

**RUTS** | RAJAMANGALA  
UNIVERSITY  
OF TECHNOLOGY  
SRIVIJAYA

คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี

# วงจรรวมแอนะล็อกและการประยุกต์ใช้งาน

## ANALOG INTEGRATED CIRCUITS AND APPLICATIONS

**ผศ. ดร. รัชต์ นนทพุทร**

หลักสูตรสาขาวิชาระบบโทรคมนาคมและเครือข่าย

วงจรรวมแอนะล็อกและการประยุกต์ใช้งาน  
Analog Integrated Circuits and Applications

โดย ผศ. ดร. ธนัสถ์ นนทพุทธ

จำนวนหน้า 295 หน้า ราคา 200 บาท

จำนวน 200 เล่ม (พ.ศ. 2565)

Printout:

คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย  
เลขที่ 1 ถนนราชดำเนินนอก ตำบลบ่อยาง อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000 โทรศัพท์ 0-7431-7112

- หากมีคำแนะนำหรือติชม สามารถติดต่อได้ที่ <http://indec.rmutsv.ac.th/> หรือ email: [thanat.n@rmutsv.ac.th](mailto:thanat.n@rmutsv.ac.th)

วงจรรวมแอนะล็อกและการประยุกต์ใช้งาน  
Analog Integrated Circuits and Applications

ผศ. ดร. ธนัสถ์ นนทพุทธ

คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

## คำนำ

ตำราเล่มนี้ ได้จัดทำขึ้นเพื่อนำไปใช้สำหรับประกอบการเรียนการสอน ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของรายวิชาวงจรรวมแอนะล็อกและการประยุกต์ใช้งาน (Analog Integrated Circuits and Applications) หลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต (ค.อ.บ.) สาขาวิชาไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จัดทำขึ้นจากการค้นคว้าศึกษา รวบรวมและเรียบเรียงเพื่อใช้สำหรับเป็นส่วนหนึ่งของรายวิชาตามคำอธิบายรายวิชา มีเนื้อหาสมบูรณ์และมีความทันสมัย ซึ่งเกิดจากการวิเคราะห์ สังเคราะห์จาก ตำรา หนังสือ งานวิจัย และบทความทางวิชาการที่เกี่ยวข้องครอบคลุมกับเนื้อหาในรายวิชานี้ อีกทั้งได้รวบรวมข้อมูลจากประสบการณ์สอนของผู้เขียน จนมาเป็นตำราเล่มนี้

ผู้เขียนตำราเล่มนี้ หวังอย่างยิ่งว่า คงอำนวยความสะดวกต่อการเรียนการสอนตามสมควรต่อนักศึกษาหรือผู้ที่สนใจในรายวิชาที่มีเนื้อหาเกี่ยวข้องกับรายวิชานี้ สามารถอ่านและทำความเข้าใจตำราเล่มนี้ได้ด้วยตัวเอง เพื่อใช้ประกอบเนื้อหาในรายวิชาอื่น ๆ ได้ การจัดทำตำราเล่มนี้ อาจจะมีข้อบกพร่อง ข้อผิดพลาดอยู่บ้าง ทางผู้เขียนตำราเล่มนี้ ขอน้อมรับคำแนะนำ ข้อบกพร่อง และข้อเสนอแนะเหล่านั้นมาปรับปรุง เพื่อให้เกิดประโยชน์ต่อการศึกษาต่อไปด้วยความยินดี และขอขอบคุณในความอนุเคราะห์นั้นมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ผศ. ดร. ธนัสถ์ นนทพุท

พ.ศ. 2565

## คำอธิบายรายวิชา

หลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต

สาขาวิชา ไฟฟ้า

ชื่อวิชา วงจรรวมแอนะล็อกและการประยุกต์ใช้งาน  
Analog Integrated Circuits and Applications

หน่วยกิต 3(1-4-4)

วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ วงจรตรวจระดับสัญญาณค่าเข้าใกล้ศูนย์ วงจรจุดชนวนแบบขมิตต์ วงจรกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยม วงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยม วงจรกำเนิดสัญญาณฟันเลื่อย วงจรออสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดัน เฟสล็อกลูป วงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่และวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ วงจรแอนะล็อกสวิตซ์ ปฏิบัติการวงจรรวมแอนะล็อกและการประยุกต์ใช้งาน

Comparator circuit; zero-crossing detectors; Schmitt triggers; squarewave generator; triangular-wave generator; sawtooth-wave generator; voltage-controlled oscillators; phase-lock loop; voltage to frequency and frequency to voltage converters; sample-and-hold circuit; analog switch circuit; hands-on practice in integrated analog circuits and applications.

## สรุปเนื้อหาคำอธิบายรายวิชา

รายละเอียดคำอธิบายรายวิชา	เนื้อหา
วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ วงจรตรวจระดับสัญญาณค่าเข้าใกล้ศูนย์ วงจรจุดชนวนแบบขมิตต์	บทที่ 2
วงจรกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยม วงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยม วงจรกำเนิดสัญญาณฟันเลื่อย	บทที่ 3
วงจรออสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดัน เฟสล็อกลูป	บทที่ 4
วงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่และวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน	บทที่ 5
วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ	บทที่ 6
วงจรแอนะล็อกสวิตซ์	บทที่ 7

## สารบัญ

	หน้า
คำนำ	I
คำอธิบายรายวิชา	II
สรุปเนื้อหาคำอธิบายรายวิชา	II
สารบัญ	III
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 เทคโนโลยีวงจรรวม	1
1.2 ทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์	3
1.2.1 การทำงานของทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์	5
1.2.2 อัตราขยายของทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์	7
1.2.3 ย่านการทำงานของทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์	9
1.3 ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าแบบโลหะ-ออกไซด์-สารกึ่งตัวนำ	9
1.3.1 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของมอสเฟต	10
1.3.2 การทดสอบการทำงานและคุณสมบัติต่างๆ ของมอสเฟต	13
1.4 ทรานซิสเตอร์คู่ประกอบชนิดโลหะ-ออกไซด์-สารกึ่งตัวนำ	16
1.4.1 โครงสร้างของซีมอส	17
1.4.2 การประยุกต์ใช้งานซีมอสเบื้องต้น	17
1.5 ออปแอมป์	18
1.5.1 ออปแอมป์อุดมคติ	20
1.5.2 ออปแอมป์ในทางปฏิบัติ	21
1.5.3 โหมดการทำงานของออปแอมป์	22
1.5.4 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับออปแอมป์	24
1.5.5 การต่อวงจรออปแอมป์พื้นฐานเบื้องต้น	32
1.6 สรุป	35
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 1	37
เอกสารอ้างอิง	38
<b>บทที่ 2 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ</b>	<b>41</b>
2.1 วงจรเปรียบเทียบแรงดัน	41

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2 วงจรตรวจระดับสัญญาณค่าเข้าใกล้ศูนย์	43
2.3 วงจรตรวจระดับสัญญาณค่าไม่เข้าใกล้ศูนย์	46
2.4 วงจรเปรียบเทียบเฟสของสัญญาณ	50
2.5 วงจรจุดชนวนแบบขมิตต์	52
2.6 สรุป	59
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 2	60
เอกสารอ้างอิง	61
<b>บทที่ 3 วงจรกำเนิดสัญญาณ</b>	<b>63</b>
3.1 วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์	64
3.2 วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม	74
3.3 วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม	80
3.4 วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อย	87
3.5 สรุป	93
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 3	93
เอกสารอ้างอิง	95
<b>บทที่ 4 วงจรออสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดัน และวงจรเฟสล็อกกลูบ</b>	<b>97</b>
4.1 วงจรออสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดัน	97
4.2 วงจรเฟสล็อกกลูบ	108
4.3 สรุป	114
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 4	115
เอกสารอ้างอิง	116
<b>บทที่ 5 วงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่และวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน</b>	<b>117</b>
5.1 วงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่	117
5.1.1 วงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่โดยใช้ออปแอมป์	117
5.1.2 วงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่โดยใช้ไอซีสำเร็จรูป LM331	120
5.1.3 วงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่โดยใช้ไอซีสำเร็จรูป AD650	124

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน	129
5.2.1 วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันโดยใช้ไอซีสำเร็จรูป LM331	130
5.2.2 วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันโดยใช้ไอซีสำเร็จรูป AD650	133
5.3 สรุป	137
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 5	137
เอกสารอ้างอิง	139
<b>บทที่ 6 วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ</b>	<b>141</b>
6.1 วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณอย่างง่าย	141
6.2 วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณโดยใช้ออปแอมป์	146
6.3 วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณโดยใช้ไอซีเบอร์ LF198 และ OPA615	149
6.4 สรุป	153
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 6	154
เอกสารอ้างอิง	155
<b>บทที่ 7 วงจรแอนะล็อกสวิตช์</b>	<b>157</b>
7.1 พื้นฐานการทำงานของวงจรแอนะล็อกสวิตช์	157
7.2 วงจรแอนะล็อกสวิตช์สำหรับวงจรขยายสัญญาณ	159
7.2.1 วงจรแอนะล็อกสวิตช์สำหรับวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส	159
7.2.2 วงจรแอนะล็อกสวิตช์สำหรับวงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส	166
7.3 วงจรแอนะล็อกสวิตช์สำหรับวงจรรวมสัญญาณ	175
7.3.1 วงจรแอนะล็อกสวิตช์สำหรับวงจรรวมสัญญาณแบบกลับเฟส	175
7.3.2 วงจรแอนะล็อกสวิตช์สำหรับวงจรรวมสัญญาณแบบไม่กลับเฟส	177
7.4 วงจรแอนะล็อกสวิตช์สำหรับวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก	182
7.5 สรุป	186
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 7	187
เอกสารอ้างอิง	190



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม	193
ภาคผนวก ใบงาน	199
ใบงานที่ 1 เรื่อง การต่อวงจรอุปแอมป์พื้นฐานเบื้องต้น	201
ใบงานที่ 2 เรื่อง วงจรเปรียบเทียบแรงดัน วงจรตรวจระดับสัญญาณค่าเข้าใกล้ศูนย์ และวงจรตรวจระดับสัญญาณค่าไม่เข้าใกล้ศูนย์	205
ใบงานที่ 3 เรื่อง วงจรเปรียบเทียบเฟสของสัญญาณและวงจรจุดชนวนแบบซิมิตต์	213
ใบงานที่ 4 เรื่อง วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์	221
ใบงานที่ 5 เรื่อง วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม	227
ใบงานที่ 6 เรื่อง วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม	233
ใบงานที่ 7 เรื่อง วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อย	239
ใบงานที่ 8 เรื่อง วงจรออสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดัน	245
ใบงานที่ 9 เรื่อง วงจรเฟสล็อกกลุ๊ป	249
ใบงานที่ 10 เรื่อง วงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่	255
ใบงานที่ 11 เรื่อง วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน	265
ใบงานที่ 12 เรื่อง วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ	271
ใบงานที่ 13 เรื่อง วงจรแอนะล็อกสวิตช์สำหรับวงจรขยายสัญญาณ	277
ใบงานที่ 14 เรื่อง วงจรแอนะล็อกสวิตช์สำหรับวงจรรวมสัญญาณ	281
ใบงานที่ 15 เรื่อง วงจรแอนะล็อกสวิตช์สำหรับวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัล เป็นสัญญาณแอนะล็อก	287
ดัชนี	291

## สารบัญญัตราง

ตารางที่		หน้า
6.1	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ทางเวลาอาร์ซี $\tau$ ที่ส่งผลต่อความแม่นยำของวงจรสุ่ม และคงค่าสัญญาณ	143
7.1	การเปรียบเทียบสถานะของสวิตช์ $S_{11}$ สวิตช์ $S_{12}$ สวิตช์ $S_{21}$ และสวิตช์ $S_{22}$ กับค่าบิตข้อมูลดิจิทัลของวงจรแอนะล็อกสวิตช์สำหรับวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส ในรูปที่ 7.3	172
7.2	การเปรียบเทียบสถานะของสวิตช์ $S_{11}$ สวิตช์ $S_{12}$ สวิตช์ $S_{21}$ และสวิตช์ $S_{22}$ กับค่าบิตข้อมูลดิจิทัลของวงจรแอนะล็อกสวิตช์สำหรับวงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส ในรูปที่ 7.4	173
7.3	ค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรรวมสัญญาณแบบกลับเฟสเมื่อวงจรแอนะล็อกสวิตช์ ถูกควบคุมการทำงานจากค่าบิตข้อมูลดิจิทัล	176
7.4	ค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรรวมสัญญาณแบบไม่กลับเฟสเมื่อวงจรแอนะล็อกสวิตช์ ถูกควบคุมการทำงานจากค่าบิตข้อมูลดิจิทัล	179
7.5	ค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรจากตัวอย่างที่ 7.3	186

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 วงจรรวมบนแผ่นซิลิคอน	2
1.2 โครงสร้างของทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์ชนิดเอ็นพีเอ็น	3
1.3 โครงสร้างของทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์ชนิดพีเอ็นพี	4
1.4 สัญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์ชนิดเอ็นพีเอ็น	4
1.5 สัญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์ชนิดพีเอ็นพี	4
1.6 การต่อการไบแอสเบื้องต้นของทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์ชนิดเอ็นพีเอ็น	5
1.7 การต่อการไบแอสเบื้องต้นของทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์ชนิดพีเอ็นพี	6
1.8 การไบแอสเบื้องต้นโดยใช้ขามิตเตอร์เป็นขาเทียบศักย์ทางไฟฟ้า ของทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์ชนิดเอ็นพีเอ็น	6
1.9 การไบแอสเบื้องต้นโดยใช้ขามิตเตอร์เป็นขาเทียบศักย์ทางไฟฟ้า ของทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์ชนิดพีเอ็นพี	7
1.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $h_{fe}$ และค่ากระแสคอลเล็กเตอร์ $I_C$	8
1.11 โครงสร้างพื้นฐานของมอสเฟตชนิดพีมอส	10
1.12 โครงสร้างพื้นฐานของมอสเฟตชนิดเอ็นมอส	11
1.13 สัญลักษณ์ของมอสเฟตแบบวิธีเพิ่มขนาดช่องชนิดเอ็นมอส	11
1.14 สัญลักษณ์ของมอสเฟตแบบวิธีเพิ่มขนาดช่องชนิดพีมอส 3 ขา	11
1.15 สัญลักษณ์ของมอสเฟตแบบวิธีลดขนาดช่องชนิดเอ็นมอส 3 ขา	12
1.16 สัญลักษณ์ของมอสเฟตแบบวิธีลดขนาดช่องชนิดพีมอส 3 ขา	12
1.17 สัญลักษณ์ของมอสเฟตแบบวิธีเพิ่มขนาดช่องชนิดเอ็นมอส 4 ขา	12
1.18 สัญลักษณ์ของมอสเฟตแบบวิธีเพิ่มขนาดช่องชนิดพีมอส 4 ขา	12
1.19 สัญลักษณ์ของมอสเฟตแบบวิธีลดขนาดช่องชนิดเอ็นมอส 4 ขา	13
1.20 สัญลักษณ์ของมอสเฟตแบบวิธีลดขนาดช่องชนิดพีมอส 4 ขา	13
1.21 การต่อวงจรเพื่อทดสอบการทำงานของมอสเฟต	14
1.22 กราฟคุณสมบัติทางเอาต์พุตของมอสเฟต	15
1.23 โครงสร้างซีมอสที่สร้างจากบ่อเอ็น	17
1.24 โครงสร้างซีมอสที่สร้างจากบ่อพี	17
1.25 วงจรซีมอสคอนเวอร์เตอร์	18
1.26 โครงสร้างภายในของออปแอมป์	19
1.27 โครงสร้างลักษณะภายนอกและการเชื่อมต่อขาสำหรับใช้งานของออปแอมป์ UA741	19
1.28 สัญลักษณ์ของออปแอมป์	20

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
1.29 สัญลักษณ์ของออปแอมป์สำหรับการนำไปใช้งานจริง	20
1.30 วงจรสมมูลภายในตัวออปแอมป์ในสถานะที่เป็นอุดมคติ	21
1.31 วงจรสมมูลภายในตัวออปแอมป์ในทางปฏิบัติ	21
1.32 โหมดขยายความแตกต่างจากการทำงานที่อินพุตด้านเดียวแบบไม่กลับเฟส	22
1.33 โหมดขยายความแตกต่างจากการทำงานที่อินพุตด้านเดียวแบบกลับเฟส	23
1.34 โหมดขยายความแตกต่างจากการทำงานที่อินพุตทั้งสองด้านแบบสองอินพุต	23
1.35 โหมดขยายความแตกต่างจากการทำงานที่อินพุตทั้งสองด้านแบบอินพุตเดียว	23
1.36 โหมดการทำงานแบบร่วม	24
1.37 ค่ากระแสไบแอสทางอินพุต	27
1.38 ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้ากรณีโหมดขยายความแตกต่าง	27
1.39 ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้ากรณีโหมดร่วม	27
1.40 การเกิดแรงดันออฟเซต	29
1.41 อิมพีแดนซ์ด้านออกของออปแอมป์	30
1.42 การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันเอาต์พุตสูงสุดของออปแอมป์เมื่อเทียบกับเวลา ขณะป้อนสัญญาณอินพุตหนึ่งหน่วย	31
1.43 กระบวนการการต่อและการทำงานของออปแอมป์แบบลูปปิด	33
1.44 การต่อออปแอมป์แบบลูปปิดที่มีการป้อนกลับแบบบวก	33
1.45 การต่อออปแอมป์แบบลูปปิดที่มีการป้อนกลับแบบลบ	33
1.46 การต่อออปแอมป์แบบลูปปิดที่มีอัตราขยายเท่ากับ 1	34
1.47 การต่อออปแอมป์สำหรับควบคุมอัตราการขยาย	34
2.1 วงจรเปรียบเทียบค่าแรงดันสำหรับแรงดันเอาต์พุตบวก	42
2.2 ค่าแรงดันเอาต์พุตบวกที่ได้จากวงจรในรูปที่ 2.1	42
2.3 วงจรเปรียบเทียบค่าแรงดันสำหรับแรงดันเอาต์พุตลบ	43
2.4 ค่าแรงดันเอาต์พุตลบที่ได้จากวงจรในรูปที่ 2.3	43
2.5 วงจรตรวจระดับสัญญาณค่าเข้าใกล้ศูนย์แบบไม่กลับเฟส	44
2.6 สัญญาณแรงดันอินพุตและเอาต์พุตที่ได้จากวงจรในรูปที่ 2.5	44
2.7 วงจรตรวจระดับสัญญาณค่าเข้าใกล้ศูนย์แบบกลับเฟส	45
2.8 สัญญาณแรงดันอินพุตและเอาต์พุตที่ได้จากวงจรในรูปที่ 2.7	45
2.9 วงจรตรวจระดับสัญญาณค่าไม่เข้าใกล้ศูนย์แบบไม่กลับเฟสโดยใช้ระดับแรงดันอ้างอิง จากแหล่งจ่าย	46

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.10 สัญญาณแรงดันอินพุตและเอาต์พุตที่ได้จากวงจรในรูปที่ 2.9	47
2.11 วงจรตรวจระดับสัญญาณค่าไม่เข้าใกล้ศูนย์แบบกลับเฟสโดยใช้ระดับแรงดันอ้างอิงจากแหล่งจ่าย	47
2.12 สัญญาณแรงดันอินพุตและเอาต์พุตที่ได้จากวงจรในรูปที่ 2.11	48
2.13 วงจรตรวจระดับสัญญาณค่าไม่เข้าใกล้ศูนย์แบบกลับเฟสโดยใช้ระดับแรงดันอ้างอิงจากวงจรแบ่งแรงดัน	49
2.14 สัญญาณแรงดันอินพุตและเอาต์พุตที่ได้จากวงจรในรูปที่ 2.13	49
2.15 วงจรเปรียบเทียบเฟสของสัญญาณ	51
2.16 สัญญาณแรงดันอินพุตและเอาต์พุตที่ได้จากวงจรในรูปที่ 2.15	51
2.17 วงจรจุดชนวนแบบขมิตต์แบบไม่กลับเฟส	52
2.18 คุณสมบัติของวงจรจุดชนวนแบบขมิตต์แบบไม่กลับเฟส	53
2.19 สัญญาณแรงดันอินพุตและเอาต์พุตของวงจรจุดชนวนแบบขมิตต์แบบไม่กลับเฟส	55
2.20 วงจรจุดชนวนแบบขมิตต์แบบกลับเฟส	56
2.21 คุณสมบัติของวงจรจุดชนวนแบบขมิตต์แบบกลับเฟส	56
2.22 สัญญาณแรงดันอินพุตและเอาต์พุตของวงจรจุดชนวนแบบขมิตต์แบบกลับเฟส	57
3.1 หลักการทำงานของวงจรถูกกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่มีการป้อนกลับแบบบวก	64
3.2 การเกิดการออสซิลเลตของวงจรในกรณีที่ $ A(s)\beta(s)  < 1$	66
3.3 การเกิดการออสซิลเลตของวงจรในกรณีที่ $ A(s)\beta(s)  > 1$	66
3.4 วงจรกำเนิดสัญญาณอาร์ซีออสซิลเลเตอร์	67
3.5 สัญญาณเอาต์พุตรูปคลื่นไซน์จากวงจรถูกกำเนิดสัญญาณอาร์ซีออสซิลเลเตอร์ในรูปที่ 3.4	67
3.6 วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์เวทย์บริดจ์ออสซิลเลเตอร์	70
3.7 สัญญาณเอาต์พุตรูปคลื่นไซน์จากวงจรวอร์เทนเบิร์กออสซิลเลเตอร์ในรูปที่ 3.6	74
3.8 วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมอย่างง่าย	75
3.9 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรถูกกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมอย่างง่าย	76
3.10 วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยมที่สร้างจากวงจรถูกกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมต่ออนุกรมร่วมกับวงจรหาปริพันธ์	80
3.11 สัญญาณเอาต์พุตรูปคลื่นสามเหลี่ยมจากวงจรรูปที่ 3.10	81
3.12 วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยมที่สร้างจากวงจรถูกกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมต่ออนุกรมร่วมกับวงจรหาปริพันธ์	81

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.13 สัญญาณเอาต์พุตรูปคลื่นสามเหลี่ยมจากวงจรรูปที่ 3.12	82
3.14 วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อยที่สร้างจากวงจรจุดชนวนแบบซิมิตต์ต่ออนุกรมร่วมกับวงจรหาปริพันธ์แบบปรับค่าแรงดันอ้างอิงได้	87
3.15 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อยจากวงจรรูปที่ 3.14	88
4.1 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของเบี่ยงต้นของวงจรรอสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดัน	98
4.2 สัญญาณรูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ $C_1$	99
4.3 วงจรแหล่งจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดันอย่างง่ายที่สร้างจากทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์	101
4.4 วงจรสวิทช์กระแสที่สร้างจากทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์ต่อร่วมกับไดโอด	101
4.5 วงจรแหล่งจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดันที่สร้างจากออปแอมป์อย่างง่าย	102
4.6 วงจรแหล่งจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดันแบบแหล่งจ่าย Howland	103
4.7 วงจรแหล่งจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดันแบบขยายความต่างที่มีการป้อนกลับแบบบวก	103
4.8 วงจรรอสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดัน โดยใช้ไอซีเบอร์ NE/SE-566 VCO	105
4.9 สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรในรูปที่ 4.8	106
4.10 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของวงจรเฟสล็อกกลุ๊ป	109
4.11 ความสัมพันธ์ของค่าความถี่ที่เกี่ยวข้องของวงจรเฟสล็อกกลุ๊ป	110
4.12 วงจรเฟสล็อกกลุ๊ปโดยใช้ไอซีเบอร์ NE/SE-565	111
4.13 องค์ประกอบของโครงสร้างภายในไอซีเบอร์ NE/SE-565	112
5.1 วงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่อย่างง่ายโดยใช้ออปแอมป์	118
5.2 ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากวงจรรูปที่ 5.1	118
5.3 การทำงานของวงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่ของไอซีเบอร์ LM331	120
5.4 วงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่โดยใช้ไอซีสำเร็จรูปเบอร์ LM331	121
5.5 การทำงานของวงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่ของไอซีเบอร์ AD650	124
5.6 สภาวะการทำงานช่วงเวลาการรีเซ็ตของวงจรในรูปที่ 5.5	125
5.7 สภาวะการทำงานช่วงเวลาการปริพันธ์ของวงจรในรูปที่ 5.5	125
5.8 ค่าระดับแรงดันที่เกิดจากการเก็บประจุและคายประจุของตัวเก็บประจุ $C_1$	126
5.9 วงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่โดยใช้ไอซีสำเร็จรูปเบอร์ AD650	128
5.10 วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันอย่างง่ายโดยใช้ไอซีสำเร็จรูปเบอร์ LM331	130

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.11 วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันโดยใช้ไอซีสำเร็จรูปเบอร์ LM331 แบบต่อออปแอมป์เป็นวงจรบัฟเฟอร์	131
5.12 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันของไอซีเบอร์ AD650	134
5.13 วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันโดยใช้ไอซีเบอร์ AD650	135
6.1 วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณอย่างง่าย	141
6.2 สัญญาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องของวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ	142
6.3 ค่า aperture time $t_{ap}$	144
6.4 ค่า acquisition time $t_{aq}$	145
6.5 วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณใช้ออปแอมป์	147
6.6 วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณจากรูปที่ 6.5 โดยการประยุกต์ใช้สวิตช์ที่สร้างจากมอสเฟต	148
6.7 โครงสร้างภายในไอซีเบอร์ LF198	150
6.8 วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณใช้ไอซีเบอร์ LF198	150
6.9 วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณใช้ไอซีเบอร์ OPA615	151
7.1 การทำงานของวงจรแอนะล็อกสวิตช์อย่างง่าย	157
7.2 โครงสร้างภายในไอซีเบอร์ TS5A23157 หรือ TS5A23159 ที่มีคุณสมบัติแบบ SPDT	159
7.3 วงจรแอนะล็อกสวิตช์สำหรับวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส	160
7.4 วงจรแอนะล็อกสวิตช์สำหรับวงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส	166
7.5 วงจรแอนะล็อกสวิตช์สำหรับวงจรรวมสัญญาณแบบกลับเฟส	175
7.6 วงจรแอนะล็อกสวิตช์สำหรับวงจรรวมสัญญาณแบบไม่กลับเฟส	178
7.7 วงจรแอนะล็อกสวิตช์สำหรับวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อกแบบ Binary weight resistor	183

# บทที่ 1

## บทนำ

วงจรรวมหรือไอซี (Integrated Circuit: IC) เป็นเทคโนโลยีที่สำคัญ มีความก้าวหน้าและมีการพัฒนาเป็นวงจรมัยใหม่อย่างต่อเนื่อง เป็นส่วนหนึ่งในอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ เช่น อุปกรณ์เครื่องมือวัดทางไฟฟ้า อุปกรณ์ควบคุมทางไฟฟ้า อุปกรณ์ทางการแพทย์ เครื่องมือและอุปกรณ์การสื่อสาร และอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ เป็นต้น ทั้งนี้เทคโนโลยีวงจรรวมในปัจจุบัน สามารถประยุกต์ใช้ในวงจรประมวลผลสัญญาณดิจิทัลและวงจรประมวลผลสัญญาณแอนะล็อก เป็นวงจรมัลติสัญญาณแบบผสม (Mixed signal) ที่สร้างอยู่ในชิ้นผลึกเดียวกัน โดยวงจรประมวลผลสัญญาณแอนะล็อกมักจะทำงานเป็นวงจรส่วนหน้าและวงจรส่วนท้าย แต่วงจรประมวลผลสัญญาณดิจิทัลจะใช้เป็นวงจรหลักในเป็นหน่วยประมวลผลกลาง จะเห็นได้ว่าการประมวลผลสัญญาณแอนะล็อก ซึ่งถูกสร้างเป็นวงจรรวมแอนะล็อก เป็นวงจรที่สำคัญ สามารถออกแบบและประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายวงจรรวมต่าง ๆ สำหรับบทนี้ จึงกล่าวถึง เทคโนโลยีวงจรรวม ทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์ (Bipolar Junction Transistor: BJT) หลังจากนั้นได้มีการพัฒนาเป็นทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าแบบโลหะ-ออกไซด์-สารกึ่งตัวนำ (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) หรือมอสเฟต (MOSFET) ทรานซิสเตอร์คู่ประกอบชนิดโลหะ-ออกไซด์-สารกึ่งตัวนำ (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) หรือซีมอส (CMOS) และออปแอมป์ (Operational Amplifier: Op-Amp) ซึ่งเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทแอคทีฟ (Active Devices) ที่นำมาใช้งานเป็นอุปกรณ์หลักของวงจรรวมแอนะล็อกในรายวิชานี้ หากซื้อได้ง่ายตามท้องตลาด สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นวงจรต่าง ๆ ที่ซับซ้อนได้หลากหลาย นำไปเป็นวงจรพื้นฐานเพื่อพัฒนาต่อยอดให้เป็นวงจรใหม่ได้

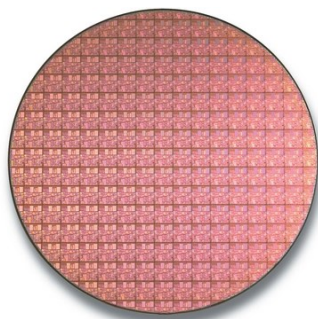
### 1.1 เทคโนโลยีวงจรรวม

การออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ได้เริ่มต้นจากการใช้หลอดวิทยุ หลังจากนั้นได้พัฒนาเป็น การใช้ทรานซิสเตอร์ที่เป็นตัว แต่ยังไม่สามารถตอบสนองการทำงานที่เป็นไปตามความเจริญเติบโตทางอุตสาหกรรมได้ เนื่องจากความต้องการการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น เช่น การตอบสนองต่อการใช้งานที่ต้องการความเร็วในการทำงานที่เพิ่มขึ้น ลดความซับซ้อนในการทำงานและสัญญาณรบกวนที่เกิดจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ในการตอบสนองต่อการใช้งาน เป็นต้น ทำให้การผลิตวงจรโดยใช้ทรานซิสเตอร์ในแบบตัวเดี่ยว ๆ นำมาต่อกันเป็นวงจรรวมแต่ละวงจรมัน ไม่สามารถรองรับการทำงานที่มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นดังกล่าวได้ จึงมีการคิดค้นเพื่อพัฒนาเป็นการผลิตวงจรรวม ทำให้ทรานซิสเตอร์หลาย ๆ ตัว ถูกนำมาบรรจุรวมกันไว้บนแผ่นซิลิคอน (Silicon) เดียวกัน แสดงดังรูปที่ 1.1 ซึ่งบนแผ่นซิลิคอนนี้ จะมีแผ่นเวเฟอร์ (Wafer) ถูกตัดเป็นแผ่นเล็ก ๆ เรียกว่า “ดาวย (Die)” และเมื่อผ่านการทดสอบจะนำมาวางสายและประกอบเป็นชิ้นผลึกหรือที่เรียกว่า “ชิป (Chip)” แต่ละชิ้นผลึกนี้ เกิดจากการออกแบบและสามารถ



ทำการผลิตตามการนำไปใช้งานที่ต้องการได้ เช่น ชิพ ที่ทำหน้าที่เป็นหน่วยประมวลผล เป็นต้น (มนตรี, 2558)

ที่ผ่านมา เทคโนโลยีวงจรรวมได้มีการพัฒนามาตลอดตั้งแต่เริ่มต้นการสร้างวงจรรวมมาจนถึงปัจจุบัน ซึ่งสามารถแบ่งตามจำนวนทรานซิสเตอร์ที่บรรจุอยู่บนแผ่นวงจรเดียวกันต่อหนึ่งวงจรรวม สำหรับยุคแรกของการผลิตวงจรรวม จำนวนทรานซิสเตอร์ที่บรรจุอยู่บนแผ่นวงจรเดียวกันต่อหนึ่งวงจรมีประมาณ 10 ถึง 20 ตัว ถือว่ามีจำนวนน้อยมาก ๆ จะเรียกเทคโนโลยีวงจรรวมในยุคนั้นว่า ยุค SSI (Small Scale Integration) เช่น ไอซีออปแอมป์ตระกูลเบอร์ 741 ไอซีลอจิกเกตตระกูลเบอร์ 7400 เบอร์ 7404 หรือเบอร์ 7408 เป็นต้น เทคโนโลยีวงจรรวมยุคต่อมาคือ ยุค MSI (Medium Scale Integration) จำนวนทรานซิสเตอร์ที่บรรจุอยู่บนแผ่นวงจรเดียวกันต่อหนึ่งวงจรมีประมาณ 100 ถึง 1,000 ตัว เช่น วงจรหน่วยความจำขนาดใหญ่ และวงจรเลื่อนข้อมูลขนาด 4 บิต เป็นต้น สังเกตเห็นได้ว่าเทคโนโลยีวงจรรวมทั้งในยุค SSI และยุค MSI นั้น แต่ละวงจรมีถูกผลิตมาเพื่อใช้งานเฉพาะเจาะจงเพียงวัตถุประสงค์เดียวเท่านั้น อย่างไรก็ตาม มีความจำเป็นที่จะต้องนำเทคโนโลยีวงจรรวมทั้งในยุค SSI และยุค MSI ไปใช้งานเพื่อประยุกต์เป็นวงจรมือถือที่ซับซ้อนได้มากขึ้นกว่าเดิมภายในวงจเดียวกัน ทำให้มีการรวมวงจรรวม SSI และ MSI ให้อยู่ภายในชิ้นเดียวกัน เพื่อลดการวางสายระหว่างวงจรรวม SSI และ MSI อีกทั้งยังสามารถเพิ่มความเร็วของวงจรมือถือได้ เรียกว่า ยุค LSI (Large Scale Integration) ซึ่งจำนวนทรานซิสเตอร์ที่บรรจุอยู่บนแผ่นวงจรเดียวกันต่อหนึ่งวงจรมีประมาณ 1,000 ถึง 10,000 ตัว เช่น วงจร ALU (Arithmetic Logic Unit) เป็นต้น หากจำนวนทรานซิสเตอร์ที่บรรจุอยู่บนแผ่นวงจรเดียวกันต่อหนึ่งวงจรมากกว่า 10,000 ตัว ขึ้นไป จะเรียกเทคโนโลยีวงจรรวมแบบนี้ว่า VLSI (Very Large Scale Integration) เช่น วงจรไมโครโพรเซสเซอร์ เบอร์ 80386 ที่โครงสร้างภายในจะมีวงจรรวมขนาดใหญ่ ประกอบไปด้วย หน่วยคำนวณ (Arithmetic Unit) เรจิสเตอร์ (Register) บัสข้อมูล (Data Bus) บัสควบคุม (Control Bus) บัสที่อยู่ (Address Bus) รวมกันเป็นหน่วยประมวลผลกลาง (Central Processing Unit) เพื่อทำหน้าที่ในการประมวลผลตามโปรแกรมคำสั่งที่ป้อนเข้ามา เป็นต้น

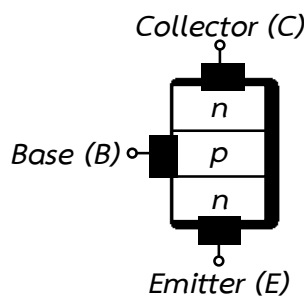


รูปที่ 1.1 วงจรรวมบนแผ่นซิลิคอน (Christopher and Judy, 2023)

นอกจากเทคโนโลยีวงจรรวม VLSI แล้ว ยังมีเทคโนโลยี ULSI (Ultra Large Scale Integration) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่มีจำนวนทรานซิสเตอร์บรรจุอยู่บนแผ่นวงจรเดียวกันต่อหนึ่งวงจรมากกว่า 500,000 ตัว เช่น วงจรไมโครโพรเซสเซอร์ เบอร์ 80486 เป็นต้น เทคโนโลยีวงจรรวมมีการพัฒนาอย่างรวดเร็วตามความก้าวหน้าทางการผลิตในแต่ละยุค ทำให้ทรานซิสเตอร์มีขนาดเล็กสามารถบรรจุในแผ่นขึ้นผลึกได้มากขึ้น (Stojcev et. al., 2005) เทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิตทรานซิสเตอร์มีขนาดเล็ก 80 nm ทำให้สามารถผลิตหน่วยความจำ (memory) ที่มีจำนวนบิตต่อหน่วยความจำได้สูงกว่า 10,000 ล้านบิต โดยในปี พ.ศ. 2563 เทคโนโลยีที่ใช้ผลิตทรานซิสเตอร์มีขนาดเล็กถึง 5 nm และในปี พ.ศ. 2565 มีขนาดเล็กเท่ากับ 3 nm (Shilov, 2022) ซึ่งในอนาคต ปี พ.ศ. 2568 และพ.ศ. 2570 เทคโนโลยีที่ใช้ผลิตทรานซิสเตอร์จะมีขนาดเล็กเท่ากับ 2 nm และ 1.4 nm (Shilov, 2023) ตามลำดับ การพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีที่ใช้ผลิตทรานซิสเตอร์จะมีขนาดเล็กทำให้จำนวนของทรานซิสเตอร์ในวงจรรวมใด ๆ มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าในทุก ๆ 18 เดือน (Moore, 1965) อย่างไรก็ตามเมื่อขนาดของเทคโนโลยีมีขนาดลดลง รวมถึงความพยายามออกแบบให้มีการบรรจุทรานซิสเตอร์ให้สามารถบรรจุบนแผ่นวงจรเดียวกันต่อหนึ่งวงจรถายเป็นจำนวนมาก ๆ ส่งผลให้การจัดวางตำแหน่งและการเดินสายในการต่อวงจรภายในของตัวทรานซิสเตอร์เป็นสิ่งที่ยากมาก ดังนั้น จึงทำให้มีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีที่ใช้ผลิตทรานซิสเตอร์ที่สามารถผลิตทรานซิสเตอร์ให้ง่ายต่อการออกแบบ และเพื่อรองรับแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำกว่าและใช้พลังงานต่ำ

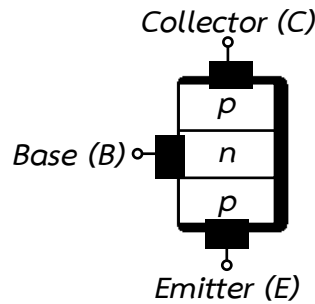
### 1.2 ทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์

ทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์หรือทรานซิสเตอร์ เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถขยายสัญญาณได้เพราะมีคุณสมบัติในการควบคุมการไหลของกระแส โดยมีการจัดการไบแอส (Bias) เพื่อให้ทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์สามารถกำหนดกระแสขาเข้าควบคุมกระแสขาออกได้ สร้างขึ้นจากการนำสารกึ่งตัวนำชนิดซิลิคอน (Silicon, Si) หรือเจอร์เมเนียม (Germanium, Ge) มาเจือสาร (Dope) ให้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพี โดยทำการต่อเข้าด้วยกัน 3 ชั้น ดังนั้นทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์ สามารถแบ่งตามชนิดโครงสร้างได้ คือ ทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นพีเอ็น (NPN) และทรานซิสเตอร์ชนิดพีเอ็นพี (PNP) แสดงดังรูปที่ 1.2 และรูปที่ 1.3 ตามลำดับ

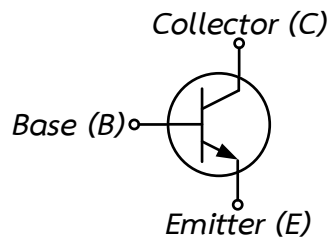


รูปที่ 1.2 โครงสร้างของทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์ชนิดเอ็นพีเอ็น (ธันส์ถ์, 2565)

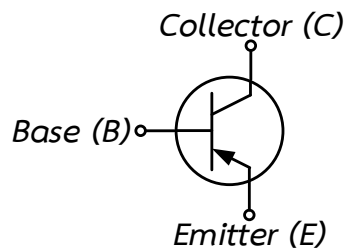
ทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์มีขาสำหรับการนำไปต่อใช้งานจำนวน 3 ขา คือ ขาเบส (Base) ขาคอลเล็กเตอร์ (Collector) และขาอิมิตเตอร์ (Emitter) กระบวนการผลิตทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์จำเป็นต้องมีการเจือสารที่แคบที่สุดหรือบางมากที่ขาเบสเมื่อเทียบกับขาอิมิตเตอร์และขาคอลเล็กเตอร์ โครงสร้างของทรานซิสเตอร์ดังกล่าวนี้ ทำให้ทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์ทำงานได้ตามคุณสมบัติในการควบคุมการไหลของกระแส ทั้งนี้สัญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์ชนิดเอ็นพีเอ็นและชนิดพีเอ็นพีแสดงดังรูปที่ 1.4 และรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.3 โครงสร้างของทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์ชนิดพีเอ็นพี (ธนะสิทธิ์, 2565)



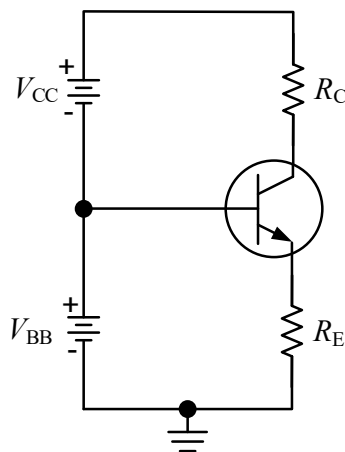
รูปที่ 1.4 สัญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์ชนิดเอ็นพีเอ็น (ธนะสิทธิ์, 2565)



รูปที่ 1.5 สัญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์ชนิดพีเอ็นพี (ธนะสิทธิ์, 2565)

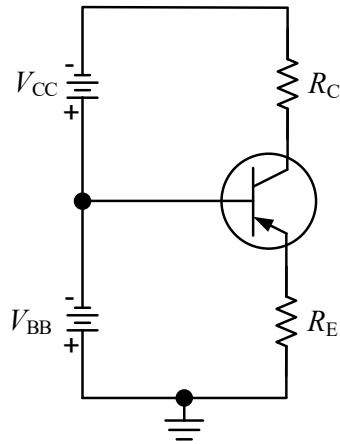
### 1.2.1 การทำงานของทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์

ทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์จะอาศัยการไบแอสเพื่อให้ทรานซิสเตอร์สามารถกำหนดกระแสควบคุมหรือกระแสขาเข้าและควบคุมกระแสขาออกได้ ทำให้การไบแอสมีผลมาจากโครงสร้าง กล่าวคือ พื้นที่โครงสร้างของบริเวณขาคอลเล็กเตอร์มีพื้นที่มากที่สุด ในขณะที่บริเวณขาเบสมีพื้นที่น้อยที่สุด จึงกำหนดให้กระแสที่ไหลออกเป็นกระแสคอลเล็กเตอร์ ดังนั้นจึงต้องจ่ายแรงดันไบแอสระหว่างขาเบสและขาคอลเล็กเตอร์ให้เป็นการจ่ายแรงดันไบแอสผกผัน (Reverse bias) ด้วยเหตุผลที่ว่า หากจ่ายแรงดันไบแอสให้ระหว่างขาเบสและขาคอลเล็กเตอร์เป็นการจ่ายแรงดันไบแอสไปข้างหน้า (Forward bias) ย่อมทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลได้ เมื่อยังไม่มีกระแสขาเข้าแต่กลับมีกระแสขาออก



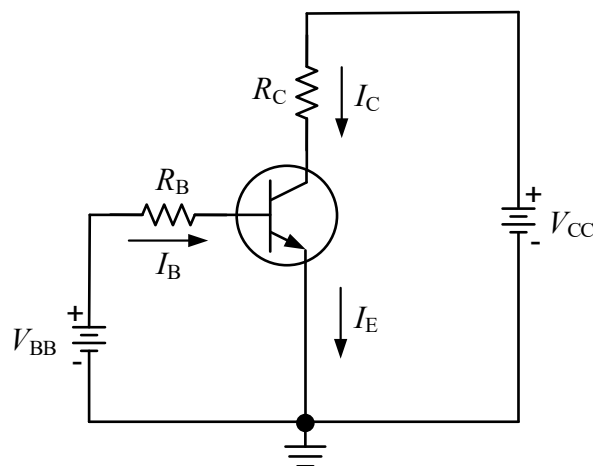
รูปที่ 1.6 การต่อการไบแอสเบื้องต้นของทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์ชนิดเอ็นพีเอ็น (ธนะสิทธิ์, 2565)

ดังนั้น เมื่อพิจารณาพื้นที่โครงสร้างบริเวณขาเบสและขาอิมิตเตอร์ซึ่งมีพื้นที่น้อยกว่าบริเวณขาคอลเล็กเตอร์ จึงกำหนดเบื้องต้นว่า การทำงานของทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์ ต้องจ่ายค่าแรงดันไบแอสระหว่างขาเบสและขาอิมิตเตอร์เป็นการจ่ายแรงดันไบแอสไปข้างหน้าเพื่อให้กระแสส่วนนี้ไหลเป็นกระแสเริ่มต้น หากกระแสขาเข้าไม่ไหล กระแสขาออกก็ย่อมไม่ไหลด้วย แต่หากกระแสขาเข้าไหลมาก กระแสขาออกต้องไหลมากตามไปด้วยเป็นสัดส่วนซึ่งกันและกัน สำหรับการต่อการไบแอสเบื้องต้นของทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์ทั้งชนิดเอ็นพีเอ็นและชนิดพีเอ็นพี แสดงดังรูปที่ 1.6 และ 1.7 ตามลำดับ

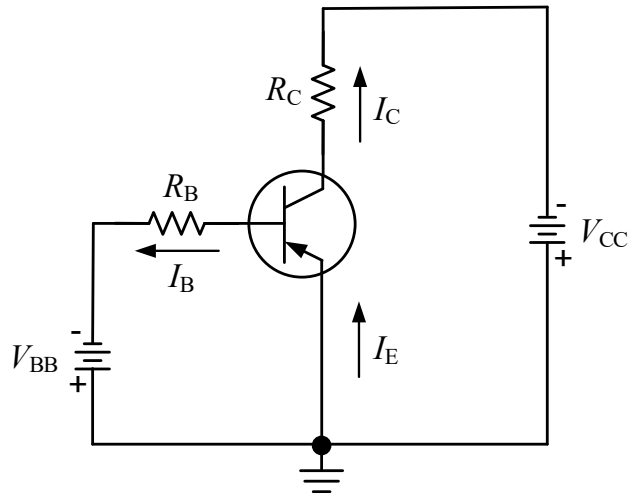


รูปที่ 1.7 การต่อการไบแอสเบื้องต้นของทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์ชนิดพีเอ็นพี (ธน์สัถ์, 2565)

จากรูปที่ 1.8 แสดงการไบแอสเบื้องต้นโดยใช้ชาอิมิตเตอร์เป็นขาเทียบศักย์ทางไฟฟ้าของทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์ชนิดเอ็นพีเอ็น จะเห็นได้ว่า การจ่ายแรงดันไบแอสระหว่างขาเบสและชาอิมิตเตอร์เป็นการจ่ายแรงดันไบแอสไปข้างหน้าจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า  $V_{BB}$  โดยมีตัวต้านทาน  $R_B$  ทำหน้าที่จำกัดปริมาณกระแสเบส  $I_B$  และเมื่อชาคอลเล็กเตอร์และชาอิมิตเตอร์ได้รับการจ่ายแรงดันไบแอสผั้กลับจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า  $V_{CC}$  จึงเปรียบเสมือนการทำให้ความต้านทานระหว่างชาคอลเล็กเตอร์และชาอิมิตเตอร์มีค่าต่ำลง ทำให้กระแสจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า  $V_{CC}$  จ่ายแรงดันไฟฟ้าจากขั้วบวกผ่านตัวต้านทาน  $R_C$  เกิดกระแสคอลเล็กเตอร์  $I_C$  ไหลเข้าชาคอลเล็กเตอร์ และไหลออกที่ชาอิมิตเตอร์ คือ กระแสอิมิตเตอร์  $I_E$  ครอบคลุมขั้วลบของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า  $V_{CC}$



รูปที่ 1.8 การไบแอสเบื้องต้นโดยใช้ชาอิมิตเตอร์เป็นขาเทียบศักย์ทางไฟฟ้าของทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์ชนิดเอ็นพีเอ็น (ธน์สัถ์, 2565)



รูปที่ 1.9 การไบแอสเบื้องต้นโดยใช้ขาอิมิตเตอร์เป็นขาเทียบศักย์ทางไฟฟ้าของทรานซิสเตอร์ รอยต่อไบโพลาร์ชนิดพีเอ็นพี (ธน์สถ์, 2565)

รูปที่ 1.9 แสดงการไบแอสเบื้องต้นโดยใช้ขาอิมิตเตอร์เป็นขาเทียบศักย์ทางไฟฟ้าของทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์ชนิดพีเอ็นพี แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า  $V_{BB}$  จ่ายแรงดันไบแอสไปข้างหน้าระหว่างขาเบสและขาอิมิตเตอร์ ทำให้เกิดกระแสไหลจากขั้วบวกของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า  $V_{BB}$  เข้าขาอิมิตเตอร์และไหลออกที่ขาเบสเป็นกระแสเบส  $I_B$  ผ่านตัวต้านทาน  $R_B$  ครอบคลุมวงจรที่ขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟ  $V_{BB}$  และเมื่อมีกระแสเบส  $I_B$  ไหลออก ดังนั้นตามหลักการการทำงาน of ทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์ กระแสเบส  $I_B$  จะส่งผลให้เกิดการไหลของกระแสอิมิตเตอร์  $I_E$  ไปยังขาคอลเล็กเตอร์ เป็นกระแสคอลเล็กเตอร์  $I_C$  โดยถือว่าเป็นกระแสไหลจากขั้วบวกของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า  $V_{CC}$  เข้าขาอิมิตเตอร์และไหลออกที่ขาคอลเล็กเตอร์ผ่านตัวต้านทาน  $R_C$  ครอบคลุมวงจรที่ขั้วลบของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า  $V_{CC}$  จากความสัมพันธ์ของการไหลของทั้งกระแสเบส  $I_B$  กระแสคอลเล็กเตอร์  $I_C$  และกระแสอิมิตเตอร์  $I_E$  จากรูปที่ 1.8 และรูปที่ 1.9 สามารถเขียนเป็นสมการได้ คือ

$$I_E = I_C + I_B \tag{1.1}$$

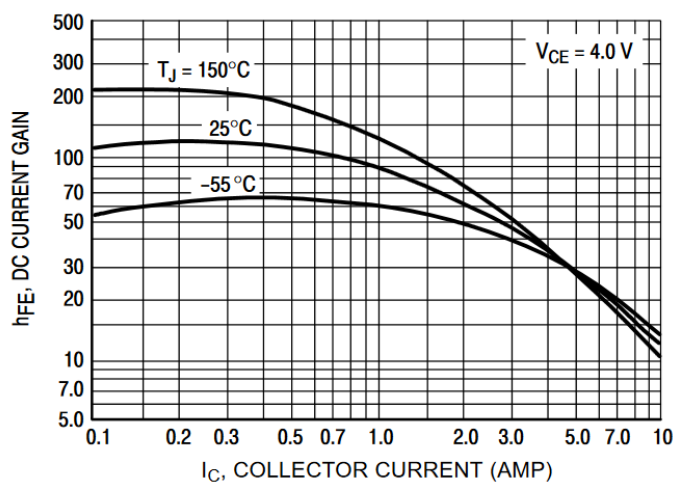
### 1.2.2 อัตราขยายของทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์

อัตราขยายของทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์สามารถแบ่งออกได้คือ อัตราขยายเบตา ( $\beta$ ) และอัตราขยายแอลฟา ( $\alpha$ )

สำหรับอัตราขยายเบตา คือ อัตราส่วนระหว่างกระแสคอลเล็กเตอร์  $I_C$  กับกระแสเบส  $I_B$  สามารถเขียนเป็นสมการได้คือ

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \quad (1.2)$$

โดยทั่วไปค่าอัตราขยายเบตาของทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์ อาจเรียกอีกอย่างว่า ค่า  $h_{fe}$  ซึ่ง  $h$  เป็นตัวย่อของวงจรสมมูลไฮบริด (Hybrid equivalent circuit) และ  $fe$  หมายถึง อัตราขยายกระแสไปข้างหน้า (Forward current amplification) ของวงจรอิมิตเตอร์ร่วม (Common emitter configuration) อัตราขยายเบตาจะมีค่าประมาณ 20 – 200 เท่า หรือมากกว่า ขึ้นอยู่กับทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์แต่ละเบอร์ที่ผลิตและนำไปใช้งาน



รูปที่ 1.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $h_{fe}$  และค่ากระแสคอลเล็กเตอร์  $I_C$   
(On Semiconductor, 2023)

ดังนั้นหากมีการนำทรานซิสเตอร์ไปใช้งานสำหรับวงจรขยายแบบต่าง ๆ ค่าอัตราขยายเบตา จึงเป็นค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ เนื่องจากค่าอัตราขยายเบตามีการเปลี่ยนแปลงหากอุณหภูมิที่รอยต่อของทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์เปลี่ยนไป (Junction temperature;  $T_J$ ) นั่นหมายความว่า หากอุณหภูมิที่รอยต่อของทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์มีค่าสูงขึ้น ค่าอัตราขยายเบตามีการเปลี่ยนแปลงที่สูงขึ้นตามไปด้วย รูปที่ 1.10 แสดงตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $h_{fe}$  และค่ากระแสคอลเล็กเตอร์  $I_C$  ที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์เบอร์ 2N3055 (On Semiconductor, 2023)

สำหรับอัตราขยายแอลฟา คือ อัตราการขยายทางกระแสระหว่างค่ากระแสคอลเล็กเตอร์  $I_C$  กับค่ากระแสอิมิตเตอร์  $I_E$  แสดงดังสมการที่ (1.3) เป็นอีกค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์ โดยปกติจะมีค่าไม่เกิน 1

$$\alpha \approx \frac{I_C}{I_E} \tag{1.3}$$

ทั้งนี้ สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายเบตาและอัตราขยายแอลฟาได้จากสมการที่ (1.4) และสมการที่ (1.5)

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \tag{1.4}$$

$$\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta} \tag{1.5}$$

### 1.2.3 ย่านการทำงานของทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์

ย่านการทำงานของทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์ สามารถแสดงได้ 3 ย่าน คือ

#### 1) ย่านคัตออฟ (Cut-off region)

การทำงานย่านนี้ กระแสเบส  $I_B$  ไม่ไหล ( $I_B = 0 \mu A$ ) ส่งผลให้ไม่มีกระแสคอลเล็กเตอร์  $I_C$  ไหล ทรานซิสเตอร์จึงไม่ทำงานหรือคัตออฟ

#### 2) ย่านอิ่มตัว (Saturation region)

การทำงานย่านนี้ กระแสคอลเล็กเตอร์  $I_C$  ไหลแบบเชิงเส้น เพียงแค่เพิ่มแรงดันตกคร่อมระหว่างขาคอลเล็กเตอร์กับขาคิมิตเตอร์ ( $V_{CE}$ ) เล็กน้อย ซึ่งลักษณะการทำงานแบบนี้จึงเหมาะที่นำไปประยุกต์ใช้เป็นสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ (ในกรณีซิลิคอนทรานซิสเตอร์ ค่าแรงดันจุดอิ่มตัวจะมีค่าประมาณ 0.2 โวลต์)

#### 3) ย่านแอกทีฟ (Active region)

การทำงานย่านนี้ กระแสคอลเล็กเตอร์  $I_C$  เปลี่ยนแปลงไม่มาก ถึงแม้จะเพิ่มแรงดันตกคร่อมระหว่างขาคอลเล็กเตอร์กับขาคิมิตเตอร์ ( $V_{CE}$ ) มากขึ้น และในย่านการทำงานนี้แรงดันที่ตกคร่อมระหว่างขาเบสกับขาคิมิตเตอร์ ( $V_{BE}$ ) มีค่าเท่ากับ 0.7 โวลต์ จากการไหลของกระแสคอลเล็กเตอร์  $I_C$  ที่ค่อนข้างคงที่ ถึงแม้แรงดันตกคร่อมระหว่างขาคอลเล็กเตอร์กับขาคิมิตเตอร์ ( $V_{CE}$ ) จะมีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นการทำงานย่านนี้จึงเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานในวงจรขยาย

## 1.3 ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าแบบโลหะ-ออกไซด์-สารกึ่งตัวนำ

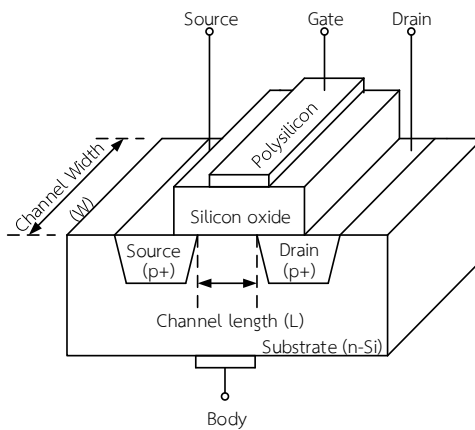
ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าแบบโลหะ-ออกไซด์-สารกึ่งตัวนำ บางครั้งอาจถูกเรียกสั้น ๆ ว่า มอสเฟตหรือมอสทรานซิสเตอร์ เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทแอกทีฟที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้สำหรับสร้างเป็นวงจรรวมได้หลายวงจร สร้างจากตัวนำชนิดหนึ่งซึ่งใช้สนามไฟฟ้าควบคุมปริมาณการไหลของกระแสในช่องทางเดินกระแส ปัจจุบันได้มีการนำเอา



มอสเฟตเข้ามาแทนที่ทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์ เนื่องจากกระบวนการผลิตที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่องส่งผลให้มอสเฟตที่ถูกสร้างขึ้นมามีคุณลักษณะที่ใกล้เคียงกับอุดมคติมาก จนกลายเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ได้รับการตอบรับมากที่สุดในวงการอุตสาหกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งหากทำการเปรียบเทียบระหว่างมอสเฟตกับทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์แล้ว มอสเฟตมีโครงสร้างและขั้นตอนการผลิตที่ไม่ซับซ้อน มีขนาดเล็ก ทำให้มีความจุมากกว่าในกรณีที่พื้นที่บนชิป (Chip) ในวงจรรวมมีขนาดจำกัด มีความต้านทานอินพุตสูง และสัญญาณรบกวนต่ำ ทำให้มอสเฟตเป็นทรานซิสเตอร์ที่ปรากฏอยู่บนวงจรรวมมากที่สุด (จิริยุทธ์, 2553)

### 1.3.1 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของมอสเฟต

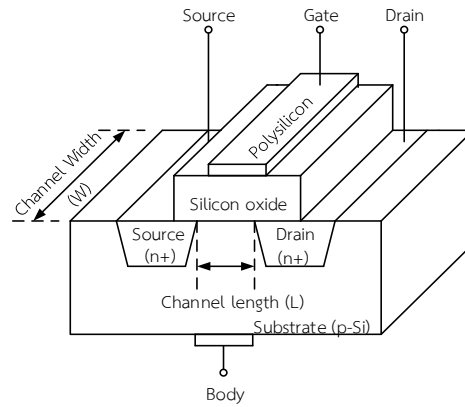
มอสเฟตสามารถแบ่งตามชนิดของสารกึ่งตัวนำที่ถูกแพร่ลงบนฐานรองได้ 2 ชนิด คือ พีมอส (PMOS) แสดงดังรูปที่ 1.11 และเอ็นมอส (NMOS) แสดงดังรูปที่ 1.12 กล่าวคือ หากเป็นมอสเฟตชนิดพีมอส สารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-type) จะถูกแพร่ลงบนฐานรองที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type) ในทางกลับกัน หากเป็นมอสเฟตชนิดเอ็นมอส สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะถูกแพร่ลงบนฐานรองที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี อีกทั้งมอสเฟตทั้งสองชนิดนี้ยังสามารถแบ่งตามชนิดการทำงานได้ คือ มอสเฟตแบบวิธีเพิ่มขนาดช่อง (Enhancement-mode MOSFET) และมอสเฟตแบบวิธีลดขนาดช่อง (Depletion-mode MOSFET)



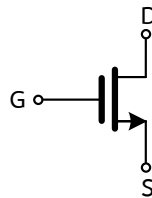
รูปที่ 1.11 โครงสร้างพื้นฐานของมอสเฟตชนิดพีมอส (ธนะสิทธิ์, 2565)

ทั้งนี้โครงสร้างพื้นฐานของมอสเฟตชนิดพีมอสและชนิดเอ็นมอสในรูปที่ 1.11 และรูปที่ 1.12 จะประกอบไปด้วยขาที่ใช้งานทั้งหมดจำนวน 4 ขา คือ ขาซอร์ส (Source) ขาเกต (Gate) ขาเดรน (Drain) และขาบอดี้ (Body) โดยทั่วไปขาบอดี้จะต่อรวมเข้ากับขาซอร์ส สารกึ่งตัวนำที่ถูกแพร่ลงบนฐานรอง คือ ขาซอร์สและขาเดรน บนผิวหน้าระหว่างซอร์สและเดรนจะมีแผ่นฟิล์มบาง ๆ คือ ซิลิคอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide: SiO<sub>2</sub>) ส่วนบนของซิลิคอนไดออกไซด์จะมีโลหะซึ่งทำจาก

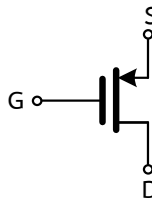
โพลีซิลิคอน (Poly silicon) ส่วนนี้เรียกว่า ขาเกต ความยาวระหว่างสารกึ่งตัวนำที่ชาซอร์สและชาเดรน เรียกว่า ความยาวช่องทางเดินกระแส (Channel length:  $L$ ) ส่วนความกว้างของชาซอร์สและชาเดรน เรียกว่า ความกว้างช่องทางเดินกระแส (Channel width:  $W$ )



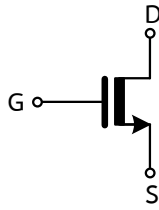
รูปที่ 1.12 โครงสร้างพื้นฐานของมอสเฟตชนิดเอ็นมอส (ธันส์ถ์, 2565)



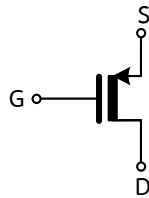
รูปที่ 1.13 สัญลักษณ์ของมอสเฟตแบบวิธีเพิ่มขนาดช่องทางชนิดเอ็นมอส 3 ขา (ธันส์ถ์, 2565)



รูปที่ 1.14 สัญลักษณ์ของมอสเฟตแบบวิธีเพิ่มขนาดช่องทางชนิดพีมอส 3 ขา (ธันส์ถ์, 2565)

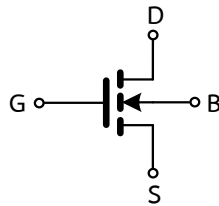


รูปที่ 1.15 สัญลักษณ์ของมอสเฟตแบบวิธีลดขนาดช่องชนิดเอ็นมอส 3 ขา (ธน์สถ์, 2565)

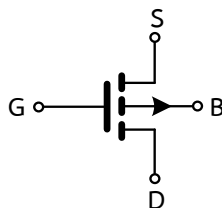


รูปที่ 1.16 สัญลักษณ์ของมอสเฟตแบบวิธีลดขนาดช่องชนิดพีมอส 3 ขา (ธน์สถ์, 2565)

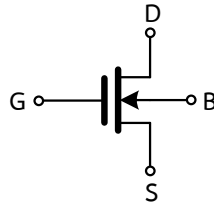
รูปที่ 1.13 – รูปที่ 1.16 แสดงสัญลักษณ์ของมอสเฟตแบบ 3 ขา ประกอบด้วยมอสเฟตแบบวิธีเพิ่มขนาดช่องชนิดเอ็นมอสและชนิดพีมอส และมอสเฟตแบบวิธีลดขนาดช่องชนิดเอ็นมอสและชนิดพีมอส เมื่อแรงดันระหว่างขาบอดี้และขาซอร์สมีค่าเท่ากับศูนย์ ตามลำดับ



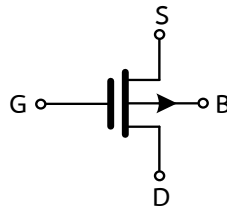
รูปที่ 1.17 สัญลักษณ์ของมอสเฟตแบบวิธีเพิ่มขนาดช่องชนิดเอ็นมอส 4 ขา (ธน์สถ์, 2565)



รูปที่ 1.18 สัญลักษณ์ของมอสเฟตแบบวิธีเพิ่มขนาดช่องชนิดพีมอส 4 ขา (ธน์สถ์, 2565)



รูปที่ 1.19 สัญลักษณ์ของมอสเฟตแบบวิธีลดขนาดช่องชนิดเอ็นมอส 4 ขา (ธันส์ถ์, 2565)



รูปที่ 1.20 สัญลักษณ์ของมอสเฟตแบบวิธีลดขนาดช่องชนิดพีมอส 4 ขา (ธันส์ถ์, 2565)

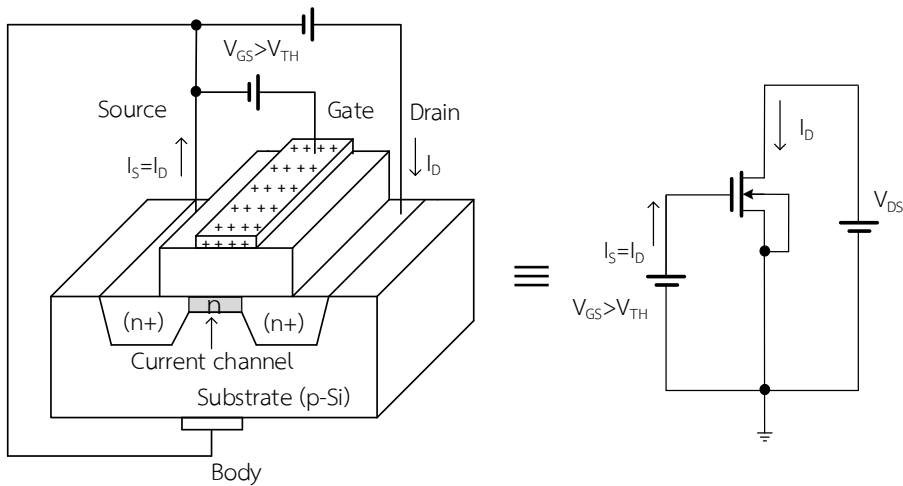
สำหรับรูปที่ 1.17 – รูปที่ 1.20 แสดงสัญลักษณ์ของมอสเฟตแบบ 4 ขา ประกอบด้วยมอสเฟตแบบวิธีเพิ่มขนาดช่องชนิดเอ็นมอสและชนิดพีมอส และมอสเฟตแบบวิธีลดขนาดช่องชนิดเอ็นมอสและชนิดพีมอส เมื่อแรงดันระหว่างขาบอดีและขาซอร์สมีค่าเท่ากับศูนย์ตามลำดับ วิธีการสังเกตสัญลักษณ์เพื่อให้ทราบว่าเป็นมอสเฟตชนิดใดนั้น สามารถทำได้โดยการดูที่หัวลูกศรที่ขาซอร์ส โดยมอสเฟตชนิดเอ็นมอสแบบ 3 ขา หัวลูกศรหันออกจากขาเกต ส่วนมอสเฟตแบบ 4 ขา หัวลูกศรหันเข้าขาเกต

### 1.3.2 การทดสอบการทำงานและคุณสมบัติต่างๆ ของมอสเฟต

มอสเฟตมีคุณลักษณะการทำงานโดยใช้แรงดันไฟฟ้าควบคุมปริมาณกระแส ในรูปที่ 1.12 จะยกตัวอย่างลักษณะการทำงานของมอสเฟตชนิดเอ็นมอส โดยการทดสอบการทำงานของมอสเฟตสามารถต่อวงจรได้ดังรูปที่ 1.21 กล่าวคือ ขณะที่ไม่มีแรงดันไบแอสที่ขาเกต มอสเฟตจะอยู่ในสภาวะหยุด (Off) การนำกระแส หรือไม่มีการนำกระแส แต่เมื่อหากมีแรงดันไบแอสที่ขาเกตและให้ไบแอสที่ขาเดรนเป็นบวกเมื่อเทียบกับขาซอร์ส (ขาที่มีค่าไบแอสแรงดันสูงกว่าเป็นขาเดรนเสมอ) ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำอิเล็กตรอน ซึ่งเป็นพาหะส่วนน้อยในฐานรองชนิดพี เกิดเป็นช่องทางเดินกระแส ทำให้กระแสอิเล็กตรอนซึ่งเป็นพาหะส่วนมากของซอร์สและเดรนสามารถไหลได้ กระแสที่ไหลผ่านขาเดรน สามารถเขียนเป็นสมการได้คือ (Sah, 1964)

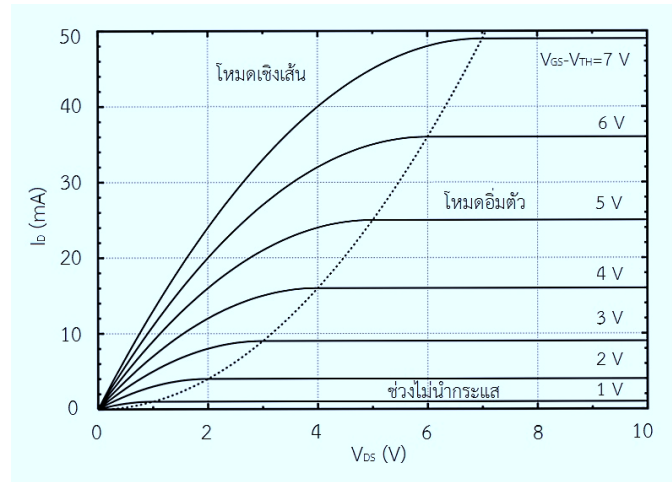
$$I_D = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left( V_{GS} - V_{TH} - \frac{V_{DS}}{2} \right) V_{DS} \quad ; \quad V_{GS} \geq V_{TH} \quad (1.6)$$

เมื่อ  $I_D$  คือ กระแสเดรน  $\mu_n$  คือ ค่าความคล่องของโฮลหรืออิเล็กตรอน (Surface mobility of carrier)  $C_{ox}$  คือ ค่าความจุต่อพื้นที่ของเกตออกไซด์ (Capacitance per unit area of the gate oxide)  $W$  คือ ความกว้างของช่องทางเดินกระแส  $L$  คือ ความยาวของช่องทางเดินกระแส  $V_{GS}$  คือ ความต่างศักย์ระหว่างขาเกตกับขาซอร์ส  $V_{TH}$  คือ ค่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน (Threshold voltage) และ  $V_{DS}$  คือ ความต่างศักย์ระหว่างขาเดรนกับขาซอร์ส



รูปที่ 1.21 การต่อวงจรเพื่อทดสอบการทำงานของมอสเฟต (ธน์สธ, 2565)

หากพิจารณาโครงสร้างพื้นฐานของวงจรภายในมอสเฟตชนิดพีเอ็มอสในรูปที่ 1.11 นั้น จะมีไดโอดแฝงอยู่ในลักษณะหันหน้าชนกันระหว่างขาเดรนและขาซอร์ส ในทางกลับกัน วงจรภายในมอสเฟตชนิดเอ็นมอสในรูปที่ 1.12 จะมีไดโอดแฝงอยู่ในลักษณะหันหลังชนกันระหว่างขาเดรนและขาซอร์ส (วรากร, 2553) ดังนั้นหากป้อนแรงดันระหว่างขาเดรนและขาซอร์สที่มีค่าต่ำกว่าค่าแรงดันที่ไดโอดทำงาน พบว่าจะไม่มีกระแสไหลผ่าน แต่เมื่อไรก็ตามที่มีการป้อนแรงดันระหว่างขาเดรนและขาซอร์สที่มีค่าสูงกว่าค่าแรงดันที่ไดโอดทำงาน ไดโอดจะทำงานในโหมดพังทลาย (Breakdown operation) ก็จะทำให้มีกระแสไหลระหว่างขาเดรนและขาซอร์ส



รูปที่ 1.22 กราฟคุณสมบัติทางเอาต์พุตของมอสเฟต (ธันส์ถ์, 2565)

