R,C ในกรณีคาบเวลามีหน่วยเป็น ns

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ค่า R,C ที่เป็นองค์ประกอบของวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ ที่ 2 เป็น 10 kΩ และ 100 pF ตามลำดับ

4.1.4 วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ



รูปที่ 4.6 วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณและรายการอุปกรณ์

ตารางที่ 4.4 รายการอุปกรณ์วงจรสุ่มและคงค่า

รายการอุปกรณ์	**จำนวน**
Digital switch 74HCT4066	1
C5 1nF	1
R10 10kΩ	1
Op-Amp(AD746AP)	1

จากหัวข้อ รายการอุปกรณ์และการออกแบบทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันโดยใช้เทคนิคการสุ่มและคงค่า ได้เป็นตารางที่ 4.5 ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบวงจรจริง

รายการอุปกรณ์	**โมเดล**
Signal Generator	LM555
R1	12.5kΩ
R2	57 kΩ
C1,C2,C4	1 nF
D1	1N4148
R3	10kΩ
R4,R5,R6	40kΩ
Rx	500kΩ
Op-Amp1,Op-Amp2	AD746AP
โมโนสเตเบิล1, โมโนสเตเบิล 2	CD4528
R7,R8,R9,R10	10kΩ
C3	80pF
C4	100pF
Digital switch	74HCT4066

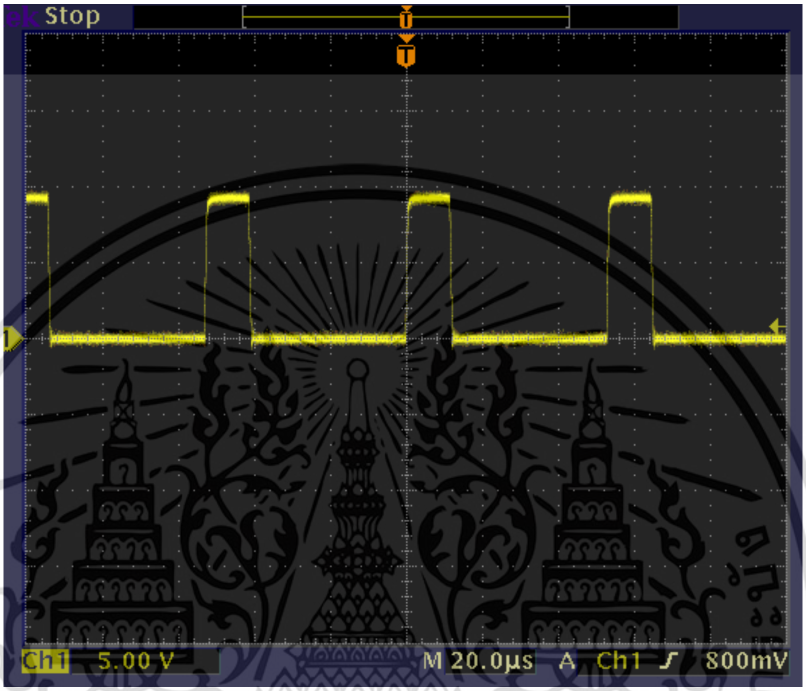
4.2 รายละเอียดการทดลอง

ต่อวงจรตาม รูปที่ 3.33 โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบคงที่แทนค่าเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุที่ต้องการทดสอบและกำหนดช่วงค่าเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุสำหรับทดสอบเป็น 10pF-100pF เมื่อรวมกับตัวเก็บประจุชนิดคงที่ที่ต่อขนานกับตัวเก็บประจุในวงจรอนุพันธ์ 100pF จะได้ค่าตัวเก็บประจุรวมเป็น 110pF-200pF รายละเอียดวิธีทดสอบได้กล่าวไว้ในหัวข้อ3.5 จากนั้นเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุและวัดค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณขยับครั้งละ 10 เป็น 10,20,30 ไปเรื่อยๆ และ ทำการทดสอบอีกย่านความจุที่ 100pF-1000pF ขยับครั้งละ 100pF ผลการทดสอบสามารถสรุปได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการทดลอง

4.3.1 ผลการวัดค่าเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณ

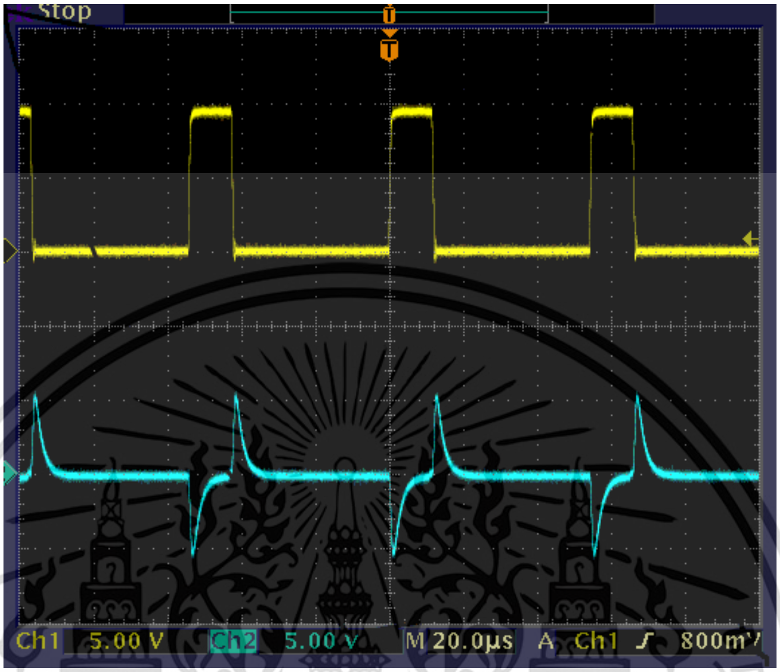


รูปที่ 4.7 แรงดันเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณ

จากรูปที่ 4.7 เอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีความถี่ 20kHz หรือ 50μs โดยมี Duty Cycle ที่ 20% ซึ่งทำให้เกิดค่า T_{on} 10μs และค่าT_{off} 40μs โดยที่สัญญาณนี้จะใช้เป็นอินพุตของวงจรอนุพันธ์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 ผลการวัดค่าเอาต์พุตวงจรอนุพันธ์

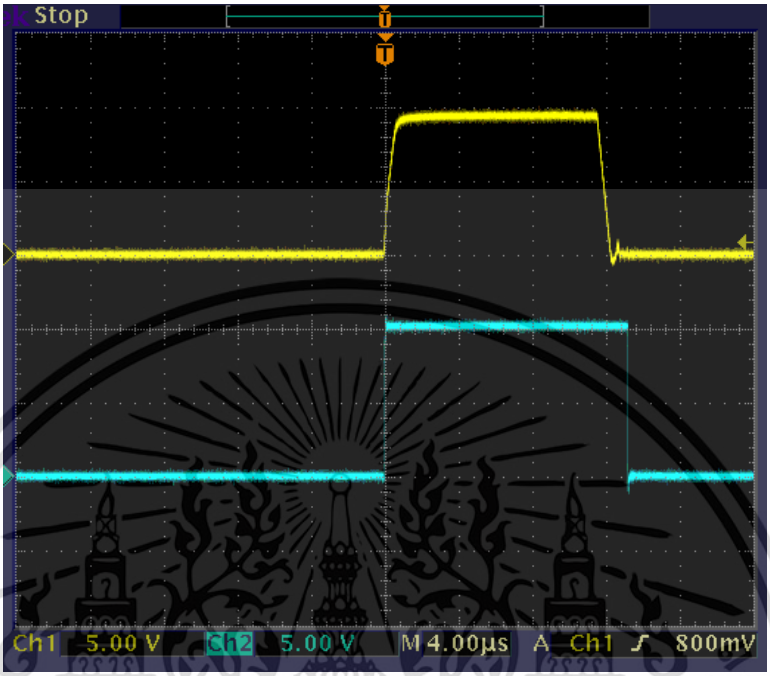


รูปที่ 4.8 เอาต์พุตของวงจรอนุพันธ์ที่ถูกกลับด้านโดยวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส

เอาต์พุตของวงจรอนุพันธ์จะมี 2 ช่วงตามรูปที่ 4.8 เป็นภาพแสดงการวัดสัญญาณหลังวงจรอนุพันธ์ที่ผ่านการขยายแบบกลับเฟส เหตุที่ต้องมีการกลับเฟสสัญญาณก็เพื่อให้สัญญาณในช่วง T_{off} ซึ่งอยู่ในช่วงเวลาที่ต้องการตรวจจับแรงดันเปลี่ยนจากด้านลบเป็นด้านบวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 ผลการวัดค่าเอาต์พุตวงจรวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ ชุดที่ 1

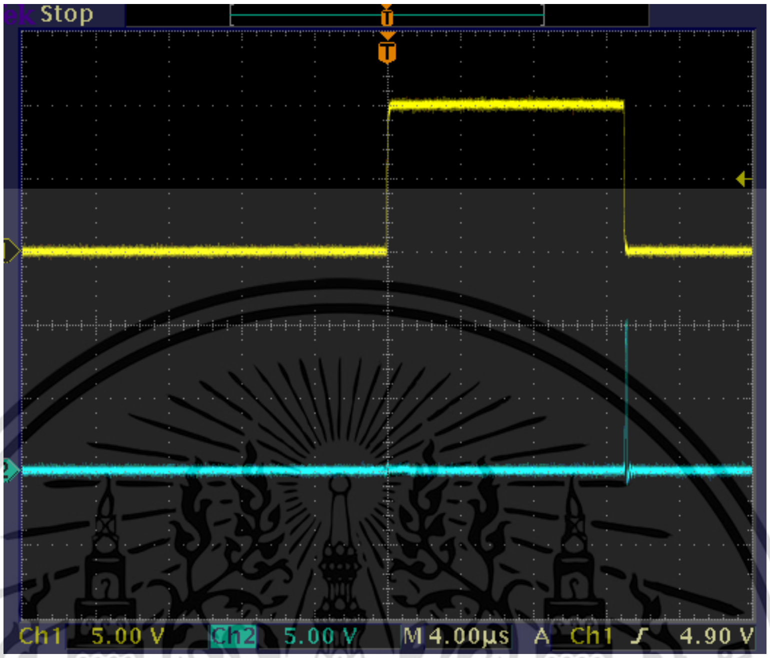


รูปที่ 4.9 สัญญาณโมโนสเตเบิลที่ชุดที่ 1 เทียบกับสัญญาณจากวงจรกำเนิดสัญญาณ

จาก รูปที่ 4.10 เป็นการวัดค่าจากเอาต์พุตของวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ชุดที่ 1 เทียบกับค่าเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณซึ่งจะเป็นอินพุตของวงจรอนุพันธ์ จะสังเกตได้ว่าสัญญาณจากโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ชุดที่ 1 จะเริ่มต้นคาบเวลาพร้อมกับสัญญาณจากวงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม แต่ช่วงเวลาสิ้นสุดที่ขอบขาลงจะช้า $t = T_{on} + 0.2R_x(C_{min} + C_{ref})$ เพื่อใช้ขอบขาลงที่มีเวลาเหลื่อมไปนี้ไปเป็นอินพุตของวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ชุดที่ 2 เป็นตัวควบคุมการเปิดและปิดสัญญาณในวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

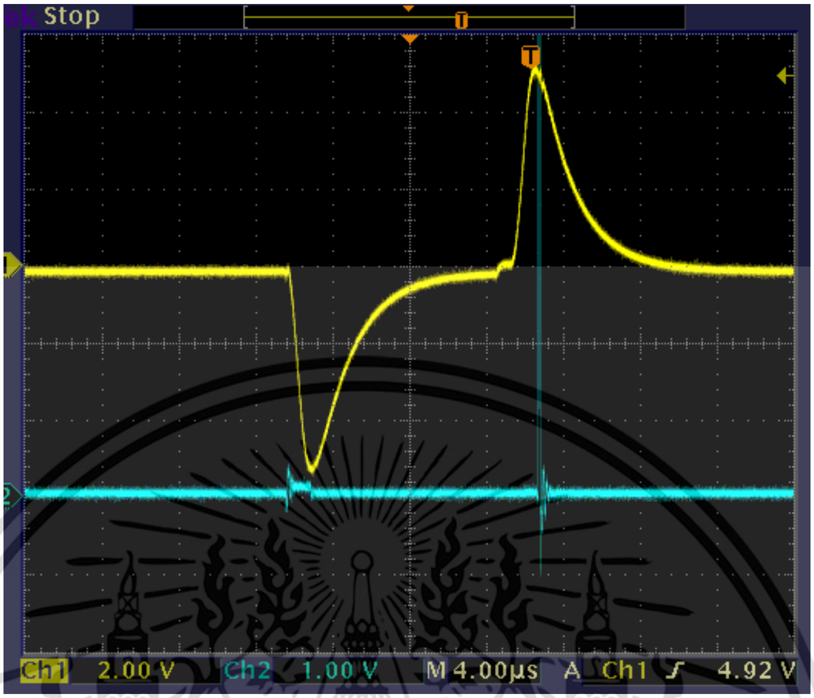
4.3.1 ผลการวัดค่าเอาต์พุตวงจรวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ ชุดที่ 2



รูปที่ 4.10 เอาต์พุตของวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ชุดที่2 เทียบกับสัญญาณอินพุต

จาก รูปที่ 4.11 เอาต์พุตโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ชุดที่ 2 จะมีลักษณะเป็นแค่แท่งสัญญาณเล็กๆ เพื่อใช้ในการส่งสัญญาณควบคุมให้วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณตามรูปที่ 4.6 อ่านค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรอนุพันธ์ในช่วงเวลาสั้นๆ ตามความกว้างของพัลส์แล้วหยุดที่ขอบขาลง ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณแรงดันเอาต์พุตที่ต้องการจะอ่านกับสัญญาณกระตุ้นเพื่อเพื่อเปิดวงจรอ่านแรงดันเป็นดัง รูปที่ 4.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