เพื่อให้มอสเฟตในรูปที่ 1.21 ทำงานอย่างเหมาะสม สามารถอธิบายการทำงานของมอสเฟตได้เป็น 3 ช่วง แสดงดังกราฟในรูปที่ 1.22 โดยแต่ละช่วงการทำงานจะขึ้นอยู่กับค่า  $V_{GS} - V_{TH}$  กล่าวคือ การทำงานช่วงแรกของมอสเฟตจะอยู่ในช่วงไม่นำกระแส คือ ค่า  $|V_{GS}| - |V_{TH}|$  มีค่าเท่ากับศูนย์หรือมีค่าเป็นลบ ค่ากระแสเดรนในสมการที่ (1.6) จะมีค่าเท่ากับ

$$I_D = 0 ; |V_{GS}| - |V_{TH}| < 0 \tag{1.7}$$

ช่วงที่ 2 ถ้า  $|V_{GS}| - |V_{TH}| > 0$  และ  $0 < |V_{DS}| < |V_{GS}| - |V_{TH}|$  แล้ว มอสเฟตจะอยู่ในช่วงของการนำกระแสไม่อิ่มตัว (Non-saturation) หรือการนำกระแสในโหมดเชิงเส้น (Linear region) ค่ากระแสเดรนในสมการที่ (1.6) จะมีค่าเท่ากับ

$$I_D = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left( V_{GS} - V_{TH} - \frac{V_{DS}}{2} \right) V_{DS} \tag{1.8}$$

จากสมการที่ (1.8) พบว่า ลักษณะการเปลี่ยนแปลงระหว่างค่ากระแส  $I_D$  กับค่า  $V_{DS}$  มีการเปลี่ยนแปลงเป็นแบบพาราโบลาคว่ำและค่ากระแส  $I_D$  มีค่าสูงสุดเมื่อ  $V_{DS} = V_{GS} - V_{TH}$  ดังนั้น

$$I_{D(max)} = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2 \tag{1.9}$$

สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแส  $I_D$  กับค่าแรงดัน  $V_{DS}$  ในสมการที่ (1.8) สามารถใช้ทำนายพฤติกรรมของมอสเฟตได้เฉพาะในช่วงการนำกระแสในโหมดเชิงเส้นเท่านั้น เนื่องจากค่า  $I_D$  ของมอสเฟตจากการทดลองจริงไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงแบบพาราโบลาคว่า (ขาขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงแบบพาราโบลาค แต่ขาลงไม่มีการเปลี่ยนแปลง) สาเหตุมาจากปรากฏการณ์ที่จำนวนพาหะที่ขาเดรนมีค่าเท่ากับศูนย์ (Gaensslen et. al., 1977) เมื่อ  $V_{DS} = V_{GS} - V_{TH}$  โดยเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “ปรากฏการณ์พินช์ออฟ” (Pinch off) และเรียกแรงดัน  $V_{DS}$  ดังกล่าวว่า “แรงดันพินช์ออฟ” หรือ แรงดันอิ่มตัว (Saturation voltage :  $V_{DSAT}$ ) ดังนั้น ช่วงการทำงานของมอสเฟตช่วงที่ 3 เมื่อ  $V_{DS} > V_{DSAT}$  คือ ช่วงการนำกระแสในโหมดอิ่มตัว (Saturation region) สมการค่ากระแส  $I_D$  สามารถเขียนได้คือ

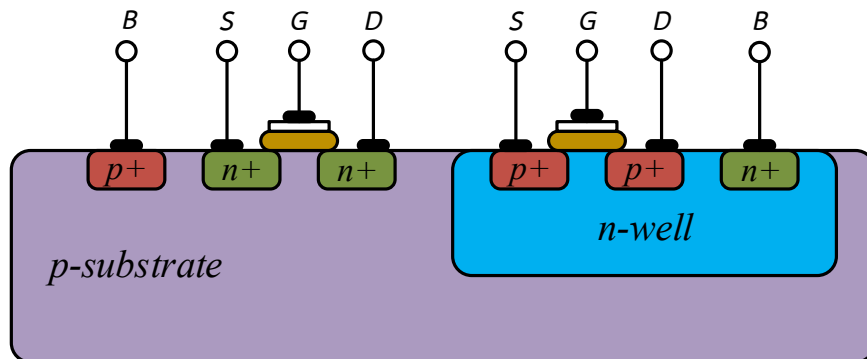
$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2 \quad (1.10)$$

#### 1.4 ทราานซิสเตอร์คู่ประกอบชนิดโลหะ-ออกไซด์-สารกึ่งตัวนำ

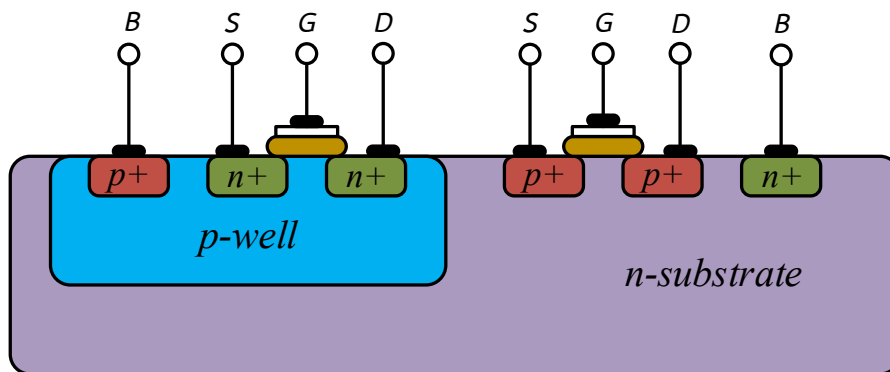
ในปัจจุบัน ทราานซิสเตอร์คู่ประกอบชนิดโลหะ-ออกไซด์-สารกึ่งตัวนำหรือซีมอส (CMOS) เป็นเทคโนโลยีที่มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องสำหรับการนำไปออกแบบและประยุกต์ใช้งานในวงจรรวมดิจิทัล เช่น หน่วยความจำ หน่วยประมวลผลกลาง หรือโทรศัพท์มือถือ เป็นต้น ส่งผลให้เทคโนโลยีการผลิตวงจรรวมแบบซีมอสได้รับความนิยมสูงกว่าเทคโนโลยีการผลิตวงจรรวมแบบอื่น เนื่องจากการพัฒนาเทคโนโลยีวงจรรวมแบบซีมอสสามารถทำการออกแบบให้สามารถบรรจุทราานซิสเตอร์ลงไปในวงจรรวมได้มากขึ้นแบบทวีคูณ รองรับแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำกว่าและใช้พลังงานต่ำ ซึ่งมีความแตกต่างไปจากมอสเฟตและทราานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์ที่จำเป็นต้องมีการใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่มากกว่า ส่งผลให้มีการใช้พลังงานที่สูงกว่า อย่างไรก็ตามนอกจากการประยุกต์ใช้งานในวงจรรวมดิจิทัลแล้ว เทคโนโลยีวงจรรวมแบบซีมอสยังคงมีความจำเป็นสำหรับประยุกต์ใช้ในการประมวลสัญญาณแอนะล็อกด้วยเสมอ เช่น วงจรแอนะล็อกสวิตช์ (Premont et. al., 1998) วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก (Digital-to-analog converter) (Nonthaputha et. al., 2016) วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ (Sample-and-hold) (Nonthaputha et. al., 2020) วงจรกรองความถี่ (Filter) (Nonthaputha & Kumngern, 2021) ระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ (PID Controller) (Nonthaputha & Kumngern, 2021) เป็นต้น ความก้าวหน้าของเทคโนโลยีที่ใช้ซีมอสในการออกแบบเป็นวงจรรวม ทำให้วงจรรวมซีมอสมีสมรรถนะด้านความถี่ที่สูงขึ้นและได้รับความนิยมมากขึ้นตามลำดับ เนื่องจากเทคโนโลยีวงจรรวมแบบซีมอสสำหรับวงจรรวมดิจิทัลและวงจรรวมแอนะล็อกเป็นของคู่กัน จึงมีความพยายามรวมวงจรรวมแอนะล็อกเข้าไปในวงจรรวมดิจิทัล เพื่อลดต้นทุนการผลิตและทำให้วงจรรวมมีขนาดเล็กลง เรียกว่าวงจรรวมซีมอสแบบสัญญาณผสม (Mixed-signal) (Razavi, 2017)

### 1.4.1 โครงสร้างของซีมอส

โครงสร้างของซีมอสเป็นการรวมมอสเฟตชนิดเอ็นมอสและมอสเฟตชนิดพีมอสมาต่อรวมด้วยกัน ซึ่งทำได้โดยการสร้างบ่อเอ็น (n-well) เรียกว่า Si Gate n-well process หรือบ่อพี (p-well) เรียกว่า Si Gate p-well process รูปที่ 1.23 แสดงโครงสร้างซีมอสที่สร้างจากบ่อเอ็น และรูปที่ 1.24 แสดงโครงสร้างซีมอสที่สร้างจากบ่อพี



รูปที่ 1.23 โครงสร้างซีมอสที่สร้างจากบ่อเอ็น (ธนะสิทธิ์, 2565)



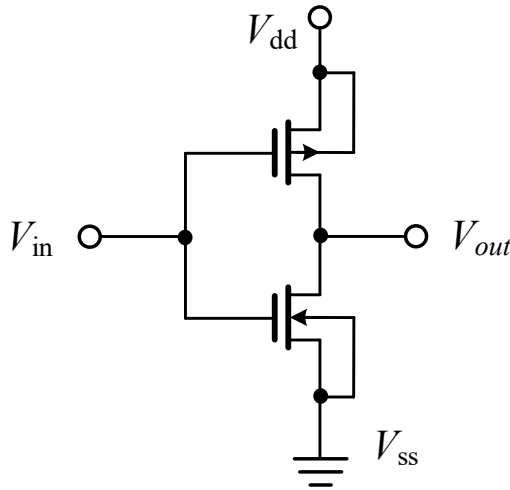
รูปที่ 1.24 โครงสร้างซีมอสที่สร้างจากบ่อพี (ธนะสิทธิ์, 2565)

### 1.4.2 การประยุกต์ใช้งานซีมอสเบื้องต้น

การประยุกต์ใช้งานซีมอสเบื้องต้นจะอาศัยการทำงานตามคุณสมบัติของมอสเฟตทั้งชนิดเอ็นมอสและชนิดพีมอสซึ่งมีลักษณะในการทำงานเป็นสวิตช์ ดังรูปที่ 1.25 แสดงการประยุกต์ใช้งานซีมอสเป็นวงจรคอนเวอร์เตอร์ (CMOS converter) หรือเรียกว่า วงจรเกตแบบนี้อย (NOT gate) สามารถอธิบายการทำงานได้ คือ ในกรณีที่มีการป้อนแรงดันอินพุต  $V_{in}$  ให้กับวงจร (เปรียบเสมือนบิตดิจิทัลเท่ากับ 1) ทำให้มอสเฟตชนิดพีมอสมีสถานะเหมือนสวิตช์เปิด (Switch-off) และมอสเฟตชนิด



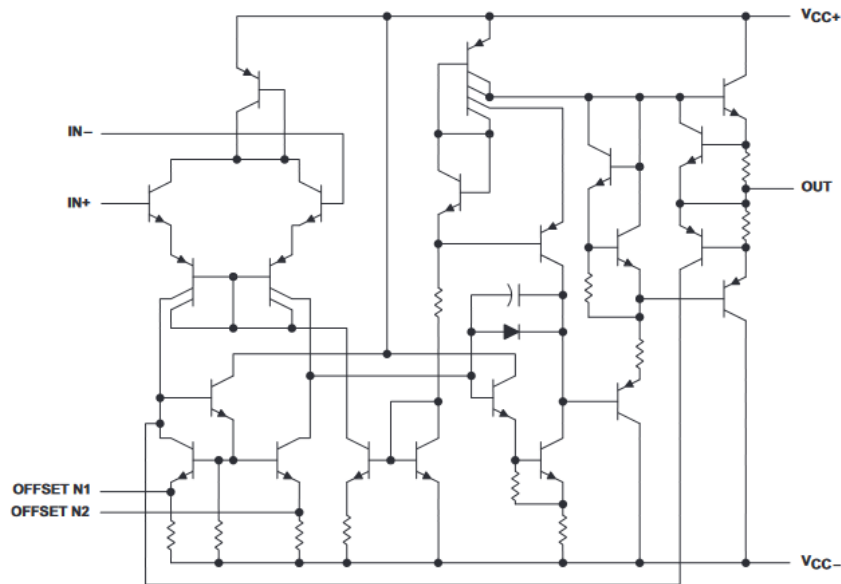
เอ็นมอสมีสถานะเหมือนสวิตช์ปิด (Switch-on) ดังนั้นค่าแรงดันอินพุต  $V_{in}$  จะถูกต่อลงกราวด์ ทำให้เอาต์พุตที่ได้มีค่าเท่ากับศูนย์ (เปรียบเสมือนบิตดิจิทัลเท่ากับ 0) ในทางกลับกันในกรณีที่ไม่มี การป้อนแรงดันอินพุต  $V_{in}$  ให้กับวงจร (เปรียบเสมือนบิตดิจิทัลเท่ากับ 0) แต่เนื่องจากการจ่ายค่า แรงดันจากไฟเลี้ยง  $V_{dd}$  ให้กับมอสเฟตชนิดพีมอส ทำให้มอสเฟตชนิดพีมอสมีสถานะเหมือนสวิตช์ปิด และเนื่องจากไม่มีค่าแรงดันอินพุต  $V_{in}$  ทำให้มอสเฟตชนิดเอ็นมอสมีสถานะเหมือนสวิตช์เปิด ดังนั้น ทำให้เอาต์พุตที่ได้มีค่าเท่ากับ  $V_{dd}$  (เปรียบเสมือนบิตดิจิทัลเท่ากับ 1)



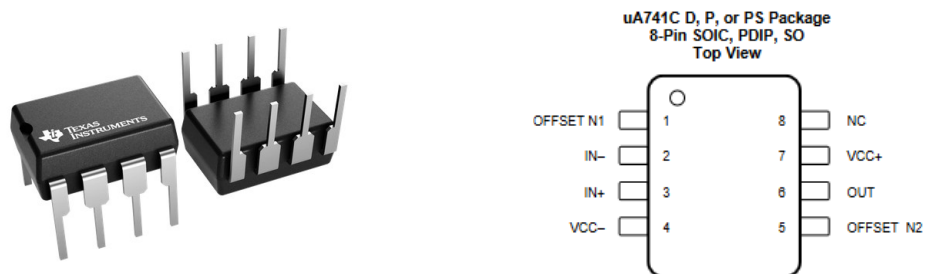
รูปที่ 1.25 วงจรซีมอสคอนเวอร์เตอร์ (ธันส์, 2565)

## 1.5 ออปแอมป์

วงจรออปแอมป์เป็นวงจรขยาย มีการทำงานคล้ายกับแหล่งจ่ายแรงดันที่ถูกควบคุมด้วย แรงดัน (James, 2021) ที่ควบคุมอัตราการขยายได้สูง โดยเริ่มต้นมีแนวคิดที่ทำการสร้างออปแอมป์ มาตั้งแต่ พ.ศ. 2490 มีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะนำมาเป็นอุปกรณ์แอนะล็อกอเนกประสงค์ ที่สามารถ ใช้งานในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่หลากหลายมากยิ่งขึ้น ออปแอมป์ในรูปแบบที่สามารถใช้งาน เชิงพาณิชย์ตัวแรกสร้างจากหลอดสุญญากาศ (Richard, 2000) แต่ยังไม่สามารถนำมาใช้งานสำหรับ การสร้างเป็นวงจรรวมได้ จนกระทั่งเมื่อปี พ.ศ. 2507 บริษัท Fairchild Semiconductor International, Inc. ซึ่งเป็นบริษัทสารกึ่งตัวนำสัญชาติอเมริกัน (ปัจจุบัน เป็นบริษัท National Semiconductor) ก็ประสบความสำเร็จในการสร้างออปแอมป์ที่สามารถนำไปใช้งานสำหรับวงจรรวมในเชิงพาณิชย์ได้ คือ ไอซีตระกูลเบอร์ 702 จนได้พัฒนามาเป็น ไอซีตระกูลเบอร์ 709 และไอซีตระกูลเบอร์ 741 ฯลฯ ที่มีการนำมาประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน (Richard, 2000)



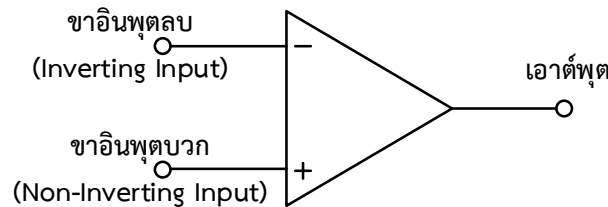
รูปที่ 1.26 โครงสร้างภายในของออปแอมป์ UA741 (Texas Instruments, 2021)



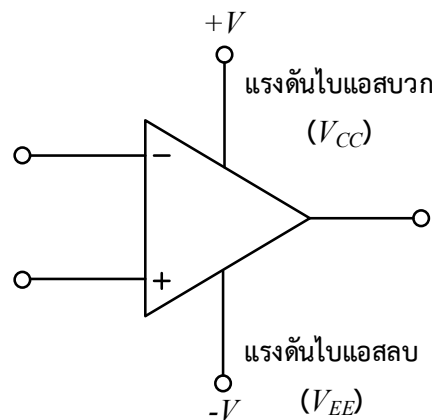
รูปที่ 1.27 โครงสร้างลักษณะภายนอกและการเชื่อมต่อขาสำหรับใช้งานของออปแอมป์ UA741 (Texas Instruments, 2021)

โครงสร้างภายในของออปแอมป์เป็นวงจรที่ซับซ้อน ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 1.26 ซึ่งเป็นโครงสร้างภายในของออปแอมป์ไอซีเบอร์ UA741 (Texas Instruments, 2021) วงจรภายในสร้างจากทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์เป็นหลัก เป็นออปแอมป์อเนกประสงค์ สามารถนำมาต่อใช้งานในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่หลากหลายได้ สำหรับโครงสร้างลักษณะภายนอกและการเชื่อมต่อขาสำหรับใช้งานของออปแอมป์ UA741 แสดงดังรูปที่ 1.27 แต่เพื่อความง่ายในการศึกษา จะแสดงให้เห็นถึงสัญลักษณ์ของออปแอมป์อย่างง่ายดังรูปที่ 1.28 ประกอบไปด้วยขาอินพุตที่เป็นขาลบ (inverting input: -) ขาอินพุตที่เป็นขาคบ (non-inverting input: +) และขาเอาต์พุต 1 ขา โดยที่กล่าวไปแล้วข้างต้น ออปแอมป์ซึ่งเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทแอกทิฟดังนั้น เมื่อนำออปแอมป์ไปประยุกต์ใช้งาน จำเป็นต้องมีการจ่ายค่าไฟเลี้ยงหรือค่าแรงดันไบแอสให้กับตัว

ออปแอมป์ด้วย ทั้งค่าแรงดันไบแอสบวก (+V) หรือ  $V_{CC}$  และแรงดันไบแอสลบ (-V) หรือ  $V_{EE}$  แสดงได้ดังรูปที่ 1.29 ดังนั้นแม้ว่าสัญลักษณ์ของออปแอมป์ที่ปรากฏโดยส่วนใหญ่แสดงดังรูปที่ 1.28 ในทางปฏิบัติ หากไม่จ่ายไฟเลี้ยงให้กับตัวออปแอมป์ในการนำไปใช้งานจริง ออปแอมป์ก็จะไม่สามารถใช้งานได้ โดยค่าแรงดันไบแอสบวกและแรงดันไบแอสลบ จะมีค่าแรงดันที่แตกต่างกันไป เช่น แรงดันไบแอส  $\pm 5$  โวลต์  $\pm 9$  โวลต์ หรือ  $\pm 12$  โวลต์ เป็นต้น ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของออปแอมป์ในแต่ละเบอร์ที่โรงงานทำการผลิต



รูปที่ 1.28 สัญลักษณ์ของออปแอมป์ (ธนส์ถ์, 2565)

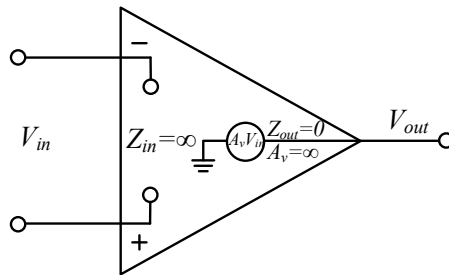


รูปที่ 1.29 สัญลักษณ์ของออปแอมป์สำหรับการนำไปใช้งานจริง (ธนส์ถ์, 2565)

### 1.5.1 ออปแอมป์อุดมคติ

วงจรสมมูลภายในตัวออปแอมป์ในสภาวะที่เป็นอุดมคติแสดงดังรูปที่ 1.30 มีคุณสมบัติที่สำคัญ คือ ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า ( $Z_{in}$ ) มีค่าสูงเป็นอนันต์ ทำให้กระแสอินพุตมีค่าต่ำเกือบเท่ากับศูนย์ ค่าอิมพีแดนซ์ด้านออก ( $Z_{out}$ ) มีค่าต่ำมาก ใกล้เคียงเท่ากับศูนย์ ทำให้ไม่มีผลต่อโวลตของวงจรขยาย ค่าอัตราขยายของออปแอมป์ ( $A_v$ ) ขณะลูปเปิด มีค่าสูงเป็นอนันต์ และความถี่แบนด์วิดท์ (Bandwidth) จะต้องมีค่ามากเป็นอนันต์ (Huijsing, 2011; มนตรีและธนส์ถ์, 2558) สามารถหาค่าแรงดันเอาต์พุต ( $V_{out}$ ) ของออปแอมป์ได้ ดังสมการ

$$V_{out} = A_v(V_1 - V_2) \tag{1.11}$$

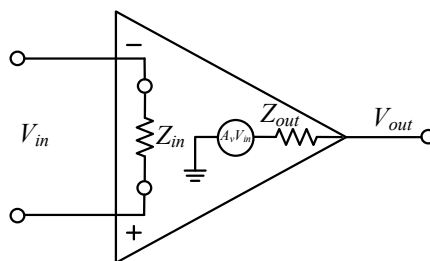


รูปที่ 1.30 วงจรสมมูลภายในตัวออปแอมป์ในสถานะที่เป็นอุดมคติ (ธน์สถ์, 2565)

เมื่อ  $A_v$  คือ ค่าอัตราขยาย  $V_1$  และ  $V_2$  คือ ค่าแรงดันอินพุตที่ขาอินพุตบวกและขาอินพุตลบของออปแอมป์ ตามลำดับ และ  $V_{out}$  คือ ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ขาออกของออปแอมป์

### 1.5.2 ออปแอมป์ในทางปฏิบัติ

ในทางปฏิบัติ ออปแอมป์ไม่ได้มีคุณสมบัติในแบบอุดมคติเลยทีเดียว โดยออปแอมป์มีข้อจำกัดทั้งข้อจำกัดเกี่ยวกับค่าแรงดันและค่ากระแส (Thomas, 2012) กล่าวคือ แรงดันเอาต์พุตยอดถึงยอด (peak-to-peak output voltage) ของออปแอมป์มักจะถูกจำกัดให้มีย่านน้อยกว่าแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงที่ใช้งานเล็กน้อย และสำหรับค่ากระแสเอาต์พุตถูกจำกัดด้วยค่ากำลังไฟฟ้าที่สิ้นเปลืองขณะต่อออปแอมป์ โดยวงจรสมมูลภายในตัวออปแอมป์ในทางปฏิบัติแสดงดังรูปที่ 1.31



รูปที่ 1.31 วงจรสมมูลภายในตัวออปแอมป์ในทางปฏิบัติ (ธน์สถ์, 2565)

โดยปกติออปแอมป์ในทางปฏิบัตินั้น จะมีค่าอัตราขยายความแตกต่างแรงดันอยู่ด้วย ซึ่งจะมีค่าประมาณ  $10^5 - 10^8$  เท่า ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า ( $Z_{in}$ ) มีค่าประมาณ  $10^5 - 10^{13}$  โอห์ม และค่าอิมพีแดนซ์ด้านออก ( $Z_{out}$ ) มีค่าประมาณ 10 - 100 โอห์ม (Ramakant, 2011) ดังนั้นหากมีความ

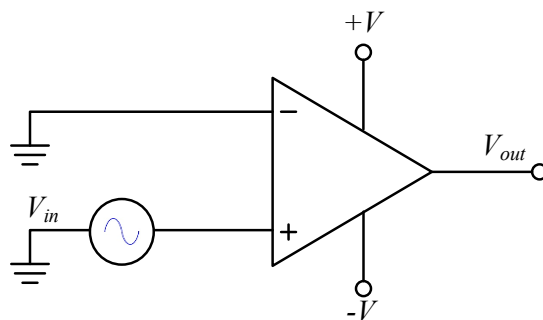
จำเป็นต้องนำออปแอมป์ไปใช้งานขั้นสูง จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการพิจารณาถึงค่าต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นภายในตัวออปแอมป์ด้วย เนื่องจากจะเกิดสัญญาณรบกวน (Noise) ภายในตัวออปแอมป์เอง ซึ่งสัญญาณรบกวนดังกล่าว จะส่งผลต่อค่าเอาต์พุตที่ต้องการได้ (Sergio, 2003) แต่ในปัจจุบัน ได้มีการออกแบบให้ออปแอมป์มีผลกระทบจากสัญญาณรบกวนน้อยลง ดังนั้นในทางปฏิบัติเมื่อพิจารณาให้ลึกซึ้งแล้ว แทบจะเป็นไปไม่ได้เลยหากจะไม่ให้เกิดสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นจากตัวออปแอมป์

### 1.5.3 โหมดการทำงานของออปแอมป์

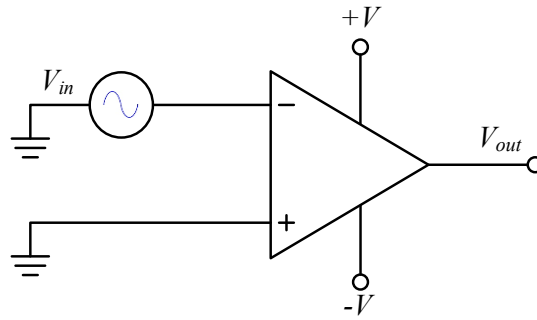
เนื่องจากออปแอมป์มีขาอินพุตสองขา ดังนั้นโหมดการทำงานเมื่อพิจารณาถึงการป้อนสัญญาณเข้าขาอินพุตบวกและขาอินพุตลบ สามารถแบ่งได้ดังนี้

#### 1) โหมดขยายความแตกต่าง

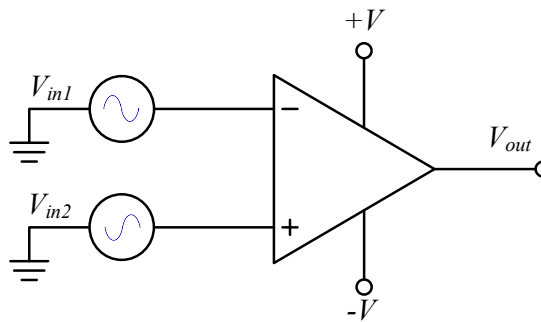
การทำงานของออปแอมป์ในโหมดนี้ เกิดจากการป้อนสัญญาณอินพุตเข้าที่ขาอินพุตของออปแอมป์เพียงใดขานึง อาจจะเป็นขาอินพุตบวกหรือขาอินพุตลบเท่านั้น สำหรับอีกขาที่เหลือก็ต้องทำการต่อลงกราวด์เพื่อให้ครบวงจร หรือเรียกว่า โหมดขยายความแตกต่างจากการทำงานที่อินพุตด้านเดียว (*Single-ended differential mode*) แสดงดังรูปที่ 1.32 เมื่อออปแอมป์มีสัญญาณป้อนเข้ามาขาใดขานึง โดยมีการป้อนสัญญาณเข้าที่ขาอินพุตบวกและต่อขาอินพุตลบลงกราวด์ สัญญาณที่ขาออกของออปแอมป์ที่ได้จะเป็นสัญญาณอินพุตที่ได้รับการขยายและจะมีมุมร่วมเฟสกัน (in-phase) กับสัญญาณอินพุต ในทางตรงข้าม หากป้อนสัญญาณอินพุตที่ขาอินพุตลบและต่อขาอินพุตบวกลงกราวด์ ดังรูปที่ 1.33 สัญญาณที่ขาออกของออปแอมป์ที่ได้จะเป็นสัญญาณอินพุตที่ได้รับการขยายและจะมีมุมต่างเฟส (out-of-phase) กับสัญญาณอินพุต 180 องศา แต่สำหรับกรณีที่มีการต่อออปแอมป์โดยมีการป้อนสัญญาณอินพุตสองสัญญาณที่เป็นอิสระต่อกันให้กับขาอินพุตทั้งสองขาพร้อมกัน โดยที่ลักษณะของสัญญาณทั้งสองมีความแตกต่างกันแบบกลับเฟส ดังรูปที่ 1.34 จะถูกเรียกว่า โหมดขยายความแตกต่างจากการทำงานที่อินพุตทั้งสองด้าน (*Double-ended differential mode*) และสามารถทำการต่อแบบสัญญาณอินพุตเพียงสัญญาณเดียวแต่ต่อเข้ากับขาอินพุตบวกและขาอินพุตลบของออปแอมป์ได้อีกแบบหนึ่งเช่นกัน แสดงดังรูปที่ 1.35



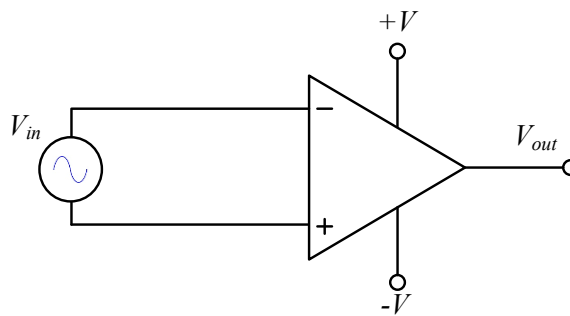
รูปที่ 1.32 โหมดขยายความแตกต่างจากการทำงานที่อินพุตด้านเดียวแบบไม่กลับเฟส (ธนัสต์, 2565)



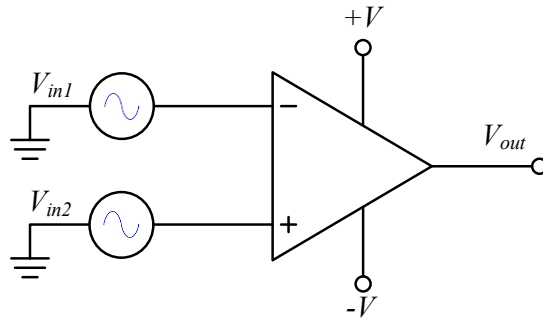
รูปที่ 1.33 โหมตขยายความแตกต่างจากการทำงานที่อินพุตด้านเดียวแบบกลับเฟส (ธনীส์ถ์, 2565)



รูปที่ 1.34 โหมตขยายความแตกต่างจากการทำงานที่อินพุตทั้งองด้านแบบองอินพุต (ธনীส์ถ์, 2565)



รูปที่ 1.35 โหมตขยายความแตกต่างจากการทำงานที่อินพุตทั้งองด้านแบบอินพุตเดี่ยว (ธনীส์ถ์, 2565)



รูปที่ 1.36 โหมดการทำงานแบบร่วม (ธน์สัถ์, 2565)

## 2) โหมดร่วม

การทำงานของออปแอมป์แบบโหมดร่วมนี้ สามารถทำได้โดยการป้อนสัญญาณอินพุตร่วมให้กับขาอินพุตทั้งสองขาของออปแอมป์ แสดงดังรูปที่ 1.36 ซึ่งในทางอุดมคติ จะเห็นได้ว่าสัญญาณอินพุตทั้งสองขาของออปแอมป์ได้รับการขยายเท่ากัน ทำให้เกิดสัญญาณที่มีชั่วตรงข้ามกันเกิดการหักล้างกันของสัญญาณขาอินพุตลบและขาอินพุตบวก ดังนั้นเอาต์พุตของสัญญาณ จึงมีค่าเท่ากับศูนย์โวลต์ แต่ในทางปฏิบัติยังมีสัญญาณเอาต์พุตเหลืออยู่เล็กน้อย เรียกว่า *สัญญาณโหมดร่วม* ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับออปแอมป์ค่าหนึ่ง จะขอกกล่าวในหัวข้อถัดไป

### 1.5.4 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องของออปแอมป์

เนื่องจากโครงสร้างภายในของตัวออปแอมป์ประกอบไปด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จำนวนมาก เช่น ทรานซิสเตอร์ ไดโอด ตัวต้านทาน เป็นต้น ทำให้ในทางปฏิบัติ เมื่อนำออปแอมป์มาใช้งาน ส่งผลให้เกิดค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง ที่เกิดขึ้นภายในวงจรของตัวออปแอมป์เอง ซึ่งทำให้ออปแอมป์มีความไม่เป็นอุดมคติ อีกทั้งอาจจะสร้างปัญหาขณะนำไปใช้งานจริง โดยเมื่อนำไปใช้งานก็จะมีผลทำให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าผิดพลาด และมีผลกระทบอย่างมากถ้าเป็นวงจรที่ใช้สำหรับสัญญาณขนาดเล็กและต้องการความเที่ยงตรงสูง แต่ก็สามารถแก้ไขหรือลดค่าดังกล่าวได้โดยอาศัยการออกแบบวงจรเพิ่มเติม ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องที่สำคัญมีดังนี้

#### 1) ค่าอัตราส่วนการขจัดโหมดร่วม

จากคุณสมบัติของออปแอมป์ที่มีอัตราขยายสัญญาณสูง เมื่อมีการต่อการทำงานแบบโหมดขยายความแตกต่าง แต่ในกรณีที่ออปแอมป์มีการทำงานเป็นแบบโหมดร่วม อัตราขยายจากสัญญาณเอาต์พุตของการทำงานของออปแอมป์ที่มีค่าอยู่บ้างเล็กน้อย ซึ่งจะได้มีค่าเท่ากับศูนย์ดังได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 1.5.3 ดังนั้น ในขณะที่ออปแอมป์ทำงานแบบโหมดขยายความแตกต่างจะต้องมีสัญญาณโหมดร่วมปนอยู่กับสัญญาณเอาต์พุตด้วย ทำให้ค่าสัญญาณเอาต์พุตที่ได้ไม่เป็นไปตามความต้องการ จึงทำให้การออกแบบวงจรภายในออปแอมป์เพื่อให้ได้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับค่าอุดมคติมากที่สุด จึงมีความจำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงการขจัดสัญญาณโหมดร่วมให้มีค่าน้อยที่สุด

เรียกว่า อัตราส่วนการขจัดโหมตร่วม เป็นค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของออปแอมป์ โดยในขณะที่ยออปแอมป์ทำงานแบบโหมคขยายความแตกต่างแบบลูปเปิด จะต้องมียุทธศาสตร์โหมตร่วมปะปนอยู่กับสัญญาณเอาต์พุตด้วย ลักษณะเช่นนี้สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จึงไม่เป็นไปตามความต้องการ ดังนั้นการออกแบบวงจรภายในออปแอมป์จึงพยายามขจัดสัญญาณโหมตร่วมดังกล่าว ให้มีค่าน้อยที่สุดสามารถหาค่าอัตราส่วนการขจัดโหมตร่วมได้จาก

$$CMRR = \frac{A_{ol}}{A_{cm}} \tag{1.12}$$

เมื่อ  $A_{ol}$  คือ ค่าอัตราขยายความแตกต่างแรงดันแบบลูปเปิดและ  $A_{cm}$  คือ ค่าอัตราขยายสัญญาณโหมตร่วม

ค่าอัตราขยายความแตกต่างแรงดันแบบลูปเปิดของออปแอมป์ คือ ค่าอัตราขยายแรงดันที่เกิดขึ้นภายในตัวออปแอมป์จากอัตราส่วนของแรงดันเอาต์พุตไปยังอินพุตในขณะที่ยังไม่ได้ทำการต่อโหลด อาจมีค่าสูงถึง 200,000 เท่า (Richard, 2000) สามารถเรียกอีกอย่างว่า อัตราขยายแรงดันสัญญาณขนาดใหญ่ (Large-signal voltage gain) สำหรับการออกแบบวงจรออปแอมป์ที่ดีนั้น ต้องทำการออกแบบให้ค่าอัตราส่วนการขจัดโหมตร่วมมีค่าสูงที่สุดเท่าที่จะทำได้นั้นแสดงว่า ต้องออกแบบให้ค่าอัตราขยายความแตกต่างแรงดันแบบลูปเปิดมีค่าสูง และค่าอัตราขยายสัญญาณโหมตร่วมมีค่าต่ำ จากสมการที่ (1.12) ค่าของ  $CMRR$  สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ เดซิเบล (Decibels:  $dB$ ) ได้คือ

$$CMRR = 20 \log \left( \frac{A_{ol}}{A_{cm}} \right) \tag{1.13}$$

**ตัวอย่างที่ 1.1**

จงคำนวณหาค่าอัตราส่วนการขจัดโหมตร่วม เมื่อออปแอมป์มีค่าอัตราขยายสัญญาณโหมตร่วมเท่ากับ 0.5 เท่า และค่าอัตราขยายความแตกต่างแรงดันแบบลูปเปิด เท่ากับ 50,000 เท่า

วิธีทำ จากโจทย์

ค่าอัตราขยายความแตกต่างแรงดันแบบลูปเปิด หรือ  $A_{ol}$  มีค่าเท่ากับ 50,000 เท่า

ค่าอัตราขยายสัญญาณโหมตร่วม หรือ  $A_{cm}$  มีค่า เท่ากับ 0.5 เท่า

ดังนั้น 
$$CMRR = \frac{A_{ol}}{A_{cm}} = \frac{50,000}{0.5} = 100,000$$

ตอบ ค่าของค่าอัตราส่วนการขจัดโหมตร่วม หรือ  $CMRR$  เท่ากับ 100,000 เท่า



## 2) ค่าแรงดันออฟเซตที่อินพุต

ค่าแรงดันออฟเซตที่อินพุต คือ ค่าความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่เกิดขึ้นระหว่างการป้อนสัญญาณอินพุตให้กับออปแอมป์โหมตขยายความแตกต่าง ซึ่งเกิดจากการไม่เข้ากันระหว่างขาเบสและขาอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์ของวงจรถยายความแตกต่างที่อยู่ภายในวงจรรวมอินพุตของตัวออปแอมป์ หากพิจารณาออปแอมป์อุดมคตินั้น เมื่อไม่มีการจ่ายค่าแรงดันใด ๆ เข้าสู่ขาอินพุตทั้งสองขา ที่ขาเอาต์พุตของวงจรถยายความแตกต่างก็ไม่มีค่าแรงดันใด ๆ ออกเป็นปกติ หรือค่าแรงดันออฟเซตที่อินพุตเท่ากับศูนย์ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาถึงออปแอมป์ในทางปฏิบัติ หากทำการต่อออปแอมป์แบบโหมตขยายความแตกต่างนั้น จะมีค่าแรงดันออฟเซตที่อินพุตเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย มีค่าไม่เกิน  $2\text{ mV}$  ทั้งนี้การปรับเพื่อลดค่าแรงดันออฟเซตที่อินพุต สามารถทำได้ 2 วิธี คือ ใช้วงจรภายในของออปแอมป์เองโดยต่ออุปกรณ์ปรับเข้ากับขาอินพุตของออปแอมป์ และอีกวิธีคือ ทำการป้อนแรงดันจากภายนอกเข้าไปเพื่อลบล้างผลของแรงดันออฟเซตนี้ แม้ว่าวิธีการนี้จะสามารถลดผลของแรงดันที่เกิดขึ้นไม่ให้ปรากฏที่เอาต์พุตได้ก็จริง แต่ก็ไม่สามารถลดจนให้แรงดันเหลือเท่ากับศูนย์โวลต์ได้

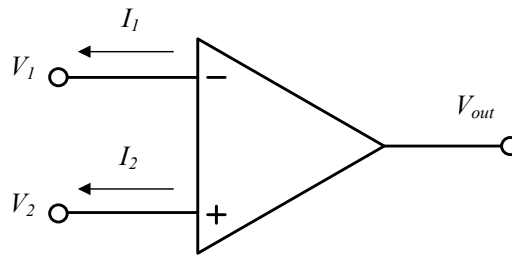
## 3) ค่ากระแสไบแอสทางอินพุต

จากพื้นฐานของโครงสร้างภายในโดยส่วนใหญ่ของออปแอมป์ คือ วงจรถยายความแตกต่างบนพื้นฐานของทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์ ดังนั้น ค่ากระแสที่ไหลเข้าหรือออกจากขาอินพุตลบหรือขาอินพุตบวก คือ ค่ากระแสเบสของทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์นั่นเอง โดยทิศทางการไหลเข้าหรือไหลออกจากออปแอมป์จะเกิดจากชนิดของทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์ ที่นำมาใช้สร้างเป็นวงจรถยายภายในตัวออปแอมป์ แต่โดยส่วนใหญ่แล้ว จะเป็นกระแสไหลเข้า ค่าดังกล่าวเรียกว่า *ค่ากระแสไบแอสทางอินพุต* ซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับค่าความต้านทานอินพุตของออปแอมป์ สามารถหาค่าได้จาก

$$I_{bias} = \frac{I_1 + I_2}{2} \quad (1.14)$$

เมื่อ  $I_1$  คือ ค่ากระแสไบแอสของขาอินพุตลบ และ  $I_2$  คือ ค่ากระแสไบแอสของขาอินพุตบวก

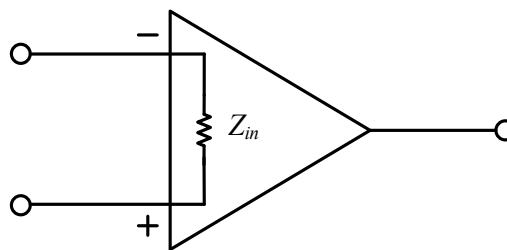
จะสังเกตได้ว่า ค่ากระแสไบแอสทางอินพุต ในสมการที่ (1.14) คือ ค่าเฉลี่ยของกระแสที่เกิดขึ้นที่ขาอินพุตของออปแอมป์ทั้งสองขา แสดงได้ดังรูปที่ 1.37



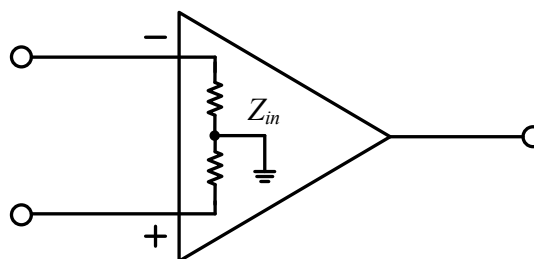
รูปที่ 1.37 ค่ากระแสไบแอสทางอินพุต (ธันส์ถ์, 2565)

4) ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า

การพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของออปแอมป์ สามารถพิจารณาจากโหมดการทำงานของออปแอมป์ทั้งสองโหมด คือ โหมดขยายความแตกต่างและโหมดร่วม ในกรณีของการพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของออปแอมป์สำหรับโหมดขยายความต่างนั้น คือ ค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นระหว่างขาอินพุตลบและขาอินพุตบวก แสดงดังรูปที่ 1.38



รูปที่ 1.38 ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้ากรณีโหมดขยายความแตกต่าง (ธันส์ถ์, 2565)



รูปที่ 1.39 ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้ากรณีโหมดร่วม (ธันส์ถ์, 2565)

ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าทั้งหมดที่เกิดขึ้น ทำให้เกิดค่ากระแสไบแอสไหลผ่านตัวออปแอมป์แล้วทำให้ค่าแรงดันที่ขาเอาต์พุตของวงจรของโหมตขยายความแตกต่างเกิดการเปลี่ยนแปลงไป แต่ในกรณีของค่าอิมพีแดนซ์ในขณะโหมตร่วมนั้น คือ ค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้วของขาอินพุตลบและขาอินพุตบวกของออปแอมป์ต่อลงกราวด์ร่วมแสดงดังรูปที่ 1.39 ทำให้เกิดค่ากระแสไบแอสไหลผ่านตัวออปแอมป์แล้วส่งผลให้ค่าแรงดันที่ขาเอาต์พุตของวงจรของโหมตร่วมมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม

### 5) ค่ากระแสออฟเซตทางอินพุต

สำหรับในทางอุดมคติ ค่ากระแสอินพุตของออปแอมป์จะมีค่าที่เท่ากัน นั่นทำให้ค่ากระแสอินพุตเท่ากับศูนย์ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงออปแอมป์ในทางปฏิบัติ ค่าดังกล่าวที่ได้จะมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ซึ่งเกิดจากค่าความแตกต่างของกระแสที่เกิดขึ้นที่ขาอินพุตของออปแอมป์ ความแตกต่างของกระแสทั้งสองนี้ เรียกว่า *ค่ากระแสออฟเซตทางอินพุตของออปแอมป์* หากค่าได้จากค่าสัมบูรณ์ของค่าความแตกต่างของกระแสที่เกิดขึ้นที่ขาอินพุตบวกและขาอินพุตลบ สามารถเขียนได้เป็น

$$I_{OS} = |I_1 - I_2| \quad (1.15)$$

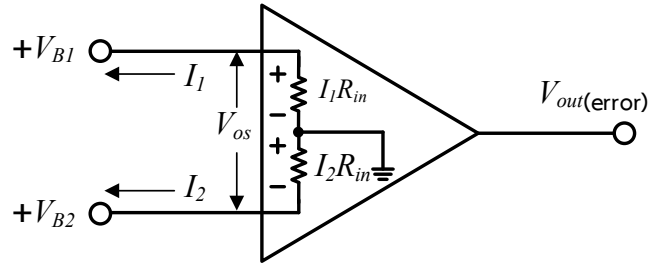
เมื่อ  $I_1$  คือ ค่ากระแสขาอินพุตบวก และ  $I_2$  คือ ค่ากระแสขาอินพุตลบ ซึ่งโดยปกติในทางปฏิบัติ ค่าขนาดของกระแสออฟเซตทางอินพุตที่เกิดขึ้นนี้ มีค่าน้อยกว่าค่ากระแสไบแอสประมาณ 10 เท่า ดังนั้น สำหรับการประยุกต์ใช้งานออปแอมป์จึงไม่ต้องคำนึงถึงค่านี้อย่างไรก็ดี ค่าอัตราขยายที่สูงและค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าที่สูงของออปแอมป์จะทำให้เกิดค่ากระแสออฟเซตทางอินพุตได้เพียงเล็กน้อย สาเหตุมาจากค่าความแตกต่างของกระแสที่ไหลผ่านค่าความต้านทานภายในของออปแอมป์ โดยทำให้เกิดเป็นค่าแรงดันออฟเซตขึ้น แสดงได้ดังรูปที่ 1.40 มีผลทำให้แรงดันเอาต์พุตมีขนาดเล็กลงไปเพียงเล็กน้อย ค่าแรงดันออฟเซตสามารถเขียนเป็นสมการได้คือ

$$V_{OS} = I_1 R_{in} - I_2 R_{in} = (I_1 - I_2) R_{in} \quad (1.16)$$

หรือ

$$V_{OS} = I_{OS} R_{in} \quad (1.17)$$

เมื่อ  $R_{in}$  คือ ค่าความต้านทานภายในขาอินพุตบวกและขาอินพุตลบของออปแอมป์



รูปที่ 1.40 การเกิดแรงดันออฟเซต (ธน์สัถ, 2565)

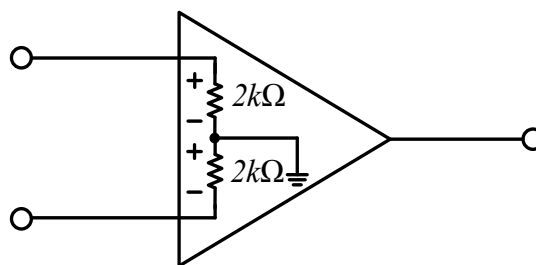
ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากค่ากระแสออฟเซตทางอินพุตเพียงเล็กน้อยนี้ จะถูกขยายให้สูงขึ้นจากอัตราขยายของออปแอมป์ ทำให้สมการที่ (1.17) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$V_{OUT(error)} = A_v I_{OS} R_{in} \tag{1.18}$$

ค่าแรงดันเอาต์พุต  $V_{out}$  ในสมการที่ (1.18) แสดงให้เห็นถึงค่าแรงดันที่เกิดความผิดพลาดในทางปฏิบัติจากค่ากระแสอินพุตออฟเซตที่มีความสัมพันธ์กัน โดยสาเหตุเกิดจากค่าอุณหภูมิที่ส่งผลต่อการเกิดการเปลี่ยนแปลงค่า โดยจะทำให้เกิดค่ากระแสอินพุตออฟเซตเท่ากับ  $0.5 \text{ nA}$  ต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียส

**ตัวอย่างที่ 1.2**

จากรูป จงคำนวณหาค่าแรงดันออฟเซต เมื่อ  $I_1 = 3 \text{ nA}$  และ  $I_2 = 1 \text{ nA}$



(ธน์สัถ, 2565)

**วิธีทำ** จากโจทย์ต้องการคำนวณหาค่าแรงดันออฟเซต ซึ่งก็คือ สมการที่ (1.16) และจากโจทย์ได้กำหนดค่า  $I_1$  และ  $I_2$  มา สำหรับค่าความต้านทานภายใน  $R_{in}$  จากรูป มีค่าเท่ากับ  $2 \text{ k}\Omega$  ดังนั้น

ค่าแรงดันออฟเซต สามารถหาค่าได้คือ

$$\begin{aligned}
 V_{OS} &= (I_1 - I_2)R_{in} \\
 V_{OS} &= (3nA - 1nA) \times (2k\Omega) \\
 &= (2nA) \times (2k\Omega)
 \end{aligned}$$

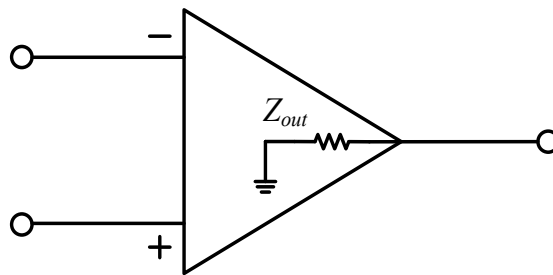
ดังนั้น

$$V_{OS} = 4 \mu V$$

**ตอบ** ค่าแรงดันออฟเซต เท่ากับ  $4 \mu V$

#### 6) ค่าอิมพีแดนซ์ด้านออก

ค่าอิมพีแดนซ์ด้านออกหรือค่าความต้านทานเอาต์พุตของออปแอมป์ แสดงดังรูปที่ 1.42 สำหรับในทางปฏิบัติ ค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์จะมีค่าน้อยมาก ประมาณ 10 – 100 โอห์ม



รูปที่ 1.41 อิมพีแดนซ์ด้านออกของออปแอมป์ (ธันส์, 2565)

#### 7) ค่าการแกว่งของแรงดันเอาต์พุตสูงสุด

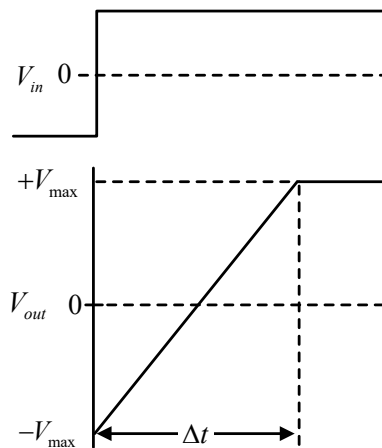
จากหัวข้อก่อนหน้านี้ ได้กล่าวถึงออปแอมป์ในขณะที่ยังไม่ป้อนค่าใด ๆ เข้าสู่ขาอินพุต ค่าแรงดันที่ขาเอาต์พุตจะมีค่าเท่ากับศูนย์โวลต์ หรือที่เรียกว่า *ค่าแรงดันเอาต์พุตสงบ (Quiescent output voltage)* แต่หากมีสัญญาณอินพุตใด ๆ ป้อนเข้าสู่ขาอินพุตของออปแอมป์ ค่าสัญญาณแรงดันเอาต์พุตที่ได้จะมีค่าจำกัดไม่เกินค่าไฟเลี้ยง ( $\pm V_{CC}$ ) ที่จ่ายไปแอสกับออปแอมป์ตัวนั้น ๆ เรียกว่า *ค่าการแกว่งของแรงดันเอาต์พุตสูงสุด* อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติ ค่าสัญญาณแรงดันเอาต์พุตขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานที่นำมาต่อโหลดกับวงจรด้วย

#### 8) ค่าอัตราสัณฐาน

ค่าอัตราสัณฐาน หมายถึง ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันเอาต์พุตสูงสุดของออปแอมป์เมื่อเทียบกับเวลา ซึ่งออปแอมป์ที่นำมาใช้งานแต่ละเบอร์จะต้องพิจารณาถึงค่านี้ด้วย เพื่อให้ทราบถึงความผิดเพี้ยนหรือสามารถลดความผิดเพี้ยนของสัญญาณได้ ค่าอัตราสัณฐานมีผลต่อการตอบสนองของทางความถี่ที่มีขนาดความถี่ที่สูง ซึ่งเกิดขึ้นที่ภาคขยายสัญญาณของวงจรภายในออปแอมป์สามารถหาค่าได้จากสมการ

$$Slew\ rate = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta t} \tag{1.19}$$

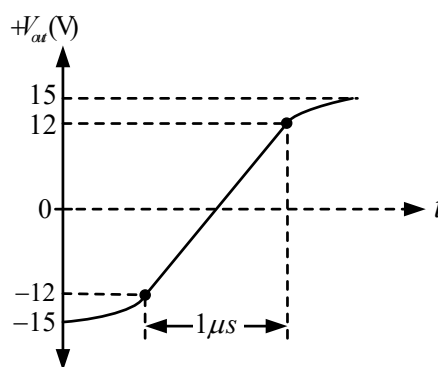
เมื่อ  $\Delta V_{out} = +V_{max} - (-V_{max})$  ซึ่งก็คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุตที่เป็นเชิงเส้นขณะทำการบ้อนสัญญาณหนึ่งหน่วยให้กับขาอินพุตของออปแอมป์ที่ระดับสูงสุดและต่ำสุด และ  $\Delta t$  คือ ค่าช่วงเวลาของระดับค่าแรงดันเอาต์พุตที่มีการเปลี่ยนแปลงเป็นเชิงเส้นจาก  $-V_{max}$  ไปจนถึง  $+V_{max}$  ขณะทำการบ้อนสัญญาณหนึ่งหน่วยให้กับขาอินพุตของออปแอมป์ แสดงดังรูปที่ 1.42 ซึ่งค่าอัตราสลับ มีหน่วยคือ โวลต์ต่อไมโครวินาที ( $V/\mu s$ )



รูปที่ 1.42 การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันเอาต์พุตสูงสุดของออปแอมป์เมื่อเทียบกับเวลาขณะบ้อนสัญญาณอินพุตหนึ่งหน่วย (ธน์สัถ์, 2565)

ตัวอย่างที่ 1.3

จากรูป แสดงกราฟการทำงานที่ขาเอาต์พุตของออปแอมป์ เมื่อทำการบ้อนสัญญาณหนึ่งหน่วยจงคำนวณหาอัตราสลับ



(ธน์สัถ์, 2565)

**วิธีทำ** จากโจทย์ต้องการคำนวณหาค่าอัตราสลับ สามารถหาค่าได้จาก สมการที่ (1.19) คือ

$$\text{Slew rate} = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta t}$$

และจากรูป ค่า  $+V_{max}$  มีค่าเท่ากับ  $12 V$  และ  $-V_{max}$  มีค่าเท่ากับ  $-12 V$  ดังนั้น

$$\Delta V_{out} = +V_{max} - (-V_{max})$$

$$\Delta V_{out} = 12 V - (-12 V)$$

$$\Delta V_{out} = 24 V$$

สำหรับค่าอัตราสลับ สามารถหาค่าได้คือ

$$\text{Slew rate} = \frac{24 V}{1 \mu s}$$

ดังนั้น  $\text{Slew rate} = 24 V/\mu s$

**ตอบ** ค่าอัตราสลับ  $24 V/\mu s$

### 1.5.5 การต่อวงจรออปแอมป์พื้นฐานเบื้องต้น

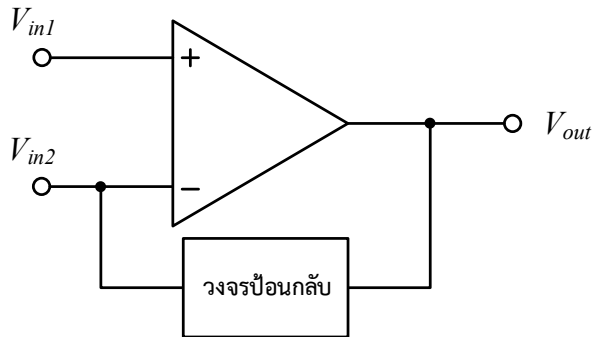
#### 1) การต่อออปแอมป์แบบรูปเปิด

การต่อออปแอมป์แบบรูปเปิด สามารถใช้สัญลักษณ์การต่อออปแอมป์ดังแสดงในรูปที่ 1.29 การต่อออปแอมป์แบบรูปเปิดนี้จะทำให้ค่าอัตราขยายของออปแอมป์มีค่าสูงที่สุด หรือเรียกอีกอย่างว่า การต่อออปแอมป์ที่ให้อัตราขยายสูงสุดขณะรูปเปิด ในขณะที่ค่าความแตกต่างของสัญญาณที่ขาอินพุตบวกและขาอินพุตลบทำให้ค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรมีค่าสูงถึงประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ ของแหล่งจ่ายแรงดันไบแอสที่จ่ายไฟเลี้ยงให้กับออปแอมป์

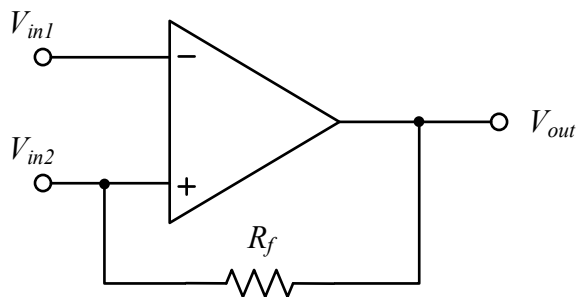
#### 2) การต่อออปแอมป์แบบรูปปิด

การต่อออปแอมป์แบบรูปปิด สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานที่ทำให้วงจรมีเสถียรภาพสูงขึ้น เนื่องจากการใช้การต่อออปแอมป์ที่มีการป้อนกลับของสัญญาณที่ต่อระหว่างขาอินพุตกับขาเอาต์พุตของออปแอมป์ ทำให้สัญญาณเอาต์พุตเองบางส่วนผ่านกระบวนการควบคุมการป้อนกลับ แสดงดังรูปที่ 1.43 โดยส่วนใหญ่กระบวนการควบคุมการป้อนกลับจะอาศัยตัวต้านทาน ดังนั้นการต่อออปแอมป์แบบรูปปิดที่มีการป้อนกลับนี้ สามารถทำการต่อได้ดังแสดงในรูปที่ 1.44 และรูปที่ 1.45 สังเกตได้ว่า รูปที่ 1.44 ขาเอาต์พุตมีการต่อแบบป้อนกลับโดยผ่านตัวต้านทานกับขาอินพุตบวก ส่วนขาอินพุตลบใช้สำหรับป้อนสัญญาณอินพุต สามารถควบคุมอัตราการป้อนกลับได้จากค่าตัวต้านทาน เรียกว่า การต่อออปแอมป์แบบรูปปิดที่มีการป้อนกลับแบบลบ แต่ในกรณีที่ขาเอาต์พุตมีการต่อ

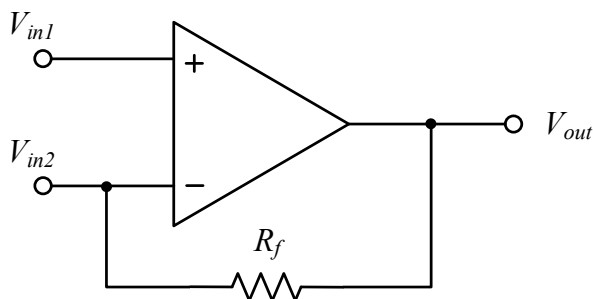
แบบป้อนกลับโดยผ่านตัวต้านทานป้อนกลับไปยังขาอินพุตลบ ส่วนขาอินพุตบวกใช้สำหรับป้อนสัญญาณอินพุต แสดงดังรูปที่ 1.45 นั้น เรียกว่า การต่อออปแอมป์แบบลูปิดที่มีการป้อนกลับแบบลบ และหากทำการต่อแบบลูปิดที่มีการป้อนกลับโดยตรง ดังรูปที่ 1.46 เรียกว่า วงจรอัตราขยายเท่ากับ 1 (Unity gain)



รูปที่ 1.43 กระบวนการการต่อและการทำงานของออปแอมป์แบบลูปิด (ธน์สถ์, 2565)

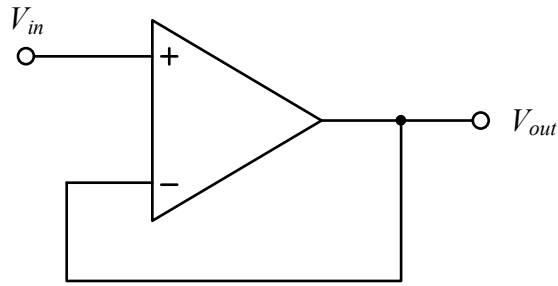


รูปที่ 1.44 การต่อออปแอมป์แบบลูปิดที่มีการป้อนกลับแบบบวก (ธน์สถ์, 2565)



รูปที่ 1.45 การต่อออปแอมป์แบบลูปิดที่มีการป้อนกลับแบบลบ (ธน์สถ์, 2565)



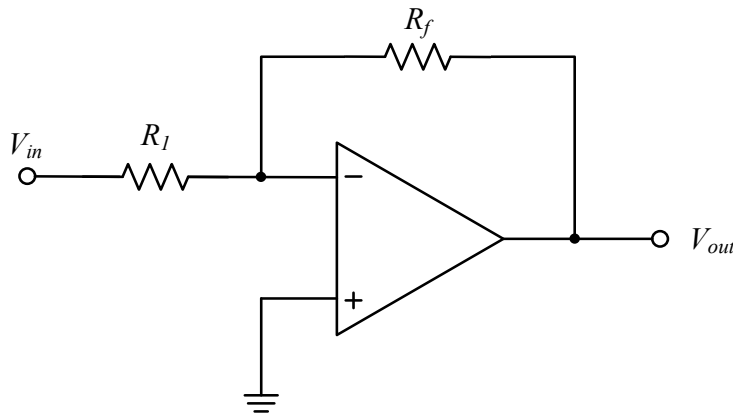


รูปที่ 1.46 การต่อออปแอมป์แบบลูปปิดที่มีอัตราขยายเท่ากับ 1 (ธน์สัถ์, 2565)

### 3) การต่อออปแอมป์สำหรับควบคุมอัตราขยาย

คือ การต่อออปแอมป์ที่มีการป้อนสัญญาณอินพุตผ่านตัวต้านทานอินพุต  $R_1$  โดยมีการป้อนสัญญาณเอาต์พุตกลับมาเป็นอินพุตผ่านตัวต้านทานป้อนกลับ  $R_f$  และอีกขานึงของอินพุตทำการต่อลงกราวด์ แสดงดังรูปที่ 1.47 การต่อออปแอมป์สำหรับควบคุมอัตราขยายนี้สามารถปรับอัตราขยายได้จากอัตราส่วนของตัวต้านทานที่ป้อนกลับกับตัวต้านทานที่ต่อที่ขาอินพุต ทำให้ได้ค่าอัตราขยายแรงดัน ดังสมการคือ

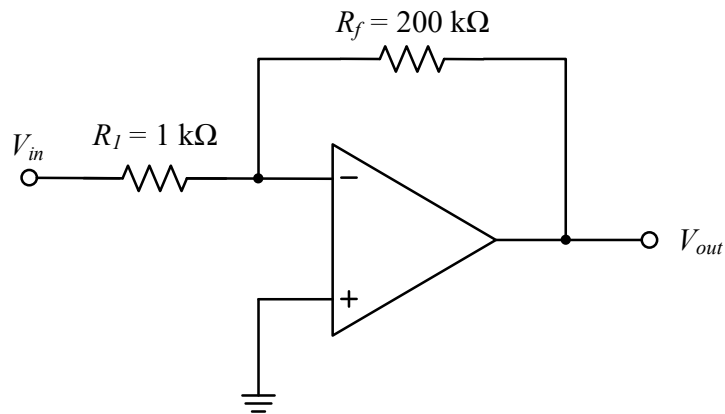
$$A_v = -\frac{R_f}{R_1} \quad (1.20)$$



รูปที่ 1.22 การต่อออปแอมป์สำหรับควบคุมอัตราขยาย (ธน์สัถ์, 2565)

**ตัวอย่างที่ 1.4**

จากวงจรในรูป จงคำนวณหาค่าอัตราขยายของออปแอมป์



(ธน์สร์, 2565)

**วิธีทำ** จากโจทย์ต้องการคำนวณหาค่าอัตราขยายของออปแอมป์ สามารถหาค่าได้จาก

$$V_{out} = -\frac{R_f}{R_1} \times V_{in}$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R_f}{R_1} = A_v$$

$$A_v = -\frac{R_f}{R_1} = -\frac{200 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega}$$

ดังนั้น  $A_v = -200$

**ตอบ** ค่าอัตราขยาย เท่ากับ 200 เท่า และสัญญาณเอาต์พุตต่างเฟสจากสัญญาณอินพุต 180 องศา

**1.6 สรุป**

เทคโนโลยีวงจรรวมได้เริ่มต้นจากหลอดวิทยุ และมีการพัฒนาเป็นวงจรรวมที่สร้างจากทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์ เช่น ไอซีตระกูลเบอร์ 709 และไอซีตระกูลเบอร์ 741 เป็นต้น ซึ่งทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถขยายสัญญาณได้ มีคุณสมบัติในการควบคุมการไหลของกระแส โดยมีการจัดการไบแอสเพื่อให้ทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์สามารถกำหนดกระแสขาเข้าควบคุมกระแสขาออกได้ สร้างขึ้นจากการนำสารกึ่งตัวนำชนิดซิลิคอนหรือเจอร์เมเนียมมาเจือสารให้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพี สามารถแบ่งตามชนิดโครงสร้างได้

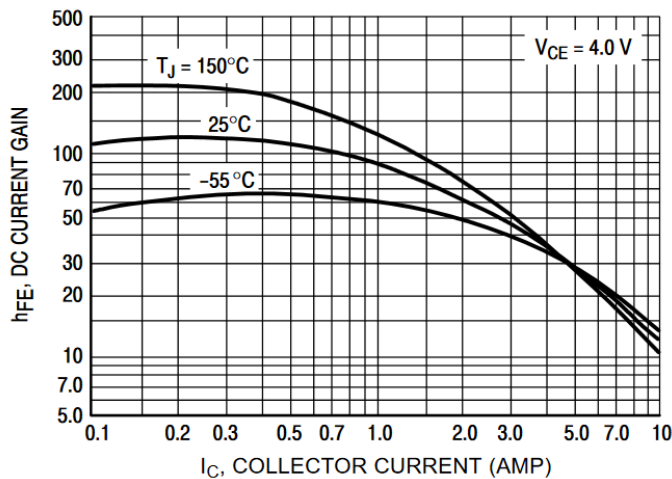
คือ ทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์ชนิดเอ็นพีเอ็นและทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์ชนิดพีเอ็นพี มีขาสำหรับการนำไปต่อใช้งานจำนวน 3 ขา คือ ขาเบส ขาคอลเล็กเตอร์ และขาอิมิตเตอร์ อัตราขยายของทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์สามารถแบ่งออกได้ คือ อัตราขยายเบตา มีค่าประมาณ 20 – 200 เท่า หรือมากกว่า ขึ้นอยู่กับทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์แต่ละเบอร์ที่ผลิตและนำไปใช้งาน เป็นค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญเนื่องจากค่าอัตราขยายเบตามีการเปลี่ยนแปลงหากอุณหภูมิที่รอยต่อของทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์เปลี่ยนไป และอัตราขยายแอลฟา เป็นอีกค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์ โดยปกติจะมีค่าไม่เกิน 1 สำหรับย่านการทำงานของทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์ สามารถแสดงได้ 3 ย่าน คือ ย่านคัตออฟ ย่านอิมิตัว และย่านแอกทิฟ

จากในอดีตที่วงจรรวมมีจำนวนทรานซิสเตอร์ที่บรรจุอยู่บนแผ่นวงจรเดียวกันต่อหนึ่งวงจรมีประมาณ 100 ถึง 1,000 ตัว แต่ในปัจจุบันการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีที่ใช้ผลิตทรานซิสเตอร์ในวงจรรวมมีขนาดเล็กลงมาก จำนวนของทรานซิสเตอร์ในวงจรรวมใด ๆ จึงมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าในทุก ๆ 18 เดือน (Moore, 1965) ทำให้วงจรรวมในปัจจุบันโดยส่วนใหญ่สร้างมาจากมอสทรานซิสเตอร์หรือมอสเฟต ทั้งชนิดพีมอสและชนิดเอ็นมอส มีขาสำหรับการนำไปต่อใช้งานทั้งชนิด 3 ขา คือ ขาซอร์ส ขาเกต และขาเดรน และชนิด 4 ขา คือ ขาซอร์ส ขาเกต ขาเดรน และขาบอดี โดยมอสเฟตมีช่วงการทำงานคือ ช่วงไม่นำกระแส ช่วงอิมิตัว และช่วงเชิงเส้น หรือซิมอสที่นำเอามอสเฟตชนิดพีมอสและชนิดเอ็นมอสมาสร้างอยู่ในวงจรเดียวกัน ซึ่งทำได้โดยการสร้างบ่อเอ็น (n-well) เรียกว่า Si Gate n-well process หรือบ่อพี (p-well) เรียกว่า Si Gate p-well process วงจรรวมที่สร้างจากทั้งมอสเฟตหรือซิมอสสามารถนำมาประยุกต์ใช้สำหรับสร้างเป็นวงจรรวมได้หลายวงจร เนื่องจากมอสเฟตที่ถูกสร้างขึ้นมามีคุณลักษณะที่ใกล้เคียงกับอุดมคติมาก จนกลายเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ได้รับการตอบรับมากที่สุดในการอุตสาหกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งหากทำการเปรียบเทียบระหว่างมอสเฟตกับทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์แล้ว มอสเฟตมีโครงสร้างและขั้นตอนการผลิตที่ไม่ซับซ้อน มีขนาดเล็ก ทำให้มีความจุมากกว่าในกรณีที่พื้นที่บนชิป (Chip) ในวงจรรวมมีขนาดจำกัด มีความต้านทานอินพุตสูง และสัญญาณรบกวนต่ำ ทำให้มอสเฟตเป็นทรานซิสเตอร์ที่ปรากฏอยู่บนวงจรรวมมากที่สุด (จิรยุทธ์, 2553)

ออปแอมป์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทแอกทิฟที่เป็นที่ยอมรับในวงการอิเล็กทรอนิกส์เป็นอย่างมาก สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย และมีความสำคัญสำหรับการออกแบบวงจรแอนะล็อก สามารถนำไปใช้งานในวงจรต่าง ๆ ที่ซับซ้อนและมีประสิทธิภาพค่อนข้างสูง นำไปเป็นวงจรพื้นฐานเพื่อพัฒนาต่อยอดให้เป็นวงจรใหม่ได้ สำหรับการนำไปใช้งานต้องทราบถึงองค์ประกอบพื้นฐานทั้งหมดของออปแอมป์ ทั้งในทางอุดมคติและในทางปฏิบัติ เช่น ค่าอินพุตและเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ ค่าอัตราขยาย โหมดการต่อใช้งาน การต่อออปแอมป์แบบลูปเปิดและลูปปิด เป็นต้น

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 1

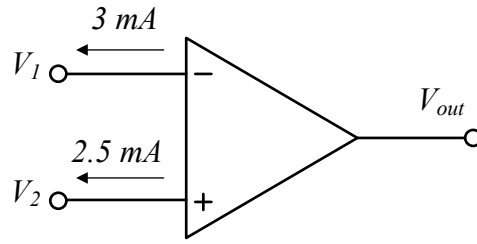
1. จงอธิบายการทำงานของทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์ชนิดเอ็นพีเอ็นโดยใช้ขั้วอิมิตเตอร์เป็นขาเทียบศักย์ทางไฟฟ้าของทรานซิสเตอร์
2. ทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์มีค่ากระแสคอลเล็กเตอร์  $I_C$  เท่ากับ  $20\text{ mA}$  และค่ากระแสอิมิตเตอร์  $I_E$  มีค่าเท่ากับ  $40\text{ mA}$  จงหาค่าอัตราขยายเบตา
3. จากรูป เมื่อค่ากระแสคอลเล็กเตอร์  $I_C$  เท่ากับ  $0.7\text{ A}$  ณ อุณหภูมิ  $25$  องศาเซลเซียส ค่าอัตราขยายเบตาของทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์มีค่าเท่ากับเท่าไร



(On Semiconductor, 2023)

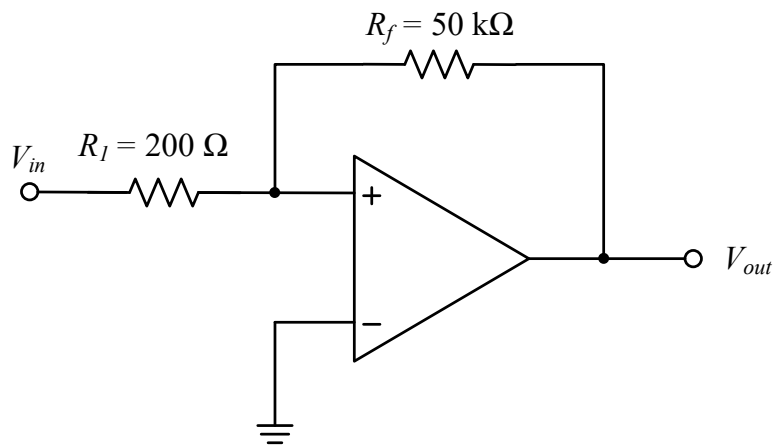
4. ช่วงการทำงานของมอสเฟตมีกี่ช่วง อะไรบ้าง จงอธิบาย
5. จงบอกความแตกต่างระหว่างซีมอสที่สร้างจากบ่อเอ็นและบ่อพี
6. จงยกตัวอย่างพร้อมอธิบายการประยุกต์ใช้งานซีมอสที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นวงจรลอจิกเกต
7. คุณสมบัติเบื้องต้นของอปแอมป์อุดมคติมีอะไรบ้าง
8. โหมดการทำงานของอปแอมป์มีกี่โหมด อะไรบ้าง
9. จงคำนวณหาค่าของค่าอัตราส่วนการขจัดโหมตร่วมในหน่วย  $dB$  เมื่อ ค่าอัตราขยายสัญญาณโหมตร่วม เท่ากับ  $0.3$  เท่า และค่าอัตราขยายความแตกต่างแรงดันแบบลูปเปิด เท่ากับ  $33,000$  เท่า

10. จากรูป จงหาค่ากระแสไบแอส



(ธน์สิทธิ์, 2565)

11. จากวงจรในรูป จงคำนวณหาค่าอัตราขยายของออปแอมป์ เมื่อ  $V_{in} = 1 V$



(ธน์สิทธิ์, 2565)

**บรรณานุกรม**

Christopher S., Judy L. S. (2023). *Fabricating ICs*. Britannica.

Gaensslen, F., Rideout, V., Walker, E. & Walker, J. (1977). Very small MOSFET's for low temperature operation. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 24, 218.

Huijsing, J. (2011). *Operational amplifiers: Theory and design*. Springer.

James, M. F. (2021). *Operational amplifiers & linear integrated circuits: Theory and application* (3rd ed.). Creative Commons.

Moore, G. E. (1965). Cramming more components onto integrated circuits. *Electronics*, 38, 114-117.

- Nonthaputha, T., & Kumngern, M. (2021). CMOS programmable PID controller circuit based analogue switches. *Przeglad Elektrotechniczny*, 7, 35-41.
- Nonthaputha, T., & Kumngern, M. (2021). CMOS single input multiple output universal biquad filter current-mode using only OTAs. *Przeglad Elektrotechniczny*, 11, 64-68.
- Nonthaputha, T., Kumngern, M., & Moungnoul, P. (2016). CMOS D/A converter using current conveyor analogue switches, *International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems*, (pp. 1-4).
- Nonthaputha, T., Kumngern, M. & Thepnarin, N. (2020). A simple and accurate CMOS sample-and-hold circuit using dual output-OTA. *Przeglad Elektrotechniczny*, 10, 163-166.
- On Semiconductor. (2023). 2N3055(NPN) data sheet.  
<https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/2n3055-d.pdf>
- Premont, C., Abouchi, N., Grisel, R. & Chante, J. P. (1998). A current conveyor-based high-frequency analog switch. *IEEE Transactions on Circuits and Systems-I*, 45, 298-300.
- Ramakant, A. G. (2011). *Op-amps and linear integrated circuits* (4th ed.). Prentice Hall International.
- Razavi, B. (2017). *Design of analog CMOS integrated circuits* (2nd ed.). McGraw-Hill Education.
- Richard, C. J. (2000). *Microelectronic circuit design* (4th ed.). McGraw-Hill.
- Sah, T. (1964). Characteristics of the metal-oxide-semiconductor transistor. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 11, 324-325.
- Sergio, F. (2003). *Design with operational amplifiers and analog integrated circuits*. McGraw Hill Higher Education.
- Shilov, A. (2022). *TSMC roadmap update: N3E in 2024, N2 in 2026, major changes incoming*. Anandtech.
- Shilov, A. (2023). *Samsung update foundry roadmap: 2nm in 2025, 1.4nm in 2027*. Anandtech.
- Stojcev, M., Toki, T. & Milentijevi, I. (2005). The limits of semiconductor technology and oncoming challenges in computer microarchitectures and architectures. *Facta universitatis - series: Electronics and Energetics*, 17, 285-312. 10.2298/FUEE0403285S.

Texas Instruments. (2021). UA741 data sheet.

[https://www.ti.com/product/UA741?utm\\_source=supplyframe&utm\\_medium=SEP&utm\\_campaign=not\\_alldatasheet&DCM=yes&dclid=CMmX8u\\_6ovgCFWGHswUdosAKtQ#params](https://www.ti.com/product/UA741?utm_source=supplyframe&utm_medium=SEP&utm_campaign=not_alldatasheet&DCM=yes&dclid=CMmX8u_6ovgCFWGHswUdosAKtQ#params)

Thomas, L. F. (2012). *Electronic devices: Electron flow version* (9th ed.). Prentice Hall International.

จิรยุทธ์ มหัทธนกุล. (2553). *การออกแบบวงจรรวมแอนะล็อก*. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร. พิมพ์ครั้งที่ 3.

มนตรี คำเงิน. (2558). *การออกแบบวงจรมอส*. คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

มนตรี ศิริปรัชญานันท์ และ ธนุศักดิ์ อรุณไพโร. (2558). *ออปแอมป์และลิเนียร์ไอซี*. ซีเอ็ดยูเคชั่น.

วรากร เกษมสุวรรณ. (2553). *การวิเคราะห์วงจรซีมอสแบบแอนะล็อก*. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. พิมพ์ครั้งที่ 2.

## บทที่ 2

### วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ

จากบทที่ 1 ได้กล่าวถึงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่นำมาใช้งานเป็นอุปกรณ์หลักซึ่งเป็นที่นิยมและหาซื้อได้ง่ายตามท้องตลาดร้านขายอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (ธนนต์, 2557) คือ *ออปแอมป์* เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งนำไปเป็นวงจรพื้นฐานเพื่อพัฒนาต่อยอดให้เป็นวงจรใหม่ได้ บทนี้จึงนำเสนอวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ (Comparator) ซึ่งเป็นเป็นวงจรแอนะล็อกพื้นฐานที่ใช้การเปรียบเทียบค่าสัญญาณสองสัญญาณโดยอาศัยคุณสมบัติของออปแอมป์ที่มีการต่อสัญญาณแบบลูปเปิด เมื่อมีสัญญาณแรงดันสองสัญญาณที่ต่อเข้าที่ขาอินพุตบวกและขาอินพุตลบ ค่าสัญญาณแรงดันเอาต์พุตของออปแอมป์ที่ทำการต่อเป็นวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ จะสามารถบอกได้ว่าสัญญาณที่ขาอินพุตใดของออปแอมป์มีค่ามากกว่าหรือมีค่าน้อยกว่า (มนตรีและธนุศักดิ์, 2558) ในทางปฏิบัติค่าแรงดันเอาต์พุตสูงสุดจะถูกจำกัด ซึ่งจะมีค่าไม่เกินค่าแรงดันไบแอสที่จ่ายให้กับออปแอมป์ (ส่วนใหญ่จะมีค่าน้อยกว่าค่าแรงดันไบแอสของออปแอมป์ ประมาณ 1 โวลต์ ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของออปแอมป์แต่ละตัวที่นำมาใช้งาน) (Thomas, 2012) โดยมากวงจรเปรียบเทียบสัญญาณเป็นวงจรที่มีอินพุตเป็นสัญญาณแอนะล็อก และสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะเป็นสัญญาณดิจิทัล ซึ่งในบทนี้ จะกล่าวถึงการประยุกต์ใช้งานวงจรรวมแอนะล็อก สำหรับวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ โดยใช้ออปแอมป์ UA741 ที่ใช้งานอย่างแพร่หลายนำมาใช้เป็นอุปกรณ์หลักมาต่อใช้งานของวงจรในแต่ละหัวข้อ เพื่อให้ทางผู้เรียนได้มองเห็นภาพรวมของการต่อวงจรอย่างถูกต้องแท้จริง

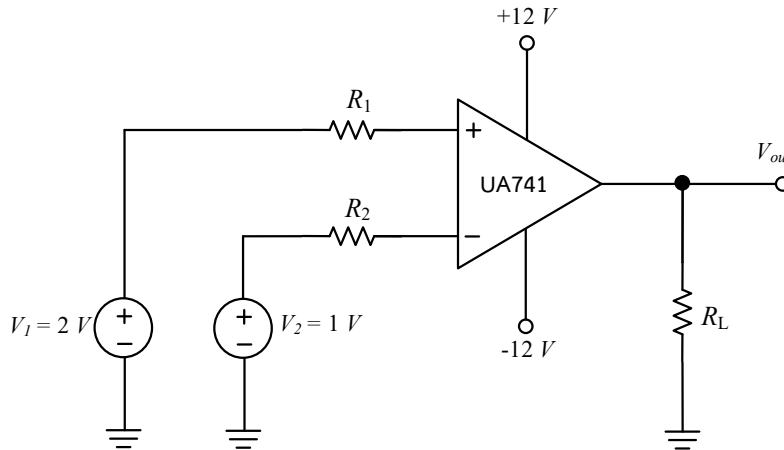
#### 2.1 วงจรเปรียบเทียบแรงดัน

การประยุกต์ใช้งานออปแอมป์ สำหรับวงจรเปรียบเทียบแรงดันนั้น จะอาศัยการต่อแรงดันเข้าที่ขาอินพุตทั้งสองขาของออปแอมป์ เมื่อแรงดันที่ขาอินพุตลบมีค่าต่ำกว่าแรงดันที่ขาอินพุตบวก แสดงดังรูปที่ 2.1 ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จะมีค่าเป็นบวก ดังแสดงในรูปที่ 2.2 แต่ในกรณีตรงข้ามกัน หากแรงดันที่ขาอินพุตลบมีค่าสูงกว่าแรงดันที่ขาอินพุตบวก แสดงดังรูปที่ 2.3 ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จะมีค่าเป็นลบแสดงดังรูปที่ 2.4 ทั้งนี้ขนาดของแรงดันเอาต์พุตที่ได้ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของออปแอมป์แต่ละตัว (Richard, 2000)

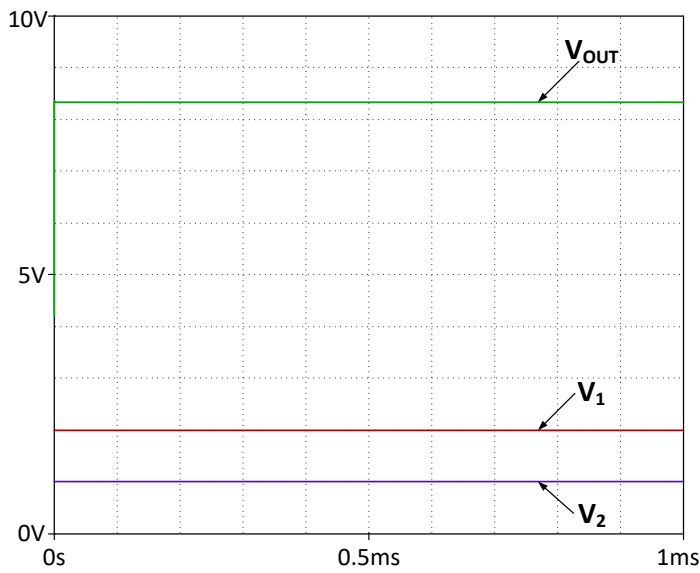
ตัวอย่างการต่อใช้งานซึ่งเป็นวงจรเปรียบเทียบค่าแรงดันสำหรับแรงดันเอาต์พุตบวก แสดงดังรูปที่ 2.1 นั้น สามารถอธิบายได้โดยค่าแรงดันที่ป้อนเข้าขาอินพุตของออปแอมป์ มีความแตกต่างกัน คือ ค่าแรงดันที่ต่อเข้าขาอินพุตบวกมีค่าเท่ากับ 2 โวลต์ ค่าแรงดันที่ต่อเข้าขาอินพุตลบเท่ากับ 1 โวลต์ และทำการจ่ายค่าแรงดันไบแอสบวกและไบแอสลบให้กับออปแอมป์ เพื่อให้ออปแอมป์ทำงาน ดังนั้น จากคุณสมบัติของออปแอมป์ในสมการที่ (1.11) นั่นคือ ค่าแรงดันที่ขาอินพุตบวกมีค่าเป็นบวกมากกว่าขาอินพุตลบ ทำให้ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จะมีค่าเท่ากับแรงดันบวกที่ผ่านอัตราขยายจากออปแอมป์ และจากรูปที่ 2.3 เมื่อค่าแรงดันที่ต่อเข้าขาอินพุตบวกมีค่าเท่ากับ 1 โวลต์ ค่าแรงดัน



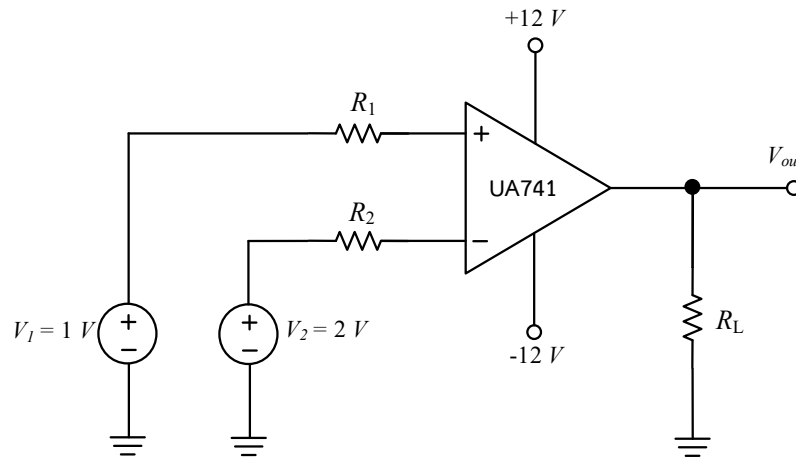
ที่ต่อเข้าขาอินพุตลบ เท่ากับ 2 โวลต์ ในกรณีนี้จะเห็นได้ว่า ค่าแรงดันที่ขาอินพุตลบมีค่าเป็นบวกมากกว่า ทำให้ค่าแรงดันเอาต์พุตของออปแอมป์ที่ได้จะมีค่าเท่ากับแรงดันลบที่ได้รับการขยายจากตัวออปแอมป์ไปโดยปริยาย



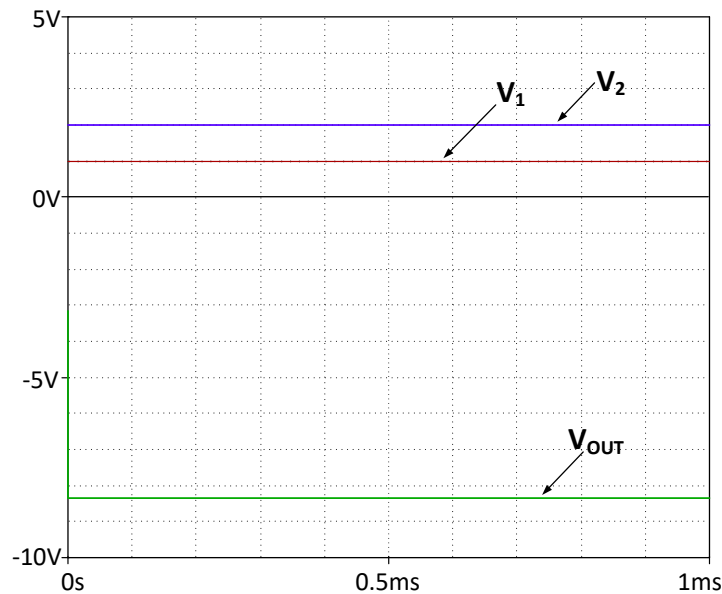
รูปที่ 2.1 วงจรเปรียบเทียบค่าแรงดันสำหรับแรงดันเอาต์พุตบวก (ธน์สัถ์, 2565)



รูปที่ 2.2 ค่าแรงดันเอาต์พุตบวกที่ได้จากวงจรในรูปที่ 2.1 (ธน์สัถ์, 2565)



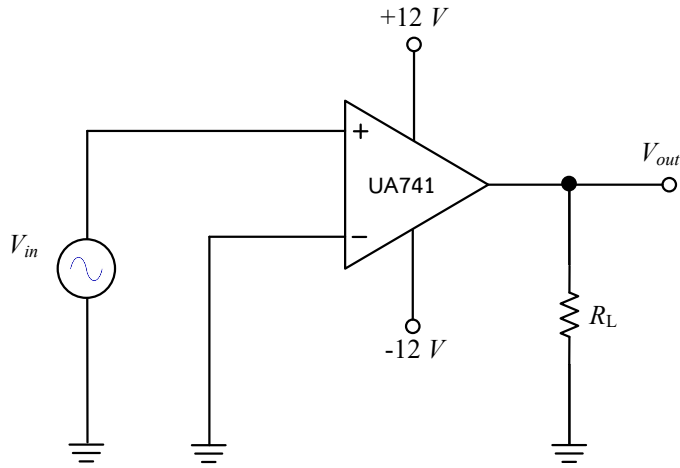
รูปที่ 2.3 วงจรเปรียบเทียบค่าแรงดันสำหรับแรงดันเอาต์พุตลบ (ธนส์ถ์, 2565)



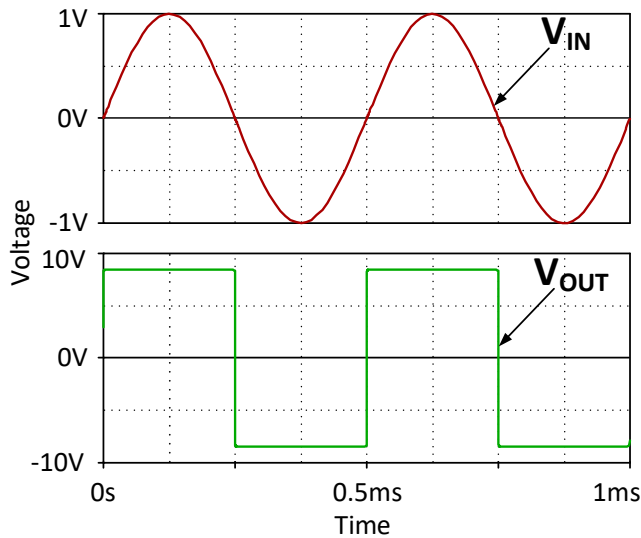
รูปที่ 2.4 ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากวงจรในรูปที่ 2.3 (ธนส์ถ์, 2565)

## 2.2 วงจรตรวจระดับสัญญาณค่าเข้าใกล้ศูนย์

วงจรตรวจระดับสัญญาณค่าเข้าใกล้ศูนย์ เป็นวงจรเปรียบเทียบแรงดันอีกประเภท ที่ใช้ออปแอมป์เป็นตัวตรวจจับสัญญาณ ในขณะที่สัญญาณอินพุตที่ป้อนเข้าขาใดขาหนึ่งของออปแอมป์เป็นสัญญาณไซน์ (Sinusoidal signal) และใช้ขาอินพุตของออปแอมป์อีกขาต่อลงกราวด์เพื่อใช้เป็นการเปรียบเทียบแรงดันอ้างอิง สัญญาณเอาต์พุตที่ได้ของวงจรนี้ จะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อแรงดันอินพุตเข้าใกล้ค่าระดับศูนย์จากการเปรียบเทียบแรงดันอ้างอิง (Sergio, 2003)

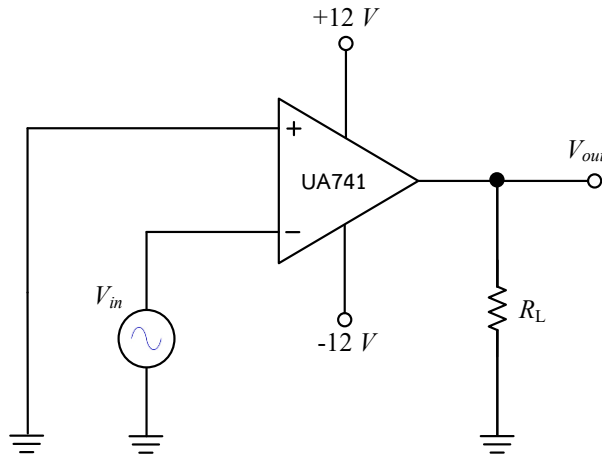


รูปที่ 2.5 วงจรตรวจระดับสัญญาณค่าเข้าใกล้ศูนย์แบบไม่กลับเฟส (ธนส์ถ์, 2565)

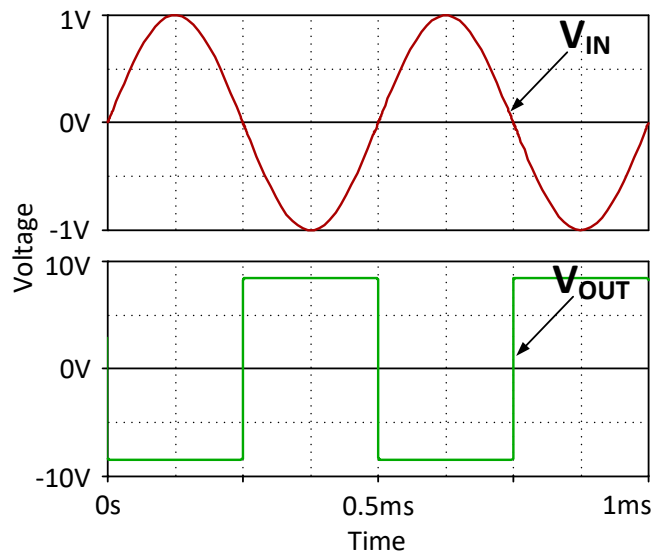


รูปที่ 2.6 สัญญาณแรงดันอินพุตและเอาต์พุตที่ได้จากวงจรในรูปที่ 2.5 (ธนส์ถ์, 2565)

จากรูปที่ 2.5 แสดงให้เห็นถึงการประยุกต์ใช้งานออปแอมป์สำหรับวงจรตรวจระดับสัญญาณค่าเข้าใกล้ศูนย์ โดยการต่อสัญญาณไซน์เข้าที่ขาอินพุตบวก และขาอินพุตลบต่อลงกราวด์เพื่อใช้สำหรับเป็นแรงดันอ้างอิงที่มีค่าแรงดันเท่ากับศูนย์ สำหรับรูปที่ 2.6 แสดงสัญญาณแรงดันอินพุตและเอาต์พุตที่ได้จากวงจรในรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าค่าสัญญาณเอาต์พุตที่ได้มีเฟสเท่ากับสัญญาณอินพุต เนื่องด้วยวงจรมีการต่อสัญญาณเข้าที่ขาอินพุตบวกของออปแอมป์ ดังนั้น วงจรตรวจระดับสัญญาณค่าเข้าใกล้ศูนย์ในรูปที่ 2.5 สามารถเรียกอีกอย่างหนึ่งได้ว่า *วงจรออปแอมป์ตรวจจับสัญญาณไซน์แบบไม่กลับเฟส*



รูปที่ 2.7 วงจรตรวจระดับสัญญาณค่าเข้าใกล้ศูนย์แบบกลับเฟส (ธันส์ถ์, 2565)



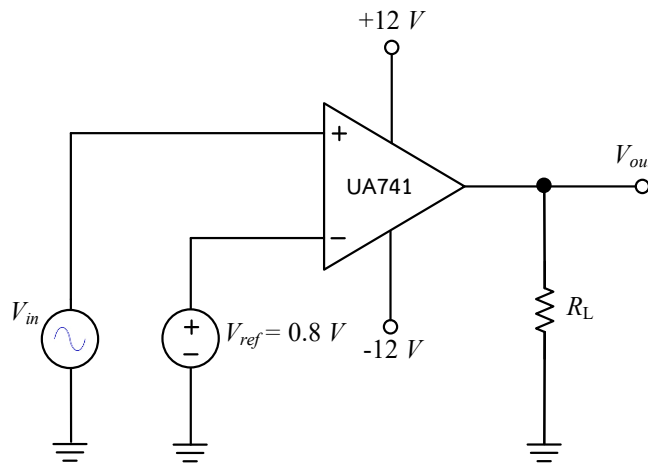
รูปที่ 2.8 สัญญาณแรงดันอินพุตและเอาต์พุตที่ได้จากวงจรในรูปที่ 2.7 (ธันส์ถ์, 2565)

สำหรับวงจรในรูปที่ 2.7 แสดงการต่อสัญญาณไซน์เข้าที่ขาอินพุตลบ และที่ขาอินพุตบวกของออปแอมป์ต่อลงกราวด์เพื่อใช้สำหรับเป็นแรงดันอ้างอิงที่มีค่าแรงดันเท่ากับศูนย์ ดังนั้นเมื่อขนาดของสัญญาณเข้าที่ขาอินพุตมีค่าสูงสุด ค่าสัญญาณแรงดันเอาต์พุตจะมีขนาดต่ำสุดที่ได้ (สัญญาณเอาต์พุตมีเฟสต่างกับสัญญาณอินพุต 180 องศา) เนื่องด้วยวงจรมีการต่อสัญญาณเข้าที่ขาอินพุตลบของออปแอมป์ สัญญาณแรงดันอินพุตและเอาต์พุตที่ได้จากวงจร แสดงดังรูปที่ 2.8 และสามารถเรียกววงจรในรูปที่ 2.7 ได้ว่า *วงจรออปแอมป์ตรวจจับสัญญาณไซน์แบบกลับเฟส*

ในทางปฏิบัติ วงจรตรวจระดับสัญญาณค่าเข้าใกล้ศูนย์โดยส่วนใหญ่แล้วจะใช้เป็นวงจรแปลงสัญญาณไซน์เป็นสัญญาณสี่เหลี่ยม หรือใช้สำหรับทดสอบสำหรับการทำงานของออปแอมป์ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานสำหรับวงจรตรวจนับความถี่ วงจรกำเนิดสัญญาณเวลา เฟสมิเตอร์ วงจรควบคุมกำลังและวงจรการสวิตซ์ในงานอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เป็นต้น (Huijsing, 2011)

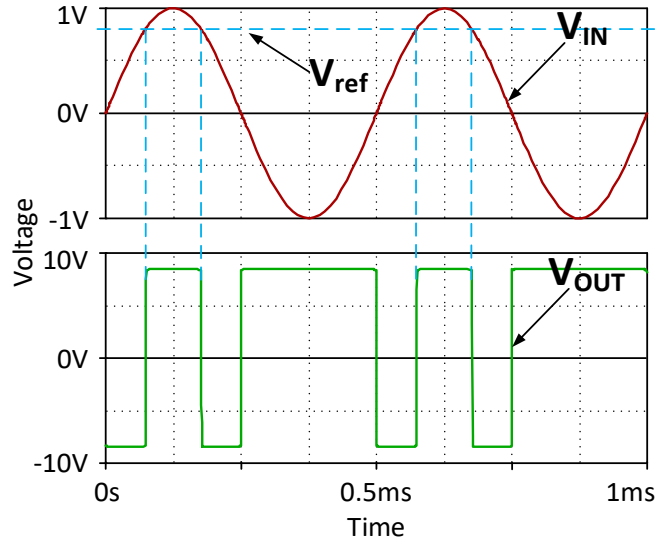
### 2.3 วงจรตรวจระดับสัญญาณค่าไม่เข้าใกล้ศูนย์

จากหัวข้อที่ 2.2 ได้กล่าวถึงวงจรตรวจระดับสัญญาณค่าเข้าใกล้ศูนย์ โดยที่ค่าระดับแรงดันอ้างอิงมีค่าเท่ากับศูนย์โวลต์ โดยปกติทั่วไป ค่าระดับแรงดันอินพุตที่ไซสำหรับอ้างอิง ไม่จำเป็นจะต้องมีค่าเท่ากับศูนย์โวลต์เสมอไป ทั้งนี้อาจจะเป็นระดับแรงดันอ้างอิงที่มีค่าคงที่ ที่มีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าศูนย์โวลต์ คือ วงจรเปรียบเทียบที่มีแรงดันอ้างอิงที่ไม่เท่าศูนย์ หรือเรียกอีกอย่างว่า *วงจรตรวจระดับสัญญาณค่าไม่เข้าใกล้ศูนย์*

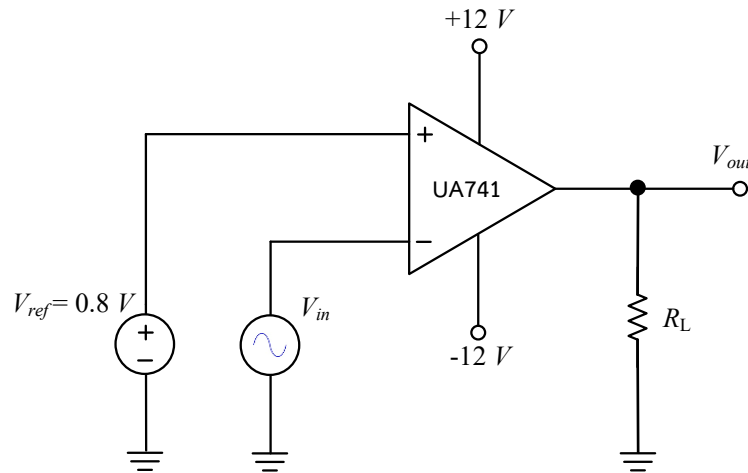


รูปที่ 2.9 วงจรตรวจระดับสัญญาณค่าไม่เข้าใกล้ศูนย์แบบไม่กลับเฟสโดยใช้ระดับแรงดันอ้างอิงจากแหล่งจ่าย (ธนะสิทธิ์, 2565)

ลักษณะการต่อของวงจรตรวจระดับสัญญาณค่าไม่เข้าใกล้ศูนย์ในรูปที่ 2.9 ซึ่งจะใช้ค่าระดับแรงดันอ้างอิงจากแหล่งจ่ายคงที่ (0.8 โวลต์) ต่อกับขาอินพุตลบของออปแอมป์ ส่วนขาอินพุตบวกต่อสัญญาณอินพุตรูปคลื่นไซน์ เรียกวงจรนี้ว่า *วงจรตรวจระดับสัญญาณค่าไม่เข้าใกล้ศูนย์แบบไม่กลับเฟส* ค่าระดับสัญญาณแรงดันเอาต์พุตที่ได้ แสดงดังรูปที่ 2.10 จะเห็นได้ว่า ค่าของระดับสัญญาณเอาต์พุตจะมีลักษณะการตรวจจับที่มีค่าคล้ายคลึงกับรูปที่ 2.6 โดยจะแตกต่างกันที่ค่าระดับแรงดันอ้างอิง ( $V_{ref}$ ) ซึ่งมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ แต่จะมีค่าเท่ากับแหล่งจ่ายที่จ่ายแรงดันให้กับอีกขาหนึ่งของออปแอมป์ (ในที่นี้เท่ากับ 0.8 โวลต์) และเนื่องจากแรงดันอ้างอิงมีค่าเป็นบวก เอาต์พุตของวงจรจะแสดงการตรวจจับที่สัญญาณอินพุตรูปคลื่นไซน์ซีกบวกเท่านั้น



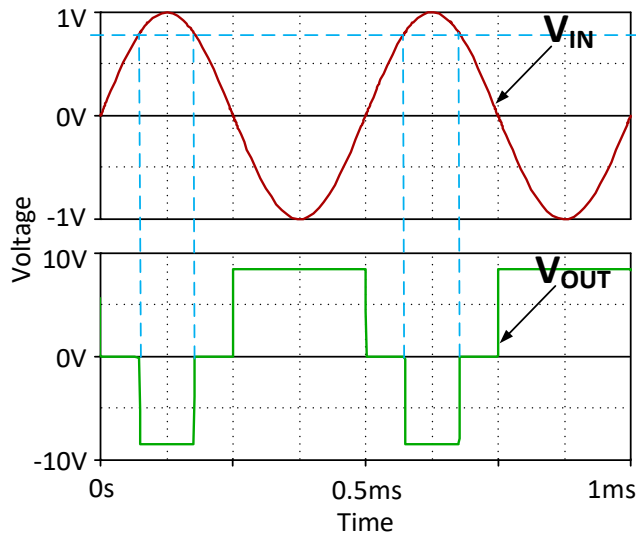
รูปที่ 2.10 สัญญาณแรงดันอินพุตและเอาต์พุตที่ได้จากวงจรในรูปที่ 2.9 (ธนัสถ์, 2565)



รูปที่ 2.11 วงจรตรวจระดับสัญญาณค่าไม่เข้าใกล้ศูนย์แบบกลับเฟสโดยใช้ระดับแรงดันอ้างอิงจากแหล่งจ่าย (ธนัสถ์, 2565)

ในทางกลับกัน หากต่อแหล่งจ่ายคงที่เข้ากับขาอินพุตบวกของออปแอมป์ (ในที่นี้เท่ากับ 0.8 โวลต์) ส่วนขาอินพุตลบต่อสัญญาณอินพุตรูปคลื่นไซน์ จะเรียกวงจรนี้ว่า *วงจรตรวจระดับสัญญาณค่าไม่เข้าใกล้ศูนย์แบบกลับเฟส* แสดงดังรูปที่ 2.11 ส่วนค่าระดับสัญญาณแรงดันอินพุตเอาต์พุตที่ได้ แสดงดังรูปที่ 2.12 จะเห็นได้ว่า ค่าของระดับสัญญาณเอาต์พุตจะมีลักษณะการตรวจจับที่มีค่าคล้ายคลึงกันกับรูปที่ 2.8 โดยจะแตกต่างกันที่ค่าระดับแรงดันอ้างอิง ซึ่งมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ แต่จะมีค่าเท่ากับแหล่งจ่ายที่จ่ายแรงดันให้กับอีกขาหนึ่งของออปแอมป์ (ในที่นี้เท่ากับ 0.8 โวลต์) และจะตรวจจับสัญญาณอินพุต

รูปคลื่นไซน์ซีกบวกเท่านั้นเช่นเดียวกับแบบไม่กลับเฟส ทั้งนี้ หากต้องการให้เอาต์พุตของวงจร แสดงการตรวจจับสัญญาณอินพุตรูปคลื่นไซน์ซีกลบเพียงอย่างเดียวก็สามารถทำได้ โดยการต่อ ค่าระดับแรงดันอ้างอิงค่าลบให้กับวงจร



รูปที่ 2.12 สัญญาณแรงดันอินพุตและเอาต์พุตที่ได้จากวงจรในรูปที่ 2.11 (ธน์สัถ์, 2565)

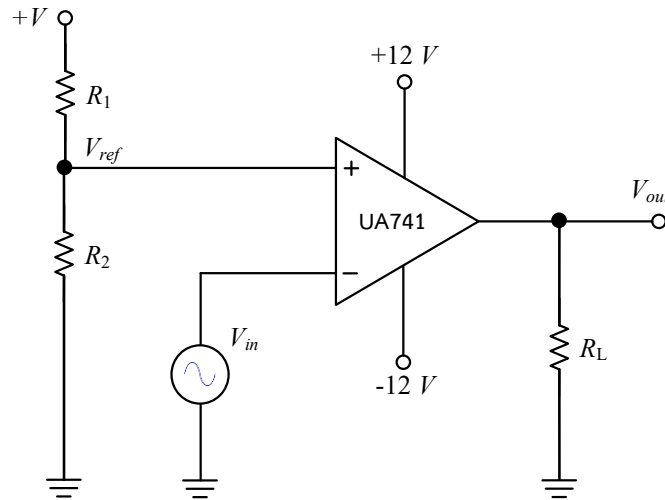
จากวงจรตรวจระดับสัญญาณค่าไม่เข้าใกล้ศูนย์ทั้งแบบไม่กลับเฟสและกลับเฟส ในรูปที่ 2.9 และรูปที่ 2.11 จะเห็นได้ว่าการใช้ค่าระดับแรงดันอ้างอิงจากแหล่งจ่าย อย่างไรก็ตาม ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ค่าระดับแรงดันจากวงจรแบ่งแรงดันโดยใช้ตัวต้านทานได้ด้วยเช่นกัน แสดงได้ดังรูปที่ 2.13 โดยที่ค่าระดับแรงดันอ้างอิงสามารถหาได้จากสมการคือ

$$V_{ref} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} (V) \tag{2.1}$$

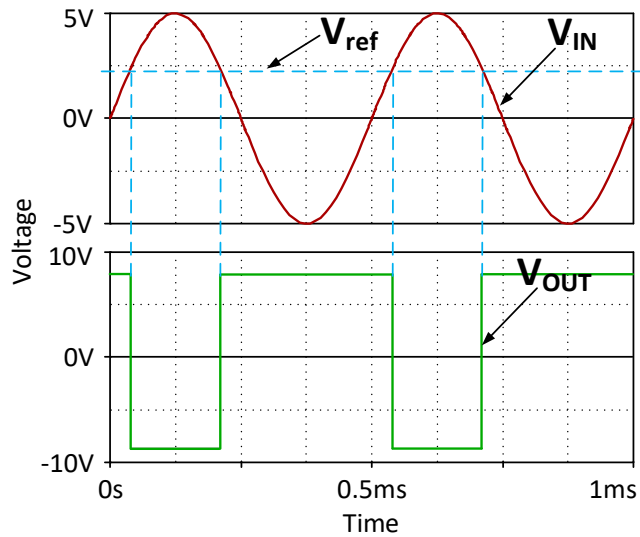
เมื่อ  $V$  คือ ค่าแรงดันจากแหล่งจ่ายเพื่อสร้างแรงดันอ้างอิง ในที่นี้จะใช้ค่าเดียวกันกับค่าแรงดันไบแอสของอปแอมป์ คือ เท่ากับแรงดันไฟกระแสตรง 12 โวลต์ ดังนั้นจากวงจรรูปที่ 2.13 สามารถหาค่าระดับแรงดันอ้างอิง  $V_{ref}$  ได้คือ

$$V_{ref} = \frac{1 \text{ k}\Omega}{4 \text{ k}\Omega + 1 \text{ k}\Omega} (12 \text{ V})$$

$$V_{ref} = 2.4 \text{ V}$$



รูปที่ 2.13 วงจรตรวจระดับสัญญาณค่าไม่เข้าใกล้ศูนย์แบบกลับเฟสโดยใช้ระดับแรงดันอ้างอิง จากวงจรแบ่งแรงดัน (ธนส์ถ์, 2565)



รูปที่ 2.14 สัญญาณแรงดันอินพุตและเอาต์พุตที่ได้จากวงจรในรูปที่ 2.13 (ธนส์ถ์, 2565)

จากรูปที่ 2.14 แสดงสัญญาณแรงดันอินพุตและเอาต์พุตที่ได้จากวงจรตรวจระดับสัญญาณค่าไม่เข้าใกล้ศูนย์แบบกลับเฟสจากค่าระดับแรงดันอ้างอิงที่ได้ออกแบบตามสมการที่ (2.1) คือ 2.4 โวลต์ ดังนั้น ที่ค่าดังกล่าวนี้ จะเป็นระดับที่ทำให้ฮอปแอมป์ตัดสินใจในการอ้างอิงเพื่อแสดงค่าเอาต์พุตแบบกลับเฟสเฉพาะค่าสัญญาณแรงดันอินพุตรูปคลื่นไซน์บวกเท่านั้น สำหรับในกรณีที่ต้องการสัญญาณแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากวงจรตรวจระดับสัญญาณค่าไม่เข้าใกล้ศูนย์แบบไม่กลับเฟสก็เพียงแค่



เปลี่ยนการต่อสัญญาณอินพุตที่เข้าที่ขาอินพุตบวกของออปแอมป์จากรูปที่ 2.13 เป็นการต่อเข้าที่ขาอินพุตลบของออปแอมป์แทน

### ตัวอย่างที่ 2.1

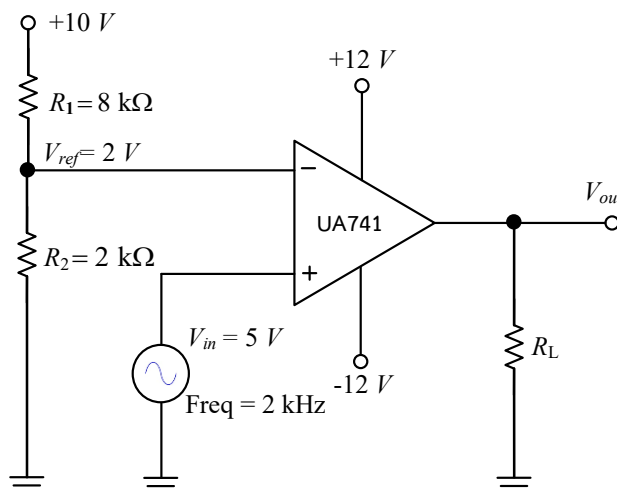
จงออกแบบวงจรตรวจระดับสัญญาณค่าไม่เข้าใกล้ศูนย์แบบไม่กลับเฟส โดยใช้ระดับแรงดันอ้างอิงจากวงจรแบ่งแรงดัน ที่ระดับค่าแรงดันอ้างอิงเท่ากับ 2 โวลต์ กำหนดให้ใช้ออปแอมป์ UA741 ที่จ่ายค่าแรงดันไฟเลี้ยงไบแอสเท่ากับ 12 โวลต์ และค่าแอมพลิจูดของสัญญาณอินพุตไซน์ เท่ากับ 5 โวลต์ ความถี่ 2 kHz

**วิธีทำ** จากโจทย์ สามารถหาค่าระดับแรงดันอ้างอิงได้ โดยใช้สมการที่ (2.1) จึงเลือกแหล่งจ่ายที่นำมาต่อสำหรับเป็นวงจรแบ่งแรงดัน เท่ากับ 10 โวลต์ โดยในที่นี้จะทำการเลือกค่าตัวต้านทาน  $R_1 = 8 \text{ k}\Omega$  และค่าตัวต้านทาน  $R_2 = 2 \text{ k}\Omega$  จะได้ค่าระดับแรงดันอ้างอิง  $V_{ref}$  คือ

$$V_{ref} = \frac{2 \text{ k}\Omega}{8 \text{ k}\Omega + 2 \text{ k}\Omega} (10 \text{ V})$$

จะได้ค่าระดับแรงดันอ้างอิง  $V_{ref} = 2 \text{ V}$

**ตอบ** วงจรที่ออกแบบไว้ คือ

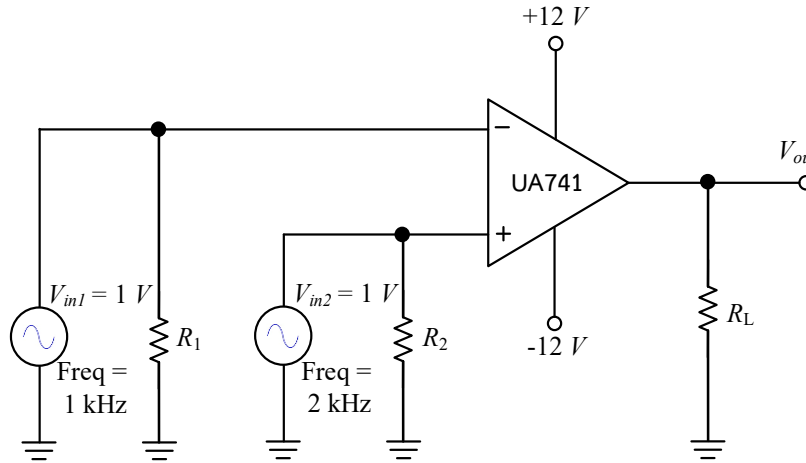


(ธนัสต์, 2565)

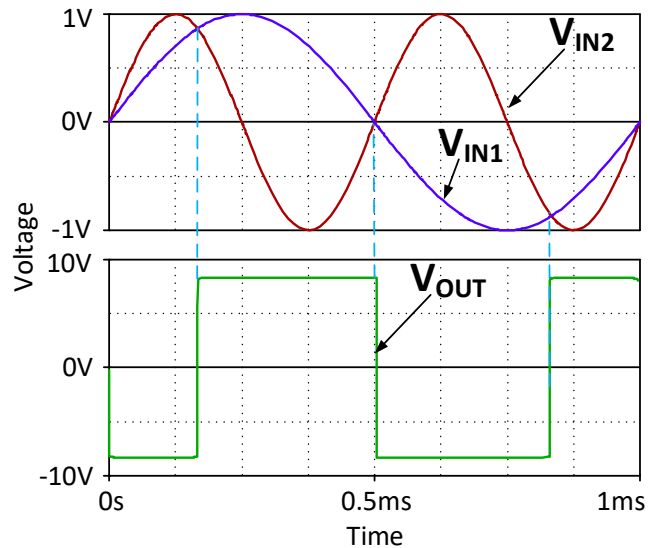
## 2.4 วงจรเปรียบเทียบเฟสของสัญญาณ

วงจรเปรียบเทียบเฟสของสัญญาณ จะอาศัยหลักการทำงานของออปแอมป์ที่มีลักษณะตามการทำงานแบบโหมตร่วมมาใช้งาน (James, 2021) นั่นคือ การต่อสัญญาณอินพุตเข้าทั้งสองขาของออปแอมป์ไปพร้อม ๆ กัน ในลักษณะของสัญญาณที่มีค่าขนาดแอมพลิจูดและเฟสต่างกัน หรือ

แอมพลิจูดเท่ากันแต่เฟสต่างกัน ออปแอมป์จะทำหน้าที่เป็นวงจรเปรียบเทียบเฟสของสัญญาณ เมื่อค่าสัญญาณที่เข้าขาอินพุตลบและขาอินพุตบวกมีเฟสต่างกัน แต่ในกรณีที่สัญญาณอินพุตที่เข้ามายังออปแอมป์ทั้งสองขามีเฟสเดียวกัน ค่าสัญญาณแรงดันเอาต์พุตที่ได้จะเป็นศูนย์ทันที วงจรเปรียบเทียบเฟสของสัญญาณแสดงได้ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 วงจรเปรียบเทียบเฟสของสัญญาณ (ธนัสต์, 2565)



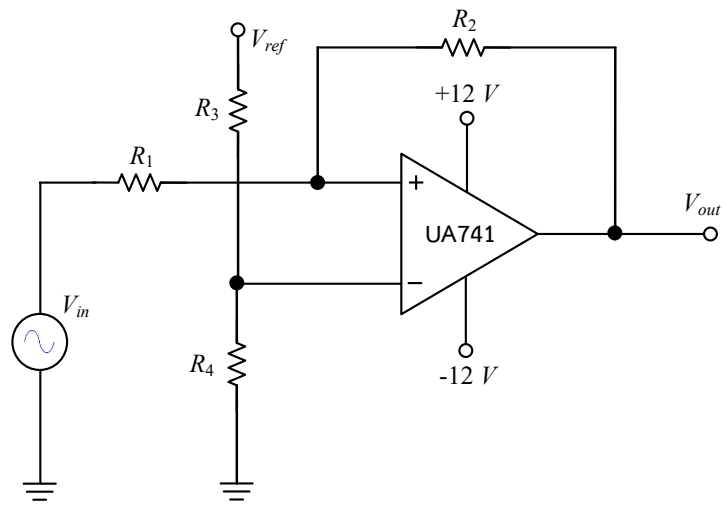
รูปที่ 2.16 สัญญาณแรงดันอินพุตและเอาต์พุตที่ได้จากวงจรในรูปที่ 2.15 (ธนัสต์, 2565)

สัญญาณแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากวงจรเปรียบเทียบเฟสของสัญญาณ จะเป็นสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยม ขนาดสัญญาณจะมีค่าเท่ากับแรงดันเอาต์พุตสูงสุดของออปแอมป์ในแต่ละตัวที่นำมาใช้งาน สำหรับความกว้างของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้ จะขึ้นอยู่กับความถี่ของสัญญาณที่ป้อนเข้าขาอินพุตทั้ง

สองขาของออปแอมป์ที่เกิดจากความสัมพันธ์ระหว่างจุดตัดของสัญญาณทั้งสอง ทั้งด้านบวกและด้านลบ ทั้งนี้ สามารถนำวงจรเปรียบเทียบเฟสของสัญญาณ ไปประยุกต์ใช้งานสำหรับระบบควบคุมในการตรวจจับเฟสของสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาได้ (Richard, 2000)

### 2.5 วงจรจุดชนวนแบบขมิตต์

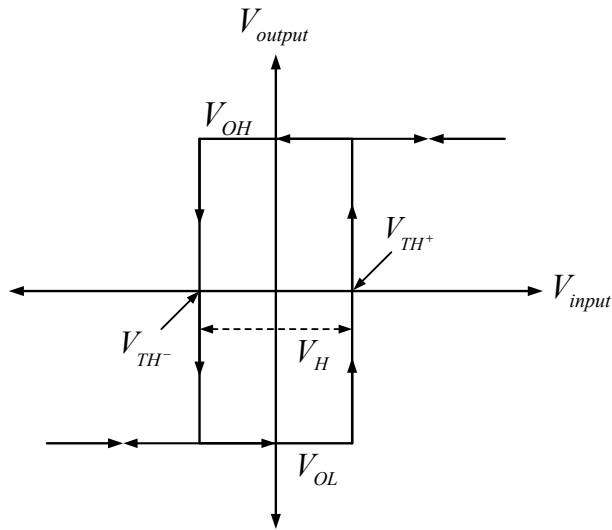
วงจรจุดชนวนแบบขมิตต์ (Schmitt trigger) ถือเป็นวงจรเปรียบเทียบสัญญาณอีกประเภทที่มีการนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่น การทำให้สัญญาณแอนะล็อกเปลี่ยนเป็นสัญญาณดิจิทัลในงานควบคุมหรืองานในวงการอิเล็กทรอนิกส์ หรือระบบสื่อสารได้ (Richard, 2000) และอีกประการที่สำคัญของวงจรจุดชนวนแบบขมิตต์ คือ สามารถใช้เป็นวงจรที่เปลี่ยนแรงดันอินพุตให้เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาอย่างช้า ๆ เพื่อให้สัญญาณเอาต์พุตเป็นสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยมหรือค่าสัญญาณพัลส์ที่ต้องการได้ โดยการทำงานของวงจรมีการใช้หลักการต่อออปแอมป์ป้อนกลับแบบบวก สัญญาณเอาต์พุตบางส่วนจะถูกนำมาป้อนกลับทางขาอินพุตบวกของออปแอมป์ เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุตของวงจร นั่นทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตทั้งสองสถานะ ทั้งนี้ สามารถออกแบบวงจรจุดชนวนแบบขมิตต์จากออปแอมป์เป็นอุปกรณ์หลัก สามารถทำได้ 2 รูปแบบ คือ วงจรจุดชนวนแบบขมิตต์แบบไม่กลับเฟสและวงจรจุดชนวนแบบขมิตต์แบบกลับเฟส



รูปที่ 2.17 วงจรจุดชนวนแบบขมิตต์แบบไม่กลับเฟส (ธนัสถ์, 2565)

วงจรจุดชนวนแบบขมิตต์แบบไม่กลับเฟสแสดงได้ดังรูปที่ 2.17 และจะมีกราฟแสดงคุณสมบัติของวงจรมีดังรูปที่ 2.18 จะเห็นได้ว่าวงจรจุดชนวนแบบขมิตต์จะเป็นวงจรเปรียบเทียบแรงดันและมีตัวต้านทานสองตัว จำนวน 2 ชุด ที่ทำการต่อแบบวงจรแบ่งแรงดัน ชุดแรกคือตัวต้านทาน  $R_1$  และตัวต้านทาน  $R_2$  ซึ่งทำหน้าที่เป็นส่วนป้อนกลับแบบบวก และอีกชุดคือ

ตัวต้านทาน  $R_3$  และตัวต้านทาน  $R_4$  ซึ่งทำหน้าที่กำหนดค่าแรงดันออฟเซตที่ป้อนให้กับขาอินพุตลบของออปแอมป์



รูปที่ 2.18 คุณสมบัติของวงจรจุดชนวนแบบขมิตต์แบบไม่กลับเฟส (ธน์สถ์, 2565)

เมื่อแรงดันอินพุตถูกป้อนเข้าในวงจรที่ขาอินพุตลบของออปแอมป์ แรงดันป้อนกลับส่วนหนึ่งจะถูกป้อนกลับไปยังขาอินพุตบวกของออปแอมป์ผ่านตัวต้านทาน  $R_1$  และตัวต้านทาน  $R_2$  ทำให้ค่าแรงดันอินพุตเกิดการกระตุ้นจากแรงดันเอาต์พุต ทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันที่ขาอินพุตทั้งสองของออปแอมป์นี้ จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าแรงดันขีดเริ่ม (Threshold voltage:  $V_{TH}$ ) ทำให้ค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรมีการเปลี่ยนแปลงอยู่สองสถานะ คือ  $V_{out} = V_{OH}$  (สัญญาณอินพุตจะไปบังคับให้วงจรทำงาน ทำให้ได้ค่าสัญญาณพัลส์ช่วงขาขึ้นออกที่เอาต์พุต) และ  $V_{out} = V_{OL}$  (สัญญาณอินพุตจะไปบังคับให้วงจรหยุดทำงาน ทำให้ได้ค่าสัญญาณพัลส์ช่วงขาลงออกที่เอาต์พุต) นั่นทำให้ค่าแรงดันขีดเริ่มที่เกิดขึ้นมีสองสถานะเช่นเดียวกัน คือ แรงดันขีดเริ่มค่าสูง  $V_{TH+}$  และแรงดันขีดเริ่มค่าต่ำ  $V_{TH-}$  สามารถหาค่าได้จาก

$$V_{TH+} = -\left(\frac{R_1}{R_2}\right)(V_{OL}) \tag{2.2}$$

และ

$$V_{TH-} = -\left(\frac{R_1}{R_2}\right)(V_{OH}) \tag{2.3}$$

ความสัมพันธ์ของระหว่างสมการที่ (2.3) และ (2.4) กับกราฟคุณสมบัติของวงจรทำให้เกิดผลต่างของระดับแรงดันที่เรียกว่า ความกว้างฮิสเทอรีซิส (Hysteresis width:  $V_H$ ) หาค่าได้จาก

$$V_H = V_{TH^+} - V_{TH^-} \quad (2.4)$$

หรือ

$$V_H = \left( \frac{R_1}{R_2} \right) \times (V_{oH} - V_{oL}) \quad (2.5)$$

จะเห็นว่า ค่าความกว้างฮิสเทอรีซิส  $V_H$  ในสมการที่ (2.5) จะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามอัตราส่วนของตัวต้านทาน  $R_1$  และตัวต้านทาน  $R_2$  ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ของวงจรป้อนกลับแบบบวกของออปแอมป์ หากตัวต้านทาน  $R_1$  และตัวต้านทาน  $R_2$  มีค่าเท่ากัน จะทำให้ได้ความกว้างฮิสเทอรีซิส  $V_H$  คือ

$$V_H = V_{TH^+} - V_{TH^-} = V_{oH} - V_{oL} \quad (2.6)$$

และโดยที่สมมติว่าค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้ของวงจรมีค่าเท่ากับ  $V_{sat}$  ของออปแอมป์ จะได้เป็น

$$V_{sat} = V_{oH} = -V_{oL} \quad (2.7)$$

ซึ่งค่าความกว้างฮิสเทอรีซิส  $V_H$  ที่ได้ จะกลายเป็น

$$V_H = \frac{R_1 \times (V_{oH} - V_{oL})}{R_1 + R_2} \quad (2.8)$$

หรือ

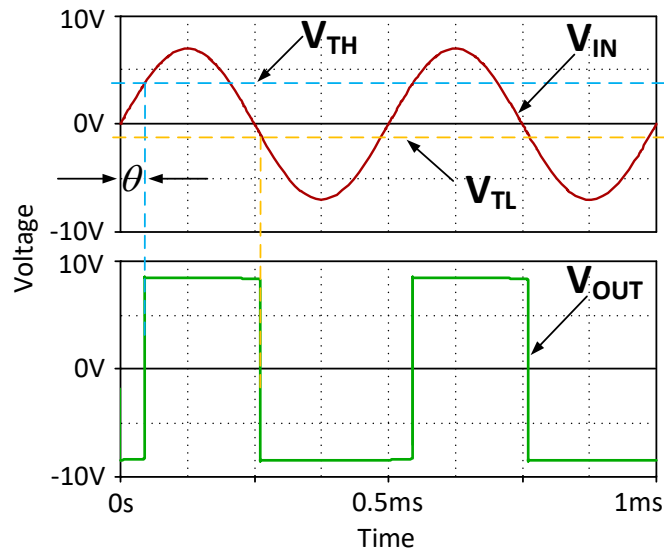
$$V_H = \left( \frac{2R_1}{R_1 + R_2} \right) \times V_{sat} \quad (2.9)$$

จากสมการที่ (2.9) จะเห็นได้ว่า ค่าความกว้างฮิสเทอรีซิส  $V_H$  จะมีความอิสระกับค่าแรงดันอ้างอิงที่ป้อนให้กับขาอินพุตลบของออปแอมป์ ซึ่งเป็นวงจรแบ่งแรงดันจากตัวต้านทาน  $R_3$  และตัวต้านทาน  $R_4$  ที่ต่อไว้เพื่อชดเชยกระแสวิกตไบแอสของออปแอมป์ (Ramakant, 2011) ดังนั้น จากวงจรในรูปที่ 2.17 สามารถแสดงค่าสัญญาณแรงดันอินพุต สัญญาณแรงดันเอาต์พุต ค่าแรงดัน

ขีดเริ่มค่าสูง  $V_{TH+}$  และค่าแรงดันขีดเริ่มค่าต่ำ  $V_{TH-}$  ดังรูปที่ 2.19 จะสังเกตได้ว่า โดยทั่วไปแล้ว สำหรับการนำวงจรจุดชนวนแบบขมิตต์ไปใช้งาน จะต้องออกแบบให้ค่าของแรงดันขีดเริ่ม  $V_{TH}$  ต้องมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันขีดเริ่มค่าต่ำ  $V_{TH-}$  ค่าความต้านทาน  $R_1$  ต้องมีน้อยกว่าค่าความต้านทาน  $R_2$  และค่าความต้านทาน  $R_4$  ต้องมีค่าน้อยกว่าค่าความต้านทาน  $R_3$  เสมอ จากรูปที่ 2.19 จะเห็นได้ว่า ลักษณะของสัญญาณเอาต์พุตจะเป็นสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมที่มีเฟสเดียวกันกับสัญญาณอินพุต แต่จะมีการเลื่อนเฟส เท่ากับ  $\theta$  ซึ่ง สามารถหาค่ามุมที่ได้จากการเลื่อนเฟสของสัญญาณคือ

$$\theta = \sin^{-1} \left( \frac{V_{TH}}{V_p} \right) \tag{2.10}$$

เมื่อ  $V_p$  คือ ค่าขนาดแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณอินพุตความถี่รูปคลื่นไซน์



รูปที่ 2.19 สัญญาณแรงดันอินพุตและเอาต์พุตของวงจรจุดชนวนแบบขมิตต์แบบไม่กลับเฟส (ธนะสิทธิ์, 2565)

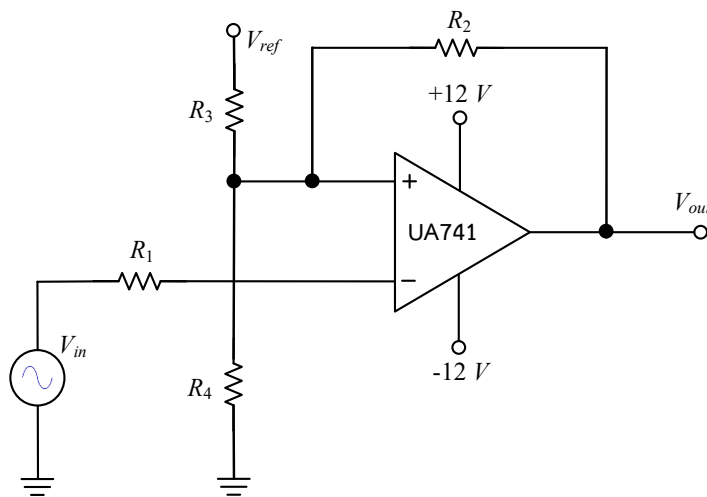
สำหรับวงจรจุดชนวนแบบขมิตต์แบบกลับเฟส แสดงได้ดังรูปที่ 2.20 และจะมีกราฟแสดงคุณสมบัติของวงจรแสดงดังรูปที่ 2.21 จะเห็นได้ว่าวงจรจุดชนวนแบบขมิตต์แบบกลับเฟส จะต่างกับแบบไม่กลับเฟส คือ การปรับเปลี่ยนขาสัญญาณอินพุตบวกเป็นการต่อวงจรป้อนกลับผ่านตัวต้านทาน  $R_2$  และค่าแรงดันอ้างอิงจากวงจรแบ่งแรงดัน  $R_3$  และ  $R_4$  และทำการต่อสัญญาณรูปคลื่นไซน์เข้าที่ขาอินพุตลบของออปแอมป์ผ่านตัวต้านทาน  $R_1$  เพียงตัวเดียวแทน เพื่อชดเชยค่ากระแสอินพุตไบอัสให้กับออปแอมป์ ค่าความต้านทานของ  $R_1$  ที่เหมาะสม ควรจะต้องมีค่าเท่ากับค่าความต้านทานรวมแบบขนานของตัวต้านทาน  $R_2$  และตัวต้านทาน  $R_4$  เนื่องจากวงจรมีการ

ป้อนกลับแบบบวก ทำให้แรงดันเอาต์พุตของวงจรเปลี่ยนแปลงได้สองสถานะคือ  $V_{OH}$  และ  $V_{OL}$  สามารถหาค่าแรงดันขีดเริ่มได้จาก

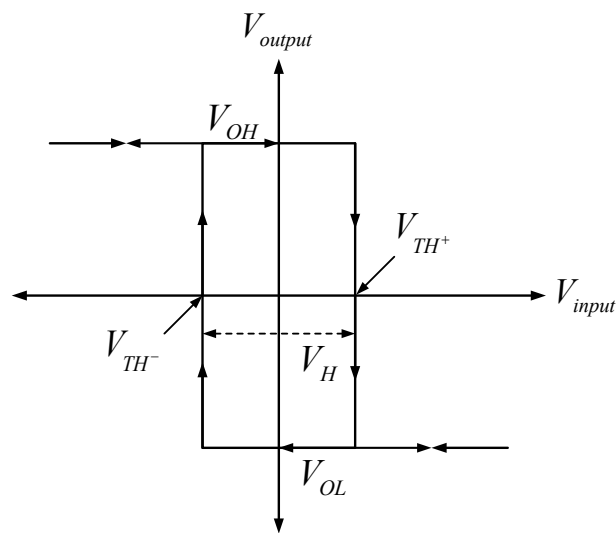
$$V_{TH^+} = \left( \frac{R_4}{R_2 + R_4} \right) (V_{OH}) \tag{2.11}$$

และ

$$V_{TH^-} = \left( \frac{R_4}{R_2 + R_4} \right) (V_{OL}) \tag{2.12}$$



รูปที่ 2.20 วงจรจุดชนวนแบบขมิตต์แบบกลับเฟส (ธน์สร์, 2565)



รูปที่ 2.21 คุณสมบัติของวงจรจุดชนวนแบบขมิตต์แบบกลับเฟส (ธน์สร์, 2565)

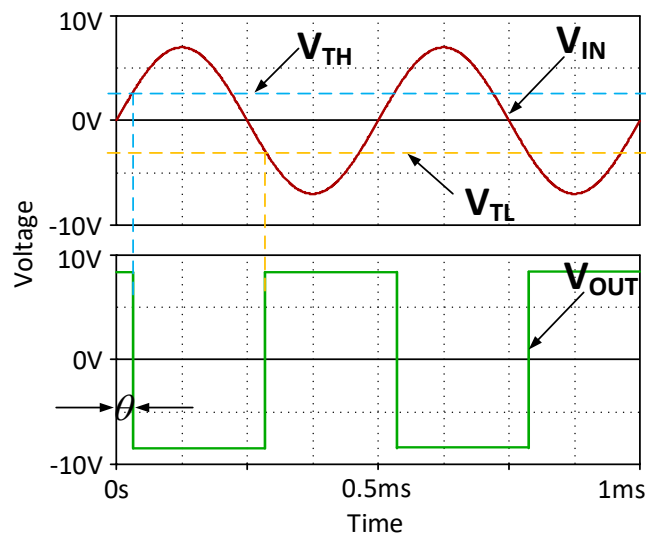
สำหรับค่าความกว้างฮิสเทอรีซิส  $V_H$  ของวงจรจุดชนวนแบบขมิตต์แบบกลับเฟส ในรูปที่ 2.21 สามารถหาค่าได้จาก

$$V_H = \left( \frac{R_4}{R_2 + R_4} \right) \times (V_{oH} - V_{oL}) \quad (2.13)$$

โดยสมมติว่าค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้ของวงจรมีค่าเท่ากับ  $V_{sat}$  ของออปแอมป์ ทำให้สามารถหาค่าความกว้างฮิสเทอรีซิส  $V_H$  ได้จาก

$$V_H = \left( \frac{2R_4}{R_2 + R_4} \right) \times V_{sat} \quad (2.14)$$

จากกราฟแสดงคุณสมบัติของวงจรจุดชนวนแบบขมิตต์แบบกลับเฟส ในรูปที่ 2.21 นั้น จะเห็นได้ว่ามีช่วงการเปลี่ยนแปลงสัญญาณในแนวตั้ง แต่จะมีทิศทางการเปลี่ยนแปลงของวงจรเป็นแบบตามเข็มนาฬิกา ซึ่งจะตรงกันข้ามกับกราฟในรูปที่ 2.18 ที่แสดงคุณสมบัติของวงจรจุดชนวนแบบขมิตต์แบบไม่กลับเฟส ส่วนค่าของสัญญาณแรงดันอินพุตและเอาต์พุตของวงจรจุดชนวนแบบขมิตต์แบบกลับเฟส แสดงดังรูปที่ 2.22 ลักษณะของสัญญาณเอาต์พุตจะเป็นสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมที่มีเฟสตรงกันข้ามไปจากสัญญาณอินพุต โดยการเลื่อนเฟสเท่ากับ  $\theta$  สามารถหาค่าได้จากสมการที่ (2.10) เช่นเดียวกับวงจรจุดชนวนแบบขมิตต์แบบไม่กลับเฟส



รูปที่ 2.22 สัญญาณแรงดันอินพุตและเอาต์พุตของวงจรจุดชนวนแบบขมิตต์แบบกลับเฟส (ธันส์ถ์, 2565)

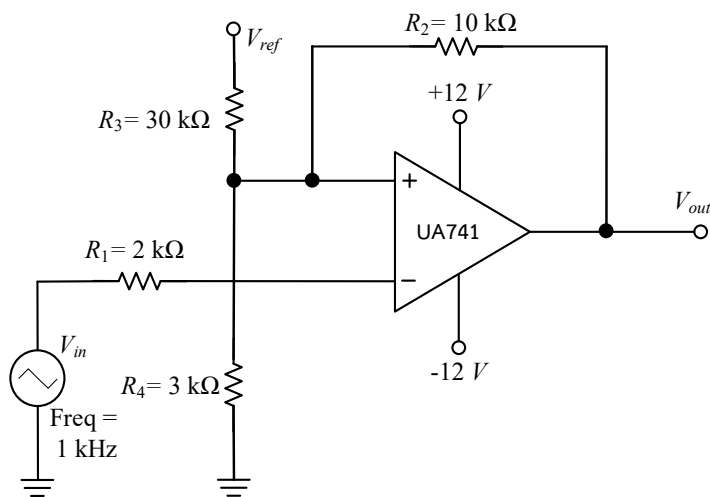


สัญญาณอินพุตที่สามารถป้อนให้กับวงจรจุดชนวนแบบขมิตต์ นอกจากสัญญาณที่เป็นสัญญาณความถี่รูปคลื่นไซน์แล้ว ยังสามารถป้อนสัญญาณอินพุตในรูปคลื่นสามเหลี่ยมได้ด้วย การกำหนดค่าต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับวงจร ก็สามารถหาค่าได้เหมือนกับสัญญาณอินพุตความถี่รูปคลื่นไซน์ สัญญาณแรงดันเอาต์พุตที่ได้ก็เป็นสัญญาณพัลส์เช่นเดียวกัน

## ตัวอย่างที่ 2.2

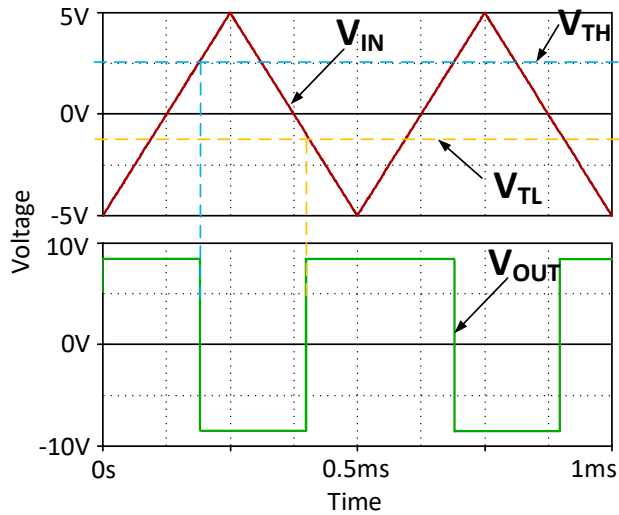
จากวงจรจุดชนวนแบบขมิตต์แบบกลับเฟส ในรูปที่ 2.10 จงแสดงค่าสัญญาณเอาต์พุตของวงจรเมื่อสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม ที่มีค่าขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณแรงดันเท่ากับ 5 โวลต์ และความถี่ 1 kHz

**วิธีทำ** จากโจทย์ สามารถกำหนดค่าของตัวต้านทาน  $R_2$  และตัวต้านทาน  $R_4$  เพื่อให้สามารถหาค่าความกว้างฮิสเทอรีซิส  $V_H$  ได้ ในที่นี้จะกำหนดให้  $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$  และ  $R_4 = 3 \text{ k}\Omega$  หลังจากนั้นต่อวงจรตามรูปที่ 2.10 โดยค่าแอมพลิจูดของสัญญาณอินพุตสามเหลี่ยมเท่ากับ 5 โวลต์ และกำหนดค่าความถี่ 1 kHz ซึ่งจะได้ค่าเวลา  $T$  เท่ากับ 1 ms เพื่อป้อนเป็นสัญญาณอินพุตให้กับวงจร ดังรูป



(ธนัสถ์, 2565)

**ตอบ** จะเห็นได้ว่า สัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับวงจร ซึ่งเป็นสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยมนั้นสามารถนำมาเป็นสัญญาณอินพุตให้กับวงจรจุดชนวนแบบขมิตต์แบบกลับเฟสได้จากวงจรเดียวกันกับวงจรจุดชนวนแบบขมิตต์แบบกลับเฟสที่ป้อนสัญญาณไซน์ดังรูปที่ 2.10 (ที่แสดงในตัวอย่างนี้ ซึ่งแบบไม่กลับเฟสก็เช่นเดียวกัน) โดยไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงวงจรใด ๆ ค่าของแรงดันขีดเริ่มค่าสูง  $V_{TH}$  และค่าแรงดันขีดเริ่มค่าต่ำ  $V_{TH-}$  สามารถหาค่าได้ทั้งจากการคำนวณและจากผลการจำลอง ดังรูป



(ธนัสถ์, 2565)

จากตัวอย่างที่ 2.2 การทำงานของวงจรจุดชนวนแบบขมิตต์แบบกลับเฟส เมื่อทำการป้อนสัญญาณอินพุตรูปคลื่นสามเหลี่ยมนั้น สังเกตได้ว่าช่วงขอบขาขึ้นของสัญญาณอินพุตรูปคลื่นสามเหลี่ยมที่ระดับค่ามากกว่าศูนย์ไปแล้วนั้น วงจรจะทำการตัดสินใจในการพิจารณาเพื่อให้สัญญาณเอาต์พุตมีสัญญาณที่ตรงกันข้ามในระดับแรงดันที่เป็นสัญญาณอินพุตรูปคลื่นสามเหลี่ยมมีค่าเท่ากับค่าของแรงดันขีดเริ่มค่าสูง  $V_{TH+}$  และจะคงสถานะเดิมไปจนกว่าระดับแรงดันที่เป็นสัญญาณอินพุตรูปคลื่นสามเหลี่ยมมีค่าเท่ากับค่าแรงดันขีดเริ่มค่าต่ำ  $V_{TH-}$  สัญญาณเอาต์พุตที่ได้ก็จะมีสถานะที่ตรงกันข้าม และจะทำการตรวจสอบไปแบบนี้ไปเรื่อย ๆ ตามกราฟที่แสดงคุณสมบัติของวงจรสำหรับช่วงความกว้างของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้ หากทำการออกแบบให้มีค่าของแรงดันขีดเริ่มค่าสูง  $V_{TH+}$  และค่าแรงดันขีดเริ่มค่าต่ำ  $V_{TH-}$  เท่ากัน ก็จะได้ค่าความกว้างพัลส์ของสัญญาณเอาต์พุตที่เท่ากัน แต่จะมีเฟสที่เลื่อนออกไปจากสัญญาณอินพุต เท่ากับ  $\theta$  องศา

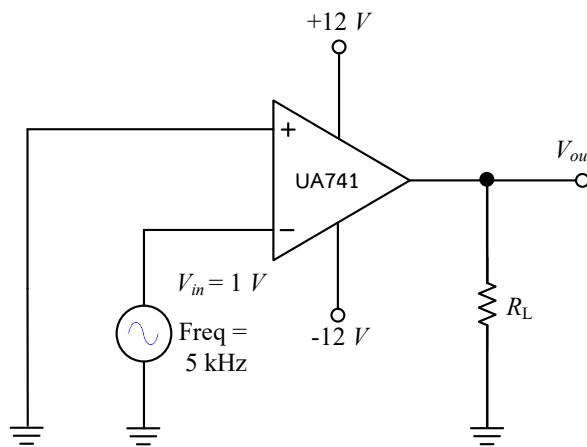
## 2.6 สรุป

วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ เป็นวงจรแอนะล็อกที่ใช้การเปรียบเทียบค่าสัญญาณ โดยอาศัยคุณสมบัติของออปแอมป์ ที่มีการต่อสัญญาณแบบลูปเปิด หรือการทำงานแบบโหมดร่วม ในลักษณะของสัญญาณที่มีค่าขนาดแอมพลิจูดและเฟสต่างกัน เรียกว่า วงจรเปรียบเทียบเฟสของสัญญาณ สำหรับวงจรตรวจระดับสัญญาณค่าเข้าใกล้ศูนย์และค่าไม่เข้าใกล้ศูนย์ สามารถนำไปใช้งานเป็นวงจรแปลงสัญญาณรูปคลื่นไซน์เป็นสัญญาณสี่เหลี่ยม และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานสำหรับวงจรตรวจนับความถี่ วงจรกำเนิดสัญญาณเวลา เฟสมิเตอร์ได้ สำหรับวงจรจุดชนวนแบบขมิตต์ ใช้เป็นวงจรที่เปลี่ยนแรงดันอินพุตให้เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาอย่างช้า ๆ เพื่อให้สัญญาณเอาต์พุตเป็นสัญญาณ

คลื่นสี่เหลี่ยมหรือค่าสัญญาณพัลส์ที่ต้องการได้ เช่น การทำให้สัญญาณแอนะล็อกเปลี่ยนเป็นสัญญาณดิจิทัลในงานควบคุมหรืองานในวงการอิเล็กทรอนิกส์ หรือระบบสื่อสารได้

### แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 2

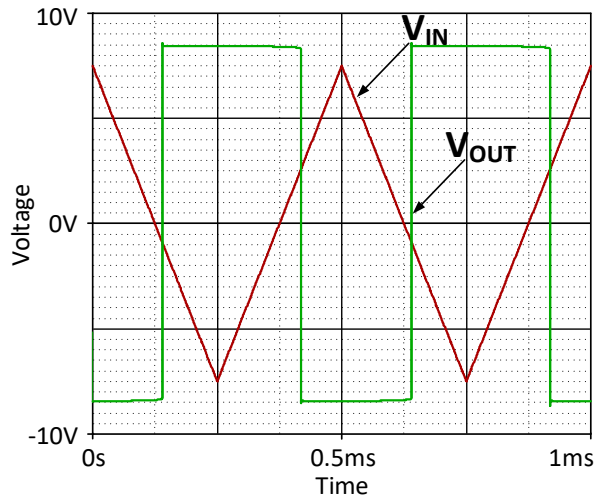
1. จงอธิบายการทำงานของวงจรเปรียบเทียบแรงดันโดยใช้ออปแอมป์
2. หากทำการต่อออปแอมป์เป็นวงจรเปรียบเทียบแรงดัน โดยแรงดันที่ป้อนเข้าขาอินพุตบวกมากกว่าอินพุตลบ สัญญาณเอาต์พุตจะเป็นอย่างไร เพราะอะไร
3. การต่อออปแอมป์สำหรับเป็นวงจรตรวจระดับสัญญาณค่าเข้าใกล้ศูนย์ มีหลักการทำงานอย่างไร จงอธิบาย
4. จากวงจรดังรูปด้านล่างนี้ คือวงจรอะไร มีค่าความถี่และคาบเวลาเท่ากับเท่าไร



(ธนัสถ์, 2565)

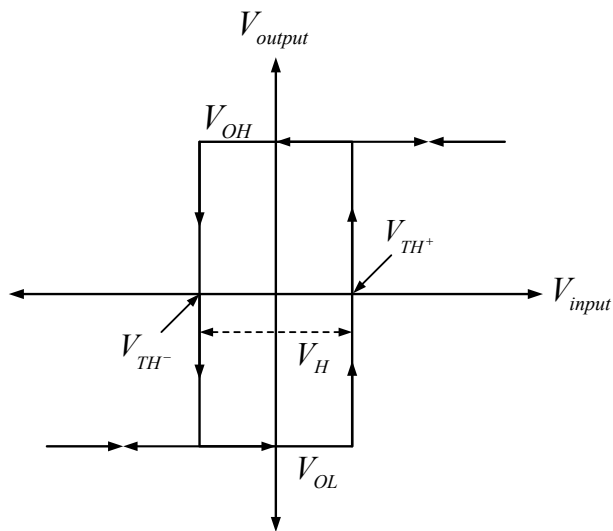
5. จงอธิบายการทำงานของวงจรตรวจระดับสัญญาณค่าไม่เข้าใกล้ศูนย์โดยใช้ออปแอมป์
6. จงออกแบบวงจรตรวจระดับสัญญาณค่าไม่เข้าใกล้ศูนย์โดยใช้ออปแอมป์แบบกลับเฟส ค่าระดับแรงดันอ้างอิงจากวงจรแบ่งแรงดันเท่ากับ  $-0.5$  โวลต์ ค่าขนาดสัญญาณอินพุตไซน์เท่ากับ  $1.5$  โวลต์ ค่าความถี่ เท่ากับ  $4$  kHz พร้อมทั้งอธิบายการทำงานของวงจร
7. วงจรเปรียบเทียบเฟสของสัญญาณมีลักษณะการทำงานอย่างไร จงอธิบาย
8. จงอธิบายคุณสมบัติของวงจรจุดชนวนแบบขมิตต์แบบไม่กลับเฟส
9. วงจรจุดชนวนแบบขมิตต์สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานอะไรได้บ้าง
10. จงคำนวณหาค่ามุมการเลื่อนเฟสของวงจรจุดชนวนแบบขมิตต์ เมื่อค่าขนาดแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณอินพุตความถี่รูปคลื่นไซน์  $V_p$  เท่ากับ  $2$  โวลต์ และค่าของแรงดันขีดเริ่มค่าสูง  $V_{TH+}$  เท่ากับ  $4.8$  โวลต์

11. จากวงจรดังรูปด้านล่างนี้ คือค่าสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรอะไร



(ธน์สดี, 2565)

12. จากรูปในข้อที่ 11 จงหาค่าความกว้างฮิสเทอรีซิส  $V_H$  ค่าของแรงดันขีดเริ่มค่าสูง  $V_{TH^+}$  และค่าของแรงดันขีดเริ่มค่าต่ำ  $V_{TH^-}$
13. จงอธิบายกราฟคุณสมบัติของวงจรจุดชนวนแบบขมิตต์แบบไม่กลับเฟสดังรูป



**บรรณานุกรม**

Huijsing, J. (2011). *Operational amplifiers: Theory and design*. Springer.  
 James, M. F. (2021). *Operational amplifiers & linear integrated circuits: Theory and application (3rd ed.)*. Creative Commons.