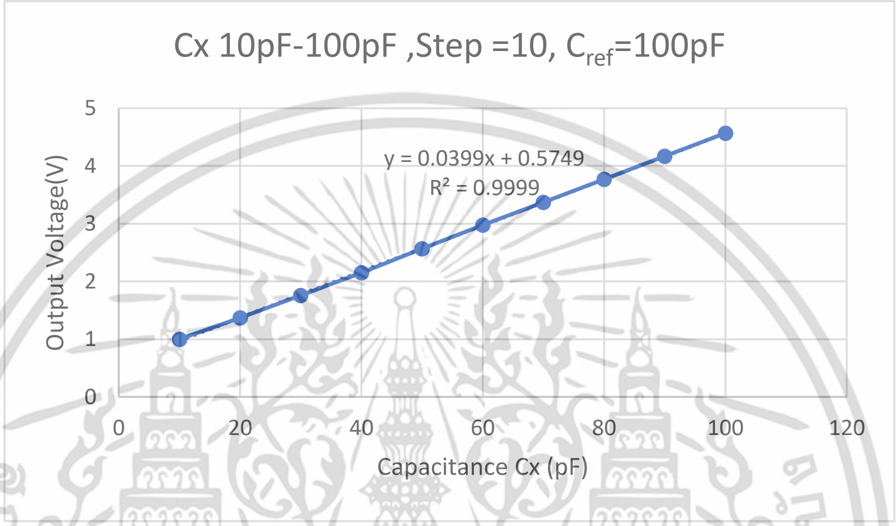
รูปที่ 4.11 จุดวัดเอาต์พุตของวงจรอนุพันธ์

จากรูปที่ 4.12 เอาต์พุตของวงจรอนุพันธ์ที่อยู่ในช่วงเวลาเดียวกันกับแท่งสัญญาณเล็กๆ จากวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ชุดที่ 2 คือค่าแรงดันที่ต้องการทราบค่า โดยใช้วิธีเปิดสวิตซ์ให้ค่าแรงดันจุดนั้นผ่านวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณเพื่อไปชาร์จตัวเก็บประจุ เมื่อวัดค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณก็จะได้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งสามารถนำไปประเมินกลับเพื่อหาค่าตัวเก็บประจุที่เป็นส่วนประกอบในวงจรอนุพันธ์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

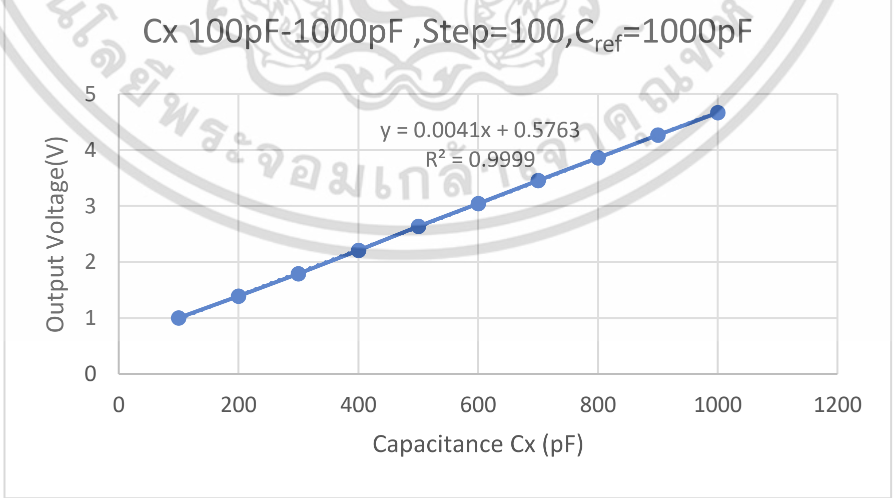
4.3.2 ผลการอ่านค่าแรงดันเอาต์พุตจากวงจรที่นำเสนอ

ตัวเก็บประจุทดสอบ(pF)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
แรงดันเอาต์พุต	1	1.37	1.757	2.15	2.566	2.975	3.371	3.768	4.167	4.57



รูปที่ 4.12 ค่าแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้ สำหรับค่าความจุ C_x ตั้งแต่ 10 pF ถึง 100 pF

ตัวเก็บประจุทดสอบ(pF)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
แรงดันเอาต์พุต	1	1.386	1.79	2.209	2.638	3.041	3.453	3.86	4.266	4.67



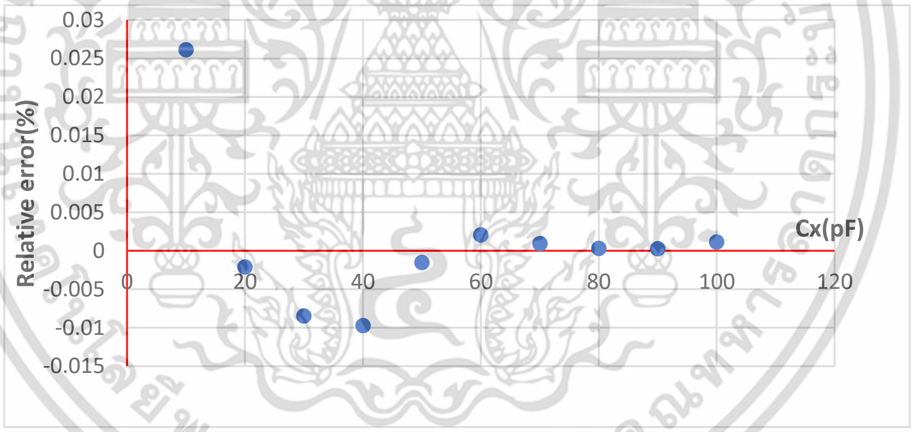
รูปที่ 4.13 ค่าแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้สำหรับค่าความจุ Cx ตั้งแต่ 100pF ถึง 1000 pF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.12 เกิดจากการทดลองต่อวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันโดยใช้เทคนิคการสุ่มและคงค่าตามรูปที่ 3.33 โดยใช้องค์ประกอบตามตารางที่ 4.5 แล้ววัดค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรโดยใช้โวลต์มิเตอร์วัดค่าและบันทึกข้อมูลเก็บไว้ โดยใช้ตัวเก็บประจุทดสอบตั้งแต่ C=10pF แล้วเพิ่มค่าขึ้นครั้งละ 10pF จนกระทั่งถึง 100pF เมื่อนำผลที่ได้มาแสดงในรูปกราฟและทำ Linear regression จะได้กราฟเป็นไปตามรูปที่ 3.30 ซึ่งจะพบว่ากราฟมีความเป็นเชิงเส้นมากขึ้น คือมีค่า R-Squared=0.9996