Ramakant, A. G. (2011). *Op-amps and linear integrated circuits* (4th ed.).  
Prentice Hall International.

Richard, C. J. (2000). *Microelectronic circuit design* (4th ed.). McGraw-Hill.

Sergio, F. (2003). *Design with operational amplifiers and analog integrated  
circuits*. McGraw Hill Higher Education.

Thomas, L. F. (2012). *Electronic devices: Electron flow version* (9th ed.). Prentice  
Hall International.

ฉันทน์ ศรีสกุล. (2557). *ออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วย OrCAD*. วิตตี้กรุ๊ป.

มนตรี ศิริปรัชญานันท์ และ ธนุศักดิ์ อรุณไพโร. (2558). *ออปแอมป์และลิเนียร์ไอซี*. ซีเอ็ด  
ยูเคชั่น.

## บทที่ 3

### วงจรถ้าเนิดสัญญาณ

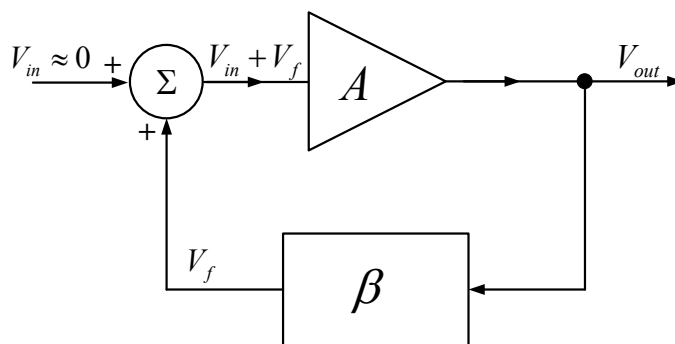
จากบทที่ 2 ซึ่งได้กล่าวถึง วงจรแอนะล็อกที่ใช้การเปรียบเทียบค่าสัญญาณสองสัญญาณ โดยอาศัยคุณสมบัติของออปแอมป์ (Sergio, 2003) หรือที่เรียกว่า วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ ซึ่งเกิดจากการนำสัญญาณอินพุตสองสัญญาณจากแหล่งกำเนิดสัญญาณ นำมาเป็นสัญญาณในการป้อนเข้าที่ขาอินพุตบวกและขาอินพุตลบของออปแอมป์ ทำให้ออปแอมป์ทำหน้าที่เป็นวงจรถ้าเปรียบเทียบสัญญาณ (Thomas, 2012) สามารถแสดงการเปรียบเทียบค่าสัญญาณอินพุต หากสัญญาณที่ขาอินพุตใดของออปแอมป์มีค่ามากกว่าหรือมีค่าน้อยกว่า แต่สำหรับบทนี้ จะกล่าวถึง วงจรถ้าเนิดสัญญาณ (Signal generator) หรือวงจรถ้าอสซิลเลเตอร์ (Oscillator) เป็นวงจรถ้าแอนะล็อกที่สำคัญ วงจรถ้าหนึ่งที่ถูกออกแบบหรือสร้างมาเพื่อให้กำเนิดรูปคลื่นสัญญาณที่ต้องการ นำไปเป็นสัญญาณอินพุตให้กับวงจรถ้าเปรียบเทียบสัญญาณในบทที่ 2 ได้ อีกทั้งถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางในงานด้านการวัด ระบบเครื่องมือวัด การประมวลผลสัญญาณ ระบบอิเล็กทรอนิกส์ ตลอดจนระบบสื่อสารโทรคมนาคม เป็นต้น โดยทั่วไปวงจรถ้ากำเนิดสัญญาณ สามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภท คือ วงจรถ้ากำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal generator) ซึ่งรูปคลื่นที่ได้จากวงจรถ้าสามารถให้กำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์เท่านั้น และอีกประเภท คือ วงจรถ้ากำเนิดรูปคลื่นอื่น ๆ ที่ไม่ใช่สัญญาณรูปคลื่นไซน์ (Non-sinusoidal generator) เช่น วงจรถ้ากำเนิดสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (Square-wave generator) วงจรถ้ากำเนิดสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม (Triangular-wave generator) และวงจรถ้ากำเนิดสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อย (Sawtooth-wave generator) ทั้งวงจรถ้ากำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์และที่ไม่ใช่สัญญาณรูปคลื่นไซน์อย่างง่าย สามารถสร้างจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั้งจากอุปกรณ์แพสซีฟ (Passive device) เช่น ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ ทรานซิสเตอร์ เป็นต้น หรือสร้างจากอุปกรณ์แอกทีฟ เช่น ออปแอมป์ วงจรถ้าขยายความนำถ่ายโอน (Operational Transconductance Amplifier: OTA) (Abuelmaatti, 2001) วงจรถ้าสายพานกระแสยุคที่หนึ่ง (First Generation Current Conveyor: CCI) (Abuelmaatti, 2002) วงจรถ้าสายพานกระแสยุคที่สอง (Second Generation Current Conveyor: CCII) และวงจรถ้าขยายความนำถ่ายโอนสายพานกระแส (Current Conveyor Transconductance Amplifier: CCTA) (Kumngern et al., 2019) เป็นต้น หรือใช้ทั้งจากอุปกรณ์แพสซีฟและจากอุปกรณ์แอกทีฟร่วมกัน ทั้งนี้วงจรถ้ากำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์บางวงจรถ้าสามารถพัฒนาต่อยอดไปเป็นวงจรถ้ากำเนิดสัญญาณต่าง ๆ เช่น วงจรถ้ากำเนิดสัญญาณ ASK (Amplitude shift keying) FSK (Frequency shift keying) และ PSK (Phase shift keying) (Kumngern & Nonthaputha, 2017) เป็นต้น ซึ่งในบทนี้ จะกล่าวถึงวงจรถ้ากำเนิดรูปคลื่นสัญญาณไซน์ รูปคลื่นสี่เหลี่ยม รูปคลื่นสามเหลี่ยม และรูปคลื่นฟันเลื่อย โดยใช้อุปกรณ์แอกทีฟ คือ ออปแอมป์ UA741 เป็นอุปกรณ์หลัก ที่ใช้งานอย่างแพร่หลายนำมาต่อใช้งานจริง ร่วมกับอุปกรณ์แพสซีฟ

### 3.1 วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์

โดยทั่วไปหลักการการทำงานของวงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์จะอาศัยหลักการป้อนกลับของสัญญาณ กล่าวคือ ภายในวงจรจะมีการป้อนกลับของสัญญาณเอาต์พุตบางส่วนมายังอินพุตของวงจรได้ด้วยการทำงานของวงจรมันเอง โดยไม่ต้องใช้สัญญาณอินพุต จนวงจรสามารถทำงานได้ตามคุณสมบัติทางความถี่และทางเวลา ดังสมการ

$$s(t) = V_{out} = A(t) \cos[\omega_0 t + \phi(t)] \quad (3.1)$$

เมื่อ  $A(t)$  คือ ขนาดของสัญญาณเอาต์พุตของวงจร  $\omega_0(t)$  คือ ค่าความถี่เชิงมุม มีค่าเท่ากับ  $2\pi f_0$  และ  $\phi(t)$  คือ ค่าเฟสของสัญญาณ สำหรับการป้อนกลับของวงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์สามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภท คือการป้อนกลับแบบบวก (Positive feedback) และการป้อนกลับแบบลบ (Negative feedback) ทั้ง 2 ประเภท มีความแตกต่างกันทางลักษณะของสัญญาณที่ทำการป้อนกลับ คือ หากเป็นวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ที่มีการป้อนกลับแบบบวก จะไม่มีการเลื่อนเฟสของสัญญาณที่ทำการป้อนกลับไปยังอินพุต แต่สำหรับวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ที่มีการป้อนกลับแบบลบนั้น จะมีการเลื่อนเฟสของสัญญาณจากสัญญาณเอาต์พุตที่ทำการป้อนกลับไปยังอินพุตขนาดเท่ากับ 180 องศา โดยในกรณีแรก ค่อนข้างจะได้รับความนิยมมากกว่า ซึ่งในส่วนของหัวข้อนี้ จึงขอกล่าวถึงวงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่มีการป้อนกลับแบบบวกมากกว่าแบบลบ ดังนั้นวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ที่มีการป้อนกลับแบบบวก สามารถอธิบายการทำงานได้ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยเงื่อนไขตามหลักเกณฑ์ของ Barkhausen (Barkhausen's Criteria) (Barkhausen, 1935) ที่สำคัญ จึงจะทำให้วงจรสามารถกำเนิดสัญญาณได้ โดยจะขอกล่าวถึงในลำดับถัดไป



รูปที่ 3.1 หลักการทำงานของวงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่มีการป้อนกลับแบบบวก (ธน์สร์, 2565)

จากรูปที่ 3.1 แสดงหลักการทำงานของวงจรถ่ายสัญญาณรูปคลื่นไซน์ โดยการป้อนกลับแบบบวก ซึ่งจะประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนอัตราขยายของวงจรถ่าย หรือ  $A$  และส่วนของอัตราขยายวงจรถ่ายกลับ หรือ  $\beta$  จากความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ทำให้สามารถหาค่าแรงดันเอาต์พุตจากรูปที่ 3.1 ได้คือ

$$V_{out} = A(V_{in} + V_f) \tag{3.2}$$

$$V_{out} = AV_{in} + A\beta V_{out}$$

$$AV_{in} = V_{out} - A\beta V_{out}$$

$$AV_{in} = V_{out}(1 - A\beta)$$

$$V_{out} = \frac{AV_{in}}{1 - A\beta}$$

จะได้

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{A}{1 - A\beta} \tag{3.3}$$

เงื่อนไขสำคัญที่สามารถทำให้วงจรถ่ายเกิดการออสซิลเลตเพื่อให้ได้สัญญาณรูปคลื่นไซน์ตามที่ต้องการได้นั้น ต้องขึ้นอยู่กับอัตราขยายวงรอบ (Loop gain: LG) หรือลูปเกน (Lindberg, 2010) ตามหลักเกณฑ์ของ Barkhausen (Lindberg, 2012) ดังแสดงในสมการที่ (3.4) – สมการที่ (3.7)

$$1 - A\beta = 0 \tag{3.4}$$

หรือสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

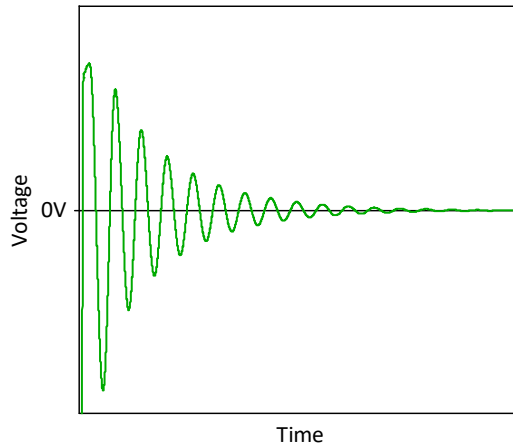
$$1 = A\beta \tag{3.5}$$

โดย

$$|A(s)\beta(s)| = 1 \tag{3.6}$$

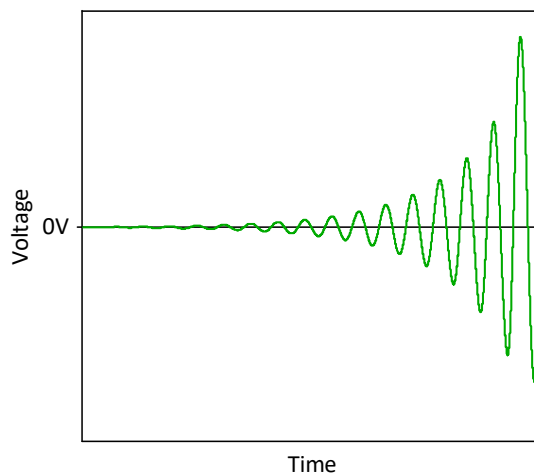
$$\angle A(s)\beta(s) = 0 \tag{3.7}$$



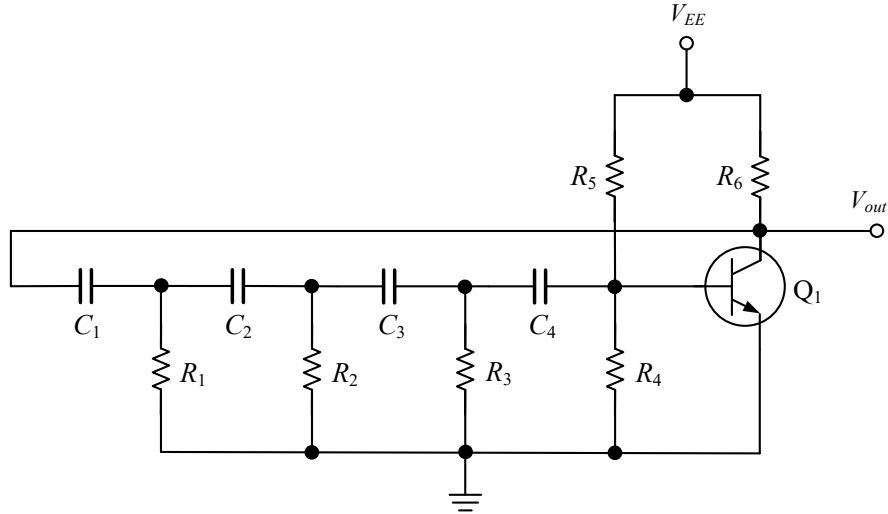


รูปที่ 3.2 การเกิดการออสซิลเลตของวงจรในกรณีที่  $|A(s)\beta(s)| < 1$  (ธน์สร์, 2565)

จากสมการที่ (3.6) และสมการที่ (3.7) คือ สภาวะการรักษาสัญญาณให้คงอยู่ ซึ่งจะเป็นไปตามเงื่อนไขหลักเกณฑ์ของ Barkhausen หากค่า  $|A(s)\beta(s)| < 1$  และ  $|A(s)\beta(s)| > 1$  การเกิดการออสซิลเลตของสัญญาณไซน์จะไม่คงที่ (Barkhausen, 1935) แสดงได้ดังรูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการเกิดการออสซิลเลตของสัญญาณเพื่อกำเนิดสัญญาณไซน์ที่ต้องการได้นั้น ต้องทำการออกแบบวงจรเพื่อให้สามารถทำงานได้ตามเงื่อนไขในสมการที่ (3.4) – สมการที่ (3.7) เท่านั้น โดยต้องออกแบบให้ค่าของตัวส่วนของสมการที่ (3.3) มีค่าเท่ากับศูนย์ จึงจะส่งผลให้วงจรสามารถสร้างสัญญาณได้ไม่จำกัดนั่นเอง หากไม่เป็นไปตามเงื่อนไขดังกล่าว การเกิดการออสซิลเลตของสัญญาณจะไม่สมบูรณ์ ทำให้ไม่สามารถนำวงจรไปใช้งานได้จริง

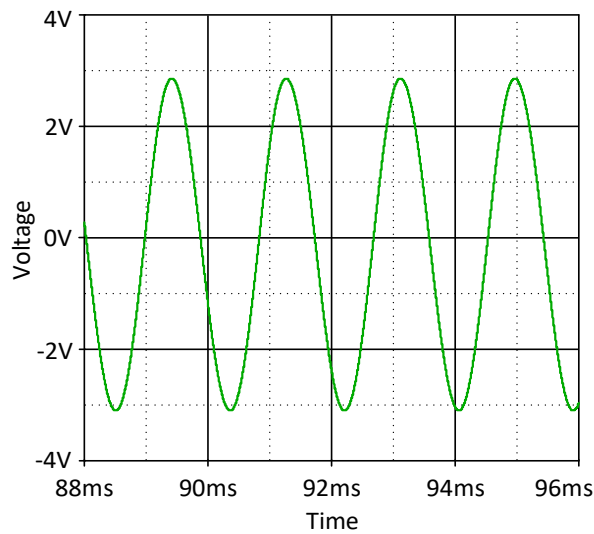


รูปที่ 3.3 การเกิดการออสซิลเลตของวงจรในกรณีที่  $|A(s)\beta(s)| > 1$  (ธน์สร์, 2565)



รูปที่ 3.4 วงจรถ่ายสัญญาณอาร์ซีโออสซิลเลเตอร์ (ธนส์ถ์, 2565)

ทั้งนี้ วงจรถ่ายสัญญาณรูปคลื่นไซน์อย่างง่าย สามารถสร้างได้จากอุปกรณ์แพสซีฟ เช่น วงจรอาร์ซีโออสซิลเลเตอร์ (RC Oscillator) ซึ่งใช้ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุต่อร่วมกันในวงจร (Ramon, 2018) หรือวงจรแอลซีโออสซิลเลเตอร์ (LC Oscillator) ซึ่งใช้ตัวขดลวด (Inductor) และตัวเก็บประจุต่อร่วมกันในวงจร หรือวงจรอาร์แอลซีโออสซิลเลเตอร์ (RLC Oscillator) แต่ในหัวข้อนี้จะขอกล่าวถึง วงจรถ่ายสัญญาณรูปคลื่นไซน์อย่างง่าย คือ วงจรอาร์ซีโออสซิลเลเตอร์ ที่สร้างมาจากตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ ต่อร่วมกับทรานซิสเตอร์ แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.5 สัญญาณเอาต์พุตรูปคลื่นไซน์จากวงจรอาร์ซีโออสซิลเลเตอร์ในรูปที่ 3.4 (ธนส์ถ์, 2565)

วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์อาร์ซีเอสซิลเลเตอร์แบบจ่ายประกอบไปด้วยตัวต้านทานจำนวน 6 ตัว ตัวเก็บประจุจำนวน 4 ตัว และทรานซิสเตอร์จำนวน 1 ตัว ค่าแรงดัน  $V_{EE}$  มีค่าเท่ากับ 12 โวลต์ สามารถให้ค่าสัญญาณเอาต์พุตที่เกิดการออสซิลเลตเป็นรูปคลื่นไซน์ แสดงดังรูปที่ 3.5 จะเห็นได้ว่าวงจรมีการต่อคล้ายกับหลักเกณฑ์ของ Barkhausen แต่เนื่องจากวงจรในรูปที่ 3.4 เป็นการป้อนกลับแบบลบ ซึ่งทรานซิสเตอร์จะทำหน้าที่เป็นวงจรขยายที่ต่อแบบคอมมอนอิมิตเตอร์ และจะทำการป้อนสัญญาณกลับจากตัวทรานซิสเตอร์เองผ่านขาคอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์ ค่าความถี่เชิงมุม  $\omega_0$  ของการเกิดการออสซิลเลต สามารถหาค่าได้จาก

$$\omega_0 = \frac{1}{RC\sqrt{2N}} \quad (3.8)$$

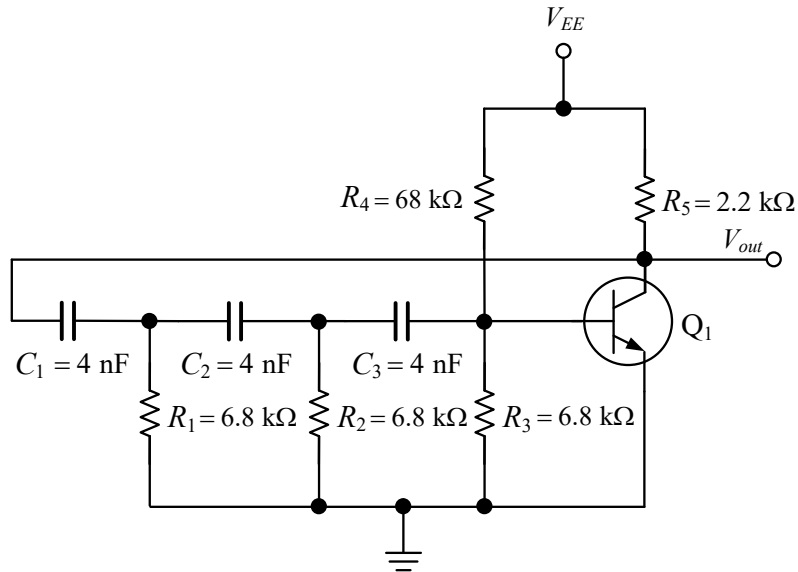
และสามารถหาค่าความถี่ได้จาก

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC\sqrt{2N}} \quad (3.9)$$

เพื่อให้ง่ายต่อการออกแบบ มักจะกำหนดให้ค่าความต้านทานและค่าตัวเก็บประจุแต่ละตัวเท่ากัน จะได้  $R = R_1 = R_2 = R_3 = R_4 \dots$  และ  $C = C_1 = C_2 = C_3 = C_4 \dots$  สำหรับ  $N$  คือจำนวนชุดของคู่ตัวต้านทานที่ต่อร่วมกับตัวเก็บประจุ หรือจำนวนคู่  $RC$  ที่ทำการต่อในวงจร ซึ่งจะมีผลต่อการเลื่อนเฟส คือ  $RC$  จำนวน 1 คู่ มีผลต่อการเลื่อนเฟสของสัญญาณเท่ากับ 60 องศา (Ramon, 2018) สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรในรูปที่ 3.5 จะเกิดการออสซิลเลตของสัญญาณ ช่วงเวลา  $t$  เท่ากับศูนย์ โดยอัตราขยายที่เกิดขึ้นภายในของตัวทรานซิสเตอร์ที่นำมาต่อใช้งานจะมีอัตราขยายที่ไม่สามารถควบคุมได้ ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ที่นำมาต่อใช้งาน ทั้งนี้ วงจรกำเนิดสัญญาณอาร์ซีเอสซิลเลเตอร์ มีข้อดี คือ สามารถสร้างเป็นวงจรกำเนิดสัญญาณได้ง่าย ไม่จำเป็นต้องใช้ตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งยากต่อการการออกแบบและใช้งาน เป็นวงจรกำเนิดสัญญาณที่เหมาะสมสำหรับใช้งานในย่านความถี่ต่ำ และการเกิดการออสซิลเลตที่คงที่ อย่างไรก็ตามก็มีข้อเสีย คือ การเกิดการออสซิลเลตของสัญญาณเอาต์พุตมีการขยายต่ำ (ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์) มีข้อจำกัดของค่าความถี่ที่กำเนิดได้เฉพาะช่วงความถี่ต่ำเท่านั้น ซึ่งต้องมีเงื่อนไขการเลือกใช้ค่าความต้านทานและค่าเก็บประจุทุกตัวเท่ากัน และการเกิดการออสซิลเลตจะเกิดขึ้นได้ยาก เนื่องจากค่าเอาต์พุตของสัญญาณที่ทำการป้อนกลับมีค่าต่ำ เป็นต้น

**ตัวอย่างที่ 3.1**

จากรูปแสดงวงจรกำเนิดสัญญาณอาร์ชีออสซิลเลเตอร์อย่างง่าย จงหาค่าความถี่ที่เกิดขึ้นของวงจร



(ธน์สถ์, 2565)

**วิธีทำ** จากรูปจะเห็นได้ว่า ค่า  $R = R_1 = R_2 = R_3 = 6.8 \text{ k}\Omega$ ,  $C = C_1 = C_2 = C_3 = 4 \text{ nF}$  และจำนวนชุดของคู่ตัวต้านทานที่ต่อร่วมกับตัวเก็บประจุ  $N = 3$  สามารถหาค่าความถี่ของวงจรได้จากสมการที่ (3.5) โดย

$$\omega_0 = \frac{1}{RC\sqrt{2N}}$$

$$2\pi f_0 = \frac{1}{RC\sqrt{2N}}$$

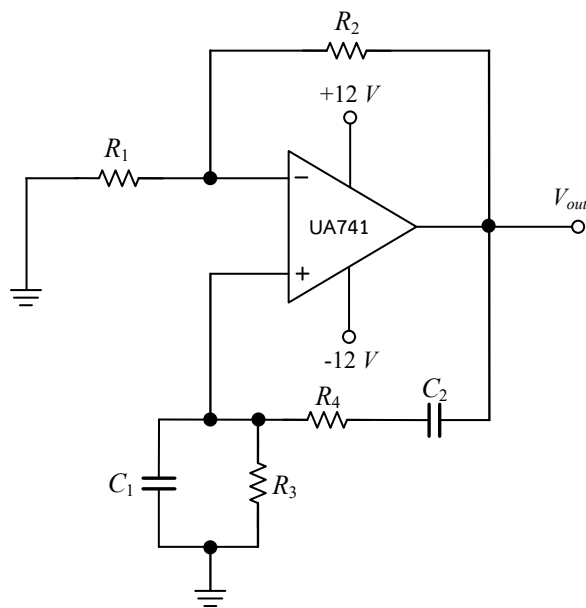
จะได้ค่า  $f_0 = \frac{1}{2\pi RC\sqrt{2N}}$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \times 6.8 \text{ k}\Omega \times 4 \text{ nF} \times \sqrt{2 \times 3}}$$

$$f_0 \cong 4 \text{ kHz}$$

**ตอบ** ค่าความถี่ที่เกิดขึ้นของวงจร มีค่าประมาณเท่ากับ 4 kHz

จะเห็นได้ว่า วงจรถ่ายสัญญาณอาร์ซีเอสซิลเลเตอร์อย่างง่ายโดยใช้อุปกรณ์แพสซีฟ มีข้อจำกัดค่อนข้างเยอะ (Elprocus, 2021) ซึ่งเกี่ยวข้องกับส่วนของวงจรถ่ายของตัวทรานซิสเตอร์ที่มีอัตราการขยายคงที่ ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์แต่ละตัว อีกทั้งลักษณะการป้อนกลับของวงจรถ่ายอยู่ในรูปแบบการป้อนกลับแบบลบ ทำให้เกิดการเลื่อนเฟสของสัญญาณและการควบคุมการป้อนกลับเพื่อให้เป็นไปตามเงื่อนไขหลักเกณฑ์ของ Barkhausen ค่อนข้างทำได้ยาก จึงมีการพัฒนาวงจรถ่ายอาร์ซีเอสซิลเลเตอร์ที่สามารถให้กำเนิดสัญญาณไซน์อีกรูปแบบที่ใช้อุปกรณ์แพสซีฟต่อร่วมกับออปแอมป์ ทำให้วงจรมีการป้อนกลับแบบบวก (All about electronics, 2021) เรียกว่า วงจรถ่ายสัญญาณไซน์เวินเบร็ดจ์ออสซิลเลเตอร์ (Wein Bridge Oscillator) หรือเรียกอีกอย่างว่า วงจรถ่ายสัญญาณฮาร์โมนิกออสซิลเลเตอร์ (Harmonic Oscillator) แสดงดังรูปที่ 3.6 ซึ่งโดยส่วนใหญ่สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรถ่ายนี้ คือ สัญญาณไซน์ที่นำไปใช้งานในย่านความถี่เสียง



รูปที่ 3.6 วงจรถ่ายสัญญาณไซน์เวินเบร็ดจ์ออสซิลเลเตอร์ (ธน์สร์, 2565)

จากรูปที่ 3.6 ค่าแรงดันไบแอสบวกและไบแอสลบที่จ่ายให้กับออปแอมป์ เท่ากับ 12 โวลต์ ตัวต้านทาน  $R_1$  และ  $R_2$  คือ ส่วนของวงจรถ่ายซึ่งต่ออยู่กับขาอินพุตลบของออปแอมป์ ส่วนถัดมาคือ ส่วนของวงจรถ่ายป้อนกลับที่ทำการต่อป้อนกลับแบบบวก มีอยู่สองส่วนด้วยกัน ส่วนแรกคือ ตัวเก็บประจุ  $C_1$  และ  $R_3$  ที่ทำการต่อกันแบบขนาน ทำหน้าที่เป็นวงจรถ่ายความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass filter) และส่วนที่สองคือ ตัวเก็บประจุ  $C_2$  และ  $R_4$  ที่ทำการต่อกันแบบอนุกรม ทำหน้าที่เป็นวงจรถ่ายความถี่สูงผ่าน (High-pass filter) ดังนั้นเมื่อทั้งสองต่ออยู่ด้วยกันในวงจรถ่าย ทำให้กลายเป็นวงจรถ่ายความถี่ผ่าน (Band-pass filter) (Muhammad, 2011) เมื่อพิจารณาจากวงจรถ่าย

โดยอาศัยความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ กับเงื่อนไขหลักเกณฑ์ของ Barkhausen สามารถหา  $\beta$  ได้คือ

$$\beta = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (3.10)$$

เมื่อพิจารณาจากค่าอิมพีแดนซ์ในวงจรถ่ายโอน จะได้  $Z_1 = R_3 \parallel -jX_{C_1}$  และ  $Z_2 = R_4 - jX_{C_2}$  เนื่องจากค่า  $Z_1$  คือค่า  $R_3$  ต่อขนานกับ  $-jX_{C_1}$  ดังนั้นสามารถหาค่า  $Z_1$  ได้จาก

$$Z_1 = \frac{-jX_{C_1} R_3}{-jX_{C_1} + R_3} \quad (3.11)$$

$$Z_1 = \frac{-jX_{C_1} R_3}{-jX_{C_1} \left( 1 + \left( \frac{R_3}{-jX_{C_1}} \right) \right)} \quad (3.12)$$

จะได้

$$Z_1 = \frac{R_3}{1 + \left( \frac{R_3}{-jX_{C_1}} \right)} \quad (3.13)$$

เมื่อ  $X_C = \frac{1}{\omega C}$  จะได้ค่า  $Z_1$  คือ

$$Z_1 = \frac{R_3}{1 + j\omega C_1 R_3} \quad (3.14)$$

และสามารถค่า  $Z_2$  ได้จาก

$$Z_2 = R_4 - \frac{j}{\omega C_2} \quad (3.15)$$

แทนค่าสมการที่ (3.14) และ (3.15) ในสมการที่ (3.10) จะได้

$$\beta = \frac{\left( \frac{R_3}{1 + j\omega C_1 R_3} \right)}{\left( \frac{R_3}{1 + j\omega C_1 R_3} \right) + \left( R_4 - \frac{j}{\omega C_2} \right)} \quad (3.16)$$

จัดรูปใหม่เป็น

$$\beta = \frac{R_3}{R_3 + R_4 - \left(\frac{j}{\omega C_2}\right) + j\omega C_1 R_3 R_4 + \left(\frac{C_1 R_3}{C_2}\right)} \quad (3.17)$$

หรือ

$$\beta = \frac{R_3}{R_3 \left(1 + \frac{C_1}{C_2}\right) + R_4 + j \left(\omega C_1 R_3 R_4 - \left(\frac{1}{\omega C_2}\right)\right)} \quad (3.18)$$

พิจารณารูปจางนจินตภาพของตัวส่วนในสมการที่ (3.18) เพื่อทำการหาค่า  $\omega$  จะได้

$$\omega C_1 R_3 R_4 = \frac{1}{\omega C_2} \quad (3.19)$$

$$\omega^2 = \frac{1}{C_1 C_2 R_3 R_4} \quad (3.20)$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{C_1 C_2 R_3 R_4}} \quad (3.21)$$

ดังนั้น สามารถหาค่าความถี่  $f_0$  ได้จาก

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{C_1 C_2 R_3 R_4}} \quad (3.22)$$

หากทำการกำหนดค่าให้  $R = R_3 = R_4$  และ  $C = C_1 = C_2$  ค่าความถี่  $f_0$  สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3.23)$$

ทั้งนี้ จากสมการที่ (3.18) วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์เวเนย์บริดจ์ออสซิลเลเตอร์ สามารถหาค่าอัตราขยายของวงจรป้อนกลับ  $\beta$  ได้จาก

$$\beta = \frac{R_3}{R_3 \left(1 + \frac{C_1}{C_2}\right) + R_4} \quad (3.24)$$

เนื่องจากกำหนดให้  $R = R_3 = R_4$  และ  $C = C_1 = C_2$  จะได้

$$\beta = \frac{R}{3R} \quad (3.25)$$

ดังนั้น จะได้

$$\beta = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{3} \quad (3.26)$$

และค่ามุมเฟสสัญญาณของวงจรถ่ายโอน คือ

$$\phi = 0 \quad (3.27)$$

อาศัยความสัมพันธ์จากสมการที่ (3.25) และ (3.26) ทำให้สามารถหาค่า  $A$  ได้ นั่นคือ

$$A = 3 \quad (3.28)$$

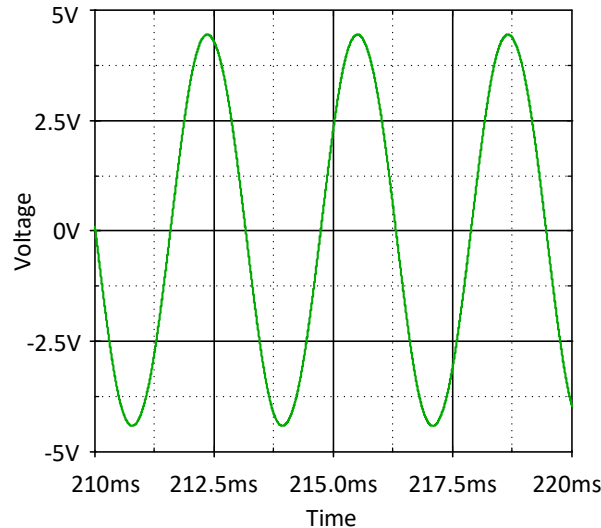
จากสมการที่ (3.28) คือส่วนของอัตราขยายของวงจรถ่ายโอน ซึ่งสามารถหาค่าอัตราขยายของวงจรถ่ายโอนที่เกิดขึ้นจากวงจรถ่ายโอนในรูปที่ 3.6 จาก

$$A = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (3.29)$$

แทนสมการที่ (3.28) ลงในสมการที่ (3.29) จะได้

$$\frac{R_2}{R_1} = 2 \quad (3.30)$$



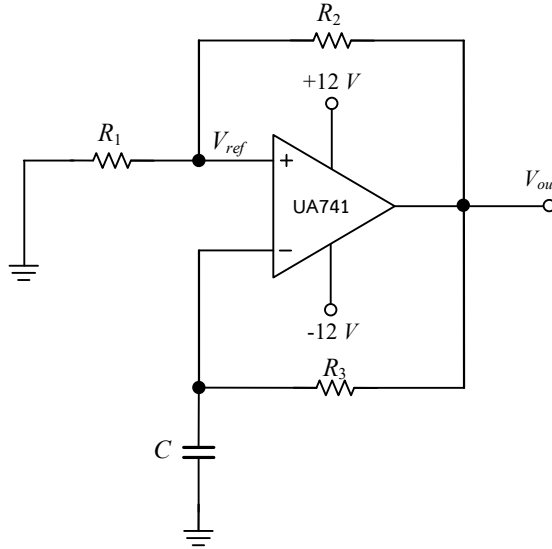


รูปที่ 3.7 สัญญาณเอาต์พุตรูปคลื่นไซน์จากวงจรวอร์นีย์บริดจ์ออสซิลเลเตอร์ในรูปที่ 3.6 (ธันส์, 2565)

จะเห็นได้ว่า การออกแบบวงจรในรูปที่ 3.6 จะต้องกำหนดค่าของตัวอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้วงจรเป็นไปตามเงื่อนไขของ Barkhausen จะทำให้ได้สัญญาณเอาต์พุตรูปคลื่นไซน์ที่ต้องการดังรูปที่ 3.7 ทั้งนี้วงจรถ่ายสัญญาณรูปคลื่นไซน์ได้มีการพัฒนาเพื่อให้วงจรสามารถสร้างสัญญาณไซน์ที่มีความถี่สูงขึ้นได้ หรือสามารถปรับค่าความถี่เพื่อให้กำเนิดสัญญาณไซน์ได้ตามที่ต้องการจากการปรับค่ากระแสหรือแรงดันภายนอกวงจรได้ โดยการใช้อุปกรณ์แอคทิฟประเภทอื่น ๆ แทนตัวออปแอมป์ เช่น วงจรขยายความนำถ่ายไอออน วงจรสายพานกระแสยุคที่สอง วงจรขยายความนำถ่ายไอออนสายพานกระแส (Kumngern et al., 2019) เป็นต้น

### 3.2 วงจรถ่ายสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม

วงจรถ่ายสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม จัดอยู่ในประเภท วงจรถ่ายรูปคลื่นอื่น ๆ ที่ไม่ใช่สัญญาณรูปคลื่นไซน์ หรือเรียกว่า วงจรออสซิลเลเตอร์แบบผ่อนคลาย (Relaxation oscillator) วงจรออสซิลเลเตอร์แบบวงจรถัดชนวนแบบชมิทต์ (Schmitt-trigger oscillator) หรือวงจรอะสเตเบิล มัลติไวเบรเตอร์ (Astable multivibrator) (Richard, 2000) โดยทั่วไปสามารถสร้างได้จากอุปกรณ์แอคทิฟ คือ ออปแอมป์ เพียงจำนวน 1 ตัว นำมาต่อร่วมกับอุปกรณ์พาสซีฟ คือ ตัวต้านทานอย่างน้อย จำนวน 3 ตัว และตัวเก็บประจุ เพียงจำนวน 1 ตัว เท่านั้น (Eeeguide, 2022) ลักษณะการต่อเพื่อใช้งานเป็นการต่อแบบโหมตร่วมที่มีการป้อนกลับของสัญญาณเอาต์พุตมายังขาอินพุตลบและขาอินพุตบวกของออปแอมป์ โดยไม่จำเป็นจะต้องใช้สัญญาณอินพุตเพื่อป้อนให้กับวงจร แสดงได้ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 วงจรถ่ายสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมอย่างง่าย (ธันส์, 2565)

สำหรับหลักการการทำงานของวงจรถ่ายสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมอย่างง่าย เป็นการควบคุมการทำงานของออปแอมป์ให้ทำงานในช่วงอิมิตัว ทั้งทางด้านลบและด้านบวกสลับกันไป หรืออยู่ย่านคัตออฟเท่านั้น (Ramakant, 2011) จากรูปที่ 3.8 อัตราส่วน  $\beta V_{out}$  จะถูกป้อนกลับไปยังขาอินพุตบวกของออปแอมป์ โดย  $\beta$  มีค่าเท่ากับ

$$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \tag{3.31}$$

เมื่อแรงดันที่ปรากฏที่ขาเอาต์พุตของออปแอมป์ถูกป้อนกลับไปยังขาอินพุตบวกแล้ว ในที่นี้กำหนดเป็นค่าแรงดันเอาต์พุตที่มีอัตราขยาย  $\beta$  ทำให้แรงดันขณะป้อนกลับ ณ จุด  $V_{ref}$  จะกลายเป็น

$$\beta V_{sat+} \tag{3.32}$$

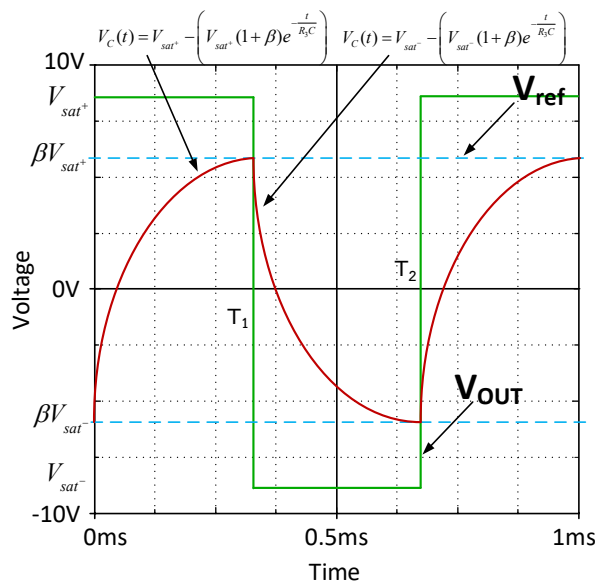
หรือ

$$\beta V_{sat-} \tag{3.33}$$

ณ จุดแรงดันที่ปรากฏที่ขาเอาต์พุตของออปแอมป์อีกด้านหนึ่ง จะถูกป้อนกลับไปยังขาอินพุตลบ โดยมีตัวเก็บประจุที่ทำการต่อลงกราวนด์ ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมภายในตัวเก็บประจุ  $V_C$  แรงดัน

ที่ตกคร่อมนี้จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามการเก็บประจุและคายประจุของตัวเก็บประจุ และเมื่อใดก็ตามที่  $V_C$  มีค่าเปลี่ยนแปลงไปจนถึงค่าระดับแรงดันอ้างอิง  $V_{ref}$  ค่าแรงดันเอาต์พุต  $V_{out}$  จะมีการเปลี่ยนแปลงสถานะไปตามค่าระดับแรงดันอ้างอิง  $V_{ref}$  ลักษณะการทำงานของออปแอมป์ในช่วงนี้คือ การทำงานเป็นวงจรเปรียบเทียบแรงดัน ดังที่เคยกล่าวถึงไปแล้วในบทที่ 2

จากรูปที่ 3.9 แสดงการทำงานและสัญญาณเอาต์พุตจากวงจรในรูปที่ 3.8 ที่สามารถสร้างสัญญาณเป็นรูปคลื่นสัญญาณสี่เหลี่ยม สามารถอธิบายการทำงานได้ คือ เมื่อพิจารณาช่วงครึ่งคาบเวลาแรก  $0 - (1/2)T = T_1$  สำหรับส่วนของการป้อนกลับเข้าขาอินพุตลบ เมื่อแรงดันสัญญาณเอาต์พุต มีค่าเท่ากับ  $V_{sat+}$  ตัวเก็บประจุ  $C$  จะทำการเก็บประจุจากแรงดันที่ได้ ผ่านตัวต้านทาน  $R_3$  และในขณะเดียวกัน สำหรับส่วนของการป้อนกลับเข้าขาอินพุตบวก ซึ่งค่าแรงดันอ้างอิง  $V_{ref}$  ที่ได้จะมีค่าเท่ากับสมการที่ (3.32) แรงดันที่ตกคร่อมตัวประจุ  $C$  หรือ  $V_C$  จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งมีค่าเท่ากับแรงดันสูงสุดที่ตัวเก็บประจุสามารถเก็บแรงดันได้ แรงดันที่ตกคร่อมนี้จะมีค่าสูงสุดเท่ากับสมการที่ (3.32) หลังจากนั้น ช่วงคาบเวลา  $(1/2)T - T = T_2$  แรงดันเอาต์พุต  $V_{out}$  ก็จะมีค่าเปลี่ยนแปลงจากสมการที่ (3.32) เป็น (3.33) และในช่วงคาบเวลาเดียวกันนี้ แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุก็จะเริ่มคายประจุผ่านตัวต้านทาน  $R_3$  จนมีค่าลดลงเท่ากับระดับแรงดันศูนย์โวลต์ และจะเริ่มทำการเก็บประจุใหม่จากแรงดัน  $V_{sat-}$  ไปเรื่อย ๆ จนถึงค่าระดับตามเงื่อนไขในสมการที่ (3.33) ทำให้ ณ ช่วงเวลานี้แรงดันเอาต์พุต  $V_{out}$  จะเปลี่ยนจากแรงดัน  $V_{sat-}$  กลับไปเป็น  $V_{sat+}$  อีกครั้งเหมือนในช่วงการทำงานเริ่มแรกของคาบเวลา  $0 - (1/2)T = T_1$  การทำงานของวงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ก็จะเกิดซ้ำกันไปตลอดช่วงเวลาแบบนี้ตลอดไป



รูปที่ 3.9 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมอย่างง่าย (ธันส์, 2565)

สำหรับค่าคาบเวลาและค่าความถี่ที่เกิดขึ้นภายในวงจรถ่ายสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมนี้ สามารถหาค่าได้ในช่วงแรงดันที่เกิดขึ้น จากค่าเวลาการเก็บประจุหรือคายประจุของตัวเก็บประจุ ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$V_C(t) = V_f + (V_i - V_f)e^{-\frac{t}{R_3C}} \quad (3.34)$$

โดยที่  $V_f$  คือ แรงดันค่าสุดท้าย มีค่าเท่ากับ  $V_{sat^+}$  และ  $V_i$  คือ แรงดันค่าเริ่มต้น มีค่าเท่ากับ  $\beta V_{sat^-}$  ดังนั้น จากสมการที่ (3.34) สามารถเขียนใหม่ได้ คือ

$$V_C(t) = V_{sat^+} + (\beta V_{sat^-} - V_{sat^+})e^{-\frac{t}{R_3C}} \quad (3.35)$$

เมื่อ  $-V_{sat^+} = V_{sat^-}$  สมการที่ (3.35) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$V_C(t) = V_{sat^+} - \left( V_{sat^+} (1 + \beta) e^{-\frac{t}{R_3C}} \right) \quad (3.36)$$

ทำการพิจารณาช่วงครึ่งคาบเวลาแรก ณ ช่วงเวลา  $t = 0 - (1/2)T = T_1$  ค่าแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุจะมีค่าเท่ากับ  $\beta V_{sat^+}$  และค่าแรงดันเอาต์พุต  $V_{out}$  จะมีการเปลี่ยนแปลงจาก  $V_{sat^+}$  เป็น  $V_{sat^-}$  ดังนั้น สามารถหาค่าแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุช่วงครึ่งคาบเวลาแรก คือ

$$V_C(T_1) = \beta V_{sat^+} = V_{sat^+} - \left( V_{sat^+} (1 + \beta) e^{-\frac{T_1}{R_3C}} \right) \quad (3.36)$$

จะได้

$$\beta = 1 - (1 + \beta) e^{-\frac{T_1}{R_3C}} \quad (3.37)$$

$$1 - \beta = (1 + \beta) e^{-\frac{T_1}{R_3C}} \quad (3.38)$$

$$\frac{1-\beta}{1+\beta} = e^{-\frac{T_1}{R_3C}} \quad (3.39)$$

$$\ln\left(\frac{1-\beta}{1+\beta}\right) = \ln\left(e^{-\frac{T_1}{R_3C}}\right) \quad (3.40)$$

$$\ln\left(\frac{1-\beta}{1+\beta}\right) = -\frac{T_1}{R_3C} \quad (3.41)$$

ดังนั้น จะได้  $T_1$  คือ

$$T_1 = \ln\left(\frac{1+\beta}{1-\beta}\right)R_3C \quad (3.42)$$

แต่เนื่องจาก  $T_1$  คือ ช่วงเวลาครึ่งคาบเวลา  $0-(1/2)T$  เท่านั้น ดังนั้นจะได้

$$T = 2T_1 = 2\ln\left(\frac{1+\beta}{1-\beta}\right)R_3C \quad (3.43)$$

จากเงื่อนไขทั้งหมดที่เกิดขึ้น พบว่าหาก  $V_{sat^+}$  มีขนาดเท่ากับ  $V_{sat^-}$  แรงดันเอาต์พุตที่ได้จะเป็นรูปคลื่นสัญญาณสี่เหลี่ยมที่มีความสมมาตรกัน (Symmetrical waveform) (Naik, 2022) หากการออกแบบวงจรดังรูปที่ 3.8 โดยเลือกให้ตัวต้านทาน  $R_1 = R_2$  จะได้ค่า  $\beta = 0.5$  ดังนั้นสมการที่ (3.43) สามารถเขียนได้ใหม่คือ

$$T = 2(\ln 3)(R_3C) \quad (3.44)$$

หรือ

$$T \cong 2.2(R_3C) \quad (3.45)$$

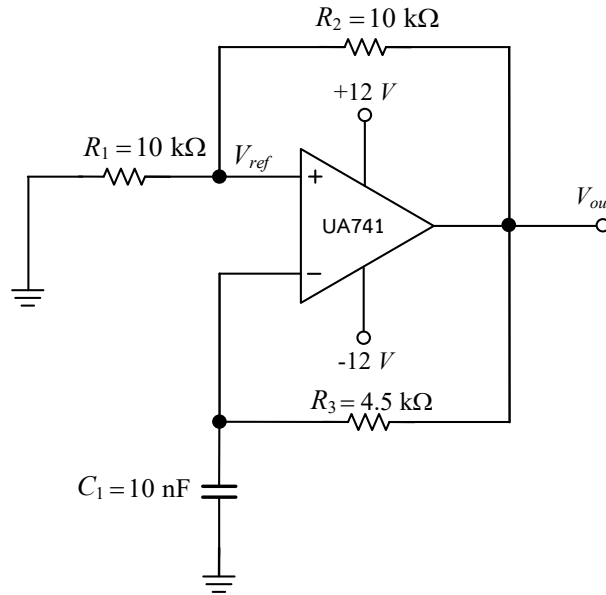
จะได้ ค่าความถี่  $f_0$  คือ

$$f_0 \cong \frac{1}{2.2(R_3C)} \quad (3.46)$$

**ตัวอย่างที่ 3.2**

จงออกแบบวงจรถ่ายสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมอย่างง่าย โดยกำหนดให้ค่าความถี่  $f_0 = 10 \text{ kHz}$

**วิธีทำ** วงจรถ่ายสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมอย่างง่าย สามารถสร้างได้จาก ออปแอมป์ จำนวน 1 ตัว ตัวต้านทาน จำนวน 3 ตัว และตัวเก็บประจุ จำนวน 1 ตัว ดังรูป



(ธนัสถ์, 2565)

โดยโจทย์ต้องการให้เอาต์พุตของสัญญาณมีค่าความถี่  $f_0 = 10 \text{ kHz}$  ดังนั้น อาศัยสมการที่ (3.46) โดยมีเงื่อนไขคือ  $R_1 = R_2$  จะได้ว่า

$$f_0 \cong \frac{1}{2.2R_3C}$$

$$10 \text{ kHz} \cong \frac{1}{2.2R_3C}$$

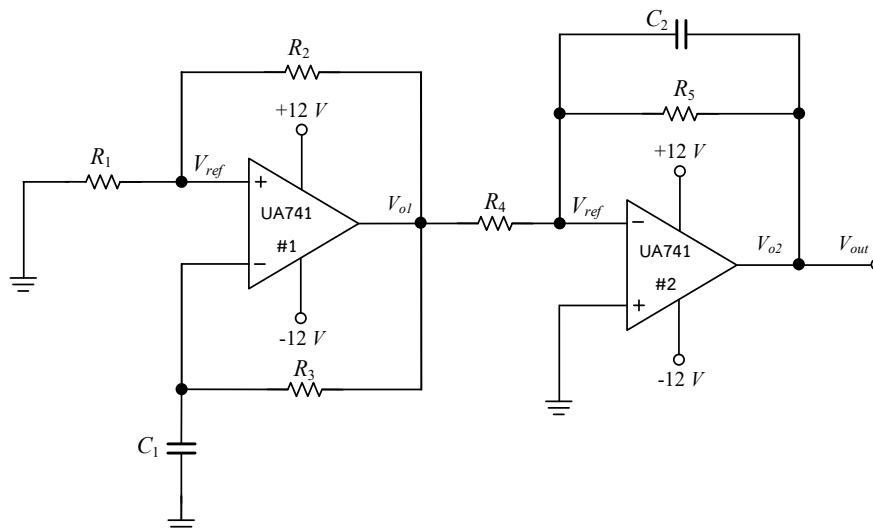
$$R_3C \cong \frac{1}{2.2(10 \text{ kHz})}$$

$$R_3C \cong 45.45 \times 10^{-6}$$

**ตอบ** ในที่นี้จะเลือกค่า  $R_3 = 4.5 \text{ k}\Omega$ ,  $C = 10 \text{ nF}$  โดย  $R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega$  ดังนั้นจะได้ วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมอย่างง่าย ที่ต้องการเอาต์พุตของสัญญาณมีค่าความถี่  $f_0 = 10 \text{ kHz}$

### 3.3 วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม

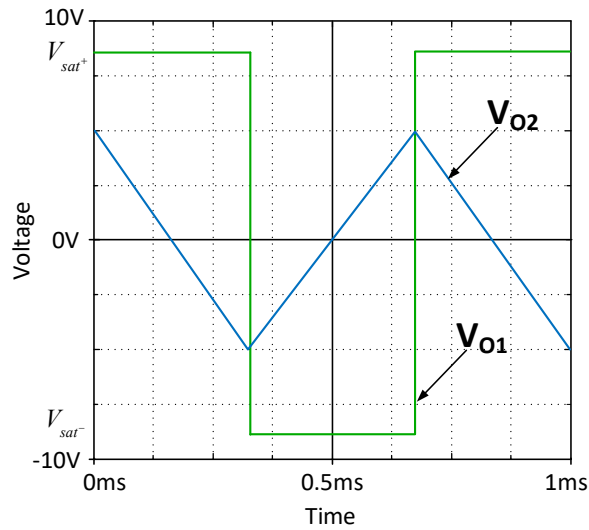
วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม จัดอยู่ในประเภท วงจรกำเนิดรูปคลื่นอื่น ๆ ที่ไม่ใช่สัญญาณรูปคลื่นไซน์ เช่นเดียวกับกับวงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ซึ่งโดยปกติแล้วสัญญาณที่ได้จากวงจรกำเนิดรูปคลื่นสามเหลี่ยม จะถูกสร้างมาจากพื้นฐานของวงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 3.8 โดยนำเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ได้ ไปต่ออนุกรมร่วมกับวงจรถ่ายปริพันธ์ (Integrator circuit) (Naik, 2022) แสดงดังรูปที่ 3.10 สัญญาณที่ออกจากวงจรถ่ายปริพันธ์ ก็จะเป็นรูปคลื่นสัญญาณสามเหลี่ยมได้ตามต้องการ ดังรูปที่ 3.11 แต่วิธีการต่อแบบดังกล่าวนี้ขนาดของแอมพลิจูดของรูปคลื่นสัญญาณสามเหลี่ยมจะมีค่าลดลงเมื่อความถี่เพิ่มมากขึ้น



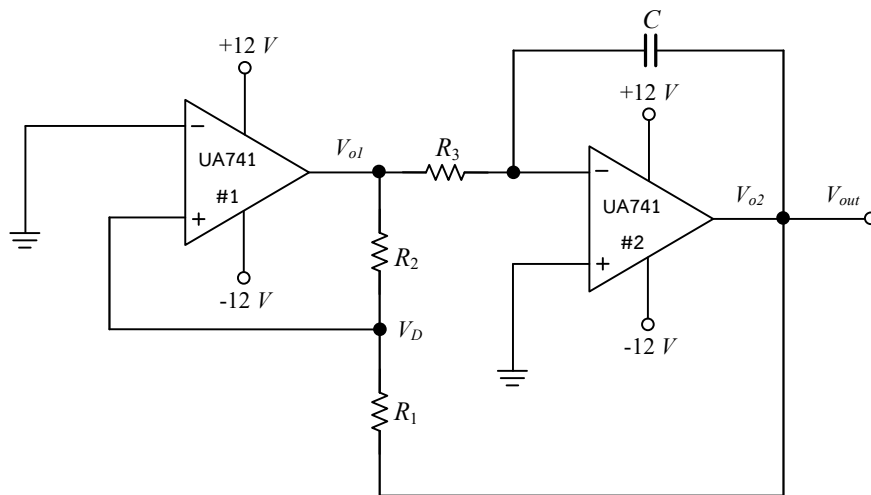
รูปที่ 3.10 วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยมที่สร้างจากวงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ต่ออนุกรมร่วมกับวงจรถ่ายปริพันธ์ (ธน์สธ, 2565)

สำหรับวงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยมที่เป็นที่นิยมนำมาใช้งานอีกแบบหนึ่ง แสดงดังรูปที่ 3.12 จะมีการใช้จำนวนของตัวอุปกรณ์น้อยกว่าวงจรในรูปที่ 3.10 ประกอบไปด้วยวงจรเปรียบเทียบสัญญาณแบบวงจรจุดชนวนแบบขมิตต์ ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 ต่ออนุกรมร่วมกับวงจรถ่ายปริพันธ์ หลักการทำงานของวงจรถ่ายปริพันธ์ เป็นการนำวงจรถ่ายจุดชนวนแบบขมิตต์ มาใช้งานเพื่อใช้เปรียบเทียบระดับสัญญาณสองระดับ ซึ่งทำให้ได้ค่าเอาต์พุตออกมา 2 ค่า คือ  $V_{sat+}$  และ  $V_{sat-}$  ที่เป็นสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมและมีแอมพลิจูด  $\pm V_{sat}$  สัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมนี้จะถูกป้อนไปเป็นสัญญาณอินพุตผ่านตัวต้านทาน  $R_3$  ให้กับวงจรถ่ายปริพันธ์ ทำให้สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะเป็นสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม

แสดงดังรูปที่ 3.13 สัญญาณรูปคลื่นเอาต์พุตที่ได้ส่วนหนึ่งจะถูกป้อนกลับไปยังวงจรถ่ายสัญญาณแบบซิมิตต์อีกครั้ง โดยผ่านตัวต้านทานที่ต่อเป็นวงจรถ่ายแรงดันจำนวนสองตัวคือ  $R_1$  และ  $R_2$

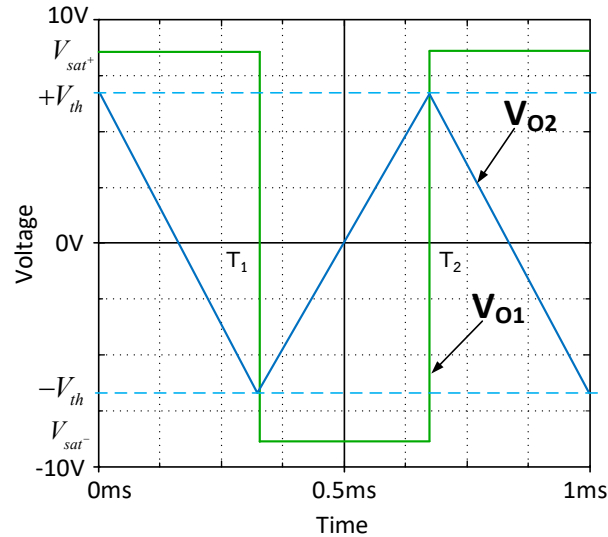


รูปที่ 3.11 สัญญาณเอาต์พุตรูปคลื่นสามเหลี่ยมจากวงจรรูปที่ 3.10 (ธนัสถ์, 2565)



รูปที่ 3.12 วงจรถ่ายสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยมที่สร้างจากวงจรถ่ายสัญญาณแบบซิมิตต์ ต่ออนุกรมร่วมกับวงจรถ่ายปริพันธ์ (ธนัสถ์, 2565)





รูปที่ 3.13 สัญญาณเอาต์พุตรูปคลื่นสามเหลี่ยมจากวงจรรูปที่ 3.12 (ธันส์, 2565)

หลักการการทำงานของวงจรรูปที่ 3.12 นั้น สามารถอธิบายได้ คือ เริ่มต้นทำการสมมติให้เอาต์พุตของวงจรถูกจัดชววนแบบขมิตต์มีค่าเริ่มต้นที่  $V_{sat+}$  ซึ่ง ณ ช่วงเวลา ครึ่งคาบแรก  $t = 0 - (1/2)T = T_1$  นั้น ทำให่วงจรหาปริพันธ์จะทำการปริพันธ์สัญญาณ  $V_{sat+}$  เป็นสัญญาณแรम्พ์ (Ramp signal) ด้านขาลงที่มีขนาดแอมพลิจูดเท่ากับค่าระดับแรงดันขีดเริ่มบวก  $+V_{th}$  เนื่องจากวงจรถหาปริพันธ์ที่ต่อในวงจรถาการต่อแบบกลับเฟส (มนตรีและธนูศักดิ์, 2558) ดังนั้นแรงดันที่ปลายด้านหนึ่งของวงจรถแบ่งแรงดัน  $R_1$  และ  $R_2$  มีค่าเป็น  $V_{sat+}$  ขณะเดียวกันสำหรับแรงดันเอาต์พุตที่ออกจากวงจรถหาปริพันธ์ ในที่นี้ กำหนดให้เป็น  $V_{O2}$  เมื่อถึงช่วงเวลา  $t = 0 - (1/2)T = T_1$  ทำให้สัญญาณ  $V_{O2}$  มีแอมพลิจูดเท่ากับค่าระดับแรงดันขีดเริ่มลบ  $-V_{th}$  ณ จุดนี้ ทำให้แรงดัน  $V_D$  มีค่าต่ำกว่าศูนย์โวลต์เล็กน้อย ส่งผลให้อาต์พุตของวงจรถจัดชววนแบบขมิตต์ จะเปลี่ยนจาก  $V_{sat+}$  เป็น  $V_{sat-}$  โดยทันที และขณะเดียวกันในช่วงเวลาที่  $V_{O1}$  มีค่าเป็น  $V_{sat+}$  นั้น สัญญาณ  $V_{O2}$  ก็จะเพิ่มขึ้นไปในทิศทางบวก เนื่องมาจากการทำงานของวงจรถหาปริพันธ์เช่นเดียวกัน เมื่อเวลาที่  $t = (1/2)T - T = T_2$  แรงดัน ณ จุด  $V_D$  ก็จะมีค่ามากกว่าศูนย์โวลต์เล็กน้อย จึงทำให้สัญญาณ  $V_{O1}$  เปลี่ยนจากระดับ  $V_{sat+}$  เป็น  $V_{sat-}$  อีกครั้ง และการทำงานของวงจรถจะเป็นเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จะเห็นได้ว่าความถี่ของรูปคลื่นสัญญาณทั้งจากวงจรถจัดชววนแบบขมิตต์และวงจรถหาปริพันธ์จะมีค่าเท่ากัน อย่างไรก็ตาม แอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้เป็นรูปคลื่นสัญญาณสามเหลี่ยมจะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทาน  $R_3$  ตัวเก็บประจุ  $C$  ของวงจรถหาปริพันธ์ และระดับแรงดันเอาต์พุต  $V_{O1}$

สำหรับการหาค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้ สามารถทำการวิเคราะห์โดยทำการพิจารณาจากแรงดัน ณ จุด  $V_D$  ในช่วงเวลาที่เอาต์พุตของวงจรถ่ายโอนแบบขมิตต์มีค่าเป็น  $V_{sat^+}$  โดย

$$V_D = -V_{th} + \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) (V_{sat^+} - (-V_{th})) \quad (3.47)$$

ที่เวลา  $t = 0 - (1/2)T = T_1$  แรงดัน ณ จุด  $V_D$  จะกลายเป็นศูนย์โวลต์ ดังนั้น จากสมการที่ (3.47) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$-V_{th} = -\frac{R_1}{R_2} (V_{sat^+}) \quad (3.48)$$

ในทำนองเดียวกัน ที่เวลา  $t = (1/2)T - T = T_2$  เอาต์พุตของวงจรถ่ายโอนแบบขมิตต์จะเปลี่ยนแปลงจากระดับ  $V_{sat^-}$  เป็น  $V_{sat^+}$  จะได้

$$V_{th} = -\frac{R_1}{R_2} (V_{sat^-}) \quad (3.49)$$

หรือ

$$V_{th} = \frac{R_1}{R_2} (V_{sat^+}) \quad (3.50)$$

ดังนั้น จะได้ค่าแอมพลิจูดจากยอดถึงยอดของสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม  $V_{O_2}$  คือ

$$V_{O_2(p-p)} = +V_{th} - (-V_{th}) \quad (3.51)$$

$$V_{O_2(p-p)} = 2V_{th} \quad (3.52)$$

นำสมการที่ (3.50) แทนลงในสมการที่ (3.52) จะได้

$$V_{O2(p-p)} = 2 \frac{R_1}{R_2} (V_{sat^+}) \quad (3.53)$$

และจากสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากรูปที่ 3.13 สังเกตพบว่า สัญญาณ  $V_{O2}$  มีการเปลี่ยนแปลงจาก  $-V_{th}$  เป็น  $+V_{th}$  ในช่วงครึ่งคาบเวลา คือ  $t = 0 - (1/2)T = T_1$  และเกิดขึ้นเมื่อสัญญาณ  $V_{O1}$  มีค่าเท่ากับ  $V_{sat^-}$  ดังนั้นสามารถหาค่าแรงดันเอาต์พุต  $V_o$  ได้จาก

$$V_o = -\frac{1}{RC} \int V_i dt \quad (3.54)$$

โดย ค่าแอมพลิจูดจากยอดถึงยอดของสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม  $V_{O2}$  สามารถหาค่าได้จาก

$$V_{O2(p-p)} = -\frac{1}{R_3 C} \int_0^{T/2} V_{sat^-} dt \quad (3.55)$$

จากสมการที่ (3.55) เมื่อทำการปริพันธ์ จะได้

$$V_{O2(p-p)} = \frac{V_{sat^+}}{R_3 C} \left( \frac{T}{2} \right) \quad (3.56)$$

หรือสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$T = 2R_3 C \frac{V_{O2(p-p)}}{V_{sat^+}} \quad (3.57)$$

แทนค่าสมการที่ (3.53) ลงในสมการที่ (3.57) จะได้ ค่าคาบเวลา  $T$  คือ

$$T = \frac{4R_1 R_3 C}{R_2} \quad (3.58)$$

ดังนั้น สามารถหาค่าความถี่ได้จาก

$$f_0 = \frac{R_2}{4R_1 R_3 C} \quad (3.59)$$

สำหรับค่าสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรถ่ายสัญญาณดังรูปที่ 3.12 โดยส่วนใหญ่ จะมีความเที่ยงตรงน้อย แต่จะสามารถทำงานได้ดีสำหรับย่านความถี่เสียง และหากกรณีความถี่ต่ำ สัญญาณเอาต์พุต  $V_{O2}$  อาจเกิดความผิดเพี้ยนได้ จากการทำงานของวงจรถ่ายสัญญาณที่ผ่านเข้าสู่สถานะ อิมิตัว ซึ่งในปัจจุบันได้มีวงจรถ่ายสัญญาณสามเหลี่ยม ที่สร้างจากอุปกรณ์แพสซีฟต่อร่วมกับอุปกรณ์ แอคทีฟอื่น ๆ เช่น วงจรขยายความนำถ่ายโอน วงจรสายพานกระแสยุคที่สอง หรือวงจรขยายความ นำถ่ายโอนสายพานกระแส เป็นต้น ทำให้มีสามารถลดความผิดเพี้ยนต่ำของสัญญาณเอาต์พุตได้ มากกว่าและสามารถสร้างสัญญาณเอาต์พุตที่มีความถี่สูงได้ มีความเที่ยงตรงสูง และใช้พลังงานไฟฟ้าที่ต่ำกว่าการใช้โอปแอมป์

### ตัวอย่างที่ 3.3

จงออกแบบวงจรถ่ายสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม โดยกำหนดให้ค่าความถี่  $f_0 = 2 \text{ kHz}$  ค่าแรงดันขีดเริ่ม  $V_{th} = |-V_{th}| = 4 \text{ V}$  และค่าแรงดัน ณ จุดอิมิตัว  $+V_{sat} = |-V_{sat}| = 10 \text{ V}$  พร้อมทั้งแสดงรูปคลื่นสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรถ่าย

**วิธีทำ** วงจรถ่ายสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม สามารถสร้างได้ดังรูปที่ 3.12 ประกอบด้วย โอปแอมป์ จำนวน 2 ตัว ตัวต้านทาน จำนวน 3 ตัว และตัวเก็บประจุ จำนวน 1 ตัว โดยโจทย์ต้องการ ค่าเอาต์พุตของสัญญาณที่มีค่าความถี่  $f_0 = 2 \text{ kHz}$  ดังนั้น โดยอาศัยสมการที่ (3.50) เพื่อทำการหา ค่า  $R_1$  และ  $R_2$  จะได้

$$4 \text{ V} = \frac{R_1}{R_2} 10 \text{ V}$$

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{4 \text{ V}}{10 \text{ V}}$$

$$\frac{R_1}{R_2} = 0.4$$

ในที่นี้จะเลือกค่า  $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$  จะได้

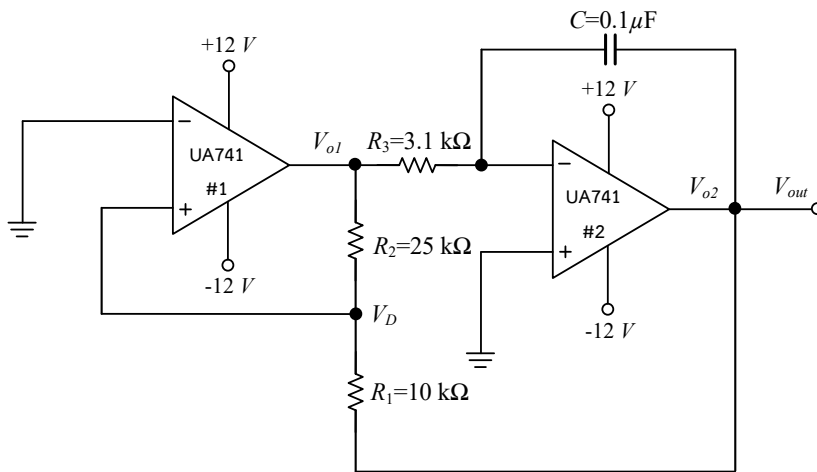
$$R_2 = \frac{10 \text{ k}\Omega}{0.4} = 25 \text{ k}\Omega$$

ทำการเลือกใช้ตัวเก็บประจุ  $C = 0.1 \mu\text{F}$  และจากโจทย์กำหนดค่าความถี่  $f_0 = 2 \text{ kHz}$  อาศัยสมการที่ (3.59) จะได้

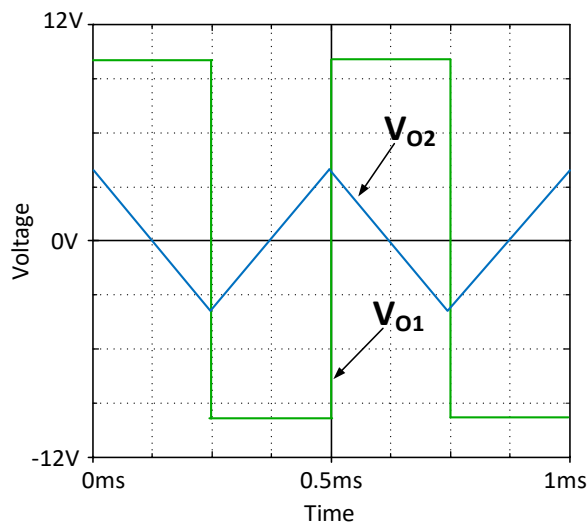
$$2 \text{ kHz} = \frac{25 \text{ k}\Omega}{4 \times (10 \text{ k}\Omega) \times R_3 \times (0.1 \mu\text{F})}$$

ดังนั้น จะได้ค่า  $R_3 \cong 3.1 \text{ k}\Omega$

**ตอบ** สำหรับการออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยมจะใช้ออปแอมป์ UA741 เป็นอุปกรณ์หลัก แรงดันไปแอสบวกและลบ เท่ากับ 12 โวลต์ โดยกำหนดให้ค่าความถี่  $f_0 = 2 \text{ kHz}$  ค่าแรงดันขีดเริ่ม  $V_{th} = |-V_{th}| = 4 \text{ V}$  และค่าแรงดัน ณ จุดอิ่มตัว  $+V_{sat} = |-V_{sat}| = 10 \text{ V}$  นั้น จะได้ค่า  $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 25 \text{ k}\Omega$ ,  $R_3 = 3.1 \text{ k}\Omega$  และ  $C = 0.1 \mu\text{F}$  สำหรับวงจรที่ได้ออกแบบและเอาต์พุตของสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยมแสดงได้ตามลำดับด้านล่างนี้



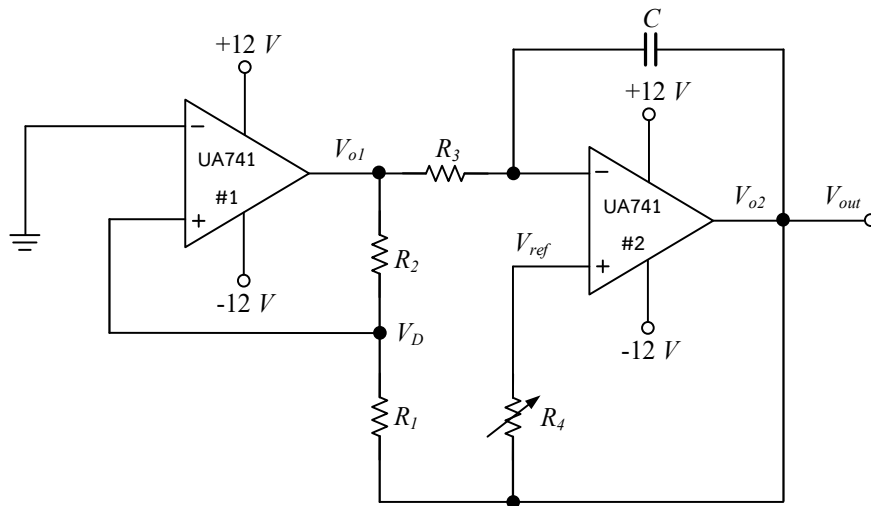
(ธนัสถ์, 2565)



(ธนัสถ์, 2565)

### 3.4 วงจรถ่ายสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อย

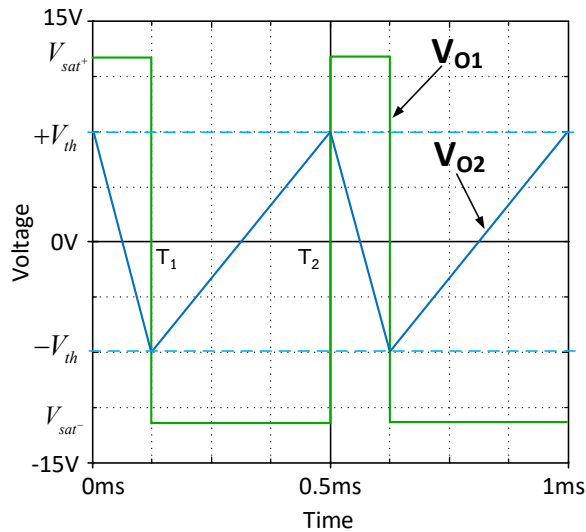
จากหัวข้อก่อนหน้านี้ ได้กล่าวถึง วงจรถ่ายสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยมไปแล้ว โดยจะสังเกตได้ว่า มีการออกแบบให้ค่าของช่วงเวลาขอบขาขึ้น (Rise time:  $t_r$ ) และขอบขาลง (Fall time:  $t_f$ ) ของสัญญาณเอาต์พุตสามเหลี่ยมมีค่าเท่ากัน คือ การเปลี่ยนแปลงจาก  $-V_{th}$  ไปยัง  $+V_{th}$  หรือจาก  $+V_{th}$  ไปยัง  $-V_{th}$  ตลอดทั้งช่วงเวลาคาบมีค่าเท่ากัน ในขณะที่การออกแบบและสร้างวงจรถ่ายสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อยนั้น ต้องทำการออกแบบให้ค่าของช่วงเวลาขอบขาขึ้น และขอบขาลงของสัญญาณเอาต์พุตสามเหลี่ยมมีค่าที่ไม่เท่ากัน โดยอาจจะออกแบบให้ช่วงเวลาขอบขาขึ้นมีคาบเวลาน้อยกว่าขอบขาลงหรือในทางกลับกันอาจจะออกแบบให้ช่วงเวลาขอบขาลงมีคาบเวลาที่น้อยกว่าขอบขาขึ้นก็ได้ (Electronic Circuits Lab, 2022)



รูปที่ 3.14 วงจรถ่ายสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อยที่สร้างจากวงจรถ่ายสัญญาณแบบขมิตต์ต่ออนุกรมร่วมกับวงจรถ่ายหาปริพันธ์แบบปรับค่าแรงดันอ้างอิงได้ (ธนัสถ์, 2565)

จากรูปที่ 3.14 แสดงวงจรถ่ายสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อยที่สร้างจากวงจรถ่ายสัญญาณแบบขมิตต์ที่ต่ออนุกรมร่วมกับวงจรถ่ายหาปริพันธ์ คล้ายกับวงจรถ่ายสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยมในรูปที่ 3.12 แต่จะแตกต่างกันเพียงวงจรถ่ายสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อยในรูปที่ 3.14 จะมีการต่อวงจรเพื่อทำการปรับค่าแรงดันอ้างอิง  $V_{ref}$  โดยใช้ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ นำมาต่อกับวงจรถ่ายหาปริพันธ์เข้าที่ขาอินพุตบวกของออปแอมป์ตัวที่ 2 ลักษณะการทำงานที่เกิดขึ้นของวงจรจะทำงานในโหมดรวมมันเอง ค่าแรงดันอ้างอิงที่เกิดขึ้น จะถูกนำมาใช้ประโยชน์สำหรับการปรับค่าช่วงเวลาของสัญญาณเอาต์พุตสำหรับขอบขาขึ้นและขอบขาลง ดังนั้นเพื่อให้สามารถทำการปรับค่าได้ง่าย

การสร้างแรงดันอ้างอิง ณ จุดนี้ จึงเลือกใช้ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ คือ  $R_4$  สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรถูกเปลี่ยนเฟสเล็กน้อยในรูปที่ 3.14 แสดงดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรถูกเปลี่ยนเฟสเล็กน้อยจากวงจรรูปที่ 3.14 (ธนัสถ์, 2565)

หลักการทำงานของวงจรรูปที่ 3.14 นั้น สามารถอธิบายได้ คือ เริ่มต้นทำการสมมติให้เอาต์พุตของวงจรถูกจัดจนวนแบบซิมิตต์มีค่าเริ่มต้นที่  $+V_{sat}$  ซึ่ง ณ ช่วงเวลา ครึ่งคาบแรก  $t = 0 - (1/2)T = T_1$  นั้น สัญญาณเอาต์พุตของวงจรถูกป้อนไปยังอินพุตของวงจรถูกปรับเฟสที่ทำการต่อแบบกลับเฟส แรงดันจุดนี้ กำหนดให้เป็น  $V_{O1}$  วงจรถูกปรับเฟสจะทำการหาปริพันธ์สัญญาณ  $+V_{sat}$  เป็นสัญญาณแรมป์ด้านขาลง นั่นคือ ค่าของช่วงเวลาขอบขาลง  $t_f$  ขนาดแอมพลิจูดจะมีค่าเท่ากับค่าระดับแรงดันขีดเริ่มบวก  $+V_{th}$  แรงดันจะถูกป้อนเข้าขาอินพุตลบของออปแอมป์ที่ต่อแบบโหมตร่วม และจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับขาอินพุตบวกที่ทำการต่อกับตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ สำหรับใช้เป็นค่าแรงดันอ้างอิง  $V_{ref}$  ณ ช่วงเวลาแรกของสัญญาณเอาต์พุต  $t = 0 - (1/2)T = T_1$  ค่าแรงดันเริ่มต้นที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุสามารถหาได้จาก

$$V_C(t=0) = V_{ref} - V_{th} \tag{3.60}$$

ค่าแรงดันชั่วขณะที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ  $V_C(t)$  หาค่าได้จาก

$$\begin{aligned} V_{ref} - V_{o2}(t) &= \frac{1}{C} \int i_C dt + V_C(t=0) \\ &= \frac{1}{C} \int \frac{V_{sat^+} - V_{ref}}{R_3} dt + (V_{ref} - V_{th}) \end{aligned} \quad (3.61)$$

ค่าแรงดันเอาต์พุตชั่วขณะของวงจรถ่ายโอน คือ

$$V_{out} = V_{o2} = V_{th} - \left( \frac{V_{sat^+} - V_{ref}}{R_3 C} \right) t \quad (3.62)$$

ดังนั้น ช่วงคาบเวลาแรก ค่าแรงดันเอาต์พุตของสัญญาณหลังจากผ่านการปริพันธ์สัญญาณ คือ ค่าระดับแรงดันเอาต์พุตต่ำสุดของสัญญาณซึ่งมีค่าเท่ากับแรงดันขีดเริ่มลบ  $-V_{th}$  ดังนั้นจากสมการ (3.62) จะได้

$$-V_{th} = V_{th} - \left( \frac{V_{sat^+} - V_{ref}}{R_3 C} \right) T_1 \quad (3.63)$$

จะได้ช่วงคาบเวลาแรก คือ

$$T_1 = \frac{2R_3 C V_{th}}{V_{sat^+} - V_{ref}} \quad (3.64)$$

สำหรับช่วงครึ่งเวลาหลังของสัญญาณเอาต์พุต  $t = (1/2)T - T = T_2$  วงจรถ่ายโอนปริพันธ์ที่ต่อแบบกลับเฟส จะทำการปริพันธ์ค่าสัญญาณ  $-V_{sat}$  เป็นสัญญาณแรมป์ด้านขาขึ้น นั่นคือ ค่าของช่วงเวลาขอบขาขึ้น  $t_r$  ขนาดแอมพลิจูดจะมีค่าเท่ากับค่าระดับแรงดันขีดเริ่มบวก  $-V_{th}$  ค่าแรงดันเริ่มต้นที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุสามารถหาได้จาก

$$V_C(t=0) = V_{o1} - V_{o2} = V_{ref} - (-V_{th}) \quad (3.65)$$

ค่าแรงดันชั่วขณะ  $V_C(t)$  ที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ หาค่าได้จาก

$$\begin{aligned} V_{ref} - V_{o2}(t) &= \frac{1}{C} \int i_C dt + V_C(t=0) \\ &= \frac{1}{C} \int \frac{V_{sat^-} - V_{ref}}{R_3} dt + (V_{ref} - (-V_{th})) \end{aligned} \quad (3.66)$$



ค่าแรงดันเอาต์พุตชั่วขณะของวงจร คือ

$$V_{out} = V_{o2} = -V_{th} + \left( \frac{V_{sat^-} + V_{ref}}{R_3 C} \right) t \quad (3.67)$$

ดังนั้น ช่วงคาบเวลาหลัง ค่าแรงดันเอาต์พุตของสัญญาณหลังจากผ่านการปริพันธ์สัญญาณ คือ ค่าระดับแรงดันเอาต์พุตสูงสุดของสัญญาณ ซึ่งมีค่าเท่ากับแรงดันขีดเริ่มบวก  $V_{th}$  จากสมการ (3.67) จะได้

$$V_{th} = -V_{th} + \left( \frac{V_{sat^+} + V_{ref}}{R_3 C} \right) T_2 \quad (3.68)$$

จะได้ช่วงคาบเวลาหลัง คือ

$$T_2 = \frac{2R_3 CV_{th}}{V_{sat^-} + V_{ref}} \quad (3.69)$$

แรงดันเอาต์พุตที่ได้จากช่วงคาบเวลาทั้งหมดที่เกิดขึ้น คือ  $T_1 + T_2$  จะได้

$$\begin{aligned} T &= \left( \frac{2R_3 CV_{th}}{V_{sat^+} - V_{ref}} + \frac{2R_3 CV_{th}}{V_{sat^-} + V_{ref}} \right) \Big|_{V_{sat^+} = |V_{sat^-}|} \\ &= \frac{4R_3 CV_{th} V_{sat}}{V_{sat}^2 - V_{ref}^2} \end{aligned} \quad (3.70)$$

ดังนั้น ค่าความถี่  $f_o$  ของวงจร คือ

$$f_o = \frac{V_{sat}^2 - V_{ref}^2}{4R_3 CV_{th} V_{sat}} \quad (3.71)$$

สำหรับค่าความกว้างระหว่างรูปคลื่นขอบขาและขอบขาขึ้นหรือรอบทำงาน (Duty cycle) ของวงจรนี้ สามารถหาค่าได้จาก

$$\begin{aligned} k &= \frac{T_1}{T} = \left( \frac{2R_3 CV_{th}}{V_{sat} - V_{ref}} \right) \times \left( \frac{V_{sat}^2 - V_{ref}^2}{4R_3 CV_{th} V_{sat}} \right) \\ &= \frac{V_{sat} + V_{ref}}{2V_{sat}} \\ \therefore k &= \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{V_{ref}}{V_{sat}} \right) \end{aligned} \quad (3.72)$$

จะเห็นได้ว่า วงจรถ่ายสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อย จะมีความแตกต่างไปจากวงจรถ่ายสัญญาณอื่น ๆ คือ การทำให้ช่วงขอบขาลงและขอบขาขึ้นของสัญญาณมีช่วงเวลาที่แตกต่างกัน โดยการต่อวงจรแบ่งแรงดันอ้างอิงเข้าที่ขาอินพุตบวกของออปแอมป์ เพื่อให้การทำงานของช่วงเวลากการปรับสัญญาณมีความแตกต่างกัน แต่เมื่อใดก็ตามที่ทำการออกแบบให้ขอบขาลงและขอบขาขึ้นมีช่วงเวลาที่เท่ากัน วงจรถ่ายสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อยก็จะกลายเป็นวงจรถ่ายสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยมไปโดยอัตโนมัติ

**ตัวอย่างที่ 3.4**

จงออกแบบวงจรถ่ายสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อย โดยกำหนดให้ค่าความถี่  $f_0 = 5 \text{ kHz}$  ค่าตัวตั้งไซเคิล เท่ากับ 0.4 ค่าแรงดันขีดเริ่ม  $V_{th} = |-V_{th}| = 5 \text{ V}$  และค่าแรงดัน ณ จุดอิ่มตัว  $+V_{sat} = |-V_{sat}| = 12 \text{ V}$  พร้อมทั้งแสดงรูปคลื่นสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรนี้

**วิธีทำ** วงจรถ่ายสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อย สามารถสร้างได้ดังรูปที่ 3.14 โดยจะประกอบด้วย ออปแอมป์จำนวน 2 ตัว ตัวต้านทานจำนวน 3 ตัว และตัวเก็บประจุ จำนวน 1 ตัว ซึ่งโจทย์ต้องการให้เอาต์พุตของสัญญาณมีค่าความถี่  $f_0 = 5 \text{ kHz}$  เมื่อค่าตัวตั้งไซเคิล เท่ากับ 0.4 ดังนั้นอาศัยสมการที่ (3.72) เพื่อทำการหาค่า  $V_{ref}$  จะได้ว่า

$$k = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{V_{ref}}{V_{sat}} \right)$$

จากโจทย์ค่าตัวตั้งไซเคิล  $k = 0.4$  และ  $V_{sat} = 12 \text{ V}$  จะได้

$$0.4 = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{V_{ref}}{12} \right)$$

$$0.8 = 1 + \left( \frac{V_{ref}}{12} \right)$$

$$V_{ref} = (0.8 - 1) \times 12$$

$$V_{ref} = -11.2 \text{ V}$$

หลังจากนั้น ทำการหาค่า  $R_1$  และ  $R_2$  จากสมการที่ (3.50)

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{V_{th}}{V_{sat}} = \frac{5}{12} \cong 0.42$$

ในกรณีนี้ ทำการเลือกใช้ตัวต้านทาน  $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$  จะได้ค่า  $R_2$  เท่ากับ

$$R_2 = \frac{R_1}{0.42} = \frac{10 \text{ k}\Omega}{0.42} \cong 24 \text{ k}\Omega$$

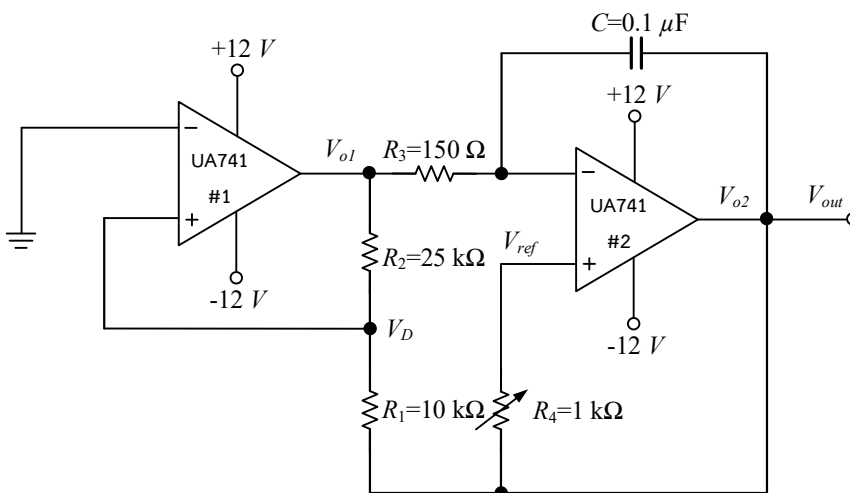
จากโจทย์กำหนดให้  $f_0 = 5 \text{ kHz}$  โดยทำการเลือกใช้ตัวเก็บประจุ  $C = 0.1 \mu\text{F}$  อาศัยสมการที่ (3.71) เพื่อหาค่าความต้านทาน  $R_3$  จะได้

$$R_3 = \frac{V_{sat}^2 - V_{ref}^2}{4f_0 C V_{th} V_{sat}}$$

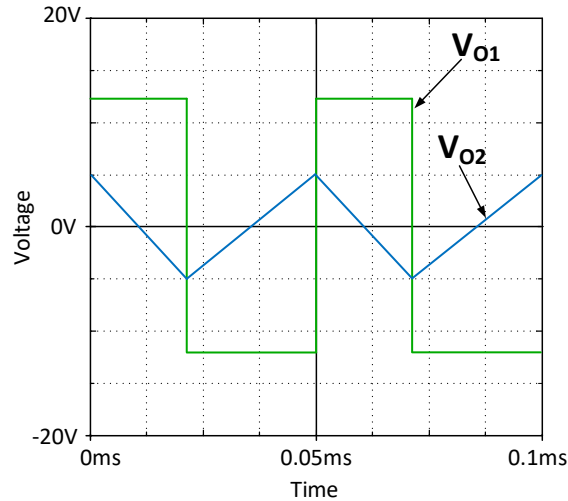
$$R_3 = \frac{(12 \text{ V})^2 - (-11.2 \text{ V})^2}{4 \times (5 \text{ kHz}) \times (0.1 \mu\text{F}) \times (5 \text{ V}) \times (12 \text{ V})}$$

ดังนั้น จะได้ค่า  $R_3 \cong 150 \Omega$

**ตอบ** สำหรับการออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อย โดยกำหนดให้ค่าความถี่  $f_0 = 5 \text{ kHz}$  ค่าแรงดันขีดเริ่ม  $V_{th} = |-V_{th}| = 5 \text{ V}$  และค่าแรงดัน ณ จุดอิ่มตัว  $+V_{sat} = |-V_{sat}| = 12 \text{ V}$  นั้น จะได้ค่า  $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 25 \text{ k}\Omega$ ,  $R_3 = 150 \Omega$ ,  $R_4 = 1 \text{ k}\Omega$  แบบปรับค่าได้ และ  $C = 0.1 \mu\text{F}$  วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อยและเอาต์พุตของสัญญาณที่ได้จากการออกแบบแสดงดังรูป



(อินส์ถ์, 2565)



(ธนัสต์, 2565)

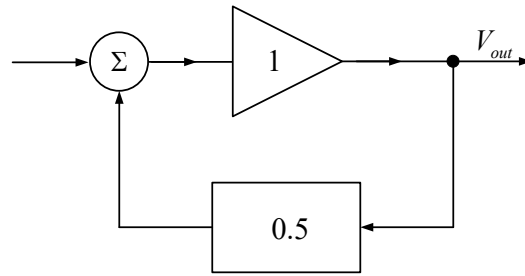
### 3.5 สรุป

วงจรถ่ายสัญญาณ โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภท คือ วงจรถ่ายสัญญาณรูปคลื่นไซน์ ที่มีหลักการทำงานของวงจร คือ การป้อนกลับของสัญญาณ โดยที่สัญญาณเอาต์พุตบางส่วนถูกป้อนกลับมายังอินพุตของวงจรได้ด้วยการทำงานของวงจรเอง โดยไม่ต้องใช้สัญญาณอินพุต จนวงจรสามารถทำงานได้ตามคุณสมบัติทางความถี่และทางเวลาได้ ตามเงื่อนไขหลักเกณฑ์ของ Barkhausen (Barkhausen’s Criteria) (Barkhausen, 1935) และอีกประเภท คือ วงจรถ่ายสัญญาณรูปคลื่นอื่น ๆ ที่ไม่ใช่สัญญาณรูปคลื่นไซน์ เช่น วงจรถ่ายสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม วงจรถ่ายสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม และวงจรถ่ายสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อย วงจรถ่ายสัญญาณสามารถสร้างจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั้งจากอุปกรณ์แพสซีฟ เช่น ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ ทรานซิสเตอร์ เป็นต้น หรือสร้างจากอุปกรณ์แอคทีฟ เช่น ออปแอมป์ วงจรขยายความนำถ่ายไอออน วงจรสายพาน กระแสยุคที่หนึ่ง วงจรสายพานกระแสยุคที่สอง และวงจรขยายความนำถ่ายไอออนสายพานกระแส เป็นต้น วงจรถ่ายสัญญาณถือเป็นวงจรแอนะล็อกที่สำคัญวงจรหนึ่งที่ถูกออกแบบหรือสร้างมาเพื่อให้กำเนิดรูปคลื่นสัญญาณที่ต้องการ ถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางในงานด้านการวัด ระบบเครื่องมือวัด การประมวลผลสัญญาณ ระบบอิเล็กทรอนิกส์ ตลอดจนระบบสื่อสารโทรคมนาคม เป็นต้น และสำหรับบทถัดไปก็จะกล่าวถึงวงจรออสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดัน ซึ่งถือเป็นวงจรถ่ายสัญญาณอีกประเภทแต่มีหลักการทำงานของวงจรที่แตกต่างออกไปจากบทนี้ รวมทั้งวงจรเฟสล็อกลูป ซึ่งเป็นวงจรควบคุมความถี่โดยใช้วิธีเปรียบเทียบเฟสของความถี่ด้านเอาต์พุตกับค่าเฟสของความถี่อ้างอิง ที่ถูกป้อนเข้าทางอินพุตของวงจร

#### แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 3

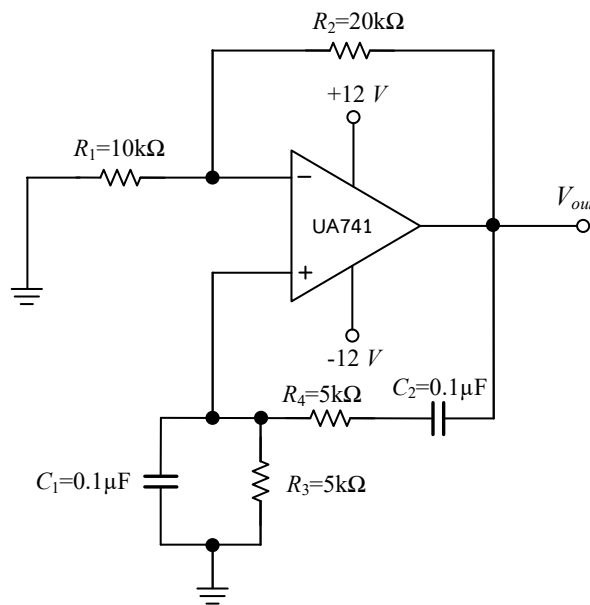
1. วงจรถ่ายสัญญาณ มีกี่ประเภท อะไรบ้าง พร้อมอธิบายความแตกต่างของสัญญาณแต่ละประเภท

- จงอธิบายหลักการทำงานของวงจรถ่ายสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่มีการป้อนกลับแบบบวก
- จากรูป จงหาค่าลูปเกน



(ธน์สัถ์, 2565)

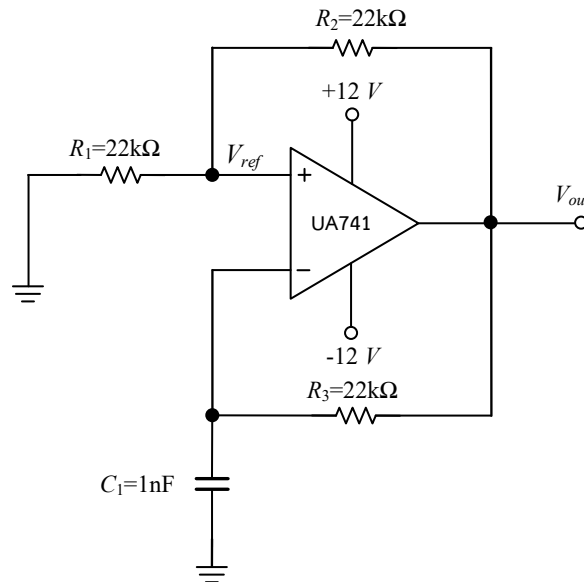
- จากข้อที่ 3 ค่าลูปเกนที่ได้ จะส่งผลต่อการเกิดการออสซิลเลตอย่างไรบ้าง เพราะอะไร
- จากรูป จงหาค่าความถี่ของการเกิดการออสซิลเลต



(ธน์สัถ์, 2565)

- จงออกแบบวงจรถ่ายสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม โดยกำหนดให้ค่าความถี่  $f_0 = 4 \text{ kHz}$  ค่าแรงดันขีดเริ่ม  $V_{th} = |-V_{th}| = 5 \text{ V}$  และค่าแรงดัน ณ จุดอิ่มตัว  $+V_{sat} = |-V_{sat}| = 15 \text{ V}$
- จงออกแบบวงจรถ่ายสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อย โดยกำหนดให้ค่าความถี่  $f_0 = 2 \text{ kHz}$  ค่าความถี่ไซเคิล เท่ากับ 0.4 ค่าแรงดันขีดเริ่ม  $V_{th} = |-V_{th}| = 8 \text{ V}$  และค่าแรงดัน ณ จุดอิ่มตัว  $+V_{sat} = |-V_{sat}| = 14 \text{ V}$

8. จากรูป เป็นวงจรถ่ายสัญญาณแบบใด และค่าความถี่ของการเกิดการออสซิลเลตเท่ากับเท่าไร



(ธน์สัถ์, 2565)

**บรรณานุกรม**

Abuelmaatti, M. T. (2001). New ASK/FSK/PSK/QAM wave generator using multiple-output operational transconductance amplifiers. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 48, 487–490.

Abuelmaatti, M. T. (2002). New ASK/FSK/PSK/QAM wave generator using a single current-controlled multiple output current conveyor. *International Journal of Electronics*, 89, 35–43.

All about electronics. (2021). Wien bridge oscillator (using op-amp) explained. <https://www.youtube.com/watch?v=gbUXbaxvX94>

Barkhausen, H. (1935). *Electron Tubes and their Technical Applications*. Leipzig.

Eeeguide. (2022). Square wave generator using op-amp. <https://www.eeeguide.com/square-wave-generator-using-op-amp/>

Electronic Circuits Lab. (2022). Waveform generator using op-amp. College of Engineering Trivandrum. Department of Electrical Engineering.

Elprocus. (2021). RC phase shift oscillator working and its applications. <https://www.elprocus.com/rc-phase-shift-oscillator-circuit-using-bjt-frequency/>

- Kumngern, M., & Nonthaputha, T. (2017). BFSK/FM signal generator circuits. *International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer, and Optimization Techniques (ICECCOT)*. (pp. 1 – 4). IEEE.
- Kumngern, M., Nonthaputha, T., & Khateb, F. (2019). Arbitrary waveform generators using current-controlled current conveyor transconductance amplifier and current conveyor analog switches. *Journal of Circuits, Systems, and Computers*, 27, 1950179-1 - 1950179-20.
- Lindberg, E. (2010). The Barkhausen criterion (Observation?). *International Conference on IEEE Workshop on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems (NDES2010)*. (pp. 15–18). IEEE.
- Lindberg, E. (2012). The Barkhausen criterion. *International Conference on ELECTRONICS' 2012*. (pp. 1 – 50). IEEE.
- Muhammad, H. R. (2011). *Microelectronic circuits: Analysis and design* (2nd ed.). Cengage Learning.
- Naik, N. S. (2022). Op-amp as triangular wave generator.  
<https://www.youtube.com/watch?v=hPp1KAl6xPg>
- Naik, N. S. (2022). Op-amp as square wave generator.  
<https://www.youtube.com/watch?v=Wh1jU3alWMk>
- Ramakant, A. G. (2011). *Op-amps and linear integrated circuits* (4th ed.). Prentice Hall International.
- Ramon, V. P. (2018). *RC Phase-Shift Oscillators*. Instituto Nacional de Investigación Y Capacitación de Telecomunicaciones. Peru.
- Richard, C. J. (2000). *Microelectronic circuit design* (4th ed.). McGraw-Hill.
- Sergio, F. (2003). *Design with operational amplifiers and analog integrated circuits*. McGraw Hill Higher Education.
- Thomas, L. F. (2012). *Electronic devices: Electron flow version* (9th ed.). Prentice Hall International.
- มนตรี ศิริปรัชญานันท์ และ ธนุศักดิ์ อรุณไพโร. (2558). *ออปแอมป์และลิเนียร์ไอซี*. ซีเอ็ดยูเคชั่น.

## บทที่ 4

### วงจรรอสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดันและวงจรเฟสล็อกกลูบ

จากบทที่ 3 ได้กล่าวถึงวงจรรำเนดสัญญาณ ที่สามารถกำเนดสัญญาณที่ต้องการ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ ระบบโทรคมนาคม ระบบควบคุมและเครื่องมือวัดทางไฟฟ้า แต่สัญญาณที่ได้ของวงจรรำเนดสัญญาณในบทที่ 3 นั้น เป็นการกำเนดสัญญาณจากภายในวงจรวง โดยกำหนดค่าความถี่ของการเกิดสัญญาณได้จากการกำหนดค่าจากอุปกรณ์แพสซีฟเป็นหลัก แต่สำหรับบทนี้ จะกล่าวถึงวงจรรำเนดสัญญาณอีกรูปแบบหนึ่ง ที่สามารถควบคุมการกำเนดสัญญาณจากแหล่งจ่ายแรงดันภายนอก ซึ่งก็คือ “วงจรรอสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดัน (Voltage-controlled oscillator: VCO)” อีกทั้ง ได้กล่าวถึง “วงจรเฟสล็อกกลูบ (Phase-locked loop: PLL)” ซึ่งเป็นวงจรที่สามารถควบคุมความถี่โดยใช้วิธีเปรียบเทียบเฟสของความถี่ด้านเอาต์พุตกับค่าเฟสของความถี่อ้างอิง ที่ถูกป้อนเข้าทางอินพุตของวงจร

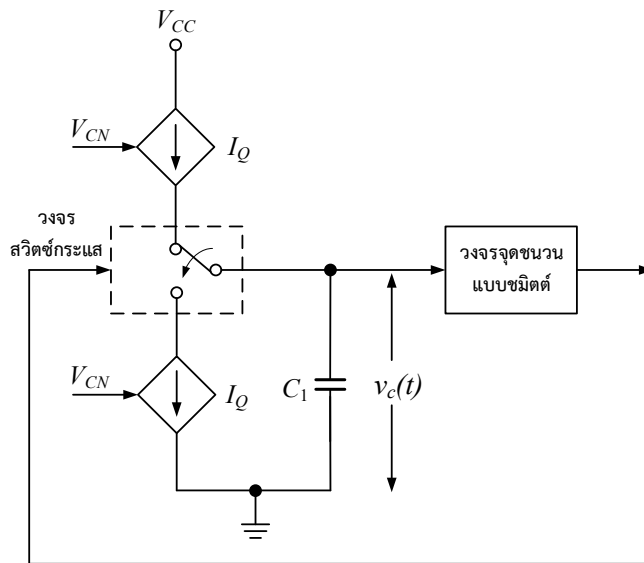
#### 4.1 วงจรรอสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดัน

วงจรรอสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดัน เป็นวงจรที่สามารถสร้างสัญญาณเอาต์พุตที่ต้องการได้ โดยใช้การควบคุมแรงดันจากแหล่งจ่ายแรงดันภายนอก หรือเรียกอีกอย่างว่า วงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่ (Voltage-to-frequency converter: V/F) โดยความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ที่เกิดการอสซิลเลต  $f_0$  และแรงดันในการควบคุม  $V_C$  จะมีความจำเป็นสำหรับวงจรรอสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดันเป็นอย่างยิ่ง วงจรรอสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดันสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลายอย่าง (Toumazou et al., 1998) เช่น ใช้งานสำหรับการมอดูเลตทางความถี่ (Frequency modulation: FM) วงจรรำเนดเสียง และการมอดูเลตแบบ FSK (Muhammad, 2011)

โดยทั่วไปหลักการทำงานของวงจรรอสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดัน จะใช้แรงดันจากภายนอกมาควบคุมให้เอาต์พุตมีค่าสัญญาณทางความถี่ตามค่าแรงดันที่มีการปรับเปลี่ยนไป โดยอาศัยการเก็บประจุและคายประจุของตัวเก็บประจุในช่วงที่ค่ากระแสคงที่ ซึ่งค่าดังกล่าวนี้ขึ้นอยู่กับค่าแรงดันที่ป้อนมาจากภายนอกวงจร การเก็บประจุจะเริ่มต้นเมื่อค่าแรงดันภายในตัวเก็บประจุมีค่าต่ำลงจนถึงค่าระดับแรงดันขีดเริ่มต่ำ (Lower threshold voltage) หรือ  $V_L$  ในทางกลับกัน การคายประจุของตัวเก็บประจุจะเริ่มต้นเมื่อค่าแรงดันภายในตัวเก็บประจุ มีค่าสูงจนถึงค่าระดับแรงดันขีดเริ่มสูง (Upper threshold voltage) หรือ  $V_H$  จากรูปที่ 4.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมการทำงานเบื้องต้นของวงจรรอสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดัน แหล่งจ่ายกระแสจะถูกใช้เพื่อควบคุมให้ตัวเก็บประจุ  $C_1$  ทำการเก็บประจุและคายประจุ แรงดันที่ได้จากการเก็บประจุและคายประจุนี้จะเป็นแรงดันอินพุตให้กับวงจรจุดชนวนแบบขมิตต์ ส่วนค่าแรงดันเอาต์พุตที่ออกจากวงจรจุดชนวนแบบขมิตต์ ตามที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 ซึ่งต้องมีค่าแรงดันสองระดับ คือ ค่าระดับแรงดันขีดเริ่มบวก  $+V_{th}$  และค่าระดับแรงดันขีดเริ่มลบ  $-V_{th}$  แต่เนื่องจากบทนี้ ค่าระดับแรงดันขีดเริ่ม มีค่ามากกว่า



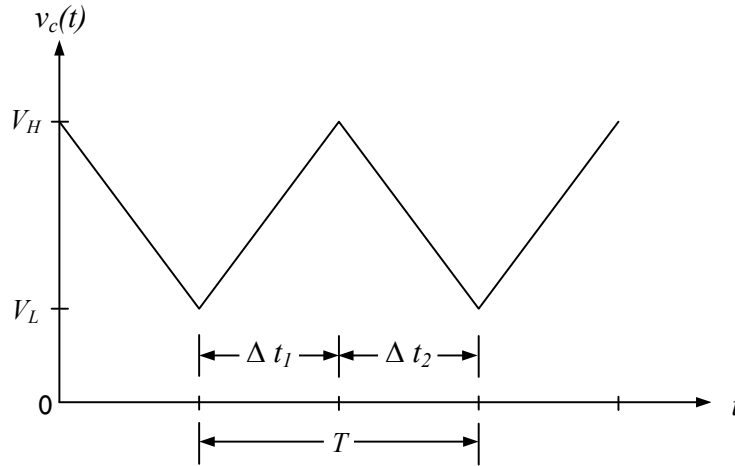
ระดับศูนย์โวลต์ การพิจารณาค่าระดับแรงดันขีดเริ่มจึงพิจารณาสองค่าเช่นเดิม แต่จะเปลี่ยนเป็นค่าระดับแรงดันขีดเริ่มสูง หรือ  $V_H$  แทน  $+V_{th}$  และค่าระดับแรงดันขีดเริ่มต่ำ หรือ  $V_L$  แทน  $-V_{th}$  ซึ่งค่าระดับแรงดันขีดเริ่มนี้ จะเป็นตัวควบคุมการทำงานของสวิตช์ในรูปแบบของกระแส (Current switch) ดังนั้นการทำงานของสวิตช์ จะขึ้นอยู่กับค่าแรงดันที่ตกคร่อมหรือที่เกิดขึ้นจากตัวเก็บประจุ  $v_c(t)$  สามารถอธิบายได้ คือ สวิตช์ที่ต่ออยู่กับตัวเก็บประจุ  $C_1$  นั้น จะทำงานสองสถานะ คือ สถานะแรกเมื่อสวิตช์ทำการแตะส่วนบนของวงจรแหล่งจ่ายกระแส ตัวเก็บประจุ  $C_1$  จะทำงานโดยการเก็บประจุและอีกสถานะคือเมื่อสวิตช์ทำการแตะส่วนล่างของวงจรแหล่งจ่ายกระแส กรณีนี้ ตัวเก็บประจุ  $C_1$  ก็จะทำให้คายประจุออกมา ดังนั้น ค่ารูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่เกิดขึ้นจากตัวเก็บประจุ  $v_c(t)$  แสดงดังรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าค่ารูปคลื่นสัญญาณมีสองช่วงคือ ช่วงขอบขาลงและขอบขาขึ้น ซึ่งแสดงถึงการทำงานของวงจรที่เกิดจากการเก็บประจุและคายประจุจากตัวเก็บประจุ  $C_1$  ดังนั้นสถานะการทำงานสามารถแบ่งออกได้เป็นสองสถานะ คือ สถานะการเก็บประจุและสถานะการคายประจุ



รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมการทำงานเบื้องต้นของวงจรออสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดัน (ธันส์ถ์, 2565)

สถานะการเก็บประจุของตัวเก็บประจุ  $C_1$  จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อ สวิตช์ที่ควบคุมด้วยกระแสจากเอาต์พุตของวงจรจุดขนวนแบบขมิตต์ ทำการแตะส่วนบนของแหล่งจ่ายกระแส  $I_Q$  ที่อยู่ระหว่างช่วงเวลาที่ค่าระดับแรงดันขีดเริ่มต่ำ  $V_L$  ไปยังค่าระดับแรงดันขีดเริ่มสูง  $V_H$  สามารถหาค่าได้โดย

$$\begin{aligned} \Delta t_1 &= \frac{C_1}{I_Q} \Delta v_c \Big|_{\Delta v_c = (V_H - V_L)} \\ &= \frac{C_1}{I_Q} (V_H - V_L) \end{aligned} \tag{4.1}$$



รูปที่ 4.2 สัญญาณรูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_1$  (ธน์สัถ์, 2565)

จากสมการที่ (4.1) เมื่อการเก็บประจุของตัวเก็บประจุ  $C_1$  ถึงค่าระดับแรงดันขีดเริ่มสูง  $V_H$  ตามช่วงระยะเวลา  $\Delta t_1$  แล้ว หลังจากนั้น ตัวเก็บประจุ  $C_1$  ก็เข้าสู่สถานะการคายประจุ ณ จุด ๆ นี้ ตำแหน่งของสวิตช์ที่ควบคุมด้วยกระแสจากเอาต์พุตของวงจรจุดชนวนแบบซิมิตต์ จะสลับตำแหน่งมาทำการแตะส่วนล่างของแหล่งจ่ายกระแส  $I_Q$  ตัวเก็บประจุ  $C_1$  จะเริ่มคายประจุจนถึงค่าระดับแรงดันขีดเริ่มต่ำ  $V_L$  ดังนั้น ช่วงเวลาที่ค่าระดับแรงดันขีดเริ่มสูง  $V_H$  ไปยังค่าระดับแรงดันขีดเริ่มต่ำ  $V_L$  สามารถหาค่าได้โดย

$$\begin{aligned} \Delta t_1 &= -\frac{C_1}{I_Q} \Delta v_c \Big|_{\Delta v_c = (V_L - V_H)} \\ &= -\frac{C_1}{I_Q} (V_L - V_H) \\ \therefore \Delta t_1 &= \frac{C_1}{I_Q} (V_H - V_L) \end{aligned} \tag{4.2}$$

จากสมการที่ (4.1) และสมการที่ (4.2) จะสังเกตได้ว่า ค่าช่วงคาบเวลาของการเก็บประจุและคายประจุของตัวเก็บประจุ  $C_1$  มีขนาดช่วงคาบเวลาเท่ากัน ดังนั้น สามารถหาค่าช่วงคาบเวลา  $T$  และความถี่ของการเกิดการออสซิลเลตของสัญญาณ  $f_o$  ได้จาก

$$T = \Delta t_1 + \Delta t_2 = \frac{2C_1(V_H - V_L)}{I_Q} \quad (4.3)$$

$$f_o = \frac{1}{T}$$

$$f_o = \frac{I_Q}{2C_1(V_H - V_L)} \quad (4.4)$$

โดย  $I_Q$  สามารถหาค่าได้จาก

$$I_Q = g_m(V_{cn} + V_{co}) \quad (4.5)$$

เมื่อ  $g_m = \frac{1}{R} = \frac{A}{V}$  คือ ค่าความนำถ่ายโอนของแหล่งจ่ายกระแส  $V_{cn}$  คือ ค่าแรงดันควบคุม และ  $V_{co}$  คือ ค่าแรงดันคงที่ หลังจากนั้น นำสมการที่ (4.5) ไปแทนค่าในสมการที่ (4.4) จะได้

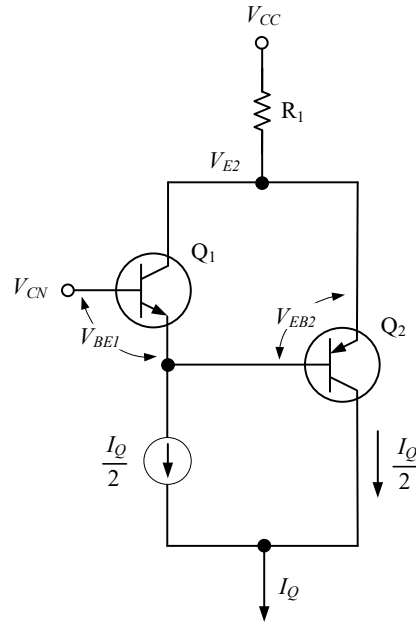
$$f_o = \frac{g_m(V_{cn} + V_{co})}{2C_1(V_H - V_L)} \quad (4.6)$$

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายโอนแรงดันไปยังความถี่ หรือ  $k_{V/F}$  สามารถหาค่าได้โดย

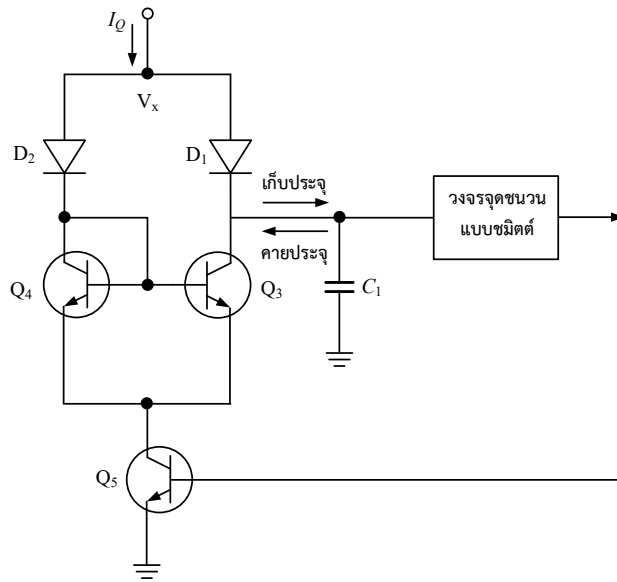
$$k_{V/F} = \frac{df_o}{dV_{cn}} \quad (4.7)$$

$$k_{V/F} = \frac{g_m}{2C_1(V_H - V_L)}$$

เนื่องจากวงจรออสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดัน ต้องอาศัยคุณสมบัติการทำงานของตัวเก็บประจุ  $C_1$  จากการเก็บประจุและคายประจุ สำหรับควบคุมการทำงานของสวิทช์กระแส แบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนของวงจรแหล่งจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดัน แสดงดังรูปที่ 4.3 และส่วนของวงจรสวิทช์กระแส แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.3 วงจรแหล่งจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดันอย่างง่ายที่สร้างจากทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์ (ธน์สถ์, 2565)



รูปที่ 4.4 วงจรสวิตช์กระแสที่สร้างจากทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์ต่อร่วมกับไดโอด (ธน์สถ์, 2565)

จากรูปที่ 4.3 แสดงวงจรแหล่งจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดันอย่างง่าย ที่สร้างจากทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์ จำนวน 2 ตัว ประกอบด้วย ทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์  $Q_1$  ชนิดเอ็นพีเอ็น

จำนวน 1 ตัว และทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์  $Q_2$  ชนิดพีเอ็นพี จำนวน 1 ตัว สามารถหาค่าแรงดันที่ขาอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์  $Q_2$  ชนิดพีเอ็นพี ได้จาก

$$V_{E2} = V_{cn} - V_{BE1} + V_{BE2} \tag{4.8}$$

เมื่อมีแรงดันไหลผ่านตัวต้านทาน  $R_1$  ดังนั้นทำให้เกิดค่าแหล่งจ่ายกระแส  $I_Q$  สามารถหาค่าได้โดย

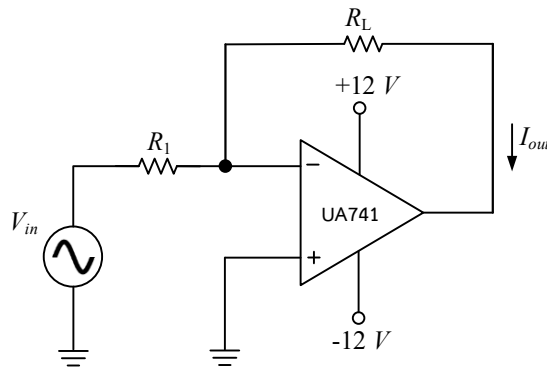
$$I_Q = \frac{V_{CC} - V_{E2}}{R_1}$$

$$I_Q = \frac{V_{CC} - V_{cn} + V_{BE1} - V_{EB2}}{R_1} \tag{4.9}$$

จากสมการที่ (4.9) เมื่อพิจารณาค่า  $V_{BE1}$  สำหรับทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์  $Q_1$  ชนิดเอ็นพีเอ็นและ  $V_{EB2}$  สำหรับทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์  $Q_1$  ชนิดพีเอ็นพีนั้น มีค่าประมาณใกล้เคียงกันคือ  $V_{BE1} \approx V_{EB2}$  ในกรณีนี้ ทำให้กระแส  $I_Q$  จากสมการที่ (4.9) สามารถเขียนใหม่ได้คือ

$$I_Q \approx \frac{V_{CC} - V_{cn}}{R_1} \tag{4.10}$$

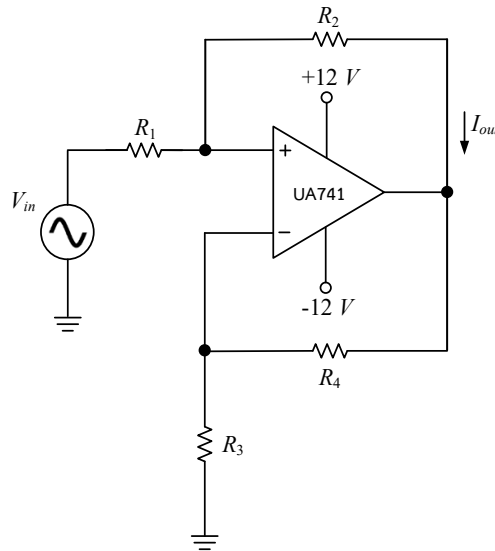
ดังนั้น จากสมการที่ (4.10) จะเห็นได้ว่า ค่าของกระแส  $I_Q$  มีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้นกับค่าแรงดันที่เปลี่ยนค่าไป วงจรแหล่งจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดันนั้น สามารถสร้างได้จากออปแอมป์ (Fernando, 2007) แสดงได้ดังรูปที่ 4.5 – รูปที่ 4.7



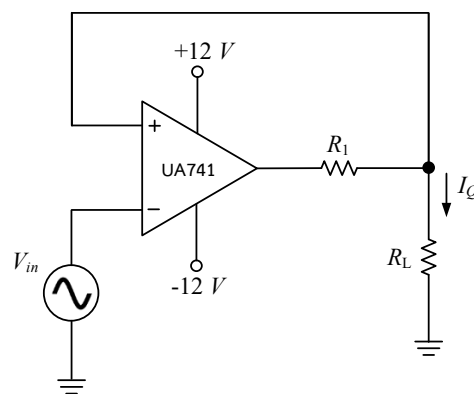
รูปที่ 4.5 วงจรแหล่งจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดันที่สร้างจากออปแอมป์อย่างง่าย (ธนัสถ์, 2565)

จากรูปที่ 4.5 แสดงการประยุกต์ใช้งานออปแอมป์สำหรับวงจรแหล่งจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดันอย่างง่าย โดยการต่อแรงดันอินพุต ผ่านตัวต้านทาน  $R_1$  เข้าที่ขาอินพุตลบของออปแอมป์ และขาอินพุตบวกทำการต่อลงกราวด์ ดังนั้น ค่ากระแสเอาต์พุตจากวงจรมีค่าได้จาก

$$I_{out} = I_Q = -\frac{V_{in}}{R_1} \quad (4.11)$$



รูปที่ 4.6 วงจรแหล่งจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดันแบบแหล่งจ่าย Howland (ธน์สัถ์, 2565)



รูปที่ 4.7 วงจรแหล่งจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดันแบบขยายความต่างที่มีการป้อนกลับแบบบวก (ธน์สัถ์, 2565)

สำหรับวงจรแหล่งจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดันแบบแหล่งจ่าย Howland (Bertemes et al., 2000) ที่แสดงในรูปที่ 4.6 นั้น เป็นวงจรที่มีการนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลายสำหรับ

การวิเคราะห์หิมพีแค้นซ์ชีวภาพทางไฟฟ้า โดยทำการกำหนดค่าให้ ตัวต้านทาน  $R_1 \times R_4 = R_2 \times R_3$  สามารถหาค่ากระแสเอาต์พุตจาก (Bertemes et al., 2000)

$$I_{out} = I_Q = \frac{V_{in}}{R_3} \tag{4.12}$$

และจากรูปที่ 4.7 แสดงวงจรแหล่งจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดันแบบขยายความต่างที่มีการป้อนกลับแบบบวก (Seoane et al., 2007) โดยมีอัตราขยายความแตกต่าง  $A_d$  เท่ากับ 1 และสามารถหาค่ากระแสเอาต์พุตได้จาก

$$I_{out} = I_Q = \frac{(A_d - 1) \times V_L - (A_d \times V_{in})}{R_1} \tag{4.13}$$

จากสมการที่ (4.13) เมื่อ  $A_d$  คือ อัตราขยายความต่าง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้น สามารถเขียนใหม่ได้คือ

$$I_{out} = I_Q = -\frac{V_{in}}{R_1} \tag{4.14}$$

จะเห็นได้ว่า ในส่วนของหัวข้อสำหรับวงจรแหล่งจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดัน สามารถทำการสร้างได้จากทั้งการใช้งานของอุปกรณ์ทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์หรือออปแอมป์เป็นอุปกรณ์หลักในการใช้งาน ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของของวงจรที่นำมาต่อร่วมให้วงจรทำงานได้ตามความต้องการ แต่ในบทนี้ จะใช้งานจากวงจรแหล่งจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดันอย่างง่ายที่สร้างจากอุปกรณ์ทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์ดังรูปที่ 4.3 เป็นวงจรหลัก

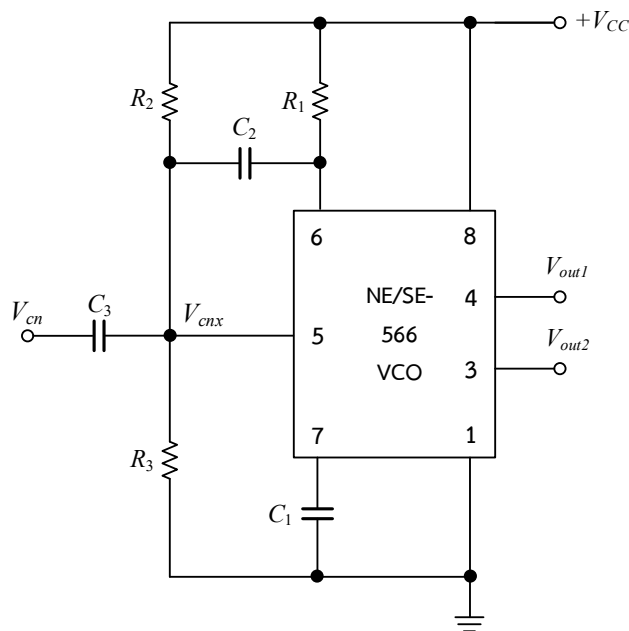
จากที่ได้กล่าวไปแล้วว่าวงจรออสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดันที่ต้องอาศัยการควบคุมการทำงานของสวิตช์กระแส ดังนั้นส่วนของวงจรสวิตช์กระแส ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.4 นั้น ประกอบด้วยไดโอด จำนวน 2 ตัว คือ ไดโอด  $D_1$  และไดโอด  $D_2$  ทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์ จำนวน 3 ตัว คือ ทรานซิสเตอร์  $Q_3$ ,  $Q_4$  และ  $Q_5$  สังเกตได้ว่าทรานซิสเตอร์  $Q_3$  และ  $Q_4$  ต่อการใช้งานในรูปแบบของวงจรสะท้อนกระแส โดยขาเบสของทรานซิสเตอร์  $Q_5$  จะนำไปต่อใช้งานโดยการป้อนสัญญาณอินพุตมาจากวงจรจุดชนวนแบบขมิตต์ ทำให้มีการทำงานในลักษณะการเปิด - ปิด แบบสวิตช์จากการควบคุมจากวงจรจุดชนวนแบบขมิตต์ที่มีสองสถานะ คือ สถานะของค่าระดับแรงดันขีดเริ่มต่ำ  $V_L$  และสถานะของค่าระดับแรงดันขีดเริ่มสูง  $V_H$  ในกรณีที่สถานะของวงจรจุดชนวนแบบขมิตต์มีค่าระดับแรงดันของวงจรขีดเริ่มสูง  $V_H$  นั้น ทรานซิสเตอร์  $Q_5$  จะไม่สามารถทำงานได้เนื่องจากตัวเก็บประจุ  $C_1$  จะเริ่มทำการเก็บประจุจากค่ากระแส  $I_Q$  ที่ไหลผ่านมาทางไดโอด  $D_1$  ณ ช่วงเวลานี้ ทำ

ให้ไดโอด  $D_2$  ทรานซิสเตอร์  $Q_3$  และทรานซิสเตอร์  $Q_4$  ไม่ทำงาน และเมื่อสถานะของวงจรถ่ายเฟสล็อกแบบขมิตต์ มีค่าระดับแรงดันของวงจรถ่ายเฟสล็อกเริ่มต่ำ  $V_L$  ทรานซิสเตอร์  $Q_5$  เริ่มทำงาน ทำให้ไดโอด  $D_2$  ทรานซิสเตอร์  $Q_3$  และทรานซิสเตอร์  $Q_4$  ทำงานตามไปด้วย ส่งผลให้ ค่าของกระแส  $I_O$  ไหลผ่าน ไดโอด  $D_2$  และทรานซิสเตอร์  $Q_4$  ค่าแรงดันที่เกิดขึ้นที่ขาแอนคของไดโอด  $D_2$  จะมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} V_X &= V_{D_2} \\ &= V_{D_2} + V_{BE_4} + V_{CE_{(sat)}} \\ &= 0.7 + 0.7 + 0.2 \\ \therefore V_X &= 1.6 \text{ V} \end{aligned} \tag{4.15}$$

แรงดันที่ขาแคโทดของไดโอด  $D_1$  คือ ค่าแรงดันที่เกิดจากการเก็บประจุ  $V_C(t)$  ของตัวเก็บประจุ  $C_1$  ซึ่งจะมีค่ามากกว่า 1.6 โวลต์อยู่แล้ว ดังนั้น ไดโอด  $D_1$  จะถูกต่อใช้งานเพื่อรองรับค่าแรงดันไบแอสย้อนกลับนั่นเอง และเมื่อตัวเก็บประจุ  $C_1$  เริ่มคายประจุผ่านทรานซิสเตอร์  $Q_3$  ตามค่าของกระแส  $I_O$  ซึ่งจะมีค่าเท่ากับค่ากระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์  $Q_4$  ด้วยเช่นกัน ดังนั้น ค่ากระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์  $Q_5$  จะมีค่าเท่ากับ

$$I_{Q_5} = 2I_O \tag{4.16}$$



รูปที่ 4.8 วงจรรอสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดัน โดยใช้ไอซีเบอร์ NE/SE-566 VCO (ชนัสต์, 2565)

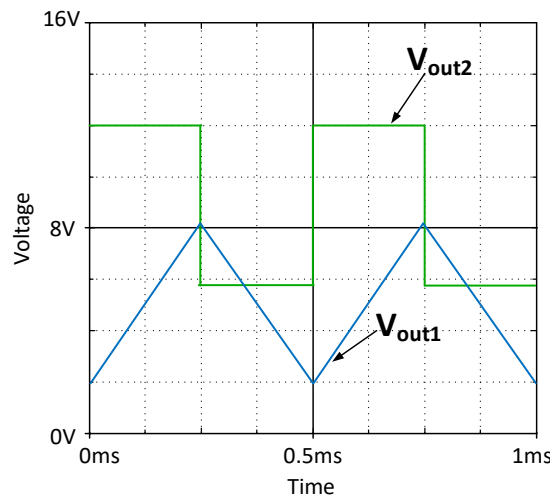


สำหรับตัวอย่างการต่อวงจรออสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดัน โดยใช้ไอซีเบอร์ NE/SE-566 VCO (Philips Semiconductors Linear Products, 2021) แสดงดังรูปที่ 4.8 ซึ่งมีหลักการทำงานตามวงจรออสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดันดังกล่าวไปแล้วข้างต้น สามารถแสดงค่าสัญญาณเอาต์พุตได้ทั้งสองรูปแบบ คือ สัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยมและสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม แสดงดังรูปที่ 4.9 ความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะขึ้นอยู่กับตัวต้านทาน  $R_1$  ตัวเก็บประจุ  $C_1$  และค่าแรงดันควบคุมจากแหล่งจ่ายภายนอก  $V_{cn}$  โดยค่าแรงดัน ณ จุด  $V_{cn_x}$  สามารถหาค่าได้จาก

$$V_{cn_x} = \frac{R_3}{R_2 + R_3} V_{CC} \tag{4.17}$$

โดยมีเงื่อนไขคือ

$$\frac{3}{4} V_{CC} \leq V_{cn} \leq V_{CC} \tag{4.18}$$



รูปที่ 4.9 สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรในรูปที่ 4.8 (ธนส์ถ์, 2565)

ดังนั้น สำหรับค่าความถี่ของการเกิดการออสซิลเลต  $f_0$  สามารถหาค่าได้จาก

$$f_0 = \frac{2(V_{CC} - V_{cn})}{V_{CC} \times (R_1 C_1)} \tag{4.19}$$

จากสมการที่ (4.19) จะสังเกตได้ว่าค่าความถี่ของการเกิดการออสซิลเลต  $f_0$  ของวงจรสามารถควบคุมได้จากค่าแรงดันภายนอก  $V_{cn}$  นั่นเอง

**ตัวอย่างที่ 4.1**

จงออกแบบวงจรออสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดัน โดยใช้ไอซีเบอร์ NE/SE-566 VCO โดยค่าความถี่ของการเกิดการออสซิลเลต  $f_0 = 10 \text{ kHz}$  เมื่อ  $V_{CC} = 16 \text{ V}$

วิธีทำ จากเงื่อนไขในสมการที่ (4.18) สามารถกำหนดค่า  $V_{cn}$  โดย

$$12 \text{ V} \leq V_{cn} \leq 16 \text{ V}$$

ทำการเลือกค่าตัวเก็บประจุ  $C_1 = 0.01 \mu\text{F}$  และตัวต้านทาน  $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$  ดังนั้น อาศัยสมการที่ (4.19) สามารถหาค่า  $V_{cn}$  ได้จาก

$$10 \text{ kHz} = \frac{2(16 \text{ V} - V_{cn})}{16 \text{ V} \times (10 \text{ k}\Omega \times 0.01 \mu\text{F})}$$

$$16 \text{ V} - V_{cn} = \frac{10 \text{ kHz} \times 16 \text{ V} \times 10 \text{ k}\Omega \times 0.01 \mu\text{F}}{2}$$

$$8 \text{ V} = 16 \text{ V} - V_{cn}$$

จะได้ค่า  $V_{cn} = 8 \text{ V}$

หลังจากนั้นทำการหาค่าตัวต้านทาน  $R_2$  และตัวต้านทาน  $R_3$  จาก

$$V_{cn_x} = \frac{R_3}{R_2 + R_3} V_{CC}$$

เมื่อ  $V_{cn} = V_{cn_x} = 8 \text{ V}$  จะได้

$$\frac{R_3}{R_2 + R_3} = \frac{V_{CC}}{V_{cn}}$$

$$1 + \frac{R_2}{R_3} = \frac{V_{CC}}{V_{cn}}$$

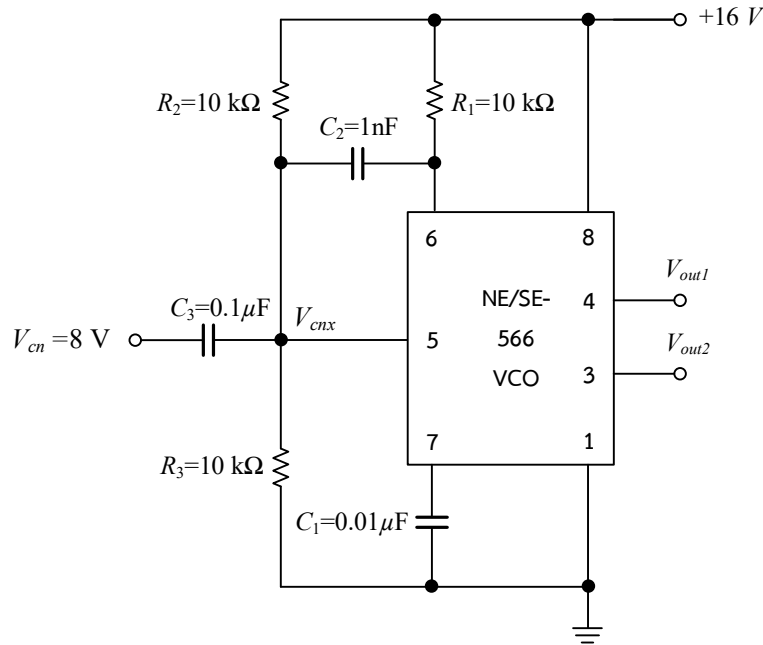
$$\frac{R_2}{R_3} = \frac{V_{CC}}{V_{cn}} - 1$$

$$\frac{R_2}{R_3} = \frac{16 \text{ V}}{8 \text{ V}} - 1$$

$$\frac{R_2}{R_3} = 1$$

ดังนั้น วงจรที่ทำการออกแบบนี้ จะทำการการเลือกตัวต้านทาน  $R_2 = R_3 = 10 \text{ k}\Omega$