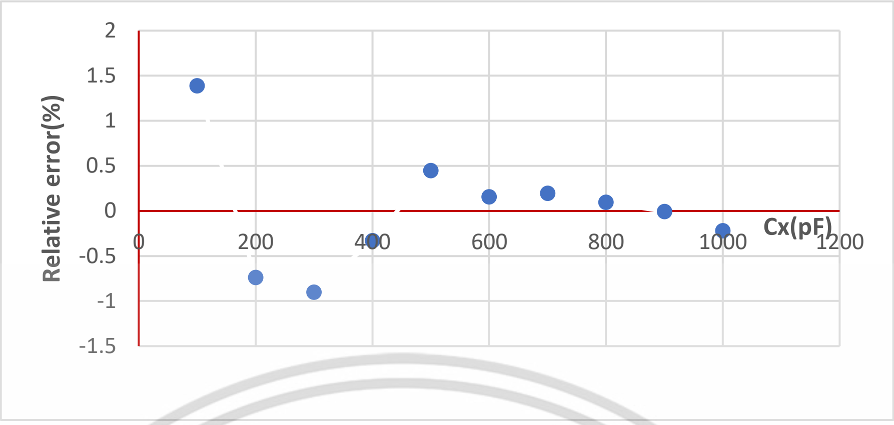
รูปที่ 4.13เกิดจากการทดลองต่อวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันโดยใช้เทคนิคการสุ่มและคงค่าตามรูปที่ 3.33 โดยใช้องค์ประกอบตามตารางที่ 4.5 แล้ววัดค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรโดยใช้โวลต์มิเตอร์วัดค่าและบันทึกข้อมูลเก็บไว้ โดยใช้ตัวเก็บประจุทดสอบตั้งแต่ C=100pF แล้วเพิ่มค่าขึ้นครั้งละ 100pF จนกระทั่งถึง 1000pF เมื่อนำผลที่ได้มาแสดงในรูปกราฟและทำ Linear regression จะได้กราฟเป็นไปตามรูปที่ 3.30 ซึ่งจะพบว่ากราฟมีความเป็นเชิงเส้นมากขึ้น คือมีค่า R-Squared=0.9996

4.3.3 ผลการวิเคราะห์ความผิดพลาดสัมพัทธ์ (Relative error)



รูปที่ 4.14 ความผิดพลาดสัมพัทธ์ สำหรับค่าความจุ C_x ตั้งแต่ 10pF ถึง 100pF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 ความผิดพลาดสัมพัทธ์ สำหรับค่าความจุ C_x ตั้งแต่ 100pF ถึง 1000pF

จากการทดสอบจริง ในบอร์ดทดลองวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันโดยใช้เทคนิคการสุ่มและคงค่าที่นำเสนอ โดยการทดสอบด้วยใช้วิธีเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุจาก 10pF-100pF โดยวิธีเพิ่มค่าความจุครั้งละ 10pF และนำค่าแรงดันที่วัดได้เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการแทนค่าในสมการเส้นตรงที่ได้จากการทำ Linear regression ในรูปที่ 4.12 โดยการแทนค่า C=[10pF,20pF,30pF,...,100pF] ตามลำดับ และนำค่าที่ได้ไปหาความสัมพันธ์แบบ ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ซึ่งได้ผลดังกราฟ รูปที่ 4.14 และเมื่อทดสอบโดยใช้ตัวเก็บประจุขนาด 100pF-1000pF โดยเพิ่มค่าความจุครั้งละ 100pF และนำค่าแรงดันที่วัดได้ เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการแทนค่าในสมการเส้นตรงในรูปที่ 4.13 โดยใช้ C=[100pF,200pF,300pF,...,1000pF] ตามลำดับและนำค่าที่ได้ไปหาความสำพันธ์แบบค่าความผิดพลาดสำพัทธ์ซึ่งจะได้ผลดังกราฟรูปที่ 4.15

กราฟดังกล่าวตาม รูปที่ 4.14 และรูปที่ 4.15 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ (C_x) และค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์เมื่อเปรียบเทียบแรงดันเอาต์พุตของวงจรที่นำเสนอกับ ค่าเอาต์พุตจากการคำณวนโดยโมเดลทางคณิตศาสตร์จากการทำ Linear regression โดยแบ่งค่า C_x เป็นช่วงตามที่กล่าวไว้ข้างต้น กราฟนี้แสดงว่า ค่าความผิดพลาดสัมพันธ์ของแรงดันเอาต์พุตแสดงได้ใน รูปที่ 4.14 และรูปที่ 4.15ซึ่งมีค่าความผิดพลาดสัมพันธ์สูงสุดของวงจรที่นำเสนอ อยู่ที่ประมาณ 1.5%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในช่วงการวัดความจุ (C_x) 10pF ถึง 1000 pF เราจะเห็นได้ว่า วงจรแปลงความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันไฟฟ้าที่นำเสนอไว้ดังกล่าว สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อเป็นวงจรอ่านข้อมูลโดยใช้เซนเซอร์ชนิดตัวเก็บประจุได้ ประโยชน์ของวงจรแปลงที่นำเสนอคือสามารถทำได้โดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้หาได้ง่ายใช้ต้นทุนต่ำและใช้ในเชิงพาณิชย์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอเทคนิคการแปลงสัญญาณทางกายภาพในรูปแบบค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากเซนเซอร์โดยวิธีการแปลงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้อุปกรณ์ที่มีขายทั่วไปในท้องตลาด เทคนิคที่เสนอคือการนำวงจรอนุพันธ์ซึ่งเป็นวงจรที่มีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แค่ 2 ตัวคือตัวต้านทานและตัวเก็บประจุไฟฟ้า โดยหลักคิดคือสมมุติให้ตัวเก็บประจุไฟฟ้าในวงจรคือปริมาณทางกายภาพในรูปแบบค่าความจุไฟฟ้าจากเซนเซอร์ซึ่งจะเป็นปริมาณที่ไม่ทราบค่าแต่สามารถกำหนดขอบเขตให้มีช่วงอยู่ระหว่าง 10pF ถึง 1000pF ซึ่งครอบคลุมค่าความจุทั่วไปของเซนเซอร์เก็บประจุที่มีค่าอยู่ระหว่าง 50pF ถึง 100pF ในขณะที่มีการจ่ายแรงดันอินพุตเป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมให้กับวงจรอนุพันธ์ เป็นผลให้เอาต์พุตจะมีสัญญาณในลักษณะเอ็กโพเนนเชียล ซึ่งเป็นคุณสมบัติทั่วไปของตัวเก็บประจุที่จะมีการเก็บประจุเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันโดยในช่วงแรกที่มีการเปลี่ยนแปลงจากไม่มีแรงดันหรือแรงดันเท่ากับศูนย์เปลี่ยนเป็นแรงดันขาบวกในทันทีจะทำให้กระแสไหลเข้าสูงแล้วค่อยๆ ลดลงเรื่อยๆ จนประจุเต็มและไม่มีกระแสไหลอีก เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงด้านอินพุตอีกครั้งจากขาบวกกลับมาเป็นศูนย์ ก็จะเก็บประจุด้านลบ เราสามารถประเมินค่าขนาดตัวเก็บประจุได้จากการอ่านค่าแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานในช่วงเวลาต่างๆ ได้โดยเวลาทั้งหมดที่ตัวเก็บประจุใช้ในการเก็บประจุจนเต็มจะเท่ากับ 5 เท่าของค่าผลคูณของขนาดตัวต้านทาน กับค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ ซึ่งจะทำให้สามารถย้อนกลับเพื่อคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้าได้ หรือใช้วิธีอื่นๆหลากหลายรูปแบบ แต่ในงานวิจัยนี้เป็นการพิจารณาแรงดันเอาต์พุตของวงจรอนุพันธ์ซึ่งมีคุณลักษณะเป็นเอ็กโพแนนเชียลเฉพาะในช่วงที่มีลักษณะเป็นเชิงเส้น ตามทฤษฎีของแมคคลอริน ที่พิสูจน์ให้เห็นว่าลักษณะของเส้นโค้งเอ็กโพเนนเชียลประกอบด้วยเส้นตรง ซึ่งต้องควบคุมช่วงเวลาคือ ในช่วงตั้งแต่เริ่มต้นจนถึง 0.2RC แรงดันเอาต์พุตของวงจรอนุพันธ์จะมีลักษณะเป็นเชิงเส้นสามารถคำนวณหาแรงดันเอาต์พุตของวงจรอนุพันธ์โดยใช้สมการ $V_o = V_i(1-\frac{t}{RC})$ ในงานวิจัยที่เสนอนี้ได้แสดงให้เห็นว่าแรงดันเอาต์พุตในช่วงเวลาตั้งแต่ $t=0$ จนถึง $t=0.2RC$ มีลักษณะเป็นเชิงเส้นเมื่อค่า RC คงที่แต่เมื่อเปลี่ยนค่า C โดยให้เวลาคงที่ สมการจะเปลี่ยนเป็นเป็น $Vo(C) = Vi(1-\frac{a}{C})$ สมการนี้ไม่เป็นเชิงเส้นจำเป็นต้องใช้เทคนิค เช่นการตัดช่วงแล้วทำสมการเส้นตรงที่ใกล้เคียงเข้ามาเพื่อใช้ประเมินค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับค่าของตัวเก็บประจุที่ไม่ทราบค่า แต่ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีขยายสเกลเพื่อให้สัดส่วนของค่าความจุที่น้อยที่สุดในย่านและตัวเก็บประจุค่าที่มากที่สุดมีสัดส่วนที่เหมาะสม วิธีในทางเทคนิคคือการต่อขนานตัวเก็บประจุคงที่เข้ากับตัวเก็บประจุในวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนุพันธ์ ซึ่งทำให้ค่าแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานเมื่อเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุจาก 10pF-100pF และจาก 100pF-1000pF มีความเป็นเชิงเส้น