**ตอบ** วงจรรอสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดัน โดยใช้ไอซีเบอร์ NE/SE-566 VCO ที่ผลิตค่าความถี่ของการเกิดการอสซิลเลต  $f_0 = 10 \text{ kHz}$  เมื่อ  $V_{CC} = 16 \text{ V}$  และ  $V_{cn} = 8 \text{ V}$  และอุปกรณ์แพสซีฟประกอบด้วย ค่าตัวเก็บประจุ  $C_1 = 0.01 \mu\text{F}$ ,  $C_2 = 1 \text{ nF}$ ,  $C_3 = 0.1 \mu\text{F}$  และตัวต้านทาน  $R_1 = R_2 = R_3 = 10 \text{ k}\Omega$  แสดงดังรูป



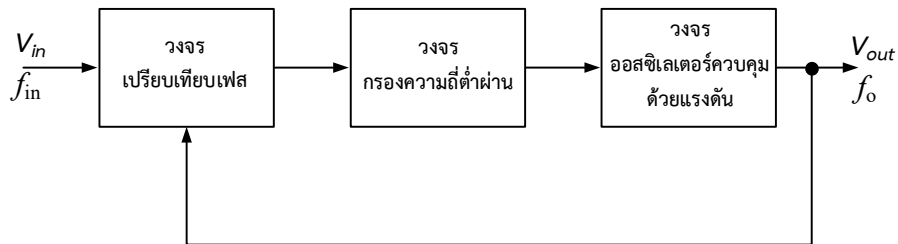
(ธนัสถ์, 2565)

## 4.2 วงจรเฟสล็อก

วงจรเฟสล็อก เป็นอีกหนึ่งวงจรสำคัญที่น่าสนใจในการนำไปประยุกต์ใช้งานในวงจรรวมแอนะล็อก มีการนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่น วงจรในระบบเครื่องมือวัดในงานอุตสาหกรรม ระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับควบคุมความถี่และเฟสของมอเตอร์ ระบบการสื่อสารเกี่ยวกับการถอดรหัสสัญญาณวิทยุเอพเอ็ม สเตอริโอ ระบบติดตามของวงจรรองความถี่ การสังเคราะห์ค่าทางความถี่สำหรับอุปกรณ์เครื่องรับและเครื่องส่งวิทยุ การถอดรหัสการมอดูเลตแบบเอพเอสเค และระบบเรดาร์ เป็นต้น (Muhammad, 2011)

หลักการทำงานเบื้องต้นของวงจรเฟสล็อก คือ ระบบจะทำการล็อกความถี่ตามรอยความถี่ (Tracking) กับค่าความถี่อ้างอิง (Reference frequency) ที่ป้อนเข้าทางอินพุต เมื่อระบบทำการล็อกค่าความถี่แล้ว หากสัญญาณความถี่ที่ป้อนทางอินพุตมีค่าเปลี่ยนแปลงไป ระบบจะสามารถรักษาสภาพการล็อกนั้นได้ โดยจะไม่ส่งผลกระทบต่อค่าความถี่ที่ระบบทำการล็อกค่าที่ต้องการไว้แล้ว

บล็อกไดอะแกรมการทำงานของวงจรเฟสล็อก แสดงดังรูปที่ 4.10 ประกอบด้วย วงจรเปรียบเทียบเฟส วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน และวงจรออสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดัน



รูปที่ 4.10 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของวงจรเฟสล็อก (ธนส์ถ์, 2565)

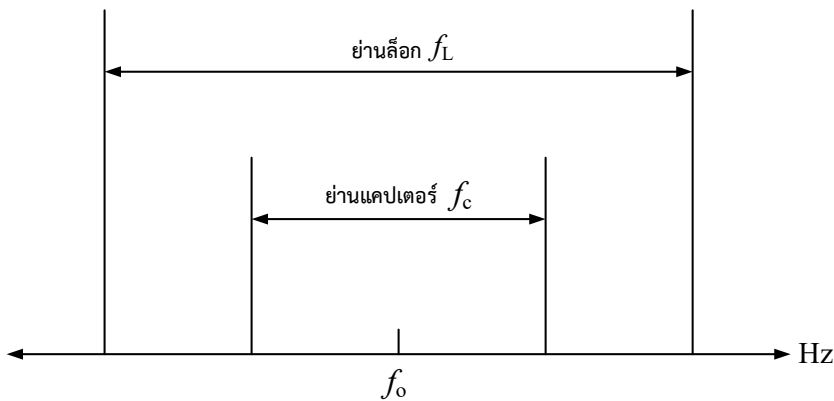
จากรูปที่ 4.10 สามารถอธิบายการทำงานของแต่ละส่วนได้ คือ วงจรเปรียบเทียบเฟส จะทำหน้าที่เปรียบเทียบเฟสของสัญญาณแรงดันอินพุตกับสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรออสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดัน หลังจากนั้น ก็จะได้อัตราส่วนค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงหรือค่าแรงดันที่มีความถี่ต่ำ เกิดจากการเปรียบเทียบเฟสที่มีความแตกต่างกัน สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรเปรียบเทียบเฟสนี้ จะถูกเรียกว่า ค่าแรงดันผิดพลาด (Error voltage) ซึ่งจะส่งต่อไปยังวงจรกรองความถี่ต่ำ หลังจากนั้น วงจรกรองความถี่จะทำการกรองความถี่สัญญาณเฉพาะค่าสัญญาณความถี่ต่ำที่ต้องการเท่านั้น หากสัญญาณมีความถี่ที่สูงกว่าก็จะถูกขจัดออกไป เมื่อได้ค่าความถี่ต่ำที่ต้องการแล้ว วงจรกรองความถี่จะส่งสัญญาณเอาต์พุตที่มีค่าเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีขนาดเรียบขึ้นไปจากเดิม แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงนี้ จะถูกส่งต่อไปยังอินพุตของวงจรออสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดัน เพื่อเป็นตัวควบคุมการทำงานของวงจร ค่าความถี่เอาต์พุตที่ได้จากส่วนนี้ คืออัตราส่วนของค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงนั่นเอง ค่าความแตกต่างของเฟสระหว่างสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตของวงจรออสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดัน จะถูกนำมาเปรียบเทียบซึ่งต้องใช้ระยะเวลาพอสมควร ขนาดของแรงดันที่คลาดเคลื่อนที่ได้จากวงจรเปรียบเทียบเฟสจะแปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความถี่และเฟสของสัญญาณ ดังนั้นเพื่อให้ได้ค่าความถี่และเฟสเดียวกัน วงจรเฟสล็อกจะทำการปรับสถานะของตัวเองจนกว่าค่าความถี่หรือเฟสของสัญญาณเอาต์พุตของวงจรออสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดันมีค่าเท่ากับค่าสัญญาณอินพุต

ทั้งนี้ หากพิจารณาสถานะการทำงานของวงจรเฟสล็อก สามารถแบ่งออกได้ 3 สถานะ คือ สถานะทำงานอิสระ (Free-running mode) สถานะแคปเจอร์ (Capture mode) และสถานะเฟสล็อก (Phase-locked mode)

การทำงานของสถานะแรก คือ สถานะทำงานอิสระ โดยวงจรเฟสล็อกจะทำงานอิสระ เนื่องจากยังไม่มีค่าแรงดันหรือค่าความถี่อินพุตเกิดขึ้น ค่าความถี่ของวงจรออสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดันจะถูกกำหนดจากโครงสร้างภายในวงจรเอง สำหรับการปรับค่าให้สามารถตอบสนองค่าอินพุต

เริ่มต้นที่ค่าระดับแรงดันศูนย์โวลต์ ค่าความถี่ดังกล่าวถูกเรียกว่า *ค่าความถี่อิสระหรือค่าความถี่ศูนย์กลาง* (Free-running frequency:  $f_0$ ) และหากมีค่าความถี่หรือแรงดันที่ป้อนมายังอินพุตของวงจรมอดูเลชัน วงจรรอสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดันจะเริ่มทำงานเพื่อสร้างสัญญาณที่มีความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปตามอินพุตที่เข้ามา ช่วงสภาวะนี้ เรียกว่า *สภาวะแคปเตอร์* หลังจากนั้น ค่าความถี่ที่ได้จากเอาต์พุตของวงจรรอสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดันจะถูกส่งป้อนกลับไปยังอินพุตเพื่อทำการเปรียบเทียบค่ากับสัญญาณอินพุต โดยจะค่อย ๆ ปรับเปลี่ยนค่าจนสามารถสร้างความถี่หรือแรงดันได้ตรงกันกับค่าสัญญาณอินพุตที่ป้อน วงจรมอดูเลชันก็จะทำการล็อกค่า ๆ นั้นไว้ เรียกสภาวะนี้ว่า *สภาวะเฟสล็อก*

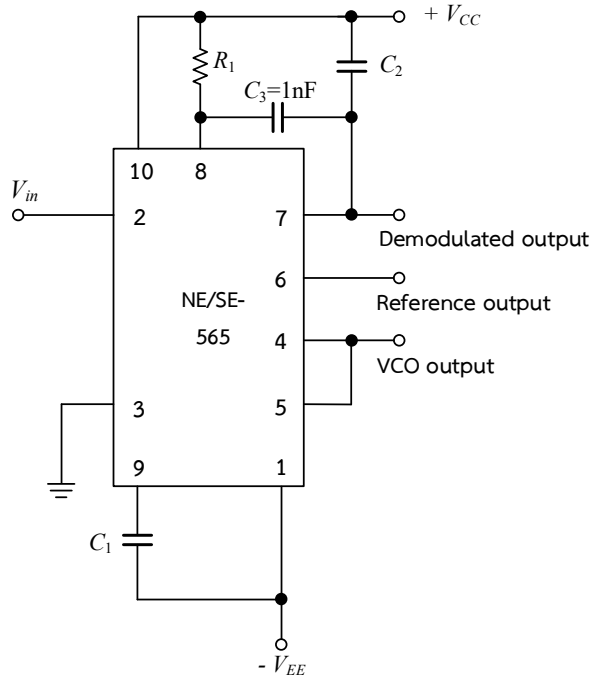
จากรูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความถี่ที่เกี่ยวข้องของวงจรมอดูเลชัน จะเห็นได้ว่าย่านล็อก (Lock range:  $f_L$ ) ถูกกำหนดขึ้นจากกรณีที่ระบบการป้อนกลับสามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่อินพุตได้ และสำหรับย่านแคปเตอร์ (Capture range:  $f_c$ ) ถูกกำหนดจากกรณีที่ระบบการป้อนกลับสามารถเข้าถึงสภาวะเฟสล็อกได้ ทั้งนี้ สำหรับลักษณะคุณสมบัติทางพลวัต (Dynamic characteristic) ของวงจรมอดูเลชัน จะถูกกำหนดโดยคุณสมบัติและการออกแบบของวงจรมอดูเลชันที่ใช้งาน ในขณะที่วงจรมอดูเลชันอยู่ในสภาวะเฟสล็อก ค่าของความเร็วในการติดตามการเปลี่ยนแปลงของความถี่อินพุตของวงจรมอดูเลชันจะถูกจำกัดโดยวงจรมอดูเลชันที่ต่ำไปโดยอัตโนมัติ



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของค่าความถี่ที่เกี่ยวข้องของวงจรมอดูเลชัน (ธันส์, 2565)

วงจรมอดูเลชัน แสดงดังรูปที่ 4.12 สามารถสร้างได้จากไอซีเบอร์ NE/SE-565 ซึ่งเป็นไอซีอเนกประสงค์ (Philips Semiconductors Linear Products, 2021) สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย นำมาต่อร่วมกับอุปกรณ์แพสซีฟ องค์ประกอบของโครงสร้างภายในไอซีเบอร์ NE/SE-565 แสดงดังบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 4.13 ประกอบด้วย วงจรเปรียบเทียบเฟส วงจรรอสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดัน และวงจรมอดูเลชัน ซึ่งเป็นส่วนประกอบเพิ่มเติมจากบล็อกไดอะแกรมหลักของการทำงานของวงจรมอดูเลชัน เป็นวงจรมอดูเลชันที่สร้างขึ้นจากวงจรมอดูเลชันในตัวไอซีเบอร์ NE/SE-565

ที่นำมาใช้งาน จะทำหน้าที่ขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อให้ได้สัญญาณในระดับที่ต้องการได้ และจากรูปที่ 4.13 สังเกตได้ว่า ส่วนประกอบหลักอีกส่วนหนึ่งของวงจรมอดูเลเตอร์ คือ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านนั้น จะอาศัยตัวต้านทานขนาดเท่ากับ  $3.6\text{ k}\Omega$  ที่อยู่ในตัวไอซีเบอร์ NE/SE-565 (Philips Semiconductors Linear Products, 2021) ต่อร่วมกับตัวเก็บประจุที่ต่อภายนอกตัวไอซี เป็นวงจรกรองความถี่ต่ำอย่างง่ายจากอุปกรณ์แพสซีฟแบบวงจรกรองความถี่ต่ำอาร์ซี (RC filter)

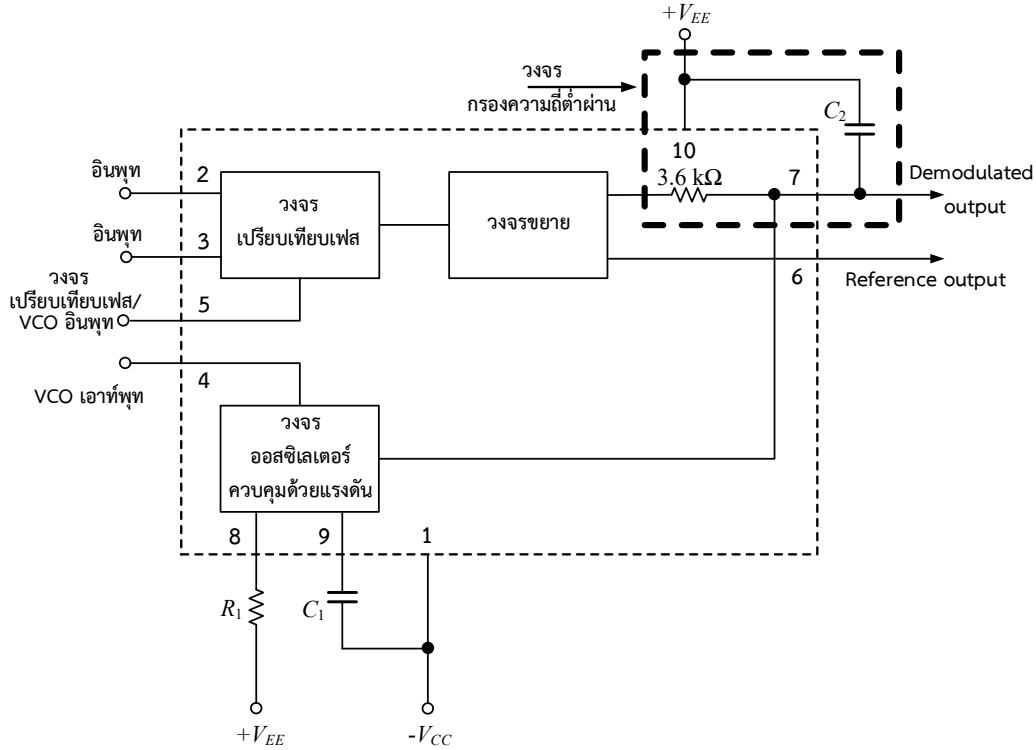


รูปที่ 4.12 วงจรมอดูเลเตอร์โดยใช้ไอซีเบอร์ NE/SE-565 (ธนัสต์, 2565)

จากการต่อวงจรมอดูเลเตอร์ โดยใช้ไอซีเบอร์ NE/SE-565 ในรูปที่ 4.12 สามารถหาค่าความถี่ศูนย์กลางได้จาก  $f_0$  ได้จาก สมการที่ (4.20) โดยตัวต้านทาน  $R_1$  และตัวเก็บประจุ  $C_1$  จะทำการต่อภายนอกตัวไอซีเบอร์ NE/SE-565 ที่ขา 8 และขา 9 ตามลำดับ สำหรับการต่อใช้งานนั้น ตัวเก็บประจุ  $C_1$  สามารถเลือกใช้ค่าได้ตามความต้องการ แต่ค่าตัวต้านทาน  $R_1$  ที่สามารถเลือกใช้ได้ ต้องมีค่าตั้งแต่  $2\text{ k}\Omega$  จนถึง  $20\text{ k}\Omega$  ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขของวงจรรอสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดัน ดังได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 4.1 สำหรับตัวเก็บประจุ  $C_2$  จะถูกต่อร่วมกับค่าความต้านทานขนาด  $3.6\text{ k}\Omega$  ที่อยู่ในตัวไอซีเบอร์ NE/SE-565 และต่อร่วมภายนอกไอซีระหว่างขา 7 และขา 10 เพื่อใช้สำหรับเป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับหนึ่ง (First-order low-pass filter) ตัวเก็บประจุ  $C_2$  จะต้องเลือกใช้ค่าที่มากพอที่จะไม่ทำให้วงจรมีผลกระทบต่อค่าแรงดันเอาต์พุตที่ขา 7 ของไอซี เพื่อให้ได้ค่าความถี่ของการเกิดการอสซิลเลตที่คงที่ และตัวเก็บประจุ  $C_3$  จะเลือกใช้ค่าประจุคงที่ คือ  $1\text{ nF}$  (Philips Semiconductors Linear Products, 2021) เช่นเดียวกันกับวงจรรอสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดัน

ในรูปที่ 4.8 โดยจะถูกต่ออยู่ระหว่างตัวต้านทาน  $R_1$  และตัวเก็บประจุ  $C_1$  เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการออสซิลเลตของสัญญาณภายในวงจร

$$f_o \approx \frac{1.2}{4R_1C_1} \tag{4.20}$$



รูปที่ 4.13 องค์ประกอบของโครงสร้างภายในไอซีเบอร์ NE/SE-565 (ธันส์, 2565)

โดยปกติตามคุณสมบัติของไอซีเบอร์ NE/SE-565 สามารถล็อกและตามสัญญาณอินพุตที่มีขนาดแบนด์วิดท์มากกว่า  $\pm 60\%$  ของค่าความถี่ศูนย์กลาง  $f_o$  (Philips Semiconductors Linear Products, 2021) ดังนั้น ค่าความถี่ย่านล็อก  $f_L$  ของวงจร สามารถหาค่าได้จาก

$$f_L = \frac{8f_o}{V_{CC} - V_{EE}} \tag{4.21}$$

เมื่อ  $V_{CC}$  และ  $-V_{EE}$  คือ ค่าแรงดันไฟเลี้ยงกระแสตรงบวกและลบที่จ่ายให้กับไอซีเบอร์ NE/SE-565 ตามลำดับ ค่าความถี่ย่านแคปเตอร์  $f_c$  สามารถหาค่าได้จาก

$$f_c = \sqrt{\frac{f_L}{2\pi \times 3.6 \text{ k}\Omega \times C_2}} \tag{4.22}$$

**ตัวอย่างที่ 4.2**

จงออกแบบวงจรเฟสล็อก โดยใช้ไอซีเบอร์ NE/SE-565 เมื่อต้องการให้ค่าความถี่ศูนย์กลาง  $f_0 = 2 \text{ kHz}$  ค่าความถี่ย่านแคปเตอร์  $f_c = 40 \text{ Hz}$  และ  $V_{CC} = -V_{EE} = 10 \text{ V}$

**วิธีทำ** จากสมการที่ (4.20) สามารถกำหนดค่าตัวเก็บประจุ  $C_1$  เพื่อทำการหาค่าตัวต้านทาน  $R_1$  โดยทำการเลือกค่าตัวเก็บประจุ  $C_1 = 0.01 \mu\text{F}$  จะได้

$$R_1 = \frac{1.2}{4f_0C_1}$$

$$R_1 = \frac{1.2}{4 \times 2 \text{ kHz} \times 0.01 \mu\text{F}}$$

$$\therefore R_1 = 15 \text{ k}\Omega$$

จากโจทย์ ค่าความถี่ศูนย์กลาง  $f_0 = 2 \text{ kHz}$  และ  $V_{CC} = -V_{EE} = 10 \text{ V}$  ดังนั้นทำการหาค่าความถี่ย่านล็อก  $f_L$  ได้จากสมการที่ (4.21) ได้คือ

$$f_L = \frac{8 \times 2 \text{ kHz}}{10 \text{ V} - (-10 \text{ V})}$$

$$\therefore f_L = 800 \text{ Hz}$$

เมื่อทราบค่าความถี่ย่านล็อก  $f_L$  และจากโจทย์กำหนดค่าความถี่ย่านแคปเตอร์  $f_c = 40 \text{ Hz}$  ดังนั้นสามารถหาค่า  $C_2$  ได้จากสมการที่ (4.22) คือ

$$f_c^2 = \frac{f_L}{2\pi \times 3.6 \text{ k}\Omega \times C_2}$$

$$C_2 = \frac{f_L}{2\pi \times 3.6 \text{ k}\Omega \times f_c^2}$$

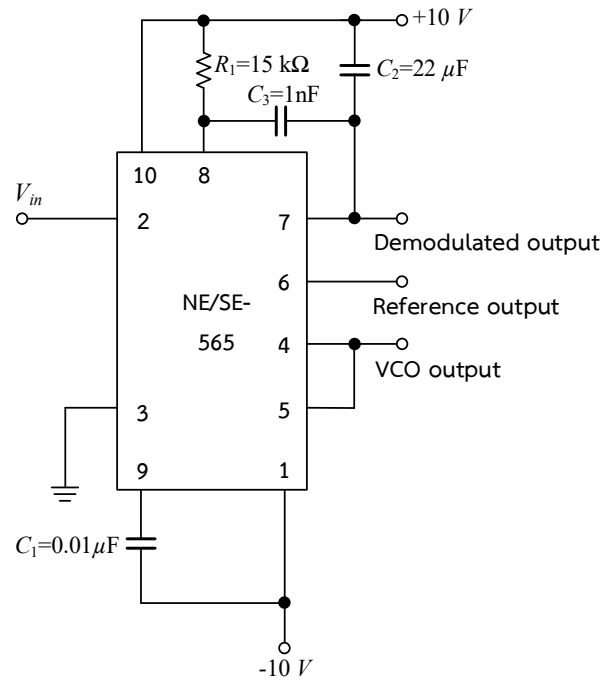
จะได้

$$C_2 = \frac{800 \text{ Hz}}{2\pi \times 3.6 \text{ k}\Omega \times (40 \text{ Hz})^2}$$

$$\therefore C_2 = 22 \mu\text{F}$$

**ตอบ** วงจรรวมอินทิเกรตเฟสล็อก โดยใช้ไอซีเบอร์ NE/SE-565 เป็นอุปกรณ์หลัก ที่ต้องการให้ค่าความถี่ศูนย์กลาง  $f_0 = 2 \text{ kHz}$  ค่าความถี่ย่านแคปเตอร์  $f_c = 40 \text{ Hz}$  และค่าแรงดันไฟเลี้ยง  $V_{CC} = -V_{EE} = 10 \text{ V}$  แสดงดังรูป





(ธนัสถ์, 2565)

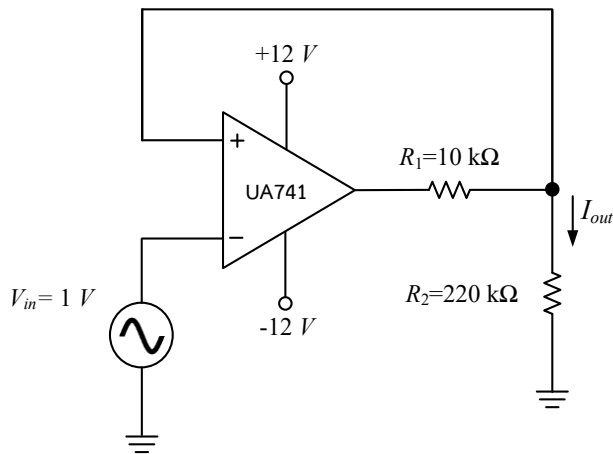
### 4.3 สรุป

วงจรรอซซึลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดัน หรือวงจร VCO เป็นวงจรที่สามารถสร้างสัญญาณเอาต์พุตที่ต้องการได้ โดยใช้การควบคุมแรงดันจากแหล่งจ่ายแรงดันภายนอก หรือเรียกอีกอย่างว่า วงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่ เอาต์พุตที่ได้จะมีค่าสัญญาณทางความถี่ตามค่าแรงดันภายนอกที่มีการปรับเปลี่ยนไป โดยอาศัยการเก็บประจุและคายประจุของตัวเก็บประจุในช่วงที่ค่ากระแสคงที่เปรียบเทียบกับค่าแรงดันสองช่วง คือค่าระดับแรงดันขีดเริ่มต่ำและค่าระดับแรงดันขีดเริ่มสูงของวงจรถัดขึ้นแบบขมิตต์ สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานสำหรับการมอดูเลตทางความถี่หรือเอฟเอ็ม วงจรกำเนิดเสียง และการมอดูเลตแบบเอฟเอสเค

สำหรับวงจรเฟสล็อกเป็นวงจรที่สามารถทำการล็อกความถี่ตามรอยความถี่กับค่าความถี่อ้างอิงที่ป้อนเข้าทางอินพุต เมื่อระบบทำการล็อกค่าความถี่แล้ว หากสัญญาณความถี่ที่ป้อนทางอินพุตมีค่าเปลี่ยนแปลงไป ระบบจะสามารถรักษาสภาพการล็อกนั้นได้ โดยจะไม่ส่งผลกระทบต่อค่าความถี่ที่ระบบทำการล็อกค่าไว้แล้ว วงจรเฟสล็อกเป็นหนึ่งในวงจรแอนะล็อกที่สำคัญที่น่าสนใจ มีการนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่น ระบบเครื่องมือวัดในงานอุตสาหกรรม ระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับควบคุมความถี่และเฟสของมอเตอร์ ระบบการสื่อสารเกี่ยวกับการถอดรหัสสัญญาณวิทยุ เอฟเอ็มสเตอริโอ ระบบติดตามของวงจรรองความถี่ การสังเคราะห์ค่าทางความถี่สำหรับอุปกรณ์เครื่องรับและเครื่องส่งวิทยุ การถอดรหัสการมอดูเลตแบบเอฟเอสเค และระบบเรดาร์ (Philips Semiconductors Linear Products, 2021) เป็นต้น

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 4

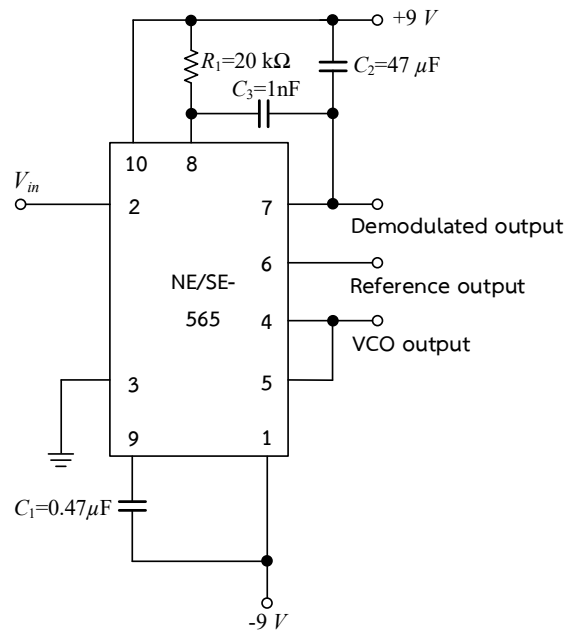
1. จงอธิบายหลักการทำงานเบื้องต้นของวงจรรอสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดัน
2. วงจรรอสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดันสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานด้านใดบ้าง
3. วงจรสวิตช์กระแสในวงจรรอสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดัน ทำหน้าที่อะไรและมีความสำคัญอย่างไร
4. จงหาค่าความถี่ของการเกิดการอสซิลเลตของสัญญาณของวงจรรอสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดัน  $f_o$  เมื่อ ตัวเก็บประจุ  $C_1$  มีค่าเท่ากับ 1 nF กระแส  $I_Q$  มีค่าเท่ากับ 2 mA ค่าระดับแรงดันขีดเริ่มสูง  $V_H$  มีค่าเท่ากับ 10 โวลต์ และค่าระดับแรงดันขีดเริ่มต่ำ  $V_L$  มีค่าเท่ากับ -10 โวลต์
5. จากข้อที่ 4 หากค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายโอนแรงดันไปยังความถี่  $k_{V/F}$  มีค่าเท่ากับ 3 จงหาค่าความนำถ่ายโอน  $g_m$
6. จากรูป จงหาค่ากระแส  $I_{out}$



(ธนัสถ์, 2565)

7. จงออกแบบวงจรรอสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดัน โดยใช้ไอซีเบอร์ NE/SE-566 VCO เมื่อค่าความถี่ของการเกิดการอสซิลเลต  $f_o = 20$  kHz เมื่อ  $V_{CC} = 12$  V
8. จงอธิบายบล็อกไดอะแกรมการทำงานของวงจรเฟสล็อก
9. วงจรเปรียบเทียบเฟสที่ใช้งานในวงจรเฟสล็อกทำหน้าที่อะไรบ้าง
10. สภาวะการทำงานของวงจรเฟสล็อกมีกี่สภาวะ อะไรบ้าง จงอธิบาย
11. วงจรเฟสล็อกมีค่า  $V_{CC}$  และ  $-V_{EE}$  เท่ากับ 9 โวลต์ ตัวเก็บประจุ  $C_1$  และตัวเก็บประจุ  $C_2$  มีค่าเท่ากับ 1 nF และ 0.1 nF ตามลำดับ จงหาค่าความถี่ย่านล็อก  $f_L$  และค่าความถี่ย่านแคปเตอร์  $f_c$  จากวงจรนี้

12. จากวงจรเฟสล็อกกลุ่ดั่งรูป จงหาค่าความถี่ศูนย์กลาง  $f_0$  ค่าความถี่ย่านลือก  $f_L$  และค่าความถี่ย่านแคบเตอร์  $f_c$



(ธน์สถ์, 2565)

### บรรณานุกรม

- Bertemes, F. P., Brown, B., & Wilson, A. J. (2000). A comparison of modified Howland circuits as current generators with current mirror type circuits. *Physiological Measurement*, 21, 1-6.
- Fernando, S. M. (2007). *Electrical bioimpedance cerebral monitoring: Fundamental steps towards clinical application*. Chalmers University of Technology.
- Muhammad, H. R. (2011). *Microelectronic circuits: analysis and design* (2nd ed.). Cengage Learning.
- Philips Semiconductors Linear Products. (2021). *NE/SE566 function generator product specification*.  
<https://www.datasheetcatalog.com>
- Seoane, F., Bragos, R., & Lindecrantz, K. (2007). *Current source for wideband multifrequency*. Electrical Bioimpedance Measurements.
- Toumazou, C., Lidgley, F. J., & Haigh, D. G. (1998). *Analogue IC design: The current-mode approach*. Peter Peregrinus.

## บทที่ 5

### วงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่และวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน

จากบทที่ 4 ได้กล่าวถึงวงจรออสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดัน เป็นวงจรที่สามารถสร้างสัญญาณเอาต์พุตจากแรงดันที่ต้องการได้ โดยใช้การควบคุมแรงดันจากแหล่งจ่ายแรงดันภายนอก หรือเรียกอีกอย่างว่า *วงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่* ซึ่งได้กล่าวไปแล้วทั้งหลักการทํางานและการต่อใช้งาน เพื่อให้ได้สัญญาณเอาต์พุตและความถี่ของสัญญาณ โดยการใช้อุปกรณ์ไอซีเบอร์ NE/SE-566 VCO ต่อร่วมกับอุปกรณ์แพสซีฟ แสดงดังรูปที่ 4.8 แต่สำหรับบทที่ 5 นี้ จะกล่าวถึงวงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่ที่แตกต่างออกไปจากบทที่ 4 ในรูปแบบของวงจรที่ใช้ไอซีออปแอมป์เบอร์ UA741 เป็นอุปกรณ์หลัก รวมทั้งการใช้ไอซีสำเร็จรูปเบอร์ LM331 และไอซีสำเร็จรูปเบอร์ AD650 เป็นอุปกรณ์หลักของวงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่อีกด้วย นอกจากนี้ ในบทที่ 5 ยังได้กล่าวถึงวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันโดยใช้ไอซีสำเร็จรูปเบอร์ LM331 และไอซีสำเร็จรูปเบอร์ AD650 เป็นอุปกรณ์หลักของวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน ทั้งนี้ วงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่และวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน สามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (Analog-to-digital converter) การควบคุมความเร็วของสเต็ปมอเตอร์ (Precision stepper motor speed controllers) การตรวจสอบเซ็นเซอร์ระยะไกล (Remote-sensor monitoring) เครื่องมือวัดความเร็ว (Tachometers) การวัดและส่งข้อมูลทางไกล (Telemetry) ระบบเครื่องมือวัดในงานอุตสาหกรรม หรือวงจรตีโมดูลเลตสัญญาณเอฟเอ็ม (McGille & Cooper, 1984) เป็นต้น

#### 5.1 วงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่

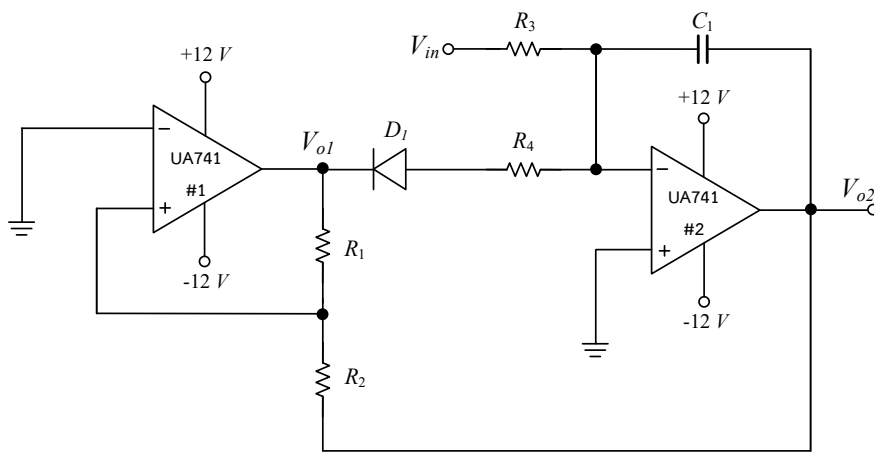
วงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่นั้น มีหลักการทํางาน คือ เมื่อป้อนอินพุตที่เป็นแรงดันให้กับวงจร วงจรสามารถกำเนิดหรือสร้างรูปคลื่นสัญญาณที่มีขนาดความถี่ได้ตามที่ต้องการ (Kaewpoonsuk & Rerkratn, 2017) มี 2 ชนิด คือ แบบ current-steering multi-vibrator ซึ่งอาศัยแรงดันจากภายนอกไปควบคุมให้วงจรมีลติไวเบรเตอร์ทํางาน เพื่อสร้างสัญญาณที่เอาต์พุต และแบบ charge-balance ซึ่งอาศัยแรงดันจากคุณสมบัติของตัวเก็บประจุที่ทำการเก็บประจุและคายประจุ เพื่อสร้างสัญญาณที่เอาต์พุต ซึ่งวงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่ที่จะกล่าวถึง คือ วงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่อย่างง่ายโดยใช้ออปแอมป์ และวงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่โดยใช้ไอซีสำเร็จรูปเบอร์ LM331 และไอซีสำเร็จรูปเบอร์ AD650 เป็นอุปกรณ์หลัก

##### 5.1.1 วงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่โดยใช้ออปแอมป์

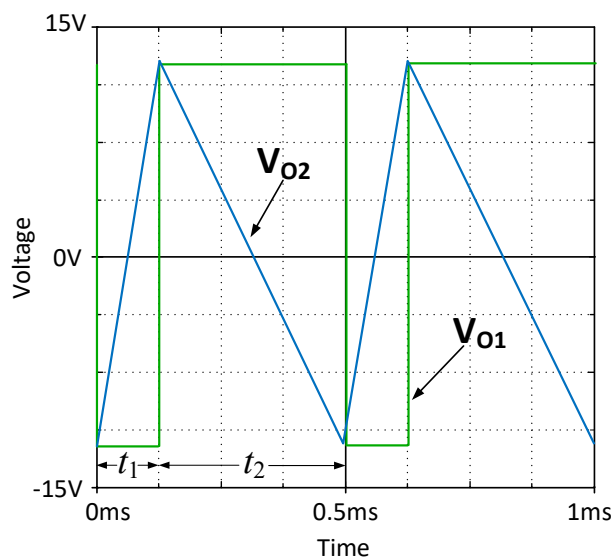
จากรูปที่ 5.1 แสดงวงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่อย่างง่ายแบบ charge-balance โดยใช้ไอซีออปแอมป์เบอร์ UA741 เป็นอุปกรณ์หลัก จำนวน 2 ตัว คือ ออปแอมป์ UA741#1 และออปแอมป์ UA741#2 ต่อร่วมกับอุปกรณ์แพสซีฟ โดยออปแอมป์ UA741#1 ทำหน้าที่เป็นวงจรเปรียบเทียบสัญญาณที่มีการป้อนกลับแบบบวก ต่อร่วมกับวงจรแบ่งแรงดันอ้างอิงโดยใช้ตัวต้านทาน

$R_1$  และ  $R_2$  และออปแอมป์ UA741#2 ต่อร่วมกับ  $C_1$  และ  $R_3$  ทำหน้าที่เป็นวงจรหาปริพันธ์ที่มีการป้อนกลับแบบลบ สำหรับไดโอด  $D_1$  ที่ต่อในวงจรบริเวณเอาต์พุตของ UA741#1 จะทำหน้าที่เหมือนสวิตช์ ปิด - เปิดวงจร เพื่อควบคุมให้ตัวเก็บประจุ  $C_1$  ทำการเก็บประจุและคายประจุ ค่าแรงดันเอาต์พุต ณ จุด  $V_{o1}$  และ  $V_{o2}$  จากรูปที่ 5.1 แสดงได้ดังรูปที่ 5.2 จะเห็นได้ว่า ช่วงเวลา  $t_1$  ค่าแรงดันเอาต์พุต ณ จุด  $V_{o1}$  จากวงจรเปรียบเทียบกับสัญญาณที่ได้จะมีค่าเป็นลบ ส่งผลทำให้ไดโอด  $D_1$  จะอยู่ในสถานะการทำงานแบบไบแอสกลับ (Reverse bias) นั่นคือ เปรียบเสมือนกับสวิตช์ปิด ทำให้ตัวเก็บประจุ  $C_1$  เริ่มทำการเก็บประจุ ค่ากระแสที่เกิดขึ้นที่จะไหลผ่านตัวเก็บประจุ  $C_1$  สามารถหาได้จาก

$$I_{C_1} = \frac{-V_{o1}}{R_4} \tag{5.1}$$



รูปที่ 5.1 วงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่อย่างง่ายโดยใช้ออปแอมป์ (ธน์สร์, 2565)



รูปที่ 5.2 ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากวงจรรูปที่ 5.1 (ธน์สร์, 2565)

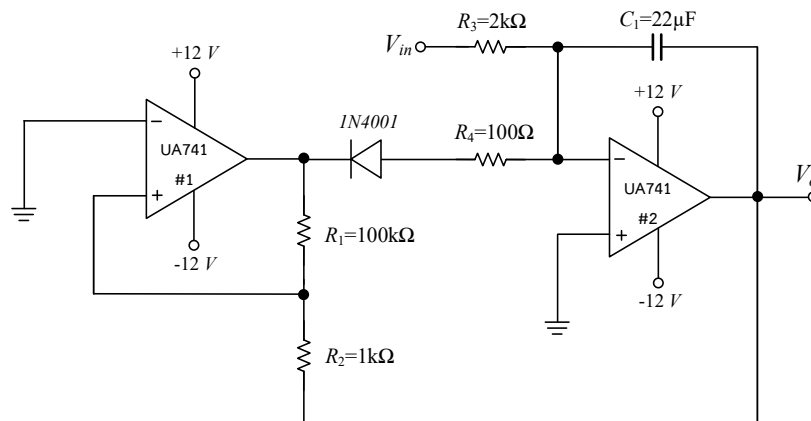
เพื่อให้ตัวเก็บประจุ  $C_1$  ทำการเก็บประจุได้อย่างรวดเร็ว โดยส่วนใหญ่แล้ว การออกแบบวงจรดังรูปที่ 5.1 นั้น จะทำการเลือกให้ตัวต้านทาน  $R_3$  มีค่าที่มากกว่า  $R_4$  ก่อนข้างเยาะ เมื่อตัวเก็บประจุ  $C_1$  ของวงจรหาปริพันธ์ ทำการเก็บประจุจนค่าแรงดันเอาต์พุต  $V_{o2}$  มีค่าเพิ่มสูงขึ้น จนทำให้ถึงค่าระดับแรงดันขีดเริ่มบวก  $V_{th+}$  วงจรเปรียบเทียบสัญญาณจะทำการเปรียบเทียบค่าสัญญาณของระดับค่าแรงดัน ณ ช่วงเวลานี้ ทำให้ค่าแรงดันเอาต์พุต  $V_{o1}$  และ  $V_{o2}$  มีค่าแรงดันเป็นบวก ส่งผลทำให้ไดโอด  $D_1$  จะอยู่ในสถานะการทำงานแบบไบแอสกลับ เปรียบเสมือนกับสวิตช์ “เปิด” ทำให้ตัวเก็บประจุ  $C_1$  ของวงจรหาปริพันธ์ ทำการคายประจุออกมา ณ ช่วงเวลา  $t_2$  จนค่าแรงดันเอาต์พุต  $V_{o2}$  มีค่าต่ำลงขึ้นถึงค่าระดับแรงดันขีดเริ่มลบ  $V_{th-}$  วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ จะทำการเปรียบเทียบค่าสัญญาณของระดับค่าแรงดัน  $V_{o1}$  และ  $V_{o2}$  อีกครั้ง ลักษณะการทำงาน ก็จะเกิดขึ้น ตามช่วงเวลา  $t_1$  และ  $t_2$  เช่นนี้ไปตลอดเวลา โดยค่าความถี่ของการเกิดการออสซิลเลต หาได้จาก

$$f_o = \left( \frac{R_1}{2R_2R_3C_1V_{sat}} \right) V_{in} \tag{5.2}$$

จากรูปที่ 5.2 สังเกตได้ว่า ค่าช่วงเวลา  $t_1$  และ  $t_2$  มีคาบช่วงเวลาที่แตกต่างกัน เนื่องจากช่วงเวลา  $t_1$  ที่ตัวเก็บประจุ  $C_1$  ทำการเก็บประจุ จะมีค่าแรงดันจากแรงดันอินพุต  $V_{in}$  เป็นตัวช่วยเสริมแรงดันให้ตัวเก็บประจุ  $C_1$  ทำการเก็บประจุจนถึงค่าระดับแรงดันขีดเริ่มบวก  $V_{th+}$  ได้เร็วกว่าตอนที่ตัวเก็บประจุ  $C_1$  ทำการคายประจุถึงค่าระดับแรงดันขีดเริ่มลบ  $V_{th-}$  นั้นเอง

### ตัวอย่างที่ 5.1

จากรูปแสดงวงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่อย่างง่ายโดยใช้ออปแอมป์ จงหาค่าความถี่ที่เกิดขึ้นของวงจร เมื่อกำหนดให้  $V_{in} = 9\text{ V}$  และ  $V_{sat} = 10\text{ V}$



(ธนัสถ์, 2565)

**วิธีทำ** จากรูปเป็นวงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่อย่างง่ายโดยใช้โอปแอมป์ จะเห็นได้ว่าค่าตัวต้านทาน  $R_1 = 100 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$  และ  $R_3 = 2 \text{ k}\Omega$  ค่าตัวเก็บประจุ  $C_1 = 22 \text{ }\mu\text{F}$  ดังนั้นสามารถหาค่าความถี่ของวงจรได้จากสมการที่ (5.2) โดย

$$f_o = \left( \frac{R_1}{2R_2R_3C_1V_{sat}} \right) V_{in}$$

เมื่อโจทย์กำหนดให้  $V_{in} = 9 \text{ V}$  และ  $V_{sat} = 10 \text{ V}$  ดังนั้นจะได้ค่าความถี่ของวงจร คือ

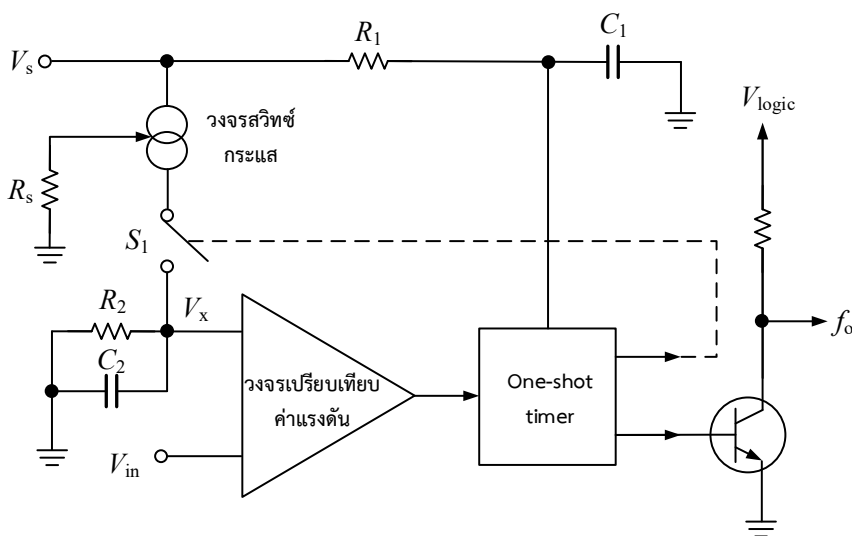
$$f_o = \left( \frac{100 \text{ k}\Omega}{2 \times (1 \text{ k}\Omega) \times (2 \text{ k}\Omega) \times (22 \text{ }\mu\text{F}) \times (10 \text{ V})} \right) \times (9 \text{ V})$$

$$\therefore f_o \cong 1 \text{ kHz}$$

**ตอบ** ค่าความถี่เอาต์พุต  $f_o$  ที่เกิดขึ้นของวงจร มีค่าประมาณเท่ากับ  $1 \text{ kHz}$

### 5.1.2 วงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่โดยใช้ไอซีสำเร็จรูป LM331

จากหัวข้อที่ 5.1.1 เป็นวงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่อย่างง่ายโดยใช้โอปแอมป์ แต่สำหรับในหัวข้อนี้ จะกล่าวถึงวงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่โดยใช้ไอซีสำเร็จรูป LM331 เป็นอุปกรณ์หลัก โดยในรูปที่ 5.3 แสดงการทำงานของวงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่แบบ charge-balance ของไอซีสำเร็จรูป LM331 โครงสร้างภายในประกอบด้วยวงจรหลักจำนวน 3 วงจร คือ วงจรสวิตช์แหล่งจ่ายกระแส วงจรเปรียบเทียบแรงดัน และวงจร one-shot timer (Texas Instruments, 2021)



รูปที่ 5.3 การทำงานของวงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่ของไอซีเบอร์ LM331 (ธน์สัท, 2565)

จากรูปที่ 5.3 สามารถอธิบายการทำงานได้ คือ เริ่มต้น วงจรเปรียบเทียบแรงดัน จะทำการเปรียบเทียบค่าแรงดันระหว่างค่าแรงดัน ณ จุด  $V_{in}$  กับค่าแรงดัน ณ จุด  $V_x$  หากค่าแรงดัน ณ จุด  $V_{in}$  มีค่ามากกว่าค่าแรงดัน ณ จุด  $V_x$  วงจรเปรียบเทียบแรงดันจะทำการส่งค่าการเปรียบเทียบแรงดันไปยังวงจร one-shot timer ทำให้สถานะของวงจร one-shot timer ทำงาน หลังจากนั้นสถานะของวงจรวัดสวิตช์แหล่งจ่ายกระแสจะอยู่ในสถานะ “ปิด” และในขณะเดียวกันทำให้ได้ค่าความถี่เอาต์พุต  $f_o$  เท่ากับ

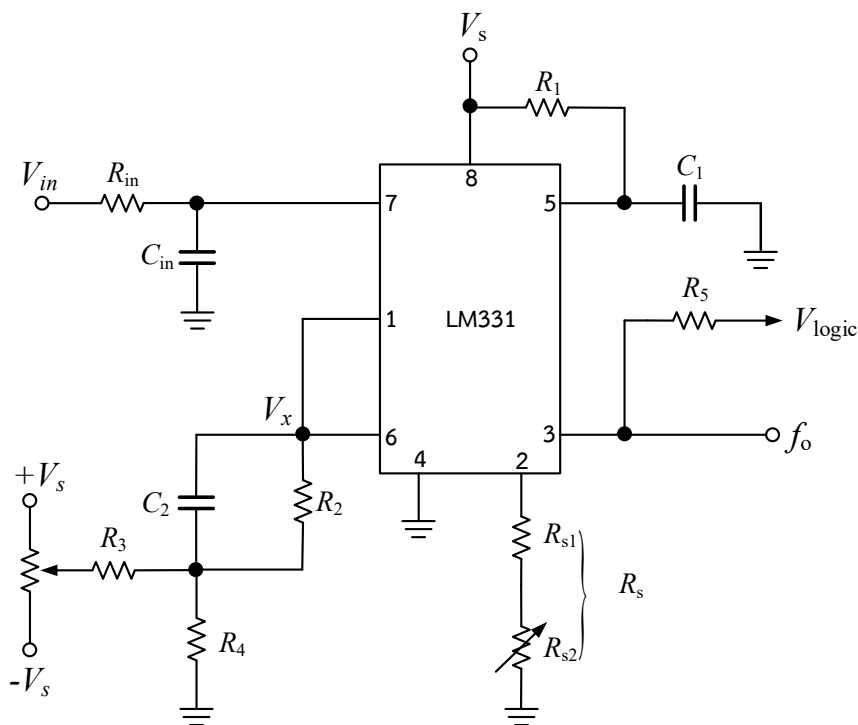
$$f_o = \frac{1}{1.1R_1C_1} \tag{5.3}$$

หรือ สามารถหาค่าคาบเวลา  $t$  ได้จาก

$$t = 1.1R_1C_1 \tag{5.4}$$

ระหว่างช่วงคาบเวลา  $t$  ในสมการที่ (5.4) จะมีค่ากระแสที่เกิดขึ้นไหลไปยังตัวเก็บประจุ  $C_2$  เพื่อทำการเก็บประจุ โดยค่าประจุที่เกิดขึ้นของตัวเก็บประจุ  $C_2$  จะมีค่าเท่ากับ

$$Q = i \times t \tag{5.5}$$



รูปที่ 5.4 วงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่โดยใช้ไอซีสำเร็จรูปเบอร์ LM331 (ชานส์, 2565)



ในขณะที่ค่ากระแสไหลไปยังตัวเก็บประจุ  $C_2$  เพื่อทำการชาร์จประจุตามช่วงคาบเวลาในสมการที่ (5.4) นั้น ทำให้ค่าแรงดัน ณ จุด  $V_x$  มีค่าเพิ่มมากขึ้น จนถึงค่าระดับที่มีค่าแรงดันมากกว่าค่าแรงดัน ณ จุด  $V_{in}$  วงจรเปรียบเทียบแรงดันจะส่งค่าการเปรียบเทียบแรงดันไปยังวงจร one-shot timer อีกครั้ง เพื่อทำการเปลี่ยนสถานะสวิตช์ของวงจรแหล่งจ่ายกระแส ให้กลับมาอยู่ในสถานะ “เปิด” ณ ช่วงเวลานี้ ทำให้ตัวเก็บประจุ  $C_2$  ทำการคายประจุผ่านตัวต้านทาน  $R_2$  จนกระทั่งค่าแรงดัน ณ จุด  $V_x$  มีค่าน้อยกว่าค่าแรงดัน ณ จุด  $V_{in}$  วงจรก็จะทำการเริ่มต้นการทำงานใหม่อีกครั้งในลักษณะเดิมตั้งแต่เริ่มต้น ดังนั้น จากหลักการการทำงานเบื้องต้นของไอซีเบอร์ LM331 นั้น เมื่อนำมาต่อใช้งานสำหรับวงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.4 จะเห็นได้ว่าจะมีการนำเอาไอซีเบอร์ LM331 ต่อร่วมกับอุปกรณ์แพสซีฟเพิ่มเติมไปจากการทำงานหลักตามการทำงานของวงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่ของไอซีเบอร์ LM331 ในรูปที่ 5.3 เนื่องจากต้องการให้วงจรมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น โดยสามารถปรับค่าเอาต์พุตของวงจรจากอุปกรณ์ที่ต่อภายนอกเพิ่มเติมได้ ดังนั้น สามารถหาค่าความถี่เอาต์พุตได้จาก

$$f_o = \left( \frac{V_{in}}{2.09 \text{ V}} \right) \times \left( \frac{R_s}{R_2} \right) \times \left( \frac{1}{R_1 C_1} \right) \quad (5.5)$$

วงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่โดยใช้ไอซีเบอร์ LM331 ที่ทำการต่อร่วมกับอุปกรณ์แพสซีฟ ดังรูปที่ 5.4 นั้น สามารถสร้างรูปคลื่นสัญญาณเอาต์พุตที่มีค่าความถี่ได้ตั้งแต่ 10 Hz – 15 kHz (Texas Instruments, 2021) ค่าแรงดันไฟเลี้ยงที่จ่ายให้กับวงจร มีค่าเท่ากับ 15 โวลต์ และค่าแรงดันอินพุตที่สามารถใช้งานในวงจรนี้ มีค่าตั้งแต่ 25 มิลลิโวลต์ ไปจนถึง 12.5 โวลต์ สำหรับตัวเก็บประจุ  $C_{in}$  ที่ต่อที่ขาอินพุต ต่อไว้เพื่อทำการกรองเอาค่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ปะปนมากับแรงดันอินพุต โดยการออกแบบหาค่าตัวเก็บประจุ  $C_{in}$  มีค่าน้อยกว่าตัวเก็บประจุ  $C_2$  มากเกินไป อาจส่งผลต่อค่าความถี่เอาต์พุตที่ได้ ถัดมาสำหรับตัวต้านทาน  $R_{in}$  และตัวต้านทาน  $R_2$  จะต้องมีความเท่ากัน เพื่อช่วยชดเชยค่าความถี่ และสำหรับตัวต้านทาน  $R_s$  จำนวน 2 ตัว คือ ตัวต้านทาน  $R_{s1}$  แบบค่าคงที่ และตัวต้านทาน  $R_{s2}$  แบบปรับค่าได้ มีไว้สำหรับปรับค่าอัตราขยายของวงจร ทั้งนี้ เนื่องจากรูปคลื่นสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรในรูปที่ 5.4 อยู่ในย่านความถี่ที่ต่ำ ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล การมอดูเลตและดีมอดูเลตทางความถี่ได้ (Muhammad, 2011)

## ตัวอย่างที่ 5.2

จงออกแบบวงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่โดยใช้ไอซีเบอร์ LM331 เมื่อกำหนดให้ค่าแรงดันอินพุต  $V_{in} = 10 \text{ V}$  และ  $f_o = 10 \text{ kHz}$

**วิธีทำ** จากโจทย์ ได้กำหนดให้ค่าแรงดันอินพุต  $V_{in} = 10\text{ V}$  และ  $f_o = 10\text{ kHz}$  และเนื่องจากวงจรต้องใช้ไอซีเบอร์ LM331 ดังนั้น สามารถหาค่าความถี่ของวงจรได้จากสมการที่ (5.5) โดยทำการเลือกใช้ค่าอุปกรณ์ต่าง ๆ เป็นไปตามเงื่อนไข คือ ตัวต้านทาน  $R_{in}$  และตัวต้านทาน  $R_2$  จะต้องมามีค่าเท่ากัน เพื่อช่วยชดเชยค่าความถี่ ดังนั้น ในที่นี้ จะเลือกค่าตัวต้านทาน  $R_{in}$  และตัวต้านทาน  $R_2$  มีค่าเท่ากับ  $100\text{ k}\Omega$  และตัวต้านทาน  $R_s$  จำนวน 2 ตัว คือ ตัวต้านทาน  $R_{s1}$  แบบค่าคงที่ มีค่าเท่ากับ  $10\text{ k}\Omega$  และตัวต้านทาน  $R_{s2}$  แบบปรับค่าได้ มีค่าเท่ากับ  $5\text{ k}\Omega$  ไว้สำหรับปรับค่าอัตราขยายของวงจร ดังนั้น จะได้ค่าตัวต้านทาน  $R_s$  คือ

$$R_s = R_{s1} + R_{s2} = 10\text{ k}\Omega + 5\text{ k}\Omega$$

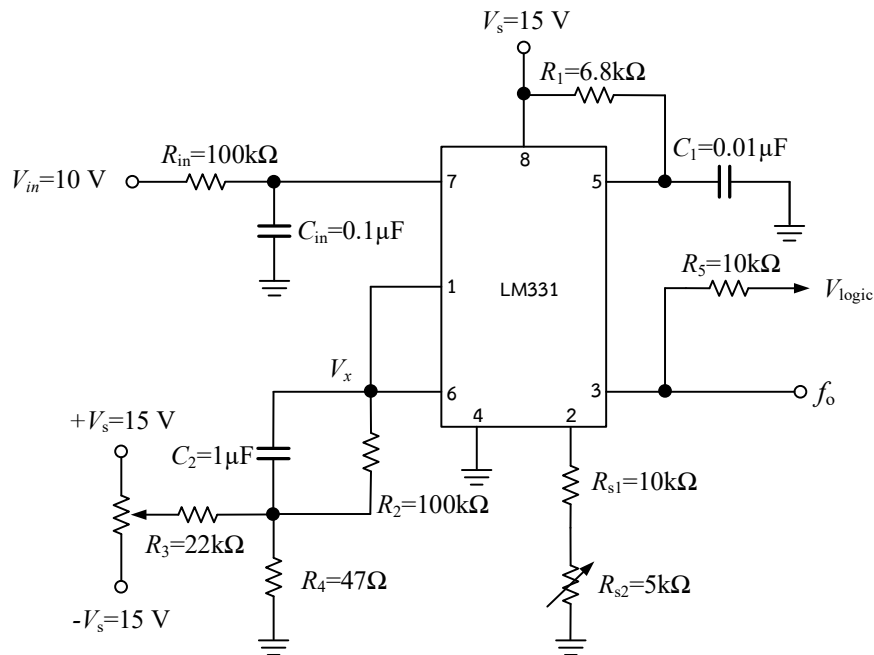
$$\therefore R_s = 15\text{ k}\Omega$$

ในที่นี้ จะใช้ค่าตัวต้านทาน  $R_1$  และค่าตัวเก็บประจุ  $C_1$  เท่ากับ  $6.8\text{ k}\Omega$  และ  $0.01\text{ }\mu\text{F}$  ดังนั้นค่าความถี่  $f_o$  ของวงจรคือ

$$f_o = \left( \frac{10\text{ V}}{2.09\text{ V}} \right) \times \left( \frac{15\text{ k}\Omega}{100\text{ k}\Omega} \right) \times \left( \frac{1}{6.8\text{ k}\Omega \times 0.01\text{ }\mu\text{F}} \right)$$

$$f_o = 10.55\text{ kHz}$$

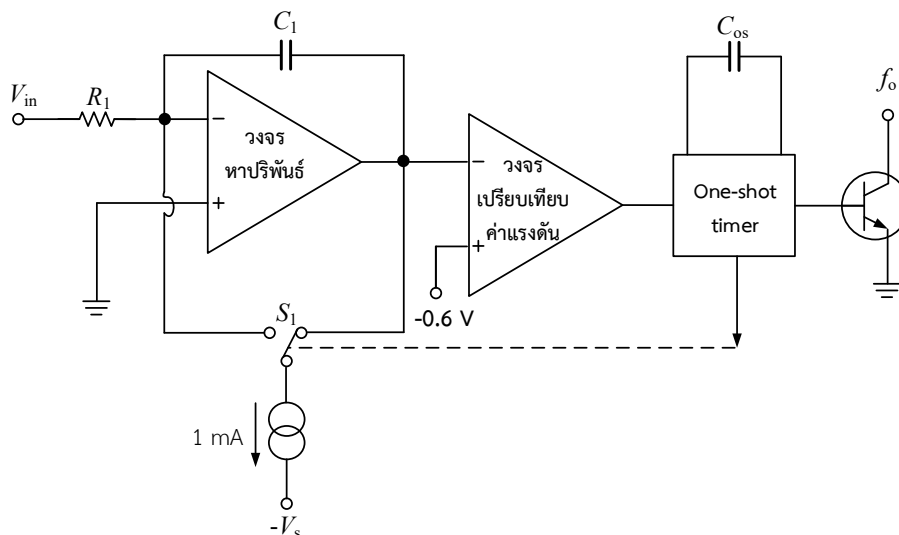
**ตอบ** วงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่โดยใช้ไอซีเบอร์ LM331 เมื่อกำหนดให้ค่าแรงดันอินพุต  $V_{in} = 10\text{ V}$  และ  $f_o = 10\text{ kHz}$  แสดงดังรูปด้านล่าง



(ธนัสถ์, 2565)

### 5.1.3 วงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่โดยใช้ไอซีสำเร็จรูป AD650

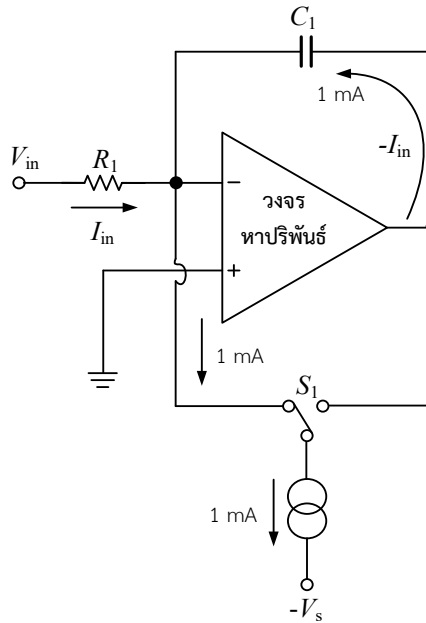
วงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่โดยใช้ไอซีสำเร็จรูป AD650 เป็นวงจรแบบ charge-balance เช่นเดียวกับกับวงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่โดยใช้ไอซีสำเร็จรูป LM331 แต่วงจรนี้สามารถให้ค่าสัญญาณเอาต์พุตที่เป็นความถี่ได้สูงสุด 5 MHz (Analog Devices, 2021) ซึ่งถือได้ว่าเป็นความถี่ที่สูงมาก ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลที่ต้องการค่าเอาต์พุตของจำนวนบิตที่จะนำไปใช้จำนวนมาก ๆ ได้ หลักการทำงานเบื้องต้นของวงจร แสดงดังบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 5.5 โดยโครงสร้างภายในประกอบด้วยวงจรหลัก 4 คือ วงจรหาปริพันธ์ วงจรสวิตช์แหล่งจ่ายกระแส วงจรเปรียบเทียบค่าแรงดัน และวงจร one-shot timer



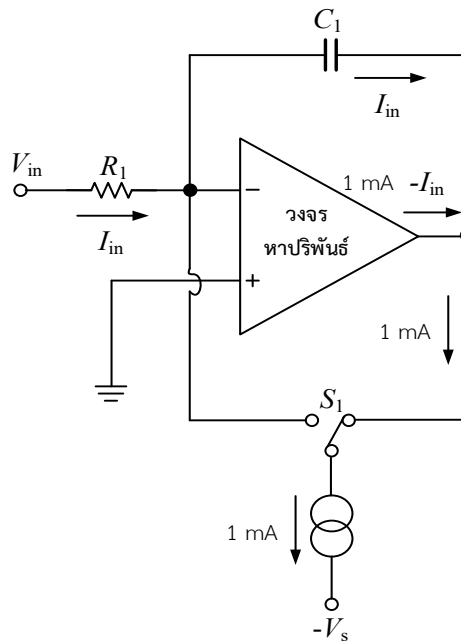
รูปที่ 5.5 การทำงานของวงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่ของไอซีเบอร์ AD650 (ธน์สร์, 2565)

จากรูปที่ 5.5 สามารถอธิบายการทำงานได้คือ เมื่อค่าแรงดันอินพุตถูกป้อนเข้าไปยังวงจรผ่านตัวต้านทาน  $R_1$  ทำให้เกิดค่ากระแส  $I_{in}$  ซึ่งกระแสส่วนหนึ่งจะไหลผ่านมายังวงจรสวิตช์กระแส  $S_1$  ที่ควบคุมการทำงานจากวงจร one-shot timer โดยจะรับค่าการเปรียบเทียบค่าแรงดันมาจากวงจรเปรียบเทียบค่าแรงดัน หากวงจร one-shot timer ได้รับค่าสัญญาณมาจากวงจรเปรียบเทียบค่าแรงดัน ในกรณีที่มีการเปรียบเทียบค่าแรงดันแล้ว หากค่าแรงดันมีค่าต่ำลงจนถึงค่าระดับแรงดันอ้างอิง วงจรสวิตช์กระแส  $S_1$  จะทำการเปลี่ยนตำแหน่งไปยังตำแหน่งอินพุตของออปแอมป์ของวงจรหาปริพันธ์โดยใช้ช่วงระยะเวลาหนึ่ง แสดงดังรูปที่ 5.6 จะถูกเรียกว่า “ช่วงเวลากวาร์เซ็ท” (Analog Devices, 2021; Steve, 2011) แต่หากกรณีที่มีการเปรียบเทียบค่าแรงดันแล้วค่าแรงดันมีค่าสูงขึ้นจนถึงค่าระดับแรงดันอิมิตัวของออปแอมป์  $V_{sat+}$  วงจร one-shot timer จะทำการเปลี่ยนตำแหน่งของวงจรสวิตช์กระแส  $S_1$  ไปยังตำแหน่งเอาต์พุตของออปแอมป์ของวงจรหาปริพันธ์โดยใช้ช่วง

ระยะเวลาหนึ่งเช่นกัน จะถูกเรียกว่า “ช่วงเวลาการปริพันธ์” (Analog Devices, 2021; Steve, 2011) แสดงดังรูปที่ 5.7 จะเห็นได้ว่าทิศทางการไหลของกระแสที่ออกจากเอาต์พุตของออปแอมป์ของวงจรหาปริพันธ์มีสองทิศทาง คือ เมื่ออยู่ใน “ช่วงเวลาการรีเซ็ต” ทิศทางการไหลของกระแส จะไหลผ่าน  $C_1$  แต่หากอยู่ใน “ช่วงเวลาการปริพันธ์” ทิศทางการไหลจะไหลมายังวงจรสวิตช์กระแส  $S_1$  โดยตรง

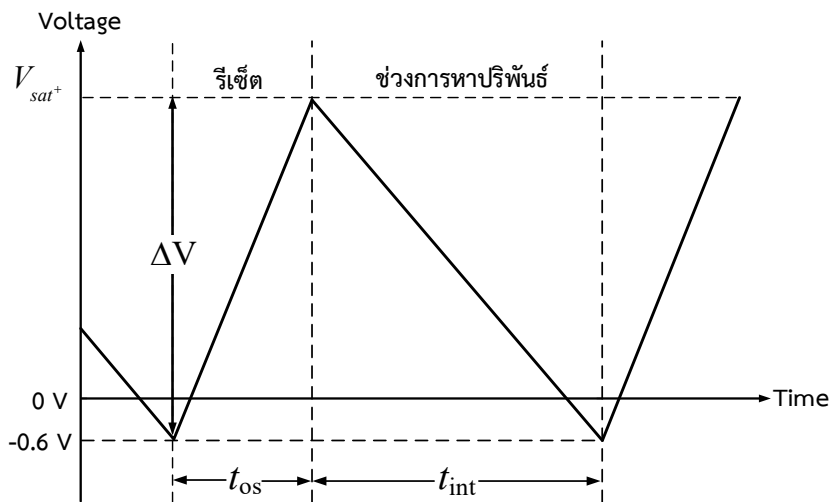


รูปที่ 5.6 สภาวะการทำงานช่วงเวลาการรีเซ็ตของวงจรในรูปที่ 5.5 (ธนัสถ์, 2565)



รูปที่ 5.7 สภาวะการทำงานช่วงเวลาการปริพันธ์ของวงจรในรูปที่ 5.5 (ธนัสถ์, 2565)

สำหรับวงจรเปรียบเทียบค่าแรงดัน ในรูปที่ 5.5 จะทำหน้าที่ในการเปรียบเทียบค่าแรงดันที่เกิดจากการเก็บประจุและคายประจุของตัวเก็บประจุ  $C_1$  โดยในช่วงเริ่มต้น เมื่อมีค่าแรงดันอินพุตป้อนเข้ามานั้น ตัวเก็บประจุ  $C_1$  จะทำการเก็บประจุ ซึ่งในขณะที่ตัวเก็บประจุ  $C_1$  กำลังเริ่มทำการเก็บประจุอยู่นั้น ค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรหาปริพันธ์จะมีค่าลดลง จนถึงค่าระดับแรงดันอ้างอิงของวงจร ซึ่งมีค่าระดับแรงดันเท่ากับ  $-0.6$  โวลต์ วงจรเปรียบเทียบค่าแรงดันจะทำการเปรียบเทียบค่าแรงดันดังกล่าว แล้วส่งสัญญาณไปยังวงจร one-shot timer เพื่อให้ทำการเปลี่ยนตำแหน่งของวงจรสวิตช์กระแส  $S_1$  ไปยังตำแหน่งอินพุตของออปแอมป์ของวงจรหาปริพันธ์ ณ ช่วงเวลานี้ ดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น คือช่วงเวลาเริ่มต้นของ “ช่วงเวลาการรีเซ็ต” ทำให้ตัวเก็บประจุ  $C_1$  จะเริ่มทำการเก็บประจุจนถึงค่าระดับแรงดัน  $V_{sat+}$  หลังจากนั้นวงจรเปรียบเทียบค่าแรงดันจะทำการเปรียบเทียบค่าแรงดันว่ามีค่าระดับแรงดันสูงขึ้น ก็จะทำการส่งสัญญาณไปยังวงจร one-shot timer เพื่อให้ทำการเปลี่ยนตำแหน่งของวงจรสวิตช์กระแส  $S_1$  ไปยังตำแหน่งเอาต์พุตของออปแอมป์ของวงจรหาปริพันธ์ ณ ช่วงเวลานี้ คือช่วงเวลาเริ่มต้นของ “ช่วงเวลาการปริพันธ์” ทำให้ตัวเก็บประจุ  $C_1$  จะเริ่มทำการคายประจุ จนถึงค่าระดับแรงดันที่ต่ำลงเท่ากับค่าแรงดันอ้างอิงของวงจรที่ค่าแรงดันเท่ากับ  $-0.6$  โวลต์ ค่าระดับแรงดันที่เกิดจากการเก็บประจุและคายประจุของตัวเก็บประจุ  $C_1$  แสดงดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 ค่าระดับแรงดันที่เกิดจากการเก็บประจุและคายประจุของตัวเก็บประจุ  $C_1$  (ธน์สร์, 2565)