5.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยต่อ

จากวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดันโดยใช้เทคนิคการสุ่มและคงค่าที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ยังมีประเด็นที่น่าสนใจในการวิจัยและพัฒนาดังนี้

การหาแนวทางสร้างสมการทางคณิตศาสตร์แบบอื่นๆ ที่ทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตของวงจรอนุพันธ์กับปริมาณประจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปมีความสัมพันธ์ที่สามารถประเมินได้ เช่น ใช้วิธีลอการิทึ่ม

การนำเทคนิคนี้เข้าไปใช้งานร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อทำให้การประมวลผลสามารถทำได้ถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] Shao Lichun, Moorthi Palaniapan and Woei Wan Tan, "A continuous-time capacitance to voltage converter for microcapacitive pressure sensors," Journal of Physics Conference Series, vol. 34, no. 1, 2006.

[2] s. hafizi-moori, “capacitance readout circuits based on weakly-coupled resonators,” a thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy the university of british columbia, 2016.

[3] S. Sakalauskas, Z. Vaitonis and R. Puras, "A high-speed capacitance-to-voltage converter," Instruments and Experimental Techniques, vol. 54, no. 5, 2011.

[4] F. krummenacher, “A High-Resolution Capacitance-to-Frequency Converter,” IEEE journal of solid-state circuits, pp. sc-20 ,no3, june 2985.

[5] D. Yin, Z. Zhang และ J. Li, “A simple switched-capacitor-based capacitance-to-frequency converter,” Analog Integrated Circuit and Signal Processing, pp. 353-361, 1991.

[6] Cheng-Ta Chiang, Chi-Shen Wang and Yu-Chung Huang, "A CMOS Integrated Capacitance-to-Frequency Converter with Digital Compensation Circuit Designed for Sensor Interface Applications," IEEE Sensors 2007 Conference, pp. 954-957, 2007.

[7] Lakshmi Areekath, Student Member, IEEE, Body George, Senior Member, IEEE และ and Ferran Reverter, “An Auto-balancing Capacitance-to-Pulse-Width Converter for Capacitive Sensors,” IEE sensors joural.

[8] N. Kanjanapart, A. Loungpol, A. Rerkratn, W. Petchmaneelumka and V. Riewruja, "Capacitance-to-Period Converter For Capacitive Sensors," International Conferenee on Engineering,Applied Sciences, and Technology (ICEAST), pp. 205-208, 2012.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[9] Wouter Bracke, Robert Puers and Chris Van Hoof, Ultra Low Power Capacitive Sensor Interfaces, Springer, 2007.

[10] D. Shin, H. Lee and S. Kim, "Improving the Accuracy of Capacitance-to-Frequency Converter by Accumulating Residual Charges," IEEE transactions on instrumentation and measurement, vol. 60, no. 12, pp. 3950-3955, 2011.

[11] P. Pruschi, N. Nizza and M. Piotto, "A Current-Mode, Dual Slope, Integrated Capacitance-to-Pulse Duration Converter," IEEE journal of solid state circuits, vol. 42, no. 9, pp. 1884-1891, 2007.

[12] Larry K. Baxter, Capacitive sensors design and appllications, IEEE Press Series on Electronics Technology, 1997.

[13] Winccy, Y. Du, Resistive, Capacitive, Inductive, and Magnetic Sensor Technologies, CRC Press Taylor & Francis Group, 2015.

[14] V. P. Parusov, N. K. Sharuev and V. N. Sharuev, "Capacitance transducers with a thermistor bridge in the measurement circuit that are based on self-excited oscillators," Instrumets and Experimental Techniques, vol. 46, no. 5, pp. 650-652, 2003.

[15] Javier Perez Sanjurjo, Enrique Prefasi, Cesare Buffa and Richard Gaggl , "A Capacitance-To-Digital Converter for MEMS Sensors for Smart Applications," Sensors 2007, vol. 17, no. 6, 2017.

[16] Christopher Rogi, Cesare Buffa, Niccolo De Milleri, Richard Gaggl and Enrique Prefasi, "A Fully-Differential Switched-Capacitor Dual-Slope Capacitance-To-Digital Converter (CDC) for a Capacitive Pressure Sensor," Sensors 2019, vol. 19, no. 17, 2019.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[17] Ákos Pintér and István Dénes, "Interface circuit for measuring small capacitance changes in sensor networks," IET Science, Measurement & Technology, vol. 9, no. 5, pp. 570-578, 23 July 2014.

[18] A. H. Hassan, Ahmed Fouad, Hassan Mostafa, Khaled N. Salama and Ahmed M. Soliman, "A New Design Methodology for Time-Based Capacitance-to-Digital Converters (T-CDCs)," International Journal of Electronics and Communications, vol. 96, pp. 238-245, 2018.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

บทความวิจัยที่ได้เผยแพร่และตีพิมพ์

"Capacitive sensor readout circuit based on sample and hold method" Petchmaneelumka W., Phankamnerd, P., Rerkratn, A., Riewruja, V. Energy Reports, 2022, 8, pp. 1012–1018.

Available online at www.sciencedirect.com
ScienceDirect
ELSEVIER
Energy Reports 8 (2022) 1012–1018
www.elsevier.com/locate/egyr

2021 8th International Conference on Power and Energy Systems Engineering (CPESE 2021), 10–12 September 2021, Fukuoka, Japan

Capacitive sensor readout circuit based on sample and hold method

Wandee Petchmaneelumka, Phirapong Phankamnerd, Apinai Rerkratn*, Vanchai Riewruja

School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand

Received 28 October 2021; accepted 7 November 2021
Available online 26 November 2021

Abstract

This paper presents a capacitive sensor readout circuit using sample and hold method. The proposed readout circuit is used to convert capacitance from sensor to DC (direct current) voltage output. The basic structure of readout circuit consists of the pulse generator circuit, differentiator circuit, amplifier circuit, monostable I circuit, monostable II circuit, and sample and hold circuit. The proposed technique is based on the change of time constant from differentiator circuit corresponding to the measurement capacitance. The sample and hold circuit is used for sampling output voltage from differentiator circuit. The output voltage of the proposed readout circuit is proportional to measurement capacitance. The standard capacitors with different capacitance are used to test the proposed converter performance. Experimental results show that the proposed readout circuit can convert measurement capacitance to output voltage with satisfied values, good linearity and high sensitivity.
© 2021 The Author(s). Published by Elsevier Ltd. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Peer-review under responsibility of the scientific committee of the 2021 8th International Conference on Power and Energy Systems Engineering, CPESE, 2021.

Keywords: Capacitive sensor; Sample and hold method; Sensor readout circuit; Capacitance to voltage converter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. Introduction

The Capacitive sensor is a one type of contactless sensor based on capacitive coupling which can detect various objects that are conductive or have a dielectric constant different from the air. Capacitive detection technology is often used in a variety of sensors, including sensors to measure physical and chemical parameters such as displacement, position and motion, proximity, pressure, force, humidity, liquid level, acceleration, CO, NH3, NO2, toxic organic vapors, ionic concentration, material properties, etc. [1–3]. In the power generation and energy industries, capacitive sensor is used for structural health monitoring of blades tip in an operational turbine such as position measurement of blade tip, blades tip clearance monitoring, blades tip vibration monitoring, blades tip condition monitoring, etc. [4–7]. Fig. 1 shows the example of blade tip clearance measurement of turbine using capacitive sensor.

The advantage of capacitive sensor is non-contact measurement, temperature robustness. Moreover, the capacitive sensor can operate in high-temperature environments, and highly electromagnetic fields. The structure of the

* Corresponding author.
E-mail address: apinai.re@kmitl.ac.th (A. Rerkratn).

https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.11.128
2352-4847/© 2021 The Author(s). Published by Elsevier Ltd. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Peer-review under responsibility of the scientific committee of the 2021 8th International Conference on Power and Energy Systems Engineering, CPESE, 2021.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fig. 1. The example of blade tip clearance measurement of turbine using capacitive sensor.

capacitive sensor is made from many different media such as poly-silicon, copper, tin oxide, conductive film, conductive material etc. Three important types of the capacitive sensors are used for the transduction applications. These are parallel plate capacitors, cylindrical co-axial capacitors and cylindrical cross-capacitors. The capacitance of the capacitive sensor is typically around 50 pF to 100 pF, with the change being a few picofarads (pF) [1–3]. It means that the electronic circuit for measuring the capacitance of capacitive sensor must have high sensitivity, good linearity and resistance to any interference. Many researchers propose techniques for measurement capacitance with various schemes of the output signal such as: N. Kanjanapart et al. and P. Bruschi et al. proposed technique to measure the capacitance with change output time period [8,9], D.Y. Shin et al. C.T. Chiang et al. and V. P. Parusov et al. proposed technique to measure the capacitance with change output frequency [10–12], J. P. Sanjurjo et al. and C. Rogi et al. proposed technique to measure the capacitance with digital output [13,14]. The widely method for capacitance measurement is the voltage output. Various capacitance to voltage converters have been reported in the literature [15–17]. This paper presents the technique to implement capacitive sensor readout circuit using differentiator circuit and sample and hold method by commercially available devices.

2. The proposed technique

The principle of the proposed capacitive sensor readout circuit is based on differentiator circuit. The output voltage of the differentiator circuit is approximately directly proportional to the rate of change (the time derivative) of the input voltage which depends on values of resistor and capacitor in circuit. Fig. 2(a) shows a simple differentiator circuit consisting of capacitors and resistors. The input of circuit is connected to a capacitor while the output voltage is measured across a resistor. Fig. 2(b) shows the input and output signals of differentiator circuit.

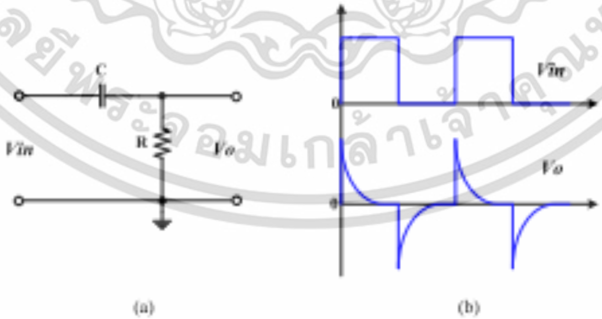


Fig. 2. (a) The RC differentiator circuit; (b) Input and output waveforms of the RC differentiator circuit.

From the circuit in Fig. 1 the output signal *Vo* can be shown in (1).

$$Vo = Vin e^{-t/RC} \tag{1}$$

where

Vin = The input voltage of differentiator circuit (V)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Vo = The output voltage of differentiator circuit (V)
t = The elapsed time since the application of the input voltage
R = Resistance (Ohms)
C = Capacitance (Farads)

The series of exponential function is shown in (2).

$$e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \cdots \tag{2}$$

From (1) and (2) define $x = t/RC$, the output voltage Vo can be represented as (3).

$$Vo = Vi(1 - \frac{t}{RC} + \frac{t^2}{2!} + \frac{t^3}{3!} + \cdots) \tag{3}$$

From (3) if $t < 0.4RC$ term $\frac{t^2}{2!} + \frac{t^3}{3!} + \cdots$ can be neglected, the output voltage Vo can be written as

$$Vo = Vi(1 - \frac{t}{RC}) \tag{4}$$

From (4) if the parameter t and R are fixed, the output voltage Vo is changed corresponding to the capacitance value.

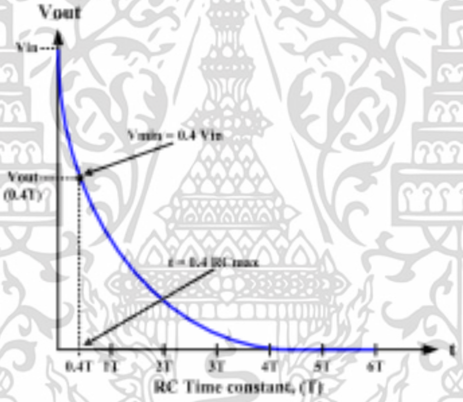


Fig. 3. The output voltage at 0.4T (RC Time constant).