จากรูปที่ 5.8 สามารถหาคาบเวลาของ one-shot timer ได้จาก

$$t_{os} = (C_{os} \times 6.8 \text{ k}\Omega) + 0.3 \mu\text{s} \quad (5.6)$$

ค่าความต่างของระดับแรงดัน  $V_{sat+}$  และระดับแรงดันอ้างอิง สามารถหาค่าได้จาก

$$\Delta V = t_{os} \times \frac{dV}{dt}$$

$$\Delta V = \frac{t_{os}}{C_1} \times (1\text{mA} - I_{in}) \tag{5.7}$$

หลังจาก “ช่วงเวลาการรีเซ็ต” ที่มีค่าคาบเวลา  $t$  ดังสมการที่ (5.6) สิ้นสุดลง ก็จะเป็นค่า “ช่วงเวลาการปริพันธ์” ซึ่งมีค่าคาบเวลาเริ่มต้นตั้งแต่ระดับแรงดัน  $V_{sat+}$  จนถึงค่าระดับแรงดันอ้างอิง สามารถหาค่าได้ดังสมการ คือ

$$T_{int} = \frac{\Delta V}{\frac{dV}{dt}}$$

$$= \frac{\frac{t_{os}}{C_1} \times (1\text{mA} - I_{in})}{\frac{I_{in}}{C_1}}$$

$$\therefore T_{int} = t_{os} \left( \frac{1\text{mA}}{I_{in}} - 1 \right) \tag{5.8}$$

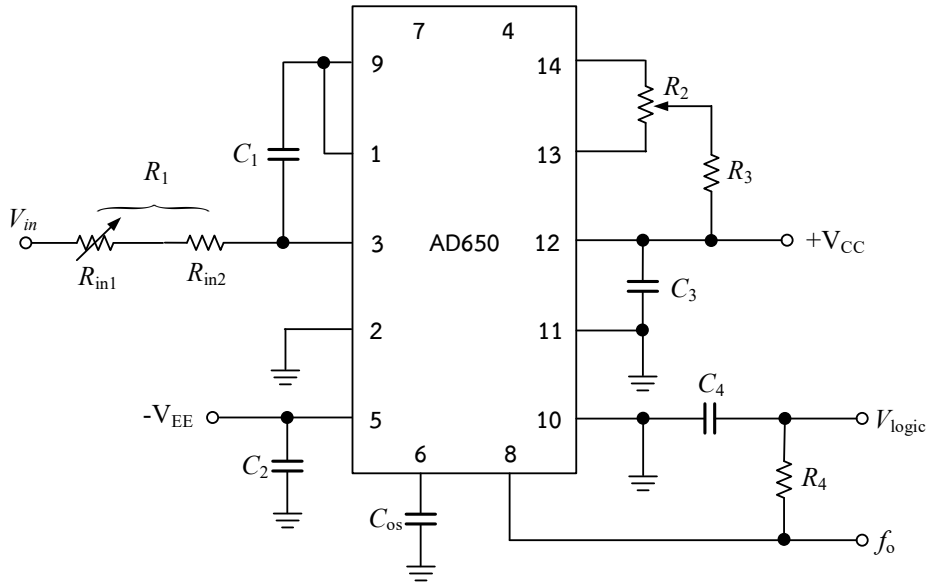
ดังนั้น สามารถหาค่าความถี่เอาต์พุต  $f_o$  ของวงจรได้จาก

$$f_o = \frac{1}{(t_{os} + T_{int})}$$

$$= \frac{I_{in}}{(t_{os} \times 1\text{mA})}$$

$$f_o = \frac{\left( \frac{V_{in}}{R_1} \right)}{(t_{os} \times 1\text{mA})} \tag{5.9}$$

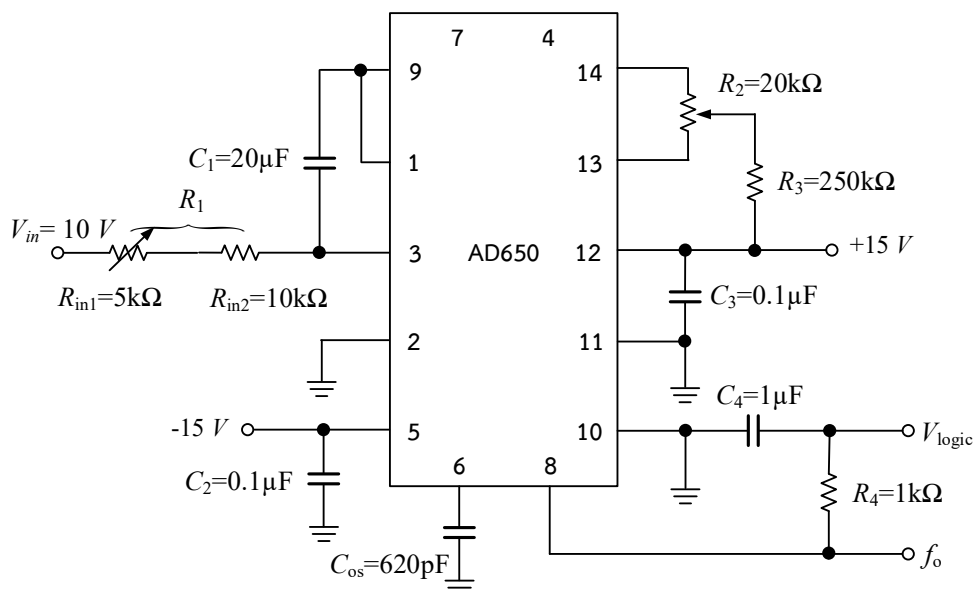
สำหรับการออกแบบวงจรโดยใช้ไอซีสำเร็จรูปเบอร์ AD650 เป็นวงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่ แสดงดังรูปที่ 5.9 ซึ่งการออกแบบวงจรจะต้องพิจารณาเงื่อนไขหลัก 2 ประการ คือ อย่างแรกต้องพิจารณา ค่าแรงดันอินพุตที่ป้อนและค่าความถี่เอาต์พุตที่ต้องการ ส่วนอย่างที่สอง คือ การออกแบบค่าอุปกรณ์แพสซีฟต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง



รูปที่ 5.9 วงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่โดยใช้ไอซีสำเร็จรูปเบอร์ AD650 (ธน์สัถ์, 2565)

ตัวอย่างที่ 5.3

จากรูป เป็นวงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่โดยใช้ไอซีสำเร็จรูปเบอร์ AD650 จงหาค่าความถี่เอาต์พุต  $f_o$  ของวงจรด้านล่างนี้



(ธน์สัถ์, 2565)

**วิธีทำ** จากโจทย์ เป็นวงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่โดยใช้ไอซีสำเร็จรูปเบอร์ AD650 ซึ่งสามารถหาค่าความถี่เอาต์พุต  $f_o$  ได้จากสมการที่ (5.9) คือ

$$f_o = \frac{\left(\frac{V_{in}}{R_1}\right)}{(t_{os} \times 1\text{mA})}$$

โดยที่  $V_{in} = 10\text{ V}$  และ  $R_1 = R_{in1} + R_{in2}$  จะได้

$$\begin{aligned} R_1 &= R_{in1} + R_{in2} \\ &= 5\text{ k}\Omega + 10\text{ k}\Omega \\ &= 15\text{ k}\Omega \end{aligned}$$

และสามารถหาค่าคาบเวลา  $t_{os}$  ของ one-shot timer ได้จากสมการที่ (5.6) คือ

$$t_{os} = (C_{os} \times 6.8\text{ k}\Omega) + 0.3\ \mu\text{s}$$

จากวงจร ค่าตัวเก็บประจุ  $C_{os}$  มีค่าเท่ากับ  $620\text{ pF}$  ดังนั้น สามารถหาค่าคาบเวลา  $t_{os}$  ของ one-shot timer คือ

$$t_{os} = (620\text{ pF} \times 6.8\text{ k}\Omega) + 0.3\ \mu\text{s}$$

$$t_{os} = 4.5\ \mu\text{s}$$

ดังนั้น ค่าความถี่เอาต์พุต  $f_o$  จะมีค่าเท่ากับ

$$f_o = \frac{\left(\frac{10\text{ V}}{15\text{ k}\Omega}\right)}{(4.5\ \mu\text{s} \times 1\text{mA})}$$

$$\therefore f_o \cong 148\text{ kHz}$$

**ตอบ** จากวงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่โดยใช้ไอซีเบอร์ AD650 ค่าความถี่เอาต์พุต  $f_o$  จะมีค่าเท่ากับ  $148\text{ kHz}$

## 5.2 วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน

จากหัวข้อที่ 5.1 ได้กล่าวถึงหลักการทำงานของวงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่โดยใช้ไอซีเบอร์ LM331 และไอซีเบอร์ AD650 รวมทั้งการออกแบบวงจรเมื่อมีการป้อนแรงดันที่ค่าระดับต่าง ๆ เพื่อให้ได้ค่าความถี่เอาต์พุตที่ต้องการนำไปประยุกต์ใช้งานไปแล้ว ในทางกลับกัน สำหรับหัวข้อนี้ จะกล่าวถึงวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน โดยมีหลักการทำงาน คือ เมื่อป้อนอินพุตที่มีขนาดสัญญาณและความถี่ให้กับวงจร วงจรสามารถแสดงค่าระดับแรงดันที่เอาต์พุตในรูปแบบของสัญญาณแอนะล็อกได้ ซึ่งหลักการทำงานและการต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ ของวงจรในหัวข้อนี้ จะอาศัยหลักการทำงานที่คล้ายคลึง

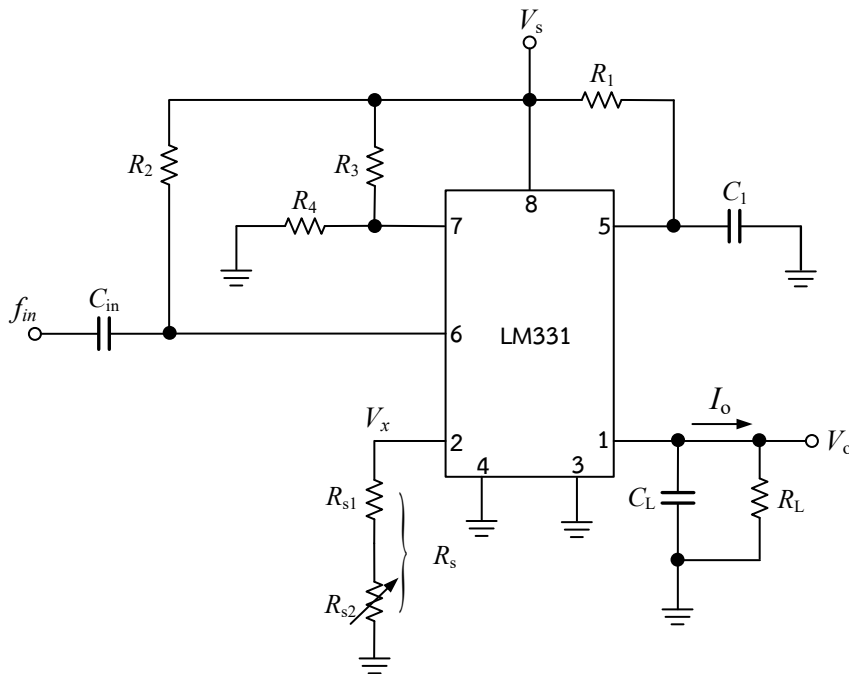


กันของตัวอุปกรณ์ที่ทำการต่อเป็นวงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่ นั่นคือ การใช้ไอซีสำเร็จรูปเบอร์ LM331 และไอซีสำเร็จรูปเบอร์ AD650 เป็นอุปกรณ์หลัก ต่อกับอุปกรณ์แพสซีฟเพื่อให้วงจรแสดงผลการทำงานที่สมบูรณ์ตามที่ต้องการ

### 5.2.1 วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันโดยใช้ไอซีสำเร็จรูป LM331

วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันอย่างง่ายโดยใช้ไอซีสำเร็จรูปเบอร์ LM331 แสดงดังรูปที่ 5.10 หลักการทำงานเบื้องต้นของวงจร คือ เมื่อสัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับวงจรซึ่งเป็นสัญญาณพัลส์ที่มีค่าความถี่ใด ๆ  $f_{in}$  จะถูกทำการส่งผ่านไปยังตัวเก็บประจุและตัวต้านทาน ที่ทำการต่อเป็นวงจรดิฟเฟอเรนเชียล (Thomas, 2012) และสัญญาณยังส่งผ่านไปยังวงจรเปรียบเทียบค่าแรงดันที่อยู่ภายในไอซีเบอร์ LM331 (ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 5.1.2) เพื่อทำการเปรียบเทียบค่าระดับของสัญญาณ และเมื่อทำการเปรียบเทียบแล้วก็จะส่งสัญญาณไปยังวงจร one-shot timer เพื่อทำการควบคุมการทำงานของสวิตช์ให้มีการ เปิด - ปิด การทำงานให้ตัวเก็บประจุสามารถทำการเก็บประจุและคายประจุได้ ค่ากระแสเฉลี่ยที่ได้จากเอาต์พุตของวงจรนี้ มีค่าเท่ากับ (Texas Instruments, 2021)

$$I_{average} = i \times (1.1 R_1 C_1) \times f \tag{5.10}$$

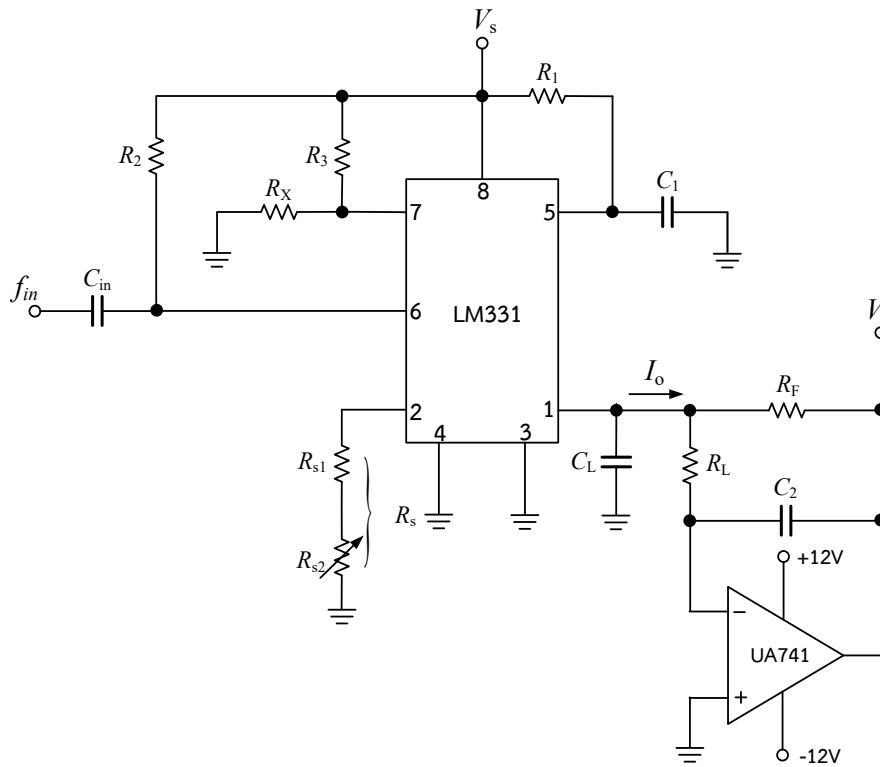


รูปที่ 5.10 วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันอย่างง่ายโดยใช้ไอซีสำเร็จรูปเบอร์ LM331 (ธนะสิทธิ์, 2565)

จากสมการที่ (5.10) ค่ากระแสเอาต์พุตที่ได้จะไหลผ่านตัวเก็บประจุ  $C_L$  และตัวต้านทาน  $R_L$  ที่ต่อขนานกัน ทำให้ได้ค่าระดับแรงดันเอาต์พุต  $V_o$  ซึ่งสามารถหาค่าได้จาก

$$V_o = (f_{in} \times 2.09 V) \times \left( \frac{R_L}{R_S} \right) \times (R_1 C_1) \quad (5.11)$$

อย่างไรก็ตามค่าระดับแรงดันเอาต์พุต  $V_o$  ที่ได้จากวงจรในรูปที่ 5.10 นั้น จะเกิดการริบเปิดของค่าแรงดันจากจุดยอดสุดของแรงดันเอาต์พุต ( $V_p$ ) เพียงเล็กน้อย ไม่เกิน  $10 mV$  แต่ก็สามารถส่งผลทำให้ค่าระดับแรงดันเอาต์พุต  $V_o$  ไม่เรียบได้ ทั้งนี้วงจรที่แสดงในรูปที่ 5.10 สามารถแก้ไขและปรับปรุงให้ค่าแรงดันเอาต์พุต  $V_o$  มีค่าที่เรียบขึ้นได้ โดยการต่อออปแอมป์เป็นวงจรบัฟเฟอร์เพิ่มเติมในส่วนเอาต์พุต แสดงดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันโดยใช้ไอซีสำเร็จรูปเบอร์ LM331 แบบต่อออปแอมป์เป็นวงจรบัฟเฟอร์ (ธันส์ถ์, 2565)

จากวงจรที่แสดงในรูปที่ 5.11 จะมีผลการตอบสนองทางเวลาที่ดีกว่าวงจรในรูปที่ 5.10 อีกทั้งยังสามารถช่วยลดการเกิดริบเปิดของค่าแรงดันได้ ทำให้เกิดค่าริบเปิดจากจุดยอด

สุดของแรงดันเอาต์พุต ( $V_p$ ) ลดลงน้อยกว่า  $5\text{ mV}$  ณ ช่วงค่าความถี่อินพุต  $f_{in}$  ที่มากกว่า  $1\text{ kHz}$  เท่านั้น แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อค่าความถี่อินพุต  $f_{in}$  ที่มีค่าต่ำกว่า  $200\text{ Hz}$  นั้น จะเกิดการริบเปิดของค่าแรงดันที่สูงกว่าวงจรในรูปที่ 5.10 ดังนั้นหากมีการนำวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันในรูปที่ 5.11 ไปประยุกต์ใช้งานต้องทำการพิจารณาถึงค่าความถี่อินพุต  $f_{in}$  ที่ป้อนด้วย สำหรับค่าระดับแรงดันเอาต์พุต  $V_o$  ในรูปที่ 5.11 สามารถหาค่าได้จาก

$$V_o = (f_{in} \times 2.09\text{ V}) \times \left( \frac{R_F}{R_S} \right) \times (R_1 C_1) \quad (5.11)$$

จากรูปที่ 5.11 ค่าตัวต้านทาน  $R_x$  ต้องเป็นไปตามเงื่อนไขคือ

$$R_x = \frac{(V_s - 2\text{ V})}{0.2\text{ mA}} \Big|_{V_s=4.5\text{ V} - 20\text{ V}} \quad (5.12)$$

#### ตัวอย่างที่ 5.4

จงออกแบบวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันโดยใช้ไอซีเบอร์ LM331 เมื่อกำหนดให้ค่าความถี่อินพุต  $f_{in} = 2\text{ kHz}$  และค่าระดับแรงดันเอาต์พุต  $V_o = 10\text{ V}$

**วิธีทำ** จากโจทย์ ได้กำหนดให้ทำการออกแบบวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันโดยใช้ไอซีเบอร์ LM331 ซึ่งกำหนดค่าความถี่อินพุต  $f_{in} = 2\text{ kHz}$  และค่าระดับแรงดันเอาต์พุต  $V_o = 10\text{ V}$  จะเห็นได้ว่าค่าความถี่อินพุตมีค่ามากกว่า  $1\text{ kHz}$  ดังนั้น การออกแบบการประยุกต์ใช้งาน จะทำการต่อวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันโดยใช้ไอซีสำเร็จรูปเบอร์ LM331 ดังรูปที่ 5.11 แบบต่อออปแอมป์เป็นวงจรบัพเฟอร์ เพื่อทำให้เกิดการริบเปิดจากจุดยอดสุดของแรงดันเอาต์พุต ( $V_p$ ) มีค่าต่ำที่สุด โดยทำการเลือกใช้ค่าอุปกรณ์ต่าง ๆ คือ ตัวต้านทาน  $R_F = R_L$  มีค่าเท่ากับ  $200\text{ k}\Omega$  ตัวต้านทาน  $R_S$  มีค่าเท่ากับ  $15\text{ k}\Omega$  ( $R_{S_1} = 10\text{ k}\Omega$ ,  $R_{S_2} = 5\text{ k}\Omega$ ) ตัวต้านทาน  $R_1$  มีค่าเท่ากับ  $2\text{ k}\Omega$  ตัวต้านทาน  $R_2 = R_3$  มีค่าเท่ากับ  $10\text{ k}\Omega$  ตัวเก็บประจุ  $C_{in}$  มีค่าเท่ากับ  $470\text{ pF}$  ตัวเก็บประจุ  $C_2$  มีค่าเท่ากับ  $20\text{ pF}$  ตัวเก็บประจุ  $C_L = C_1$  มีค่าเท่ากับ  $0.1\text{ }\mu\text{F}$  และเลือกใช้ออปแอมป์เบอร์ UA741 ดังนั้นค่าระดับแรงดันเอาต์พุต สามารถหาค่าได้จากสมการที่ (5.11) คือ

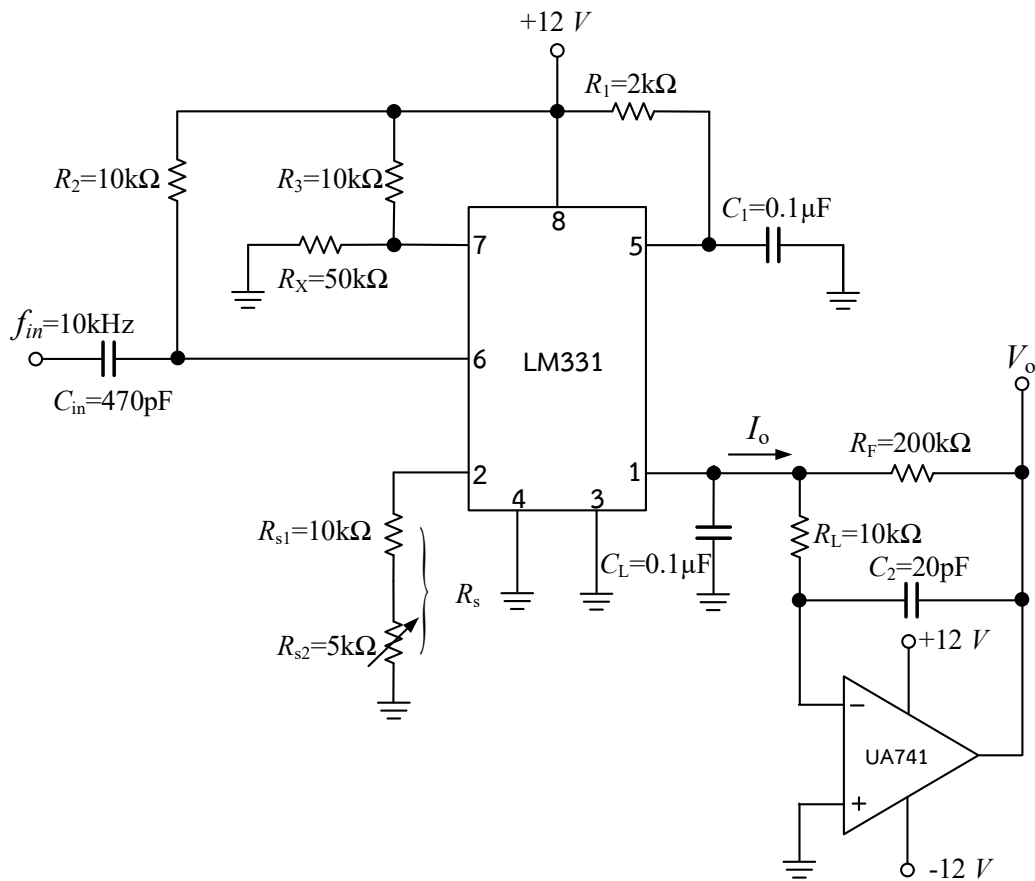
$$V_o = (f_{in} \times 2.09\text{ V}) \times \left( \frac{R_F}{R_S} \right) \times (R_1 C_1)$$

$$V_o = (2\text{ kHz} \times 2.09\text{ V}) \times \left( \frac{200\text{ k}\Omega}{15\text{ k}\Omega} \right) \times (2\text{ k}\Omega \times 0.1\text{ }\mu\text{F})$$

$$V_o \cong 11.15 V$$

ทั้งนี้ ค่าแรงดันเอาต์พุต  $V_o$  ที่ได้ จากการออกแบบวงจร มีค่าเท่ากับ  $11.15 V$  ซึ่งเป็นค่าแรงดันเอาต์พุตเต็มสเกล แต่เนื่องจากการออกแบบ มีการเลือกใช้ตัวต้านทาน  $R_s$  ที่ปรับค่าได้ จึงทำให้วงจรนี้ สามารถแสดงค่าแรงดันเอาต์พุต  $V_o$  เท่ากับ  $10 V$  ได้ตามโจทย์ที่กำหนด และจากความสัมพันธ์ในสมการที่ (5.12) จะเลือกใช้ค่าแรงดันไฟเลี้ยง  $V_o$  เท่ากับ  $12$  โวลต์ ทำให้ได้ค่าความต้านทาน  $R_x$  เท่ากับ  $50 k\Omega$

**ตอบ** วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันโดยใช้ไอซีเบอร์ LM331 เมื่อกำหนดให้ค่าความถี่อินพุต  $f_{in} = 2 \text{ kHz}$  และค่าระดับแรงดันเอาต์พุต  $V_o = 10 V$  แสดงดังรูปด้านล่าง



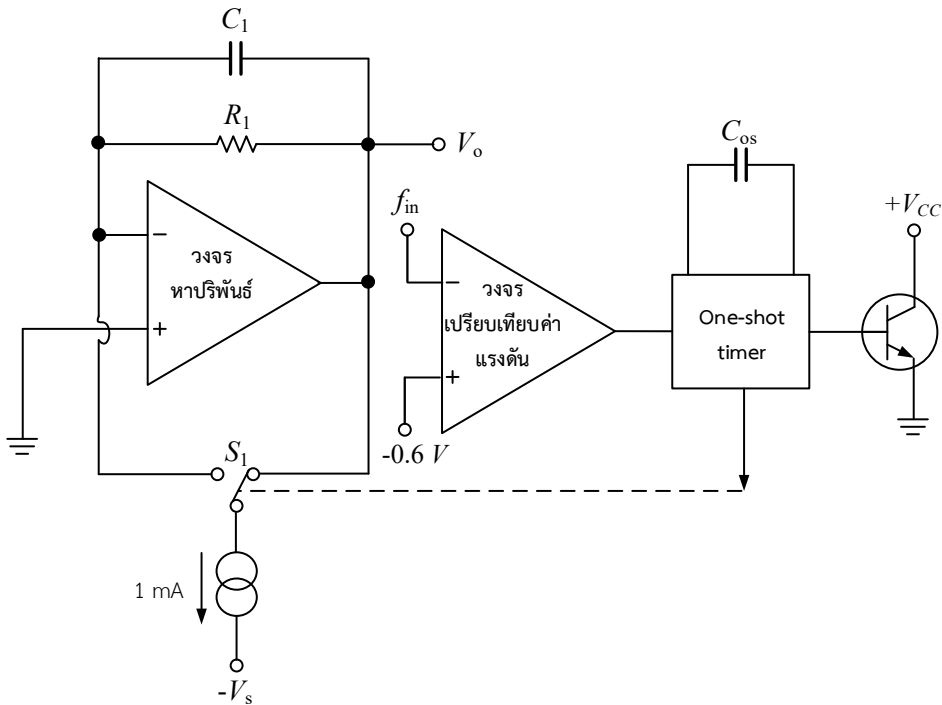
(ธน์สร์, 2565)

### 5.2.2 วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันโดยใช้ไอซีสำเร็จรูป AD650

ไอซีเบอร์ AD650 เป็นไอซีสำเร็จรูปที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นวงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่ โดยการต่ออุปกรณ์แพสซีฟ ภายนอกตัวไอซี ซึ่งได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 5.1.3 อย่างไรก็ตาม ไอซีสำเร็จรูปเบอร์ AD650 ก็ยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน (Analog

Devices, 2021) โดยไม่จำเป็นต้องมีการเปลี่ยนโครงสร้างภายในตัวไอซี เพียงแค่ทำการต่ออุปกรณ์แพสซีฟที่แตกต่างกันออกไปจากวงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่นั่นเอง

หลักการทํางานเบื้องต้นของวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันโดยใช้ไอซีสำเร็จรูปเบอร์ AD650 แสดงดังบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 5.12 นั้น ประกอบด้วย วงจรหาปริพันธ์ วงจรสวิตช์แหล่งจ่ายกระแส วงจรเปรียบเทียบค่าแรงดัน และวงจร one-shot timer เมื่อทำการป้อนความถี่  $f_{in}$  เข้าที่ขาอินพุตบวกของออปแอมป์ ซึ่งออปแอมป์ก็จะทำการเปรียบเทียบค่าระดับแรงดันของสัญญาณที่เข้ามากับค่าระดับแรงดันที่ขาอินพุตลบซึ่งมีค่าเท่ากับ  $-0.6$  โวลต์ หากมีค่าระดับแรงดันที่ต่ำกว่าแรงดัน  $-0.6$  โวลต์ วงจรเปรียบเทียบค่าแรงดันก็จะส่งสัญญาณไปยังวงจร one-shot timer เพื่อควบคุมการทำงานของสวิตช์กระแส  $S_1$  ให้ทำการเปลี่ยนตำแหน่งของวงจรสวิตช์กระแส  $S_1$  ไปยังตำแหน่งอินพุตของออปแอมป์ของวงจรหาปริพันธ์ ทำให้กระแสสามารถไหลผ่านวงจรหาปริพันธ์เกิดค่าแรงดันเอาต์พุต  $V_o$  ที่สูงขึ้น ในขณะเดียวกัน ทำให้ตัวเก็บประจุ  $C_1$  เริ่มทำการเก็บประจุจนถึงค่าระดับแรงดัน  $V_{sat+}$  อีกด้วย



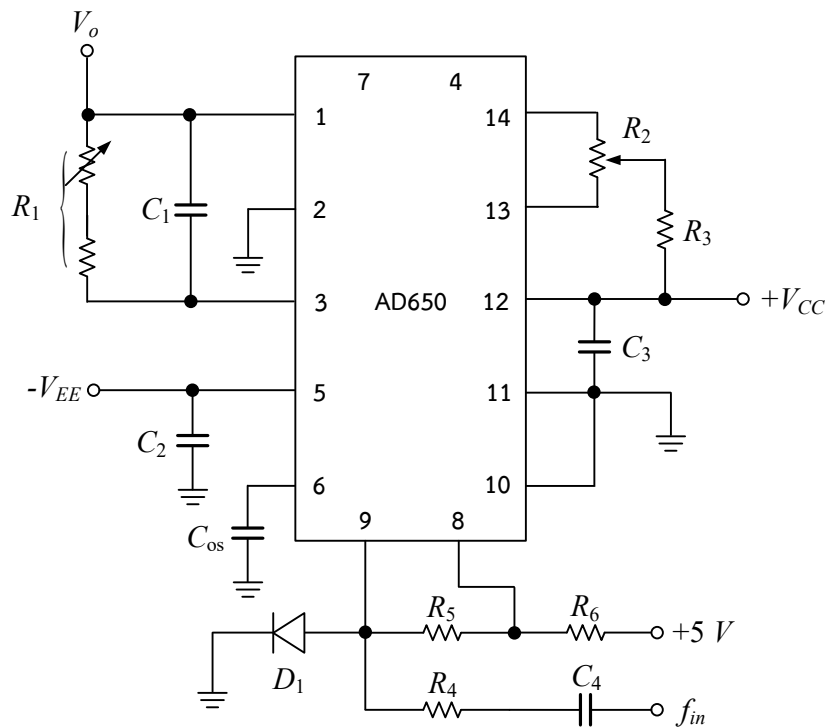
รูปที่ 5.12 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันของไอซีเบอร์ AD650 (ธน์สถ์, 2565)

และในกรณีที่ค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ นั้น ทำให้โหนดที่เอาต์พุตมีค่าอิมพีแดนซ์ที่ต่ำลง ส่งผลให้ค่ากระแสที่ไหลจากวงจรสวิตช์กระแสจะไม่ส่งผลต่อค่ากระแสอินพุตที่ป้อนให้กับวงจรหาปริพันธ์ วงจร one-shot timer ก็จะทำการเปลี่ยนตำแหน่งของวงจรสวิตช์

กระแส  $S_1$  ไปยังตำแหน่งเอาต์พุตของออปแอมป์ของวงจรหาปริพันธ์ ณ ช่วงเวลานี้ ตัวเก็บประจุ  $C_1$  จะทำการคายประจุ ผ่านตัวต้านทาน  $R_1$  ทำให้เกิดค่าแรงดันเอาต์พุต  $V_o$  ที่ระดับค่าต่ำลง อย่างไรก็ตาม เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่อินพุต  $f_{in}$  วงจร one-shot timer ก็จะทำให้การควบคุมตำแหน่งของวงจรสวิตช์กระแส  $S_1$  ตามการเปรียบเทียบค่าจากวงจรเปรียบเทียบค่าระดับแรงดันอีกครั้ง ลักษณะการทำงานของวงจรถ้าจะเป็นไปแบบนี้ตลอดเวลา ทั้งนี้ค่าแรงดันเอาต์พุต  $V_o$  สามารถหาค่าได้จาก (Analog Devices, 2021)

$$V_o = t_{os} \times R_1 \times 1 \text{ mA} \times f_{in} \tag{5.13}$$

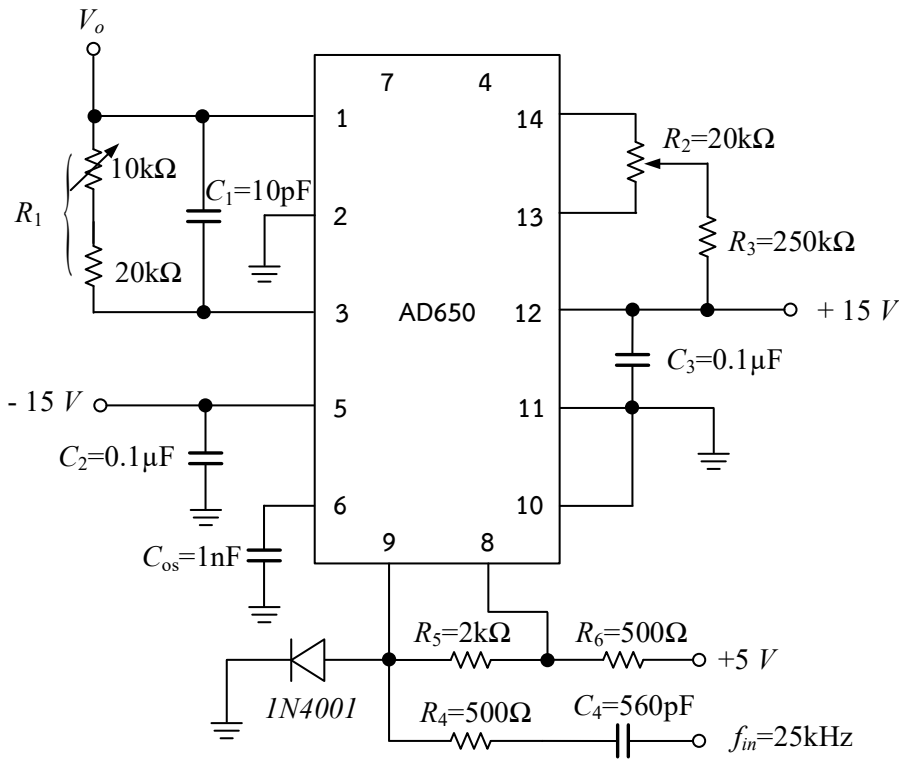
โดยที่  $t_{os}$  คือ ค่าคาบเวลาของ one-shot timer สามารถหาค่าได้จากสมการที่ (5.6) จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันเอาต์พุต  $V_o$  ที่ได้จากวงจรมีความสัมพันธ์กับตัวเก็บประจุ  $C_{os}$  ที่ต่ออยู่กับวงจร one-shot timer และตัวต้านทาน  $R_1$  ดังนั้นการออกแบบวงจรสำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานส่วนใหญ่จะทำการต่อตัวต้านทานแบบปรับค่าได้อนุกรมกับตัวต้านทาน  $R_1$  สำหรับการออกแบบวงจรโดยใช้ไอซีเบอร์ AD650 เป็นวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน แสดงดังรูปที่ 5.13 จะเห็นได้ว่าการต่ออุปกรณ์แพสซีฟต่าง ๆ จำนวนหลาย ๆ ตัว เพื่อให้วงจรมีความสมบูรณ์ตรงตามคุณสมบัติของไอซีสำเร็จรูปเบอร์ AD655 (Analog Devices, 2021)



รูปที่ 5.13 วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันโดยใช้ไอซีเบอร์ AD650 (ธันส์ถ์, 2565)

**ตัวอย่างที่ 5.5**

จากรูป จงหาค่าแรงดันเอาต์พุต  $V_o$  ของวงจร



(ธน์สฤ, 2565)

**วิธีทำ** จากรูปเป็นวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันโดยใช้ไอซีเบอร์ AD650 ดังนั้น สามารถหาค่าแรงดันเอาต์พุต  $V_o$  ได้จาก สมการที่ (5.13) จะได้

$$V_o = t_{os} \times R_1 \times 1 \text{ mA} \times f_{in}$$

โดยที่ค่าคาบเวลาของ one-shot timer  $t_{os}$  สามารถหาค่าได้จากสมการที่ (5.6)

คือ

$$t_{os} = (C_{os} \times 6.8 \text{ k}\Omega) + 0.3 \mu s$$

จากรูป  $C_{os} = 1 \text{ nF}$  จะได้

$$t_{os} = (1 \text{ nF} \times 6.8 \text{ k}\Omega) + 0.3 \mu s$$

$$t_{os} = 7.1 \mu s$$

ดังนั้นจะได้ค่าแรงดันเอาต์พุต  $V_o$  คือ

$$V_o = 7.1 \mu s \times 30 \text{ k}\Omega \times 1 \text{ mA} \times 25 \text{ kHz}$$

$$V_o \cong 5 \text{ V}$$

**ตอบ** จากรูป วงจรถ่ายแปลงความถี่เป็นแรงดันโดยใช้ไอซีสำเร็จรูปเบอร์ AD650 สามารถหาค่าแรงดันเอาต์พุต  $V_o = 5 \text{ V}$

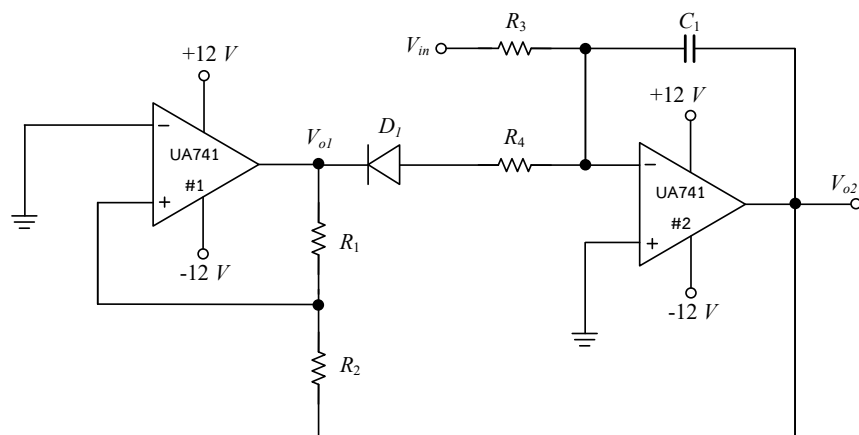
### 5.3 สรุป

วงจรถ่ายแปลงแรงดันเป็นความถี่ มีหลักการทำงาน คือ เมื่อป้อนอินพุตที่เป็นแรงดันให้กับวงจรถ่ายแปลงสามารถกำเนิดหรือสร้างรูปคลื่นสัญญาณที่มีขนาดความถี่ได้ตามที่ต้องการ มี 2 ชนิด คือ แบบ current-steering multi-vibrator ซึ่งอาศัยแรงดันจากภายนอกไปควบคุมให้วงจรมัลติไวเบเรเตอร์ทำงาน เพื่อสร้างสัญญาณที่เอาต์พุต และแบบ charge-balance ซึ่งอาศัยแรงดันจากคุณสมบัติของตัวเก็บประจุที่ทำการเก็บประจุและคายประจุเพื่อสร้างสัญญาณที่ต้องการ แต่สำหรับวงจรถ่ายแปลงความถี่เป็นแรงดัน มีหลักการทำงาน คือ เมื่อป้อนอินพุตที่มีขนาดสัญญาณและความถี่ให้กับวงจรถ่ายแปลงสามารถแสดงค่าระดับแรงดันที่เอาต์พุตในรูปแบบของสัญญาณแอนะล็อกได้

ทั้งนี้ วงจรถ่ายแปลงแรงดันเป็นความถี่และวงจรถ่ายแปลงความถี่เป็นแรงดัน โดยส่วนใหญ่จะประกอบด้วย วงจรหาปริพันธ์ วงจรสวิตช์แหล่งจ่ายกระแส วงจรเปรียบเทียบค่าแรงดัน และวงจรถ่ายแปลง one-shot timer สามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล การควบคุมความเร็วของสเต็ปมอเตอร์ การตรวจสอบเซ็นเซอร์ระยะไกล เครื่องมือวัดความเร็ว การวัดและส่งข้อมูลทางไกล ระบบเครื่องมือวัดในงานอุตสาหกรรม หรือวงจรถ่ายแปลงสัญญาณเอพเอ็ม เป็นต้น

#### แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 5

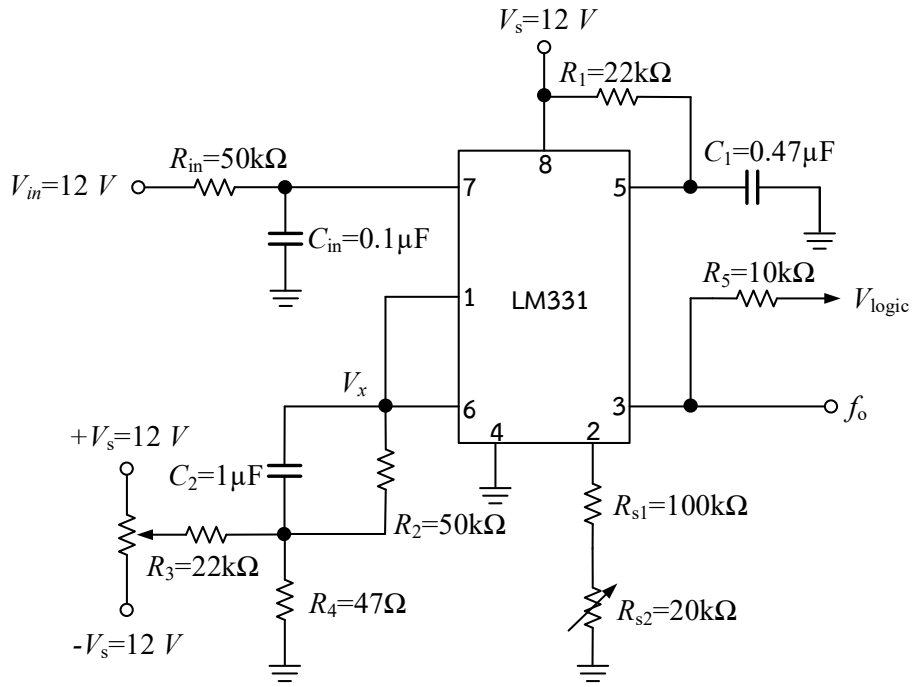
1. วงจรถ่ายแปลงแรงดันเป็นความถี่และวงจรถ่ายแปลงความถี่เป็นแรงดันนั้น มีหลักการทำงานเบื้องต้นอย่างไร จงอธิบาย
2. จงอธิบายการทำงานของวงจรถ่ายแปลงนี้ มาพอสังเขป



(ธน์สิทธิ์, 2565)

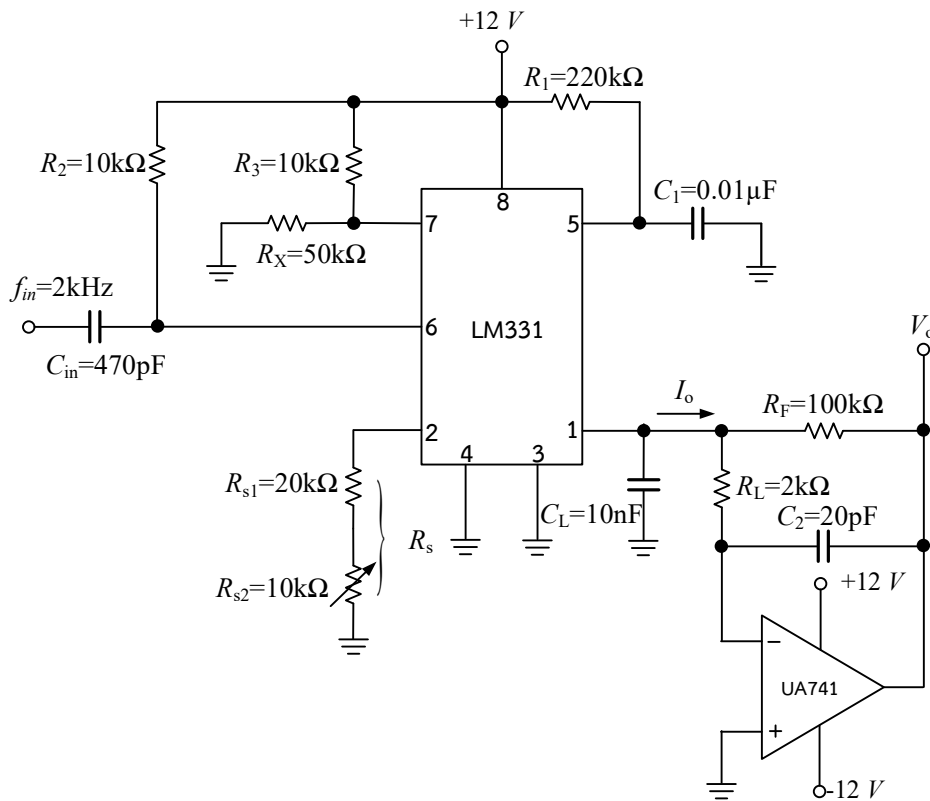


3. จากวงจรดังรูป จงหาค่าความถี่เอาต์พุต  $f_o$  ของวงจรนี้



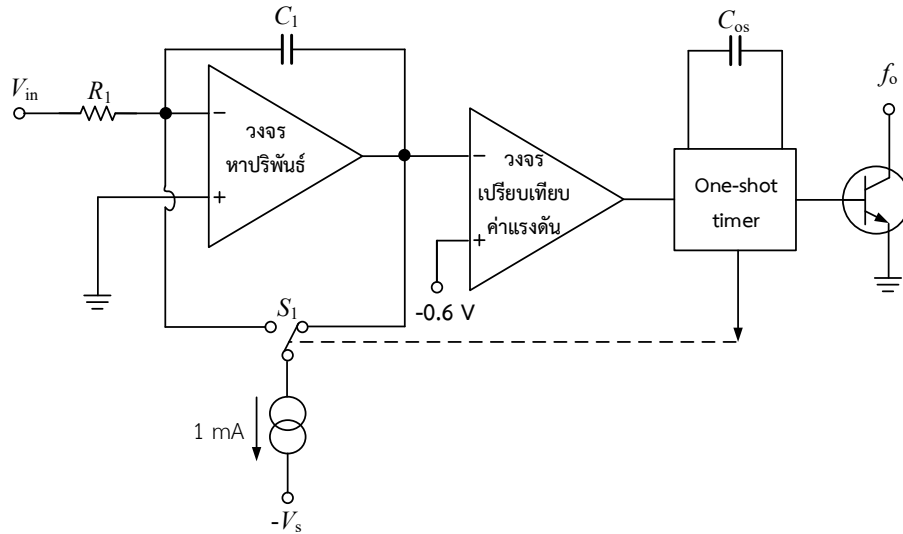
(ธนัสถ์, 2565)

4. จากรูป จงหาค่าแรงดันเอาต์พุต  $V_o$



(ธนัสถ์, 2565)

5. จงออกแบบวงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่ โดยใช้โอปแอมป์ ให้ค่าความถี่เอาต์พุต  $f_o$  ที่ต้องการ มีค่าเท่ากับ 3 kHz
6. จงอธิบายการทำงานของวงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่ดังรูป



(ธนัสถ์, 2565)

7. วงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่ มีส่วนประกอบหลักกี่วงจร อะไรบ้าง
8. จงอธิบาย “ช่วงเวลาการรีเซ็ต” และ “ช่วงเวลาการปริพันธ์” ตามหลักการทำงานของวงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่ของไอซีสำเร็จรูปเบอร์ AD650
9. จงออกแบบวงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่โดยใช้ไอซีสำเร็จรูปเบอร์ AD650 เมื่อต้องการค่าความถี่เอาต์พุต  $f_o = 1 \text{ MHz}$
10. จงออกแบบวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันโดยใช้ไอซีสำเร็จรูปเบอร์ AD650 เมื่อต้องการค่าแรงดันเอาต์พุต  $V_o$  เท่ากับ 10 โวลต์ โดยค่าความถี่อินพุต  $f_{in} = 50 \text{ kHz}$

### บรรณานุกรม

Analog Devices. (2021). *AD650 data sheet*.

<https://www.analog.com>

Kaewpoonsuk, A., & Rerktratn, A. (2017). Op-amps based schmitt trigger with controllable threshold voltage and its application to voltage-to-period converter. *International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*. (pp. 314-317). IEEE.

- McGille, C. D., & Cooper, G. R. (1984). *Continuous and discrete signal and system analysis* (2nd ed.). CBS College Publishing.
- Muhammad, H. R. (2011). *Microelectronic circuits: Analysis and design* (2nd ed.). Cengage Learning.
- Steve, M. (2011). *Using the AD650 voltage-to-frequency converter as a frequency-to-voltage converter*. Analog Devices.
- Texas Instruments. (2021). *LMx31x precision voltage-to-frequency converters data sheet*.  
<https://www.analog.com>
- Thomas, L. F. (2012). *Electronic devices: Electron flow version* (9th ed.). Prentice Hall International.

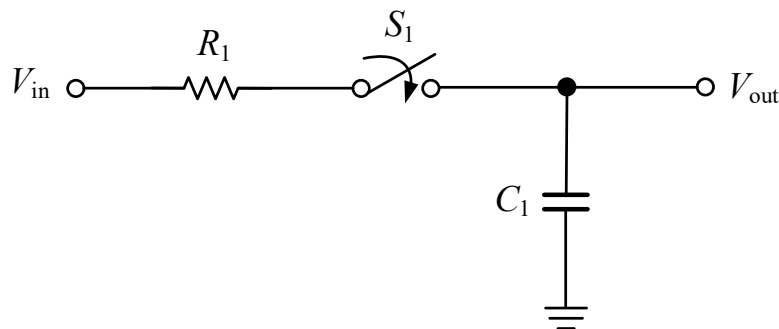
## บทที่ 6

### วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ

จากบทที่ 5 ได้กล่าวถึงวงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่และวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน โดยทั่วไปสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานสำหรับวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลได้ แต่ในบทนี้ จะกล่าวถึงวงจรที่สำคัญอีกวงจรมีหนึ่งที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานสำหรับวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลเช่นเดียวกัน คือ “วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ (Sample-and-hold)” ซึ่งเป็นวงจรส่วนแรกที่สำคัญของวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (Razavi, 1997; Nonthaputha et al., 2020) โดยอาศัยการทำงานของสวิตช์และตัวเก็บประจุในการทำงาน โดยการสุ่มค่าของสัญญาณแอนะล็อกจากการทำงานของสวิตช์ที่สามารถควบคุมการทำงานได้จากสัญญาณนาฬิกาหรือสัญญาณควบคุม และการคงค่าสัญญาณที่เกิดจากตัวเก็บประจุ เพื่อให้ได้ค่าระดับสัญญาณที่ต้องการ ทำให้สามารถหลีกเลี่ยงการลดทอนคุณภาพของการแปลงสัญญาณสำหรับวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลได้ อีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานสำหรับระบบประมวลผลสัญญาณที่ต้องการคงค่าสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและแม่นยำไว้ในช่วงเวลาหนึ่งที่ยังพอที่จะสามารถทำให้ระบบประมวลผลสัญญาณได้ (Razavi, 1997)

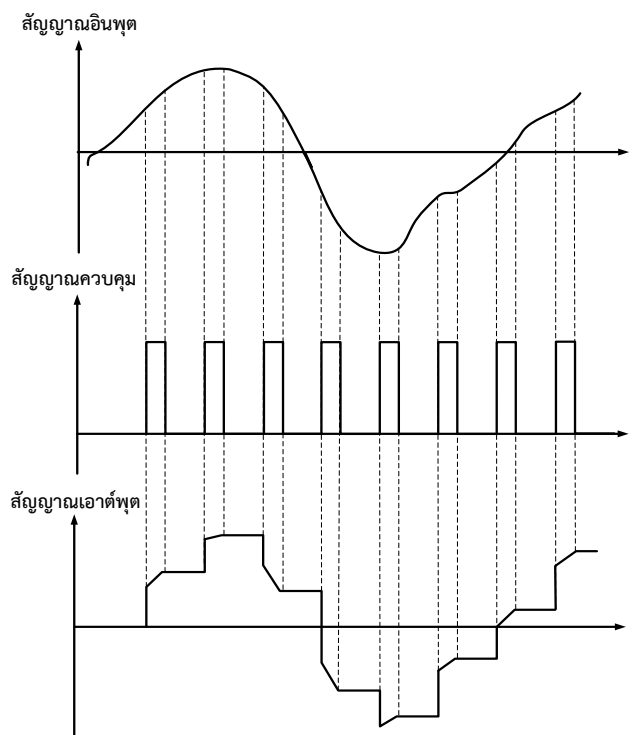
#### 6.1 วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณอย่างง่าย

วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณอย่างง่าย ประกอบไปด้วย แหล่งจ่ายแรงดันสำหรับป้อนสัญญาณอินพุตที่เป็นสัญญาณแอนะล็อก  $V_{in}$  ตัวต้านทาน  $R_1$  สวิตช์  $S_1$  ซึ่งถูกควบคุมการทำงานให้มีสถานะเปิด - ปิด จากสัญญาณนาฬิกาหรือจากสัญญาณควบคุม สำหรับการควบคุมช่วงการสุ่มและคงค่าของสัญญาณ และตัวเก็บประจุ  $C_1$  ที่ทำหน้าที่การคงค่าสัญญาณจากการเก็บประจุ (Rudy, 2003) แสดงดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณอย่างง่าย (ธน์สถ์, 2565)

สำหรับหลักการการทำงานของวงจรเบื้องต้น จะสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง คือ ช่วงแรกขณะสวิตช์  $S_1$  ปิด ตัวเก็บประจุ  $C_1$  ทำการเก็บประจุตามค่าเวลาในขณะที่สวิตช์  $S_1$  ปิด วงจรจะทำการสุ่มค่าเอาต์พุตโดยจะมีค่าตามค่าสัญญาณอินพุตที่ป้อนเข้ามาตลอดช่วงเวลา และต่อมาช่วงที่สองขณะสวิตช์  $S_1$  เปิด ตัวเก็บประจุ  $C_1$  ทำการคายประจุตามค่าเวลาในขณะที่สวิตช์  $S_1$  เปิด คือช่วงของการคงค่าสัญญาณ ดังนั้น เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 6.1 สามารถอธิบายการทำงานได้ คือในกรณีที่สวิตช์  $S_1$  มีสถานะ “ปิด” นั่นคือ ค่าของสัญญาณนาฬิกาหรือสัญญาณควบคุมสวิตช์มีค่าสูง (High) การทำงานของวงจรรออยู่ในสถานะ “สุ่ม (sample)” ในทางกลับกันหากค่าของสัญญาณนาฬิกาหรือสัญญาณควบคุมสวิตช์มีค่าต่ำ (Low) การทำงานของวงจรรออยู่ในสถานะ “คงค่าสัญญาณ (hold)” โดยวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณอย่างง่าย จะมีค่าพารามิเตอร์สำคัญที่เกี่ยวข้อง คือ “ค่าคงที่ทางเวลาอาร์ซี ( $RC$  Time constant)” หรือ  $\tau$  หากค่าคงที่ทางเวลาอาร์ซีมีค่าน้อยมาก ๆ สัญญาณเอาต์พุตของวงจรมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าสัญญาณอินพุตมาก ๆ โดยจะเห็นได้ถึงความสัมพันธ์ระหว่างความแม่นยำของสัญญาณอินพุตกับสัญญาณเอาต์พุตที่ได้ของวงจร ในกรณีที่ค่าคงที่ทางเวลาอาร์ซี  $\tau$  มีการเปลี่ยนแปลง แสดงได้ดังตารางที่ 6.1 และเมื่อสัญญาณมีค่าต่ำลงจนสวิตช์  $S_1$  มีสถานะ “เปิด” อีกครั้ง สลับกันไปตามสัญญาณควบคุม ในทางปฏิบัติตัวเก็บประจุ  $C_1$  จะไม่สามารถเก็บประจุหรือคงค่าแรงดันได้ทันที รวมทั้ง สวิตช์  $S_1$  ที่ไม่สามารถเปิดและปิดได้ทันที ทำให้รูปคลื่นสัญญาณเอาต์พุตที่ได้ในทางปฏิบัติ จะมีความแตกต่างไปจากทฤษฎีพอสมควร ดังนั้นการออกแบบวงจรเพื่อนำวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณไปประยุกต์ใช้งานจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพิจารณาถึงค่าคงที่ทางเวลาอาร์ซี  $\tau$  ด้วย



รูปที่ 6.2 สัญญาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องของวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ (ธนัสต์, 2565)

สำหรับสัญญาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับของวงจรมุมและคงค่าสัญญาณอย่างง่าย แสดงดังรูปที่ 6.2 ประกอบด้วยสัญญาณอินพุตที่เป็นสัญญาณแอนะล็อก  $V_{in}$  (สัญญาณไซน์ในรูปแบบแรงดัน) สัญญาณนาฬิกาหรือสัญญาณควบคุมการเปิด - ปิดของสวิตช์ และค่าสัญญาณเอาต์พุตที่ได้ของวงจรมุมและคงค่าสัญญาณอย่างง่ายจากรูปที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ทางเวลาอาร์ซี  $\tau$  ที่ส่งผลต่อความแม่นยำของวงจรมุมและคงค่าสัญญาณ (Rudy, 2003)

ค่าคงที่ทางเวลาอาร์ซี $\tau$	ความแม่นยำ
2.3	10 %
4.6	1 %
6.9	0.1 %
9.2	0.01 %
11.5	0.001 %
13.8	0.0001 %

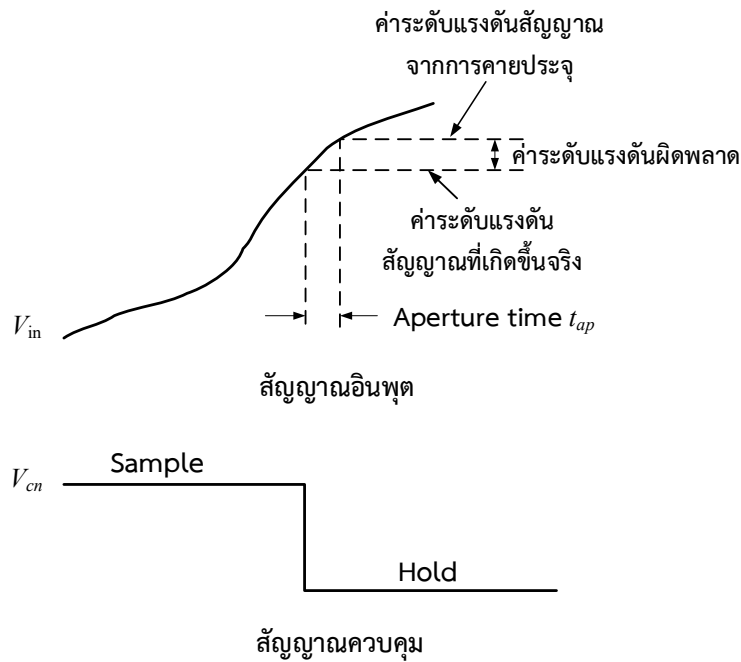
สำหรับการใช้งานของวงจรมุมและคงค่าสัญญาณในทางปฏิบัตินั้น จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวอุปกรณ์สำเร็จรูปที่ผลิตมาจากโรงงานที่นำมาใช้งาน (Muhammad, 2011) โดยการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ คือ ค่าแบนด์วิธของสัญญาณ (Signal bandwidth) ค่า aperture time  $t_{ap}$  ค่า acquisition time  $t_{aq}$  ค่า settling time  $t_s$  และค่าแรงดันที่ลดลงขณะที่ตัวเก็บประจุ  $C_1$  ทำการเก็บประจุระหว่างช่วงเวลาการคงค่าสัญญาณ สามารถอธิบายได้ดังนี้

ค่าแบนด์วิธของสัญญาณ เป็นการกำหนดค่าสัญญาณที่เริ่มต้นเมื่อสวิตช์  $S_1$  มีสถานะ “ปิด” และมีการป้อนสัญญาณอินพุตให้กับวงจรมุมและคงค่าสัญญาณ จนวงจรมุมเริ่มทำงานนั้นสามารถหาค่าแบนด์วิธของสัญญาณได้จาก

$$f_{-3dB} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} \tag{6.1}$$

ค่า aperture time  $t_{ap}$  แสดงดังรูปที่ 6.3 คือ ค่าเวลาสูงสุดที่วงจรมุมและคงค่าสัญญาณขณะสวิตช์  $S_1$  มีสถานะ “เปิด” เกิดจากช่วงเวลาการหน่วงขณะสวิตช์  $S_1$  ของวงจรมุมและคงค่าสัญญาณอย่างง่าย โดยรูปที่ 6.1 สวิตช์  $S_1$  ทำงานจากการควบคุมจากสัญญาณนาฬิกาหรือสัญญาณควบคุม ณ ช่วงเวลานี้ จะขึ้นอยู่กับประเภทของสวิตช์ภายในวงจรเองที่ถูกควบคุมจากภายนอก โดยทั่วไปจะใช้วงจรแอนะล็อกสวิตช์ ซึ่งมีค่าช่วงเวลาระหว่าง  $4 \mu\text{s}$  ถึง  $20 \mu\text{s}$  แต่ถ้าหากเลือกใช้

สวิตช์ ที่สร้างจากมอสเฟต ค่า aperture time  $t_{ap}$  จะมีค่าระหว่าง 50 nS ถึง 100 nS (Muhammad, 2011) ซึ่งค่า aperture time  $t_{ap}$  ควรมีค่าน้อยกว่าช่วงคาบเวลาการซักรตัวอย่าง (Sampling period) ทั้งนี้ เมื่อสัญญาณอินพุตมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง ค่าแรงดันที่ถูกคงค่าไว้จากการคายประจุของวงจรนั้น จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ อาจทำให้ค่าแรงดันที่ถูกคงค่าไว้เกิดความผิดพลาดได้ ดังรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.3 ค่า aperture time  $t_{ap}$  (ธน์สัถ์, 2565)

เมื่อพิจารณาวงจรสุ่มและคงค่าอย่างง่ายรูปที่ 6.1 สำหรับในกรณีที่สวิตช์  $S_1$  มีสถานะ “ปิด” ขณะการซักรตัวอย่างนั้น สวิตช์  $S_1$  จะมีเวลาที่จำกัด วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณต้องทำให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าที่ใกล้เคียงหรือเหมือนกับสัญญาณอินพุตมากที่สุด แต่ในทางปฏิบัตินั้น สัญญาณอินพุตจะมีการเปลี่ยนแปลงระหว่างช่วงเวลาการคงค่าสัญญาณไว้ แสดงดังรูปที่ 6.4 ช่วงเวลาดังกล่าวเรียกว่า ค่า acquisition time  $t_{aq}$  คือ ช่วงเวลาที่น้อยที่สุดหลังจากการสุ่ม โดยที่แรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับแรงดันอินพุต สามารถหาค่าได้จาก

$$V_{out} = V_{in} (1 - e^{-\frac{t}{R_1 C_1}}) \tag{6.2}$$

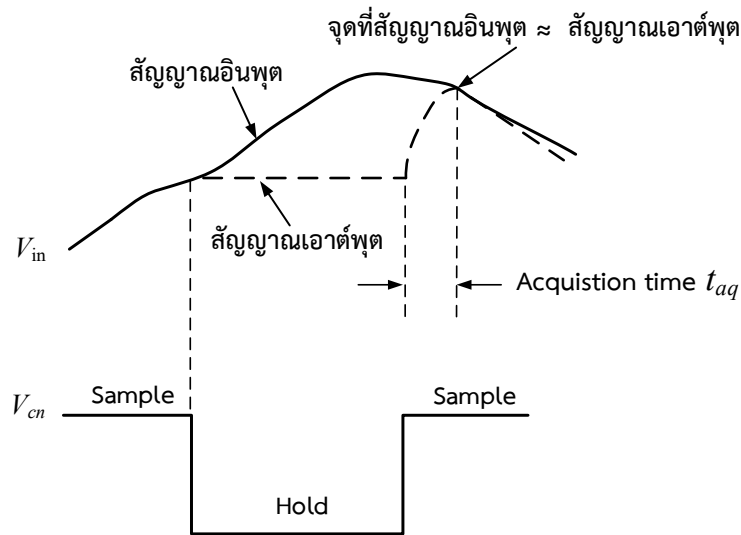
สำหรับค่า settling time  $t_s$  คือ ค่าช่วงเวลาการหน่วงที่เกิดขึ้นระหว่างที่สวิตช์  $S_1$  ทำการเปิด ณ ช่วงเวลาชั่วขณะเมื่อสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเปอร์เซ็นต์ที่เข้าใกล้สัญญาณอินพุตที่ป้อนเข้ามา

มากที่สุด โดยปกติมีค่าเท่ากับ 0.99 เเปอร์เซ็นต์ ของค่าเอาต์พุต ดังนั้น หากวงจรมุมและค่างสัญญาณถูกนำไปใช้งานในวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล การแปลงสัญญาณ จะไม่สามารถเกิดขึ้นจนกว่าสัญญาณจะทรงตัว ไม่อย่างนั้นแล้ว ค่าสัญญาณที่ได้จะมีการผิดพลาดเกิดขึ้น

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและค่าแรงดันที่เกิดขึ้นของวงจรมุมและค่างสัญญาณอย่างง่าย รูปที่ 6.1 ตัวเก็บประจุ  $C_1$  จะมีค่าการเปลี่ยนแปลงในขณะที่ทำการเก็บประจุระหว่างช่วงเวลาการค่างสัญญาณ สามารถหาค่าได้จาก

$$I = C_1 \frac{dv_o}{dt} \tag{6.3}$$

เมื่อ  $I$  คือค่ากระแสที่เกิดขึ้นขณะที่ตัวเก็บประจุ  $C_1$  ทำการเก็บประจุและคายประจุ ซึ่งอาจทำให้มีค่ากระแสรั่วไหลเกิดขึ้นเช่นกัน ดังนั้นค่ากระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นอาจส่งผลต่อค่ากระแสไบอัสของออปแอมป์ (Coughlin & Driscoll, 2001) (ในกรณีที่ว่าวงจรมุมและค่างสัญญาณใช้ออปแอมป์) หรือค่ากระแสรั่วไหลอาจเกิดจากขั้วสวิทซ์ทำงานก็ได้

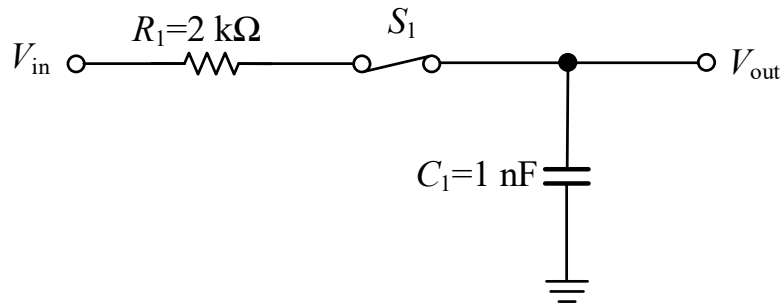


รูปที่ 6.4 ค่า acquisition time  $t_{aq}$  (ธน์สดี, 2565)



## ตัวอย่างที่ 6.1

จากวงจรในรูป จงหาค่าคงที่ทางเวลาอาร์ซี  $\tau$  และค่าแบนด์วิดท์ของสัญญาณ



(ธนัสถ์, 2565)

## วิธีทำ

ค่าคงที่ทางเวลาอาร์ซี หรือ  $\tau$  สามารถหาค่าได้จาก

$$\tau = R_1 C_1$$

$$\tau = 2 \text{ k}\Omega \times 1 \text{ nF}$$

$$\tau = 2 \text{ }\mu\text{s}$$

และค่าแบนด์วิดท์ของสัญญาณที่ได้ คือ

$$f_{-3dB} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1}$$

$$f_{-3dB} = \frac{1}{2\pi \times 2 \text{ }\mu\text{s}}$$

$$\therefore f_{-3dB} \approx 80 \text{ kHz}$$

**ตอบ** ค่าคงที่ทางเวลาอาร์ซี  $\tau$  มีค่าเท่ากับ  $2 \text{ }\mu\text{s}$  และค่าแบนด์วิดท์ของสัญญาณที่ได้ มีค่าประมาณเท่ากับ  $80 \text{ kHz}$

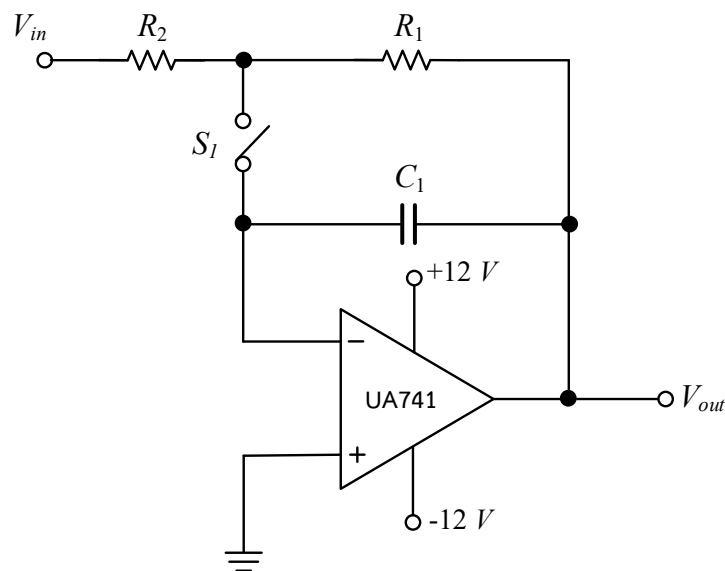
## 6.2 วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณโดยใช้ออปแอมป์

วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณโดยใช้ออปแอมป์ แสดงดังรูปที่ 6.5 ประกอบด้วย ออปแอมป์ ที่ต่อเป็นวงจรหาปริพันธ์ที่มีการป้อนกลับแบบลบ (Sergio, 2003) สวิตช์  $S_1$  และตัวต้านทาน  $R_2$  มีหลักการทำงานเบื้องต้น คือ เมื่อสวิตช์  $S_1$  อยู่ในสถานะ “ปิด” วงจรจะทำงานในรูปแบบของวงจร