From (4) and Fig. 3, the output voltage Vo is changed corresponding to the capacitance value, if setting the time interval of sample and hold circuit less than 0.4RC to sampling output voltage.

3. Circuit description

From the proposed technique, block diagram of capacitive sensor readout circuit using sample and hold method is shown in Fig. 4.

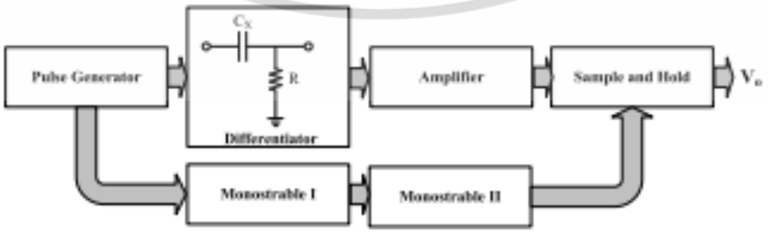


Fig. 4. Block diagram of the proposed capacitive sensor readout circuit.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The proposed capacitive sensor readout circuit consists of the pulse generator circuit, differentiator circuit, inverting amplifier circuit, monostable I, monostable II and sample and hold circuit. From Fig. 4, the generated pulses from the pulse generator are applied to the differentiator circuit with frequency 20 kHz and duty cycle 20%. The output signal of the differentiator circuit proportional to the capacitance of Cx is amplified by inverting amplifier. The amplified signal is then applied to sample and hold circuit for detecting the amplitude of signal. An amplitude detector based on the sample and hold method has been used for measuring the amplitude variation of the amplified signal. The amplitude detector circuit consists of the monostable I and monostable II used for controlling a sample and hold circuit to sample amplitude signal at the 10 us with respect to one of the signal from pulse generator. Consequently the output pulses of 200 ns width are obtained. The output signal Vo from the sample and hold circuit corresponds to the capacitance of Cx. The proposed capacitive sensor readout circuit was constructed by commercially available devices for test performance of the circuit. The experimental circuit is shown in Fig. 5. The 1% tolerance resistors used in the circuit are chosen as follows: Rx = 300 Ω, R1 = 1 kΩ, R2 = R3 = R4 = R6 = 10 kΩ, R5 = 2 kΩ, and R7 = 5 kΩ. Variable resistors used in the circuit are chosen as follows: VR1 = 100 kΩ and VR2 = 500 kΩ. The digital and analogue devices used in the presented circuits are generally commercial devices such as pulse generator (LM555), analog switch (CD4066), monostable (CD4528) and op-amp (LF353). The power supply voltages used were set to ±12 V. The various values of standard capacitor in range 10 pF to 100 pF are chosen for this experiment.

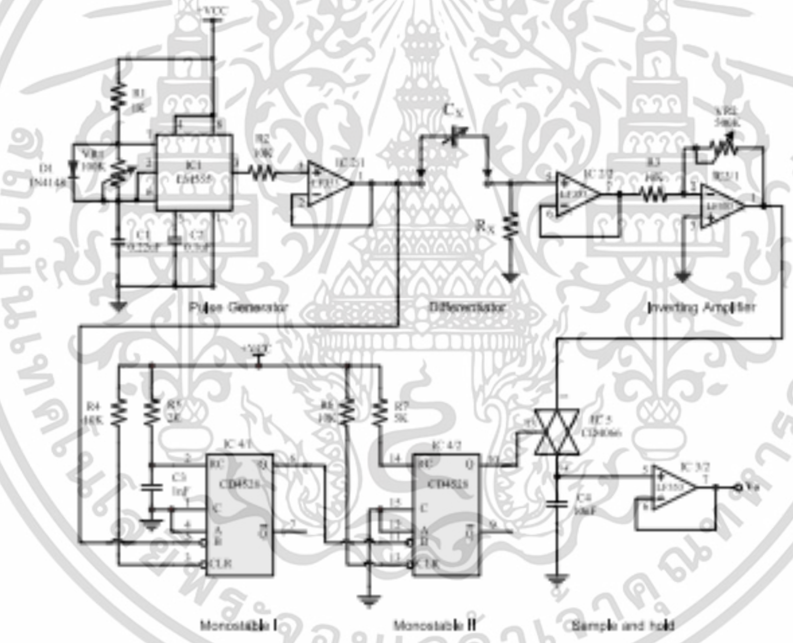


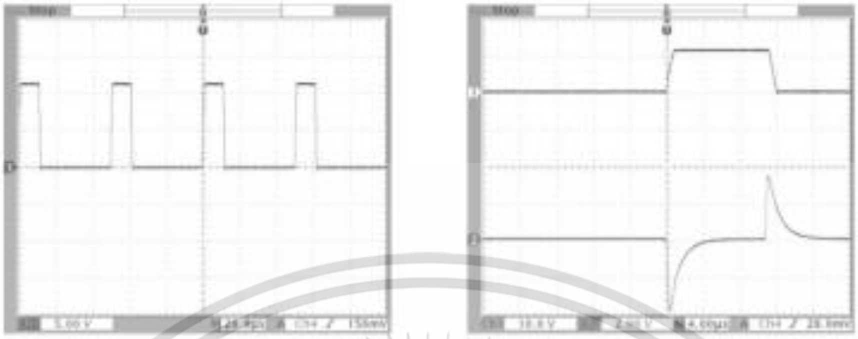
Fig. 5. The proposed capacitive sensor readout circuit.

4. The experimental results

From Fig. 5 LM555 is used to generate the pulse signal for driving the differentiator circuit and monostable I. The output signal of this circuit is shown in Fig. 6.

Fig. 6(a) shows the output signal of the pulse generator circuit with frequency 20 kHz and duty cycle 20%. Fig. 6(b) shows the measured signal of the pulse generator circuit and the differentiator circuit after amplify by inverting amplifier. The signal of channel 1 shows the output of the pulse generator, while the signal of channel 2 shows the output signal of the differential generator after being amplified by inverting amplifier. The output signal of pulse generator circuit is also sent to the sample and hold circuit. The monostable I and monostable II circuits

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) (b)

Fig. 6. (a) The output signal of the pulse generator circuit; (b) Output signal of the pulse generator circuit and the differentiator circuit after amplify by inverting amplifier.

are used to generate sampling signal for control sample and hold circuit. The output signals of monostable I and monostable II circuits are shown in Fig. 7(a) and (b) respectively.

(a) (b)

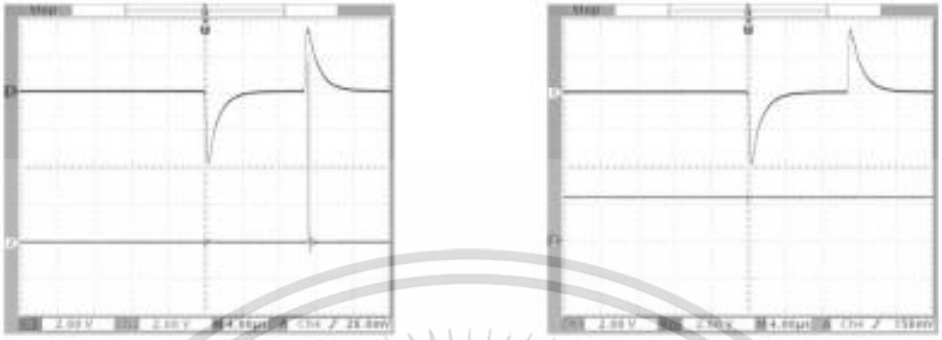
Fig. 7. (a) Measured signal of monostable I circuit; (b) Measured signal of monostable II circuit.

From Fig. 7(a) the signals of channel 1 and channel 2 show the input and output signals of monostable I circuit respectively. From Fig. 7(b) the signal of channel 1 shows the output of the pulse generator, while the signal of channel 2 shows the output signal of monostable II circuit. The output signal from the monostable II circuit with 200 ns pulse width are sent to the sample and hold circuit for sampling signal from inverting amplifier circuit. The output voltage *Vo* of the proposed capacitive sensor readout circuit is obtained from the sample and hold circuit with corresponding to the measurement capacitor Cx. The signals from the sample and hold circuit are shown in Fig. 8(a) and (b).

From Fig. 8(a), the signal of channel 1 shows the output signal of the differential generator after being amplify by inverting amplifier, while the signal of channel 2 shows the sampling signal from monostable II circuit. Fig. 8(b) shows the measured signal of the input (channel 1) and output voltages (channel 2) of the sample and hold circuit in case Cx = 70 pF. The measurement of the output voltage *Vo* for the capacitance Cx varied from 10 pF to 100pF is shown in Fig. 9.

The graph in Fig. 9 shows the relationship between the measured capacitance Cx and the output voltage of proposed circuit. This graph shows that the proposed capacitive sensor readout circuit can convert the measured capacitance to DC output voltage with satisfied values, good linearity and high sensitivity. Moreover, the proposed circuit is suitable for used in capacitive sensor. The relative error of output voltage can be shown in Fig. 10. The

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) (b)

Fig. 8. (a) Measured signal of the input of sample and hold circuit and the control signal from monostable II. (b) Measured signal of the input and output voltages of the sample and hold circuit (Cx = 70 pF).

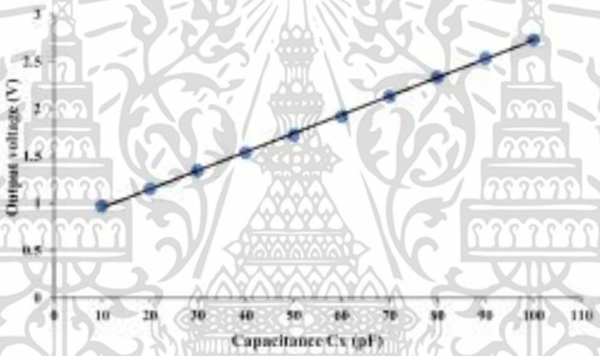


Fig. 9. The output voltage Vo for the capacitance Cx varied from 10pF to 100pF.

Fig. 10. The relative error of output voltage for the capacitance Cx varied from 10 pF to 100 pF.

maximum relative error of the proposed circuit is about 1.5% in capacitance measurement Cx range 10 pF to 100 pF. It can be seen that the proposed capacitive sensor readout circuit can be used for application in commercial available capacitive sensor. The good advantage of the proposed converter is simple, low cost and used commercial available devices. The proposed capacitive sensor readout circuit can directly adjust the output voltage *Vo* by changing the variable resistor VR2.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. Conclusion

This paper presents technique for realizing the capacitive sensor readout circuit. The proposed technique is based on the differentiator circuit and the sample and hold method to generate output voltage corresponding with the measured capacitance. The proposed converter is suitable to measure the low capacitance of commercial available capacitive sensor. In addition, the output voltage of proposed circuit can be adjusted by variable resistor VR2. The measured results show that the proposed circuit can convert the measured capacitance Cx to output voltage with satisfied sensitivity and good linearity.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

References

[1] Baxter Larry K. Capacitive sensors design and applications. IEEE Press series on Electronics Technology; 1997.
[2] Du Winncy Y. Resistive, capacitive, inductive, and magnetic sensor technologies. CRC Press Taylor & Francis Group; 2015.
[3] Bracke Wouter, Puers Robert, van Hoof Chris. Ultra low power capacitive sensor interfaces. Springer; 2007.
[4] Manz Barry. Wind Turbines: Tiny Sensors Play Big Role, mouser Electronics.
[5] Yu Bing, Ke Hongwei, Shen Enyu, Zhang Tianhong. A review of blade tip clearance measuring technologies for gas turbine engines. Meas Control 2020;53(3–4):339–57.
[6] Abdelrhman Ahmed M, Meng Hee Lim, Leong MS, Al-Obaidi Salah. Condition monitoring of blade in turbomachinery: A review. Adv Mech Eng Volume 2014.
[7] Mevissen Frank, Meo Michele. A review of NDT/Structural health monitoring techniques for hot gas components in gas turbines. Sensors 2019;19(3):711.
[8] Kanjanapart N, Loungpol A, Rerkratn A, Petchmaneelumka W, Riewruja V. Capacitance-to-period converter for capacitive sensors. In: International conference on engineering, applied sciences, and technology (ICEAST). 2012, p. 205–8.
[9] Bruschi P, Nizza N, Piotto M. A current-mode, dual slope, integrated capacitance-to-pulse duration converter. IEEE J Solid-State Circuits 2007;42(9):1884–91.
[10] Shin DY, Lee H, Kim S. Improving the accuracy of capacitance-to-frequency converter by accumulating residual charges. IEEE Trans Instrum Meas 2011;60(12):3950–5.
[11] Chiang CT, Wang CS, Huang YC. A CMOS integrated capacitance-to-frequency coverter with digital compensation circuit designed for sensor interface applicatins. In: IEEE sensors 2007 conference. 2007, p. 954–7.
[12] Parusov VP, Sharuev NK, Sharuev VN. Capacitance transducers with a thermistor bridge in the measurement circuit that are based on self-excited oscillators. Instrum Exp Tech 2003;46(5):650–2.
[13] Sanjurjo JP, Prefasi E, Buffa C, Gaggl R. A capacitance-to-digital converter for MEMS sensors for smart applications. Sensors 2017;17(6).
[14] Rogi C, Buffa C, Milleri ND, Gaggl R, Prefasi E. A fully-differential switched-capacitor dual-slope capacitance-to-digital converter (CDC) for a capacitive pressure sensor. Sensors 2019;19(17).
[15] Sakalauskasa S, Valtonisb Z, Puraсb R. A high speed capacitance to voltage converter. Instrum Exp Tech 2011;54(5):692–4.
[16] Lichun S, Palaniapan M, Wan TW. A continuous-time capacitance to voltage converter for micro capacitive pressure sensors. J Phys Conf Ser 2006;34:1014–9.
[17] Pinter A, Denes I. Interface circuit for measuring small capacitance changes in sensor networks. IET Sci Meas Technol 2015;9(5):570–8.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล นาย ภิราพงศ์ พันธ์กำเหนิด

วัน เดือน ปีเกิด วันที่ 24 พฤษภาคม 2515

ประวัติการศึกษา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ปีการศึกษา 2541 และในปีการศึกษา 2562 ได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้