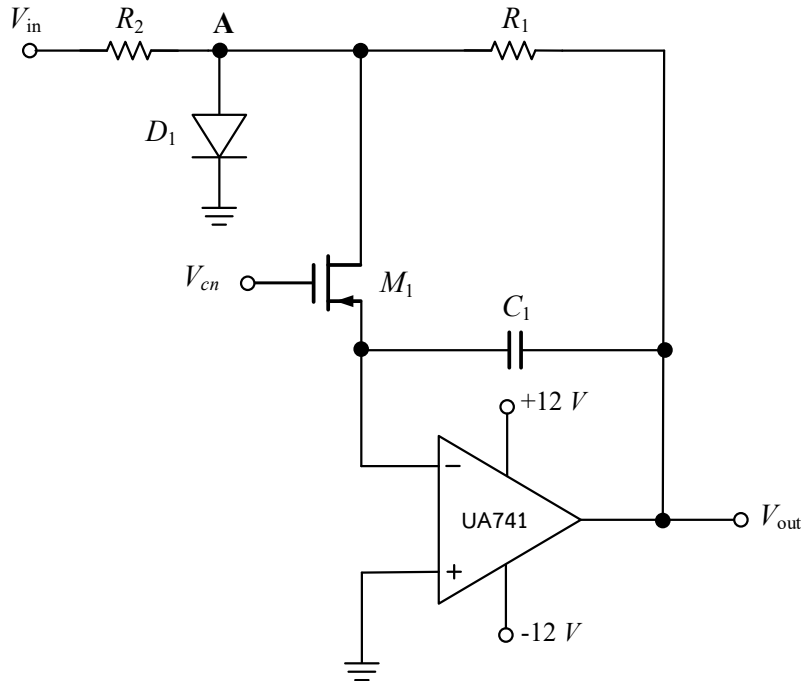
กรองความถี่อาร์ซี (RC filter) (James, 2021) และเมื่อมีแรงดันที่เป็นสัญญาณไซน์แอมป์ล็อก  $V_{in}$  ป้อนเข้ามา ค่าของแรงดันสัญญาณไซน์เอาต์พุต  $V_{out}$  สามารถหาค่าได้จาก

$$V_{out} = -V_{in} \frac{R_1}{R_2} (1 - e^{-t/R_1 C_1}) \tag{6.4}$$

ในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ ขณะที่วงจรมุมและคงค่าสัญญาณทำงาน จำเป็นจะต้องทำให้ค่าของแรงดันสัญญาณไซน์เอาต์พุต  $V_{out}$  มีค่าใกล้เคียงกับค่าแรงดันสัญญาณไซน์อินพุต  $V_{in}$  มากที่สุด ดังนั้นค่าคงที่ทางเวลาอาร์ซี  $\tau$  จะต้องมียาวกว่าค่าช่วงเวลาการมุม ซึ่งทำให้เอาต์พุตของวงจรมุมมีค่าเท่ากับค่าสัญญาณอินพุตเดิมได้ โดยไม่เกิดการผิดเพี้ยนของสัญญาณ เมื่อสวิตช์  $S_1$  อยู่ในสถานะ “เปิด” ตัวเก็บประจุ  $C_1$  จะทำการคายประจุที่มีค่าขนาดแรงดันเท่ากับ  $-V_{in}$  ออปแอมป์ จำเป็นจะต้องมีการป้องกันกระแสไบแอสเพียงเล็กน้อย เพื่อช่วยลดค่าแรงดันเอาต์พุตให้น้อยที่สุดให้กับตัวออปแอมป์ (Franco, 2009) ทำให้เอาต์พุตของวงจรมุมมีค่าเท่ากับค่าสัญญาณอินพุตเดิมได้ ดังนั้นการออกแบบสวิตช์  $S_1$  สำหรับการควบคุมการทำงานของวงจรมุมและคงค่าสัญญาณจากรูปที่ 6.5 นั้น จำเป็นต้องมีการประยุกต์ใช้งานสวิตช์  $S_1$  โดยการป้องกันแรงดันควบคุม  $V_{cn}$  ให้กับอุปกรณ์มอสเฟต  $M_1$  มาทำหน้าที่ในการควบคุมการ เปิด - ปิด ทดแทนการทำงานของสวิตช์  $S_1$  แสดงดังรูปที่ 6.6



รูปที่ 6.5 วงจรมุมและคงค่าสัญญาณโดยใช้ออปแอมป์ (ธันส์, 2565)



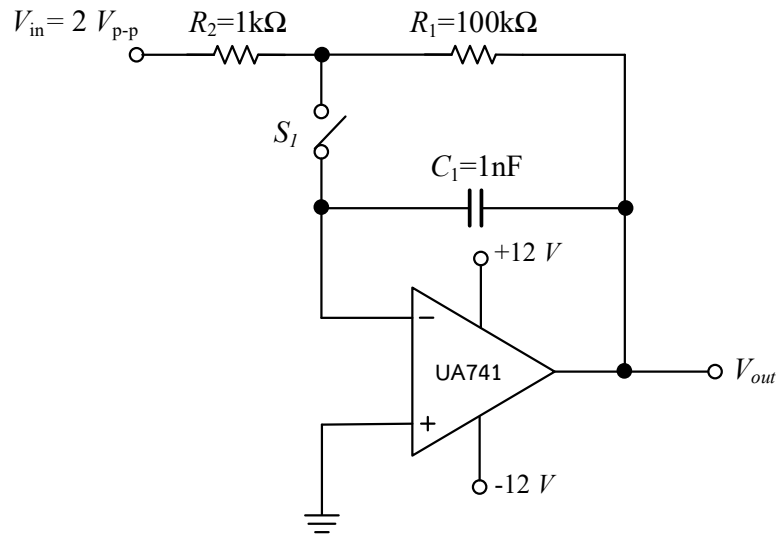
รูปที่ 6.6 วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณจากรูปที่ 6.5 โดยการประยุกต์ใช้สวิตช์ที่สร้างจากมอสเฟต (ธนัสถ์, 2565)

สำหรับการต่อใช้งานของมอสเฟต  $M_1$  ที่จะต้องทำหน้าที่เป็นสวิตช์นั้น โดยทั่วไปจะเลือกใช้ เป็นมอสเฟตชนิดพี (p-type MOSFET) (Richard, 2000) โดยในกรณีที่ค่าแรงดันควบคุม  $V_{cn}$  มีค่า อยู่ที่ระดับศูนย์โวลต์หรือค่าน้อยที่สุด มอสเฟต  $M_1$  จะทำงาน นั้นหมายถึง สถานะของมอสเฟต จะทำงานเป็นสวิตช์ อยู่ในสถานะ “ปิด” ตัวเก็บประจุ  $C_1$  จะทำหน้าที่เก็บประจุ ซึ่งอยู่ในสถานะ การสุ่มของสัญญาณของวงจรถนาค่าการเก็บประจุ  $C_1$  ถึงค่าระดับสูงสุดเท่ากับค่าแรงดันอินพุต  $V_{in}$  และสำหรับกรณีที่ค่าแรงดันควบคุม  $V_{cn}$  มีค่าอยู่ที่ระดับสูงสุด (ในที่นี้เท่ากับ +5 โวลต์) สถานะ ของสวิตช์ที่สร้างจากมอสเฟต  $M_1$  จะทำหยุดงาน (Richard, 2000) นั้นหมายถึง สวิตช์อยู่ในสถานะ “เปิด” หลังจากนั้นตัวเก็บประจุ  $C_1$  ก็จะมีการคายประจุ ซึ่งอยู่ในสถานะการคงค่าของสัญญาณของ วงจร

สำหรับไดโอด  $D_1$  จะทำหน้าที่ยกระดับค่าแรงดันที่จุดต่อร่วม A ให้มีค่าแรงดันอยู่ที่ระดับ 0.7 โวลต์ เมื่อมอสเฟต  $M_1$  ทำงาน นั้นหมายถึง สถานะของสวิตช์ อยู่ในสถานะ “ปิด” ไดโอด  $D_1$  จะส่งผลโดยตรงต่อวงจรถ ทำให้มีค่าแรงดันระหว่างขาเดรนและขาซอร์สของมอสเฟต  $M_1$  มีค่า อยู่ที่ระดับแรงดัน 0.7 โวลต์ และเมื่อแรงดันตกคร่อมผ่าน มอสเฟต  $M_1$  มีค่าลดลง ค่าแรงดัน ตกคร่อมไดโอดจะมีค่าน้อยลงตามไปด้วย ซึ่งอาจต่ำกว่าค่าระดับแรงดัน 0.7 โวลต์ โดยจะไม่ส่งผล กับค่าระดับแรงดันในขณะช่วงเวลากการสุ่มค่าของวงจรถ

**ตัวอย่างที่ 6.2**

จากรูป จงหาค่าแรงดันเอาต์พุต  $V_{out}$  เมื่อกำหนดให้  $t = 1 \mu s$



(ธนัสถ์, 2565)

**วิธีทำ** จากรูปเป็นวงจรวจรสุ่มและคงค่าสัญญาณโดยใช้โอปแอมป์ สามารถหาค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจร  $V_{out}$  ได้ จากสมการที่ (6.4) จะเห็นได้หาค่าแรงดันอินพุต  $V_{in} = 2 V$  ค่าตัวต้านทาน  $R_1 = 100 k\Omega$ ,  $R_2 = 1 k\Omega$  และค่าตัวเก็บประจุ  $C_1 = 1 nF$  ดังนั้น ค่าเอาต์พุตของวงจร  $V_{out}$  คือ

$$V_{out} = -V_{in} \frac{R_1}{R_2} (1 - e^{-t/R_1 C_1})$$

$$V_{out} = -(2 V) \frac{100 k\Omega}{1 k\Omega} (1 - e^{-1 \mu s / (100 k\Omega \times 1 nF)})$$

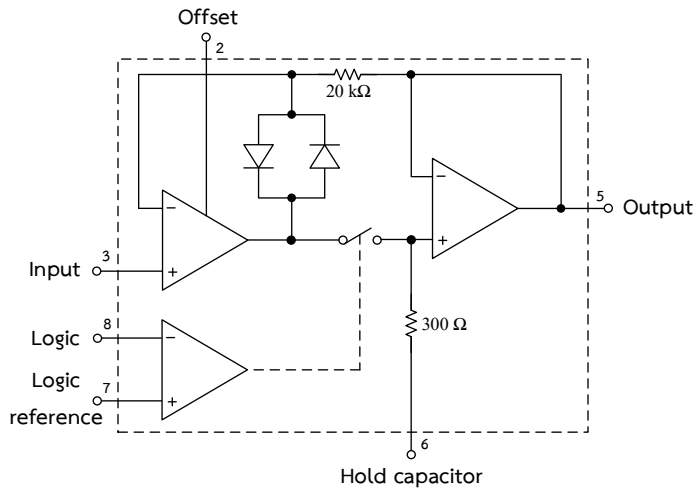
$$\therefore V_{out} \cong 1.99 V$$

**ตอบ** ค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจร  $V_{out}$  มีค่าประมาณเท่ากับ  $1.99 V$

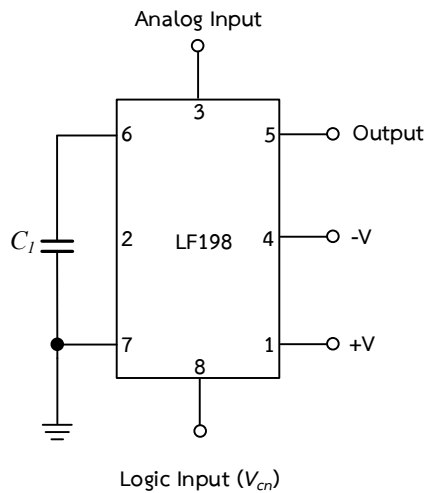
**6.3 วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณโดยใช้ไอซีเบอร์ LF198 และ OPA615**

จากหัวข้อที่ 6.1 และหัวข้อที่ 6.2 ได้แสดงให้เห็นถึงวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณอย่างง่าย และการประยุกต์ใช้งานโอปแอมป์ที่ต่อใช้งานเป็นวงจรหาปริพันธ์ ต่อร่วมกับอุปกรณ์แพสซีฟ และสวิตซ์ที่สามารถนำมาสเฟตมาต่อประยุกต์ใช้งานได้เพื่อช่วยลดค่าแรงดันเอาต์พุตให้น้อยที่สุดให้กับตัวโอปแอมป์ (Johns & Martin, 1996) สำหรับเป็นวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ ตามลำดับ

สำหรับหัวข้อนี้ จะกล่าวถึงวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณอีกรูปแบบหนึ่ง โดยการใช้ไอซีสำเร็จรูปเบอร์ LF198 ที่มีโครงสร้างภายในแสดงดังรูปที่ 6.7



รูปที่ 6.7 โครงสร้างภายในไอซีเบอร์ LF198 (ธันส์ถ์, 2565)



รูปที่ 6.8 วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณโดยใช้ไอซีเบอร์ LF198 (ธันส์ถ์, 2565)

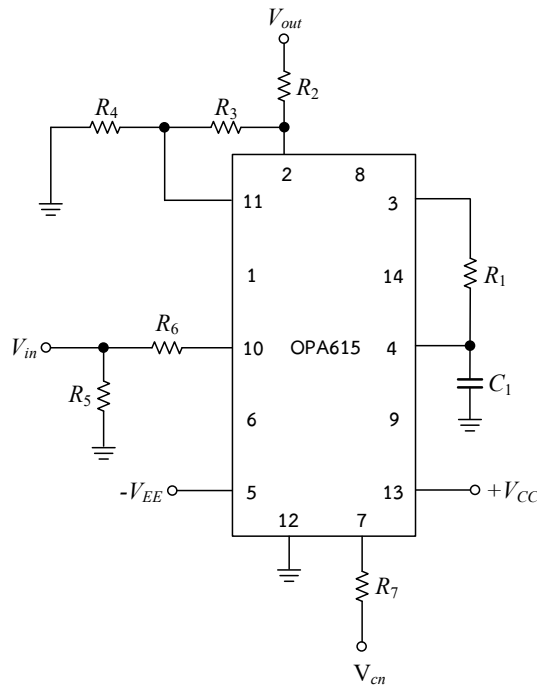
โครงสร้างภายในไอซีเบอร์ LF198 จากรูปที่ 6.7 ประกอบด้วย ออปแอมป์ จำนวน 3 ตัว ตัวต้านทาน จำนวน 2 ตัว สวิตช์ จำนวน 1 ตัว และไดโอด จำนวน 2 ตัว (Texas Instruments, 2021) สำหรับการประยุกต์ใช้งานไอซีเบอร์ LF198 เพื่อสร้างเป็นวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณนั้น แสดงดังรูปที่ 6.8 จะเห็นได้ว่า วงจรภายในยังไม่มี การต่อตัวเก็บประจุไว้ในวงจร เนื่องจากการออกแบบวงจรภายในต้องการให้มีการเลือกใช้ค่าจากตัวเก็บประจุที่แตกต่างกัน เพื่อต่อการใช้งานกับไอซีเบอร์ LF198 ภายนอกได้ ทำให้ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้ของวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ มีค่าเปลี่ยนแปลงตามค่าตัวเก็บประจุ ดังนั้นจากวงจรในรูปที่ 6.8 ตัวเก็บประจุ  $C_1$  จะถูกต่อภายนอก

ไอซีเบอร์ LF198 โดยการป้อนแรงดันควบคุม  $V_{cn}$  เพื่อควบคุมให้สถานะของสวิทช์จากวงจรมุมใน ไอซีเบอร์ LF198 ในรูปที่ 6.7 มีสถานะ เปิด - ปิด ทำให้ตัวเก็บประจุ  $C_1$  ทำหน้าที่เก็บประจุ และคายประจุ ในขณะวงจรมุมอยู่ในสถานะมุมและคงค่าสัญญาณตามสถานะการทำงานจากแรงดัน ควบคุม  $V_{cn}$  ดังได้กล่าวไว้แล้วสำหรับหลักการการทำงานเบื้องต้นของวงจรมุมและคงค่าสัญญาณ ในหัวข้อที่ 6.1 ดังนั้นจากวงจรมุมในรูปที่ 6.8 สามารถหาค่าแรงดันของสัญญาณเอาต์พุต  $V_{out}$  ได้จาก

$$V_{out} = V_{in} (1 - e^{-t/300C_1}) \tag{6.5}$$

จากสมการที่ (6.5) ค่าแรงดันของสัญญาณเอาต์พุต  $V_{out}$  ที่ได้นั้น จะเห็นได้ว่าค่าคงที่ทาง เวลาอาร์ซี  $\tau$  สามารถปรับค่าได้จากการเลือกใช้ค่าตัวเก็บประจุ  $C_1$  เพียงตัวเดียวเท่านั้น ไม่สามารถ ปรับเปลี่ยนค่าตัวต้านทานได้ เนื่องจากตัวต้านทานที่ใช้ถูกกำหนดให้อยู่ภายในตัวไอซีเบอร์ LF198 มีค่าคงที่เท่ากับ  $300 \Omega$  ทำให้การปรับค่าคงที่ทางเวลาอาร์ซี  $\tau$  มีขีดจำกัด ทั้งนี้วงจรมุม และคงค่าสัญญาณ ยังสามารถใช้ไอซีเบอร์ OPA615 ต่อร่วมกับอุปกรณ์แพสซีฟ (Texas Instruments, 2021) แสดงดังรูปที่ 6.9 สามารถหาค่าแรงดันของสัญญาณเอาต์พุต  $V_{out}$  ได้จาก

$$V_{out} = V_{in} (1 - e^{-t/R_1C_1}) \tag{6.6}$$

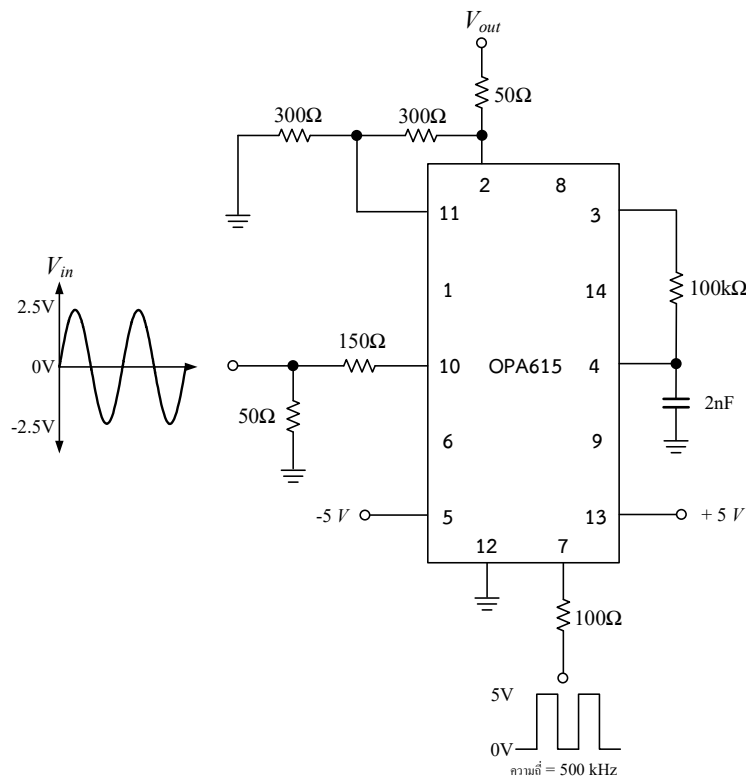


รูปที่ 6.9 วงจรมุมและคงค่าสัญญาณโดยใช้ไอซีเบอร์ OPA615 (ธันส์, 2565)

จะเห็นได้จากสมการที่ (6.6) และจากวงจรในรูปที่ 6.9 ตัวต้านทาน  $R_1$  และตัวเก็บประจุ  $C_1$  จะถูกต่อภายนอกไอซีเบอร์ OPA615 ทำให้วงจรสามารถทำการปรับค่าคงที่ทางเวลาอาร์ซี  $\tau$  ได้จากการต่อวงจรภายนอกไอซีเบอร์ OPA615 ซึ่งก็คือ การปรับเปลี่ยนค่าตัวต้านทาน  $R_1$  และตัวเก็บประจุ  $C_1$  อย่างไรก็ตาม วงจรจะสามารถทำงานเป็นวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณได้ จำเป็นต้องมีการป้อนแรงดันสัญญาณไซน์อินพุต  $V_{in}$  สำหรับเป็นแรงดันอินพุตให้กับไอซีเบอร์ OPA615 และป้อนแรงดันควบคุม  $V_{cn}$  เพื่อควบคุมให้สถานะของสวิตช์ เปิด - ปิด ที่สอดคล้องกับเวลาในการทำงานของค่าคงที่ทางเวลาอาร์ซี  $\tau$  ที่เกิดจากตัวต้านทาน  $R_1$  และตัวเก็บประจุ  $C_1$  ภายนอกไอซีเบอร์ OPA615

**ตัวอย่างที่ 6.3**

จากวงจรในรูป จงหาค่าแรงดันเอาต์พุต  $V_{out}$



(ธนัสถ์, 2565)

**วิธีทำ** จากรูปเป็นวงจรวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณโดยใช้ไอซีเบอร์ OPA615 สามารถหาค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจร  $V_{out}$  ได้จาก สมการที่ (6.6) คือ

$$V_{out} = V_{in} (1 - e^{-t/R_1 C_1})$$

โดยค่าแรงดันอินพุต  $V_{in} = 2.5 \text{ V}$  ค่าแรงดันควบคุม  $V_{cn} = 2 \text{ } \mu\text{s}$  ค่าตัวต้านทาน  $R_1 = 100 \text{ k}\Omega$  และค่าตัวเก็บประจุ  $C_1 = 2 \text{ nF}$  ดังนั้น ค่าเอาต์พุตของวงจรถูก  $V_{out}$  สามารถหาค่าได้ คือ

$$V_{out} = (2.5 \text{ V}) \left( 1 - e^{-2\mu\text{s}/(100 \text{ k}\Omega \times 2 \text{ nF})} \right)$$

$$\therefore V_{out} \cong 2.53 \text{ V}$$

**ตอบ** ค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรถูก  $V_{out}$  มีค่าประมาณเท่ากับ  $2.53 \text{ V}$

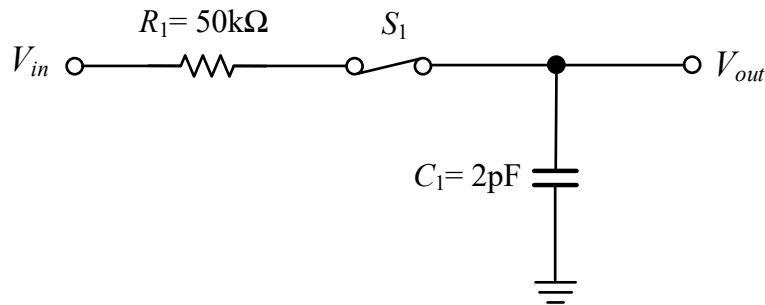
## 6.4 สรุป

วงจรมุมและคงค่าสัญญาณ เป็นวงจรถูกที่สามารถทำการมุมค่าของสัญญาณแอนะล็อกจากการทำงานของสวิตช์ที่สามารถควบคุมการทำงานจากภายนอกได้ และทำการคงค่าสัญญาณที่เกิดจากตัวเก็บประจุ เพื่อให้ได้ค่าระดับสัญญาณที่ต้องการ วงจรมุมและคงค่าสัญญาณอย่างง่ายประกอบด้วย แหล่งจ่ายแรงดันสำหรับป้อนสัญญาณอินพุตที่เป็นสัญญาณแอนะล็อก สวิตช์ซึ่งถูกควบคุมการทำงานให้มีสถานะ เปิด - ปิด จากสัญญาณนาฬิกาหรือจากสัญญาณควบคุม สำหรับการควบคุมช่วงการมุมและคงค่าของสัญญาณ ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุทำหน้าที่การคงค่าสัญญาณจากการเก็บประจุและคายประจุร่วมกับตัวต้านทาน หรือที่เรียกว่า *ค่าคงที่ทางเวลา* เป็นอีกหนึ่งวงจรถูกที่สำคัญสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานซึ่งเป็นวงจรถูกส่วนแรกของวงจรถูกแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล อีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานสำหรับระบบประมวลผลสัญญาณ (Nonthaputha et al., 2020) ที่ต้องการคงค่าสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและแม่นยำไว้ในช่วงเวลาหนึ่ง ที่เพียงพอที่จะสามารถทำให้ระบบประมวลผลสัญญาณได้ ทั้งนี้สวิตช์ซึ่งถูกควบคุมการทำงาน เปิด - ปิด จากสัญญาณนาฬิกาหรือจากสัญญาณควบคุมของวงจรมุมและคงค่าสัญญาณ สามารถสร้างได้จากวงจรถูกแอนะล็อกสวิตช์ (Premont et al., 1998) ทั้งนี้วงจรมุมและคงค่าสัญญาณสามารถสร้างได้จากวงจรถูกรวมซีมอสจากลักษณะการทำงานและการประยุกต์ใช้งานของวงจรถูกแอนะล็อกสวิตช์ เป็นวงจรมุมและคงค่าสัญญาณที่มีความแม่นยำเที่ยงตรงสูง และมีอัตราการบริโภคพลังงานต่ำ (Nonthaputha et al., 2016; Kumngern et al., 2018) ดังนั้นในบทถัดไป จะกล่าวถึงการทำงานของวงจรถูกแอนะล็อกสวิตช์ และการประยุกต์ใช้งานวงจรถูกแอนะล็อกสวิตช์ สำหรับวงจรถูกขยายสัญญาณแบบกลับเฟส วงจรถูกขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส วงจรถูกรวมสัญญาณแบบไม่กลับเฟส และวงจรถูกแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก



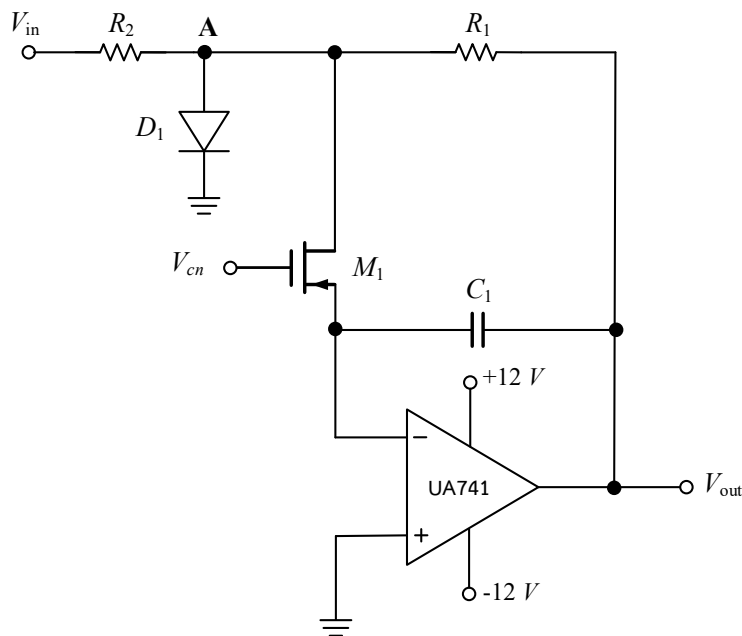
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 6

1. วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณอย่างง่าย ประกอบด้วยอะไรบ้างและมีหลักการทำงานเบื้องต้นอย่างไร จงอธิบาย
2. ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ มีอะไรบ้าง จงอธิบายมาพอสังเขป
3. จากวงจรในรูป จงคำนวณค่าคงที่ทางเวลาอาร์ซี  $\tau$



(ธน์สัถ์, 2565)

4. จากข้อที่ 3 จงหาค่าแบนด์วิดท์ของสัญญาณ
5. จงอธิบายการทำงานของวงจรถังรูป



(ธน์สัถ์, 2565)

6. ค่าคงที่ทางเวลาอาร์ซี  $\tau$  ที่มีค่าเยอะมาก จะส่งผลอย่างไร กับวงจรวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ

7. จงออกแบบวงจรร่วมและคงค่าสัญญาณโดยใช้โอปแอมป์ เมื่อกำหนดให้ค่าคงที่ทางเวลาอาร์ซี  $\tau$  มีค่าเท่ากับ  $4 \mu\text{s}$
8. จงออกแบบวงจรร่วมและคงค่าสัญญาณที่มีการใช้สวิตช์ที่สร้างจากมอสเฟต มา 2 วงจร
9. วงจรร่วมและคงค่าสัญญาณโดยใช้ไอซีเบอร์ LF198 มีขีดจำกัดอะไรบ้าง จงอธิบาย
10. จงออกแบบวงจรร่วมและคงค่าสัญญาณโดยใช้ไอซีเบอร์ OPA615 เมื่อกำหนดให้ค่าแรงดันเอาต์พุต  $V_{out} = 5 V$  ค่าแรงดันควบคุม  $V_{cm} = 1 \mu\text{s}$

### บรรณานุกรม

- Coughlin, R. F., & Driscoll F. F. (2001). *Operational amplifiers and linear integrated circuits*. Prentice-Hill.
- Franco, S. (2009). *Design with operational amplifiers and analog integrated circuits* (3rd ed.). McGraw-Hill.
- James, M. F. (2021). *Operational amplifiers & linear integrated circuits: Theory and application* (3rd ed.). Creative Commons.
- Johns, D., & Martin, K. (1996). *Analog integrated circuit design*. John Wiley & Sons.
- Kumngern, M., Nonthaputha, T., & Khateb, F. (2018). Low power sample and hold circuits using current conveyor analogue switches. *IET Circuits, Devices & Systems*, 12, 397 - 402.
- Muhammad, H. R. (2011). *Microelectronic circuits: Analysis and design* (2nd ed.). Cengage Learning.
- Nonthaputha, T., Kumngern, M., & Lerkvaranyu, S. (2016). CMOS sample-and-hold circuit using current conveyor analogue switch. *IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems*. (pp. 1 - 4)
- Nonthaputha, T., Kumngern, M., & Thepnarin, N. (2020). A simple and accurate CMOS sample-and-hold circuit using dual output-OTA. *Przeglad Elektrotechniczny*, 10, 163 - 166.
- Premont, C., Abouchi, N., Grisel, R. & Chante, J. P. (1998). A current conveyor-based high-frequency analog switch. *IEEE Transactions on Circuits and Systems-I*, 45, 298-300.

- Razavi, B. (1997). Design of sample-and-hold amplifiers for high-speed low voltage A/D converters. *IEEE Custom Integrated Circuits Conference*. (pp. 59 – 66).
- Richard, C. J. (2000). *Microelectronic circuit design* (4th ed.). McGraw-Hill.
- Rudy, V. D. P. (2003). *CMOS Integrated analog-to-digital and digital-to-analog converters* (2th ed.). Kluwer Academic Publishers.
- Sergio, F. (2003). *Design with operational amplifiers and analog integrated circuits*. McGraw Hill Higher Education.
- Texas Instruments. (2021). LF198 -N, LF298, LF398-N, LF198A-N, LF398A-N data sheet. <https://www.ti.com>
- Texas Instruments. (2021). OPA615 data sheet. <https://www.ti.com>

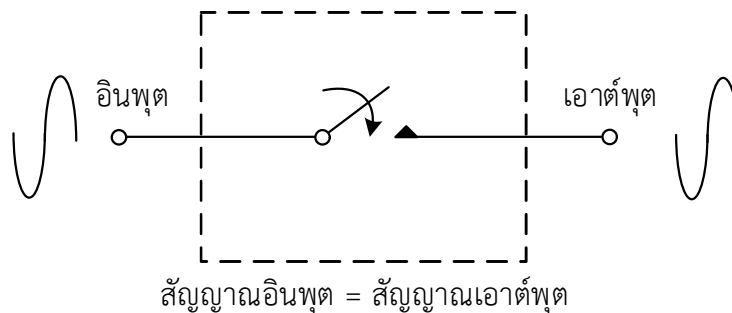
## บทที่ 7

### วงจรแอนะล็อกสวิตช์

สำหรับบทที่ 6 ได้กล่าวถึง วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ ซึ่งเป็นวงจรส่วนแรกของวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล โดยวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ มีความจำเป็นต่ออาศัยช่วงเวลาการทำงาน เปิด - ปิด ของสวิตช์ ที่เกิดจากการควบคุมให้สามารถทำงานได้จากสัญญาณดิจิทัลหรือสัญญาณแอนะล็อกไปแล้วนั้น เมื่อพิจารณาถึงการใช้งานของวงจรที่ใช้สัญญาณดิจิทัลหรือสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณควบคุมสำหรับการ เปิด - ปิด การทำงานให้กับวงจรไฟฟ้าหรือวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เหมือนลักษณะการทำงานของสวิตช์ โดยที่ขนาดของสัญญาณทางด้านอินพุตจะต้องมีค่าเท่ากับขนาดของสัญญาณทางด้านเอาต์พุต เรียกวงจรนี้ว่า “วงจรแอนะล็อกสวิตช์ (Analog switch)”

#### 7.1 พื้นฐานการทำงานของวงจรแอนะล็อกสวิตช์

จากรูปที่ 7.1 แสดงให้เห็นถึงลักษณะการทำงานของวงจรแอนะล็อกสวิตช์อย่างง่าย ประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลัก คือ สัญญาณอินพุต สวิตช์ และสัญญาณเอาต์พุต การทำงานของสวิตช์ในวงจรสามารถควบคุมได้ด้วยสัญญาณดิจิทัลหรือแอนะล็อก แต่โดยส่วนใหญ่แล้วจะใช้สัญญาณดิจิทัลสำหรับการควบคุมการทำงานของสวิตช์ให้มีสถานะ เปิด - ปิด การทำงาน โดยสวิตช์ที่ถูกควบคุมได้นั้น จะใช้เป็นตัวควบคุมว่าให้มีหรือไม่มีสัญญาณเอาต์พุต สำหรับในกรณีที่มีสัญญาณเอาต์พุตนั้น ค่าของสัญญาณเอาต์พุตจะต้องมีค่าเท่ากับสัญญาณอินพุต ซึ่งการทำงานของสวิตช์จะต้องไม่ส่งผลใด ๆ เลยต่อสัญญาณเอาต์พุต



รูปที่ 7.1 การทำงานของวงจรแอนะล็อกสวิตช์อย่างง่าย (ธน์สถ์, 2565)

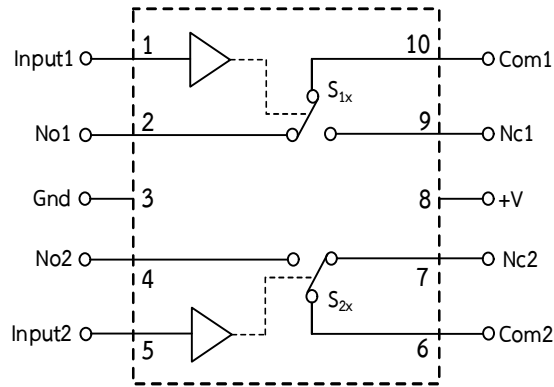
วงจรแอนะล็อกสวิตช์ สามารถสร้างได้จากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หลายชนิด (Horn, 1990) เช่น ทรานซิสเตอร์ เอสซีอาร์ (Silicon controlled rectifier: SCR) เฟต (Field-effect transistor: FET) มอสเฟต หรือซีมอส เป็นต้น และได้มีการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย เช่น วงจรสำหรับ

เครื่องมือวัด วงจรทางด้านระบบสื่อสาร (Moore, 1991) วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณโดยใช้วงจรรวมแอนะล็อกสวิตช์สายพานกระแส (Kumngern et al., 2018) วงจรกำเนิดรูปคลื่นสัญญาณต่าง ๆ โดยใช้วงจรรวมความนำถ่ายโอนสายพานกระแสที่ควบคุมด้วยกระแสและวงจรรวมแอนะล็อกสวิตช์ (Kumngern et al., 2019) วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นโดยใช้วงจรรวมแอนะล็อกสวิตช์สายพานกระแส (Nonthaputha & Kumngern, 2019) วงจรระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์โปรแกรมได้บนพื้นฐานของวงจรรวมแอนะล็อกสวิตช์สายพานกระแส (Nonthaputha & Kumngern, 2021) และวงจรรวมแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อกโดยใช้วงจรรวมแอนะล็อกสวิตช์สายพานกระแส (Nonthaputha et al., 2016) นอกเหนือจากนั้น วงจรรวมแอนะล็อกสวิตช์ยังสามารถนำไปใช้งานแทนอุปกรณ์ประเภทรีเลย์ สวิตช์สองทางสำหรับวงจรรอง่ายได้ เป็นต้น และเมื่อพิจารณาวงจรรวมแอนะล็อกสวิตช์ที่มีการนำไปสร้างเป็นวงจรรวม โดยทั่วไปที่มีขายอยู่ในท้องตลาดนั้น สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวางมากมาย ทั้งในวงจรดิจิทัลและวงจรรวมแอนะล็อก (On Semiconductor, 2000) ยกตัวอย่างเช่น ไอซีเบอร์ TS12A12511/TS12A451X/TS12A4451X ของบริษัท Texas Instruments (TI) (Texas Instruments, 2021) ไอซีเบอร์ NX3L4051 ของบริษัท NXP Semiconductor (NXP Semiconductor, 2021) ไอซีเบอร์ ADG508F/ADG509F ของบริษัท Analog Device (Analog Devices, 2021) ไอซีเบอร์ MAX4541/MAX4544 ของบริษัท MAXIM Integrated (Maxim integrated, 2021) และ AS11P2TLR/ AS11P2TLR ของบริษัท ST Microelectronics (ST Microelectronics, 2021) เป็นต้น ทั้งนี้ สำหรับการนำวงจรรวมแอนะล็อกสวิตช์ไปใช้งานนั้น ต้องคำนึงถึงค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญที่เกี่ยวข้อง (Horn, 1990) ดังนี้

- 1) ค่าความต้านทานภายในของวงจรรวมในขณะสวิตช์ของวงจรมีสถานะ “ปิด” ซึ่งโดยปกติทั่วไปจะมีค่าความต้านทานน้อยมาก ๆ ประมาณตั้งแต่  $1 \Omega$  แต่ไม่เกิน  $500 \Omega$
- 2) ค่าความต้านทานภายในของวงจรรวมในขณะสวิตช์ของวงจรมีสถานะ “เปิด” ซึ่งโดยปกติทั่วไปจะมีค่าความต้านทานสูงมาก ๆ ประมาณตั้งแต่  $1 M\Omega$  ไปจนถึง  $1 G\Omega$
- 3) ช่วงค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดและสูงสุดของวงจรรวมแอนะล็อกสวิตช์ที่นำไปใช้งาน หากเกินไปจากค่าช่วงที่กำหนดนี้ วงจรสวิตช์ภายในอาจถูกทำลายได้เนื่องจากค่าแรงดันสูงเกินไป ทำให้เกิดค่ากระแสรั่วไหล (Leakage current) ผ่านสวิตช์มากเกินไปด้วย
- 4) ค่าผลกระทบที่เกิดขึ้นในกรณีที่สวิตช์ของวงจรมีสถานะ “ปิด” ที่อาจทำให้สัญญาณเกิดการผิดเพี้ยนไป (Spike) หรือทำให้สัญญาณเกิดการผิดพลาด (Glitch) ที่อาจเกิดขึ้นได้

เนื่องจากวงจรรวมแอนะล็อกสวิตช์สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายโดยอาศัยหลักการทำงานดังรูปที่ 7.1 และหากพิจารณาถึงวงจรรวมสุ่มและคงค่าสัญญาณซึ่งได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 6 นั้น จะมีการใช้งานของสวิตช์ซึ่งถูกควบคุมการทำงาน เปิด - ปิด จากสัญญาณนาฬิกาหรือจากสัญญาณควบคุม สำหรับการควบคุมช่วงการสุ่มและคงค่าของสัญญาณ ดังรูปที่ 6.1 และรูปที่ 6.5 ลักษณะการทำงานของสวิตช์ดังกล่าวนี้ คือ วงจรรวมแอนะล็อกสวิตช์ นั้นเอง ดังนั้น จะเห็นได้ว่าวงจรรวมส่วนใหญ่โดยทั่วไปที่มีลักษณะการใช้งาน เปิด - ปิด ของสวิตช์ เพื่อให้ได้เอาต์พุตของวงจรรวมในรูปแบบต่าง ๆ จะอาศัยวงจรรวมแอนะล็อกสวิตช์ในการนำมาประยุกต์ใช้งานในรูปแบบต่าง ๆ ในลักษณะใดลักษณะหนึ่ง

ดังนั้น ในหัวข้อถัดไปจะกล่าวถึงการประยุกต์ใช้งานวงจรรวมแอนะล็อกสวิตช์โดยใช้วงจรรวมไอซีสำเร็จรูปผลิตโดย บริษัท Texas Instruments เบอร์ TS5A23157 หรือ TS5A23159 (Texas Instruments, 2021) นำมาใช้งานเป็นอุปกรณ์หลัก สำหรับวงจรรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส วงจรรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส วงจรรวมสัญญาณแบบไม่กลับเฟส และวงจรรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก ทั้งนี้ไอซีสำเร็จรูปเบอร์ TS5A23157 หรือ TS5A23159 มีคุณสมบัติแบบ single-pole double-throw (SPDT) และมีโครงสร้างภายในแสดงดังรูปที่ 7.2



รูปที่ 7.2 โครงสร้างภายในไอซีเบอร์ TS5A23157 หรือ TS5A23159 ที่มีคุณสมบัติแบบ SPDT (ธันส์ถ์, 2565)

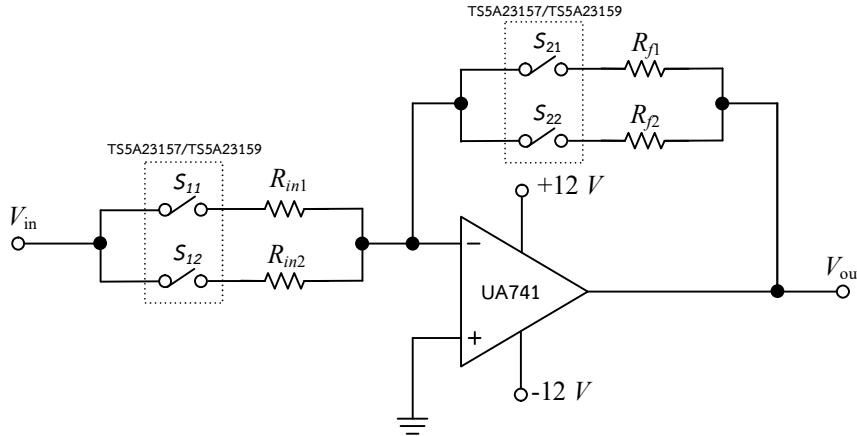
## 7.2 วงจรรวมแอนะล็อกสวิตช์สำหรับวงจรรขยายสัญญาณ

วงจรรวมแอนะล็อกสวิตช์สามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับวงจรรขยายสัญญาณโดยใช้การต่อการทำงานร่วมกับออปแอมป์เป็นอุปกรณ์หลักได้ คือ วงจรรวมแอนะล็อกสวิตช์สำหรับวงจรรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส (Inverting amplifier) และแบบไม่กลับเฟส (Non-inverting amplifier) สำหรับวงจรรวมแอนะล็อกสวิตช์สามารถเลือกใช้ไอซีเบอร์ TS5A23157 หรือ TS5A23159 ที่มีคุณสมบัติแบบ SPDT และมีโครงสร้างภายในแสดงดังรูปที่ 7.2 นำมาต่อประยุกต์ใช้งานโดยแสดงให้เห็นการทำงานของวงจรรวมแอนะล็อกสวิตช์ให้สวิตช์มีสถานะการทำงาน “ปิด” และ “เปิด” จากสัญญาณควบคุมหรือสัญญาณนาฬิกา

### 7.2.1 วงจรรวมแอนะล็อกสวิตช์สำหรับวงจรรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส

วงจรรวมแอนะล็อกสวิตช์สำหรับวงจรรขยายสัญญาณแบบกลับเฟสแสดงดังรูปที่ 7.3 เป็นการประยุกต์ใช้งานไอซีเบอร์ TS5A23157 หรือ TS5A23159 ต่อร่วมกับวงจรรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส (James, 2021) โดยใช้ออปแอมป์ UA741 ต่อร่วมกับตัวต้านทาน สวิตช์แต่ละตัวของไอซีเบอร์ TS5A23157 หรือ TS5A23159 ซึ่งประกอบด้วยสวิตช์  $S_{11}$  สวิตช์  $S_{12}$  สวิตช์  $S_{21}$  และสวิตช์  $S_{22}$  จะถูกควบคุมการทำงานให้มีสถานะการทำงานของสวิตช์ “ปิด” และ “เปิด” จากสัญญาณ

ควบคุมหรือสัญญาณนาฬิกา และเมื่อสวิตช์แต่ละตัวทำงานหรือไม่ทำงาน จากการควบคุมสัญญาณจากภายนอกนั้น วงจรสามารถทำงานเป็นวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟสได้ โดยการควบคุมการทำงานจากวงจรวจรแอนะล็อกสวิตช์



รูปที่ 7.3 วงจรแอนะล็อกสวิตช์สำหรับวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส (ธน์สัถ์, 2565)

ดังนั้นโดยอาศัยการหาค่าจากโหนดวงจรไฟฟ้า วงจรแอนะล็อกสวิตช์สำหรับวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟสในรูปที่ 7.3 สามารถหาค่าแรงดันเอาต์พุต ( $V_{out}$ ) และอัตราขยายของวงจร ( $Gain$ ) ได้ดังนี้

ในกรณีที่สวิตช์  $S_{11}$  และสวิตช์  $S_{21}$  มีสถานะ “ปิด” แต่สวิตช์  $S_{12}$  และสวิตช์  $S_{22}$  มีสถานะ “เปิด” สามารถหาค่าแรงดันเอาต์พุตและอัตราขยายของวงจรได้จาก สมการที่ (7.1) และ (7.2) ตามลำดับ

$$V_{out} = -V_{in} \left( \frac{R_{f1}}{R_{in1}} \right) \tag{7.1}$$

$$Gain = - \left( \frac{V_{out}}{V_{in}} \right) = - \left( \frac{R_{f1}}{R_{in1}} \right) \tag{7.2}$$

ในกรณีที่สวิตช์  $S_{11}$  และสวิตช์  $S_{22}$  มีสถานะ “ปิด” แต่สวิตช์  $S_{12}$  และสวิตช์  $S_{21}$  มีสถานะ “เปิด” สามารถหาค่าแรงดันเอาต์พุตและอัตราขยายของวงจรได้จาก สมการที่ (7.3) และ (7.4) ตามลำดับ

$$V_{out} = -V_{in} \left( \frac{R_{f2}}{R_{in1}} \right) \tag{7.3}$$

$$Gain = -\left(\frac{V_{out}}{V_{in}}\right) = -\left(\frac{R_{f2}}{R_{in1}}\right) \quad (7.4)$$

ในกรณีที่สวิตช์  $S_{12}$  และสวิตช์  $S_{21}$  มีสถานะ “ปิด” แต่สวิตช์  $S_{11}$  และสวิตช์  $S_{22}$  มีสถานะ “เปิด” สามารถหาค่าแรงดันเอาต์พุตและอัตราขยายของวงจรได้จาก สมการที่ (7.5) และ (7.6) ตามลำดับ

$$V_{out} = -V_{in} \left(\frac{R_{f1}}{R_{in2}}\right) \quad (7.5)$$

$$Gain = -\left(\frac{V_{out}}{V_{in}}\right) = -\left(\frac{R_{f1}}{R_{in2}}\right) \quad (7.6)$$

ในกรณีที่สวิตช์  $S_{12}$  และสวิตช์  $S_{22}$  มีสถานะ “ปิด” แต่สวิตช์  $S_{11}$  และสวิตช์  $S_{21}$  มีสถานะ “เปิด” สามารถหาค่าแรงดันเอาต์พุตและอัตราขยายของวงจรได้จาก สมการที่ (7.7) และ (7.8) ตามลำดับ

$$V_{out} = -V_{in} \left(\frac{R_{f2}}{R_{in2}}\right) \quad (7.7)$$

$$Gain = -\left(\frac{V_{out}}{V_{in}}\right) = -\left(\frac{R_{f2}}{R_{in2}}\right) \quad (7.8)$$

ในกรณีที่สวิตช์  $S_{11}$  สวิตช์  $S_{12}$  และสวิตช์  $S_{21}$  มีสถานะ “ปิด” แต่สวิตช์  $S_{22}$  มีสถานะ “เปิด” สามารถหาค่าแรงดันเอาต์พุตได้จาก

$$\begin{aligned} V_{out} &= -V_{in} \left(\frac{R_{f1}}{R_{in1} \parallel R_{in2}}\right) \\ &= -V_{in} \left(\frac{R_{f1}}{\frac{1}{\frac{1}{R_{in1}} + \frac{1}{R_{in2}}}}\right) \end{aligned}$$



$$= -V_{in} \left( \frac{R_{f1}}{\frac{R_{in1} + R_{in2}}{R_{in1} R_{in2}}} \right)$$

$$\therefore V_{out} = -V_{in} \left( \frac{R_{in1} R_{in2} R_{f1}}{R_{in1} + R_{in2}} \right) \quad (7.9)$$

ดังนั้น ค่าอัตราขยายของวงจรสามารถหาได้จาก

$$Gain = -\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\left( \frac{R_{f1}}{R_{in1} \parallel R_{in2}} \right)$$

$$\therefore Gain = -\left( \frac{R_{in1} R_{in2} R_{f1}}{R_{in1} + R_{in2}} \right) \quad (7.10)$$

ในกรณีที่สวิตช์  $S_{11}$  สวิตช์  $S_{12}$  และสวิตช์  $S_{22}$  มีสถานะ “ปิด” แต่สวิตช์  $S_{21}$  มีสถานะ “เปิด” สามารถหาค่าแรงดันเอาต์พุตได้จาก

$$V_{out} = -V_{in} \left( \frac{R_{f2}}{R_{in1} \parallel R_{in2}} \right)$$

$$= -V_{in} \left( \frac{R_{f2}}{\frac{1}{R_{in1}} + \frac{1}{R_{in2}}} \right)$$

$$= -V_{in} \left( \frac{R_{f2}}{\frac{R_{in1} + R_{in2}}{R_{in1} R_{in2}}} \right)$$

$$\therefore V_{out} = -V_{in} \left( \frac{R_{in1} R_{in2} R_{f2}}{R_{in1} + R_{in2}} \right) \quad (7.11)$$

ดังนั้น ค่าอัตราขยายของวงจรสามารถหาได้จาก

$$Gain = -\left(\frac{V_{out}}{V_{in}}\right) = -\left(\frac{R_{f2}}{R_{in1} \parallel R_{in2}}\right)$$

$$\therefore Gain = -\left(\frac{R_{in1}R_{in2}R_{f2}}{R_{in1} + R_{in2}}\right) \quad (7.12)$$

ในกรณีที่สวิตช์  $S_{11}$  สวิตช์  $S_{21}$  และสวิตช์  $S_{22}$  มีสถานะ “ปิด” แต่สวิตช์  $S_{12}$  มีสถานะ “เปิด” สามารถหาค่าแรงดันเอาต์พุตได้จาก

$$V_{out} = -V_{in} \left(\frac{R_{f1} \parallel R_{f2}}{R_{in1}}\right)$$

$$= -V_{in} \left(\frac{\frac{1}{R_{f1}} + \frac{1}{R_{f2}}}{R_{in1}}\right)$$

$$= -V_{in} \left(\frac{\frac{R_{f1} + R_{f2}}{R_{f1}R_{f2}}}{R_{in1}}\right)$$

$$= -V_{in} \left(\frac{R_{f1} + R_{f2}}{R_{in1}R_{f1}R_{f2}}\right)$$

$$\therefore V_{out} = -V_{in} \left(\frac{1}{R_{in1}R_{f2}} + \frac{1}{R_{in1}R_{f1}}\right) \quad (7.13)$$

ดังนั้น ค่าอัตราขยายของวงจรสามารถหาได้จาก

$$Gain = -\left(\frac{V_{out}}{V_{in}}\right) = -\left(\frac{R_{f1} \parallel R_{f2}}{R_{in1}}\right)$$

$$\therefore Gain = -\left(\frac{1}{R_{in1}R_{f2}} + \frac{1}{R_{in1}R_{f1}}\right) \quad (7.14)$$

ในกรณีที่สวิตช์  $S_{12}$  สวิตช์  $S_{21}$  และสวิตช์  $S_{22}$  มีสถานะ “ปิด” แต่สวิตช์  $S_{11}$  มีสถานะ “เปิด” สามารถหาค่าแรงดันเอาต์พุตได้จาก

$$V_{out} = -V_{in} \left(\frac{R_{f1} \parallel R_{f2}}{R_{in2}}\right)$$

$$= -V_{in} \left(\frac{\frac{1}{R_{f1}} + \frac{1}{R_{f2}}}{R_{in2}}\right)$$

$$= -V_{in} \left(\frac{\frac{R_{f1} + R_{f2}}{R_{f1}R_{f2}}}{R_{in2}}\right)$$

$$= -V_{in} \left(\frac{R_{f1} + R_{f2}}{R_{in2}R_{f1}R_{f2}}\right)$$

$$\therefore V_{out} = -V_{in} \left(\frac{1}{R_{in2}R_{f2}} + \frac{1}{R_{in2}R_{f1}}\right) \quad (7.15)$$

ดังนั้น ค่าอัตราขยายของวงจรสามารถหาได้จาก

$$Gain = -\left(\frac{V_{out}}{V_{in}}\right) = -\left(\frac{R_{f1} \parallel R_{f2}}{R_{in2}}\right)$$

$$\therefore Gain = -\left(\frac{1}{R_{in2}R_{f2}} + \frac{1}{R_{in2}R_{f1}}\right) \quad (7.16)$$

ในกรณีที่สวิตช์ทุกตัว คือ สวิตช์  $S_{11}$  สวิตช์  $S_{12}$  สวิตช์  $S_{21}$  และสวิตช์  $S_{22}$  มีสถานะ “ปิด” สามารถหาค่าแรงดันเอาต์พุตได้จาก

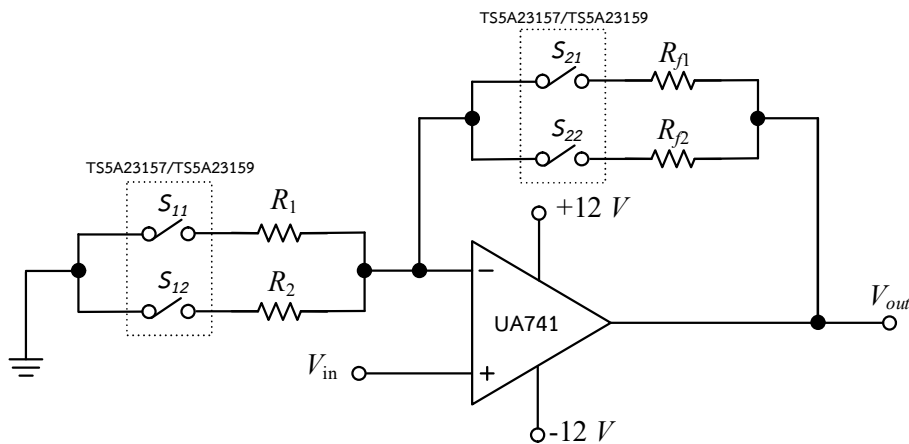
$$\begin{aligned} V_{out} &= -V_{in} \left( \frac{R_{f1} \parallel R_{f2}}{R_{in1} \parallel R_{in2}} \right) \\ &= -V_{in} \left( \frac{\frac{1}{R_{f1}} + \frac{1}{R_{f2}}}{\frac{1}{R_{in1}} + \frac{1}{R_{in2}}} \right) \\ &= -V_{in} \left( \frac{\frac{R_{f1} + R_{f2}}{R_{f1}R_{f2}}}{\frac{R_{in1} + R_{in2}}{R_{in1}R_{in2}}} \right) \\ &= -V_{in} \left( \frac{R_{f1} + R_{f2}}{R_{f1}R_{f2}} \right) \left( \frac{R_{in1}R_{in2}}{R_{in1} + R_{in2}} \right) \\ \therefore V_{out} &= -V_{in} \left( \frac{1}{R_{f1}} + \frac{1}{R_{f2}} \right) \left( \frac{R_{in1}R_{in2}}{R_{in1} + R_{in2}} \right) \quad (7.17) \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าอัตราขยายของวงจรสามารถหาได้จาก

$$\begin{aligned} Gain &= -\left(\frac{V_{out}}{V_{in}}\right) = -\left(\frac{R_{f1} \parallel R_{f2}}{R_{in1} \parallel R_{in2}}\right) \\ \therefore Gain &= -\left(\frac{1}{R_{f1}} + \frac{1}{R_{f2}}\right) \left(\frac{R_{in1}R_{in2}}{R_{in1} + R_{in2}}\right) \quad (7.18) \end{aligned}$$

### 7.2.2 วงจรแอนะล็อกสวิตช์สำหรับวงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส

วงจรแอนะล็อกสวิตช์สำหรับวงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส แสดงได้ดังรูปที่ 7.4 เป็นการประยุกต์ใช้งานไอซีเบอร์ TS5A23157 หรือ TS5A23159 ต่อร่วมกับวงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส (James, 2021) โดยใช้อปแอมป์ UA741 ต่อร่วมกับตัวต้านทาน สวิตช์แต่ละตัวของไอซีเบอร์ TS5A23157 หรือ TS5A23159 ซึ่งประกอบด้วยสวิตช์  $S_{11}$  สวิตช์  $S_{12}$  สวิตช์  $S_{21}$  และสวิตช์  $S_{22}$  จะถูกควบคุมการทำงานให้มีสถานะการทำงานของสวิตช์ “ปิด” และ “เปิด” จากสัญญาณควบคุมหรือสัญญาณนาฬิกาเช่นเดียวกันกับการทำงานในรูปที่ 7.3



รูปที่ 7.4 วงจรแอนะล็อกสวิตช์สำหรับวงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส (ธนส์ถ์, 2565)

อาศัยการหาค่าจากโหนดวงจรไฟฟ้าของวงจรในรูปที่ 7.4 ดังนั้นสามารถหาค่าอัตราขยายจากวงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟสได้ดังนี้

ในกรณีที่สวิตช์  $S_{11}$  และสวิตช์  $S_{21}$  มีสถานะ “ปิด” แต่สวิตช์  $S_{12}$  และสวิตช์  $S_{22}$  มีสถานะ “เปิด” สามารถหาค่าแรงดันเอาต์พุตและอัตราขยายของวงจรได้จากสมการที่ (7.19) และ (7.20) ตามลำดับ

$$V_{out} = V_{in} \left( 1 + \frac{R_{f1}}{R_1} \right) \quad (7.19)$$

$$Gain = \left( \frac{V_{out}}{V_{in}} \right) = \left( 1 + \frac{R_{f1}}{R_1} \right) \quad (7.20)$$

ในกรณีที่สวิตช์  $S_{11}$  และสวิตช์  $S_{22}$  มีสถานะ “ปิด” แต่สวิตช์  $S_{12}$  และสวิตช์  $S_{21}$  มีสถานะ “เปิด” สามารถหาค่าแรงดันเอาต์พุตและอัตราขยายของวงจรได้จากสมการที่ (7.21) และ (7.22) ตามลำดับ

$$V_{out} = V_{in} \left( 1 + \frac{R_{f2}}{R_1} \right) \quad (7.21)$$

$$Gain = \left( \frac{V_{out}}{V_{in}} \right) = \left( 1 + \frac{R_{f2}}{R_1} \right) \quad (7.22)$$

ในกรณีที่สวิตช์  $S_{12}$  และสวิตช์  $S_{21}$  มีสถานะ “ปิด” แต่สวิตช์  $S_{11}$  และสวิตช์  $S_{22}$  มีสถานะ “เปิด” สามารถหาค่าแรงดันเอาต์พุตและอัตราขยายของวงจรได้จากสมการที่ (7.23) และ (7.24) ตามลำดับ

$$V_{out} = V_{in} \left( 1 + \frac{R_{f1}}{R_2} \right) \quad (7.23)$$

$$Gain = \left( \frac{V_{out}}{V_{in}} \right) = \left( 1 + \frac{R_{f1}}{R_2} \right) \quad (7.24)$$

ในกรณีที่สวิตช์  $S_{12}$  และสวิตช์  $S_{22}$  มีสถานะ “ปิด” แต่สวิตช์  $S_{11}$  และสวิตช์  $S_{21}$  มีสถานะ “เปิด” สามารถหาค่าแรงดันเอาต์พุตและอัตราขยายของวงจรได้จากสมการที่ (7.25) และ (7.26) ตามลำดับ

$$V_{out} = V_{in} \left( 1 + \frac{R_{f2}}{R_2} \right) \quad (7.25)$$

$$Gain = \left( \frac{V_{out}}{V_{in}} \right) = \left( 1 + \frac{R_{f2}}{R_2} \right) \quad (7.26)$$

ในกรณีที่สวิตช์  $S_{11}$  สวิตช์  $S_{12}$  และสวิตช์  $S_{21}$  มีสถานะ “ปิด” แต่สวิตช์  $S_{22}$  มีสถานะ “เปิด” สามารถหาค่าแรงดันเอาต์พุตได้จาก

$$V_{out} = V_{in} \left( 1 + \frac{R_{f1}}{R_1 \parallel R_2} \right)$$

$$\begin{aligned}
&= V_{in} \left( 1 + \left( \frac{R_{f1}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \right) \right) \\
&= V_{in} \left( 1 + \left( \frac{R_{f1}}{\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}} \right) \right) \\
\therefore V_{out} &= V_{in} \left( 1 + \left( \frac{R_1 R_2 R_{f1}}{R_1 + R_2} \right) \right) \tag{7.27}
\end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าอัตราขยายของวงจรสามารถหาได้จาก

$$\begin{aligned}
Gain &= \left( \frac{V_{out}}{V_{in}} \right) = \left( 1 + \frac{R_{f1}}{R_1 \parallel R_2} \right) \\
\therefore Gain &= 1 + \left( \frac{R_1 R_2 R_{f1}}{R_1 + R_2} \right) \tag{7.28}
\end{aligned}$$

ในกรณีที่สวิตช์  $S_{11}$  สวิตช์  $S_{12}$  และสวิตช์  $S_{22}$  มีสถานะ “ปิด” แต่สวิตช์  $S_{21}$  มีสถานะ “เปิด” สามารถหาค่าแรงดันเอาต์พุตได้จาก

$$\begin{aligned}
V_{out} &= V_{in} \left( 1 + \frac{R_{f2}}{R_1 \parallel R_2} \right) \\
&= V_{in} \left( 1 + \left( \frac{R_{f2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \right) \right)
\end{aligned}$$

$$= V_{in} \left( 1 + \left( \frac{R_{f2}}{R_1 + R_2} \right) \right)$$

$$\therefore V_{out} = V_{in} \left( 1 + \left( \frac{R_1 R_2 R_{f2}}{R_1 + R_2} \right) \right) \tag{7.29}$$

ดังนั้น ค่าอัตราขยายของวงจรสามารถหาได้จาก

$$Gain = \left( \frac{V_{out}}{V_{in}} \right) = \left( 1 + \frac{R_{f2}}{R_1 \parallel R_2} \right)$$

$$\therefore Gain = 1 + \left( \frac{R_1 R_2 R_{f2}}{R_1 + R_2} \right) \tag{7.30}$$

ในกรณีที่สวิตช์  $S_{11}$  สวิตช์  $S_{21}$  และสวิตช์  $S_{22}$  มีสถานะ “ปิด” แต่สวิตช์  $S_{12}$  มีสถานะ “เปิด” สามารถหาค่าแรงดันเอาต์พุตได้จาก

$$V_{out} = V_{in} \left( 1 + \frac{R_{f1} \parallel R_{f2}}{R_1} \right)$$

$$= V_{in} \left( 1 + \left( \frac{\frac{1}{R_{f1}} + \frac{1}{R_{f2}}}{R_1} \right) \right)$$

$$= V_{in} \left( 1 + \left( \frac{\frac{R_{f1} + R_{f2}}{R_{f1} R_{f2}}}{R_1} \right) \right)$$



$$\therefore V_{out} = V_{in} \left( 1 + \left( \frac{R_{f1} + R_{f2}}{R_1 R_{f1} R_{f2}} \right) \right) \quad (7.31)$$

ดังนั้น ค่าอัตราขยายของวงจรสามารถหาได้จาก

$$Gain = \left( \frac{V_{out}}{V_{in}} \right) = \left( 1 + \frac{R_{f1} \parallel R_{f2}}{R_1} \right)$$

$$\therefore Gain = 1 + \left( \frac{R_{f1} + R_{f2}}{R_1 R_{f1} R_{f2}} \right) \quad (7.32)$$

ในกรณีที่สวิตช์  $S_{12}$  สวิตช์  $S_{21}$  และสวิตช์  $S_{22}$  มีสถานะ “ปิด” แต่สวิตช์  $S_{11}$  มีสถานะ “เปิด” สามารถหาค่าแรงดันเอาต์พุตได้จาก

$$\begin{aligned} V_{out} &= V_{in} \left( 1 + \frac{R_{f1} \parallel R_{f2}}{R_2} \right) \\ &= V_{in} \left( 1 + \left( \frac{\frac{1}{R_{f1}} + \frac{1}{R_{f2}}}{R_2} \right) \right) \end{aligned}$$

$$= V_{in} \left( 1 + \left( \frac{\frac{R_{f1} + R_{f2}}{R_{f1} R_{f2}}}{R_2} \right) \right)$$

$$\therefore V_{out} = V_{in} \left( 1 + \left( \frac{R_{f1} + R_{f2}}{R_2 R_{f1} R_{f2}} \right) \right) \quad (7.33)$$

ดังนั้น ค่าอัตราขยายของวงจรมหาหาได้จาก

$$Gain = \left( \frac{V_{out}}{V_{in}} \right) = \left( 1 + \frac{R_{f1} \parallel R_{f2}}{R_2} \right)$$

$$\therefore Gain = 1 + \left( \frac{R_{f1} + R_{f2}}{R_2 R_{f1} R_{f2}} \right) \tag{7.34}$$

ในกรณีที่สวิตช์ทุกตัว คือ สวิตช์  $S_{11}$  สวิตช์  $S_{12}$  สวิตช์  $S_{21}$  และสวิตช์  $S_{22}$  มีสถานะ “ปิด” สามารถหาค่าแรงดันเอาต์พุตได้จาก

$$V_{out} = V_{in} \left( 1 + \left( \frac{R_{f1} \parallel R_{f2}}{R_1 \parallel R_2} \right) \right)$$

$$= V_{in} \left( 1 + \frac{\left( \frac{1}{R_{f1}} + \frac{1}{R_{f2}} \right)}{\left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)} \right)$$

$$= V_{in} \left( 1 + \frac{\left( \frac{R_{f1} + R_{f2}}{R_{f1} R_{f2}} \right)}{\left( \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} \right)} \right)$$

$$\therefore V_{out} = V_{in} \left( 1 + \left( \frac{R_{f1} + R_{f2}}{R_{f1} R_{f2}} \right) \left( \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right) \right) \tag{7.35}$$

ดังนั้น ค่าอัตราขยายของวงจรมหาหาได้จาก

$$Gain = \left( \frac{V_{out}}{V_{in}} \right) = 1 + \left( \frac{R_{f1} \parallel R_{f2}}{R_1 \parallel R_2} \right)$$

$$Gain = 1 + \left( \frac{R_{f1} + R_{f2}}{R_{f1}R_{f2}} \right) \left( \frac{R_1R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad (7.36)$$

ตารางที่ 7.1 การเปรียบเทียบสถานะของสวิตช์  $S_{11}$  สวิตช์  $S_{12}$  สวิตช์  $S_{21}$  และสวิตช์  $S_{22}$  กับค่าบิต ข้อมูลดิจิทัลของวงจรแอนะล็อกสวิตช์สำหรับวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส ในรูปที่ 7.3 (ธน์สร์, 2565)

$S_{11}$	$S_{12}$	$S_{21}$	$S_{22}$	ค่าอัตราขยาย
0	1	0	1	$-\left(\frac{R_{f2}}{R_{in2}}\right)$
0	1	1	0	$-\left(\frac{R_{f1}}{R_{in2}}\right)$
0	1	1	1	$-\left(\frac{R_{f1} \parallel R_{f2}}{R_{in2}}\right)$
1	0	0	1	$-\left(\frac{R_{f2}}{R_{in1}}\right)$
1	0	1	0	$-\left(\frac{R_{f1}}{R_{in1}}\right)$
1	0	1	1	$-\left(\frac{R_{f1} \parallel R_{f2}}{R_{in1}}\right)$
1	1	0	1	$-\left(\frac{R_{f2}}{R_{in1} \parallel R_{in2}}\right)$
1	1	1	0	$-\left(\frac{R_{f1}}{R_{in1} \parallel R_{in2}}\right)$
1	1	1	1	$-\left(\frac{R_{f1} \parallel R_{f2}}{R_{in1} \parallel R_{in2}}\right)$

ทั้งนี้ เมื่อทำการเปรียบเทียบสถานะการ ปิด - เปิด ของสวิตช์  $S_{11}$  สวิตช์  $S_{12}$  สวิตช์  $S_{21}$  และสวิตช์  $S_{22}$  จากวงจรแอนะล็อกสวิตช์ในรูปที่ 7.3 และรูปที่ 7.4 เป็นค่าบิตข้อมูลดิจิทัล โดยขณะที่สวิตช์แต่ละตัวมีสถานะ “ปิด” บิตข้อมูลดิจิทัลจะมีค่าเท่ากับ “1” และเมื่อสวิตช์มีสถานะ “เปิด” บิตข้อมูลดิจิทัลมีค่าเท่ากับ “0” ดังนั้น สามารถสรุปการทำงานสถานะของสวิตช์  $S_{11}$  สวิตช์

$S_{12}$  สวิตช์  $S_{21}$  และสวิตช์  $S_{22}$  เปรียบเทียบกับค่าบิตข้อมูลดิจิทัลของวงจรแอนะล็อกสวิตช์สำหรับวงจรขยายสัญญาณทั้งแบบกลับเฟสและไม่กลับเฟส ได้ดังตารางที่ 7.1 และตารางที่ 7.2 ตามลำดับ

**ตารางที่ 7.2** การเปรียบเทียบสถานะของสวิตช์  $S_{11}$  สวิตช์  $S_{12}$  สวิตช์  $S_{21}$  และสวิตช์  $S_{22}$  กับค่าบิตข้อมูลดิจิทัลของวงจรแอนะล็อกสวิตช์สำหรับวงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส ในรูปที่ 7.4 (ธน์สถ์, 2565)

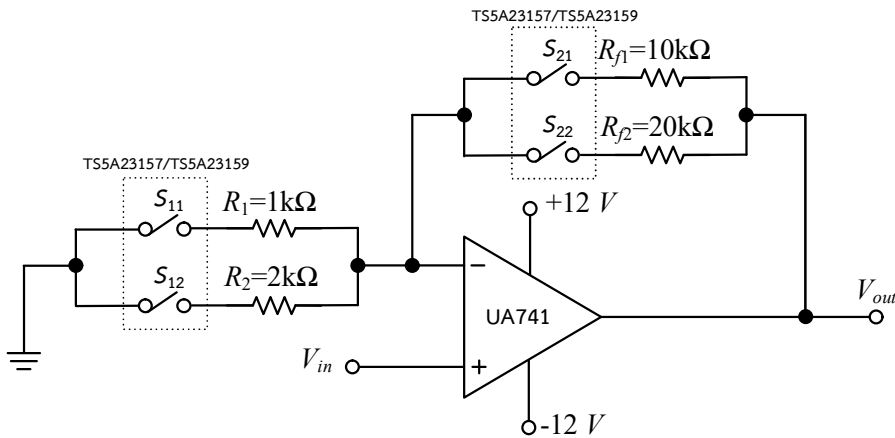
$S_{11}$	$S_{12}$	$S_{21}$	$S_{22}$	ค่าอัตราขยาย
0	1	0	1	$1 + \left( \frac{R_{f2}}{R_2} \right)$
0	1	1	0	$1 + \left( \frac{R_{f1}}{R_2} \right)$
0	1	1	1	$1 + \left( \frac{R_{f1} \parallel R_{f2}}{R_2} \right)$
1	0	0	1	$1 + \left( \frac{R_{f2}}{R_1} \right)$
1	0	1	0	$1 + \left( \frac{R_{f1}}{R_1} \right)$
1	0	1	1	$1 + \left( \frac{R_{f1} \parallel R_{f2}}{R_1} \right)$
1	1	0	1	$1 + \left( \frac{R_{f2}}{R_1 \parallel R_2} \right)$
1	1	1	0	$1 + \left( \frac{R_{f1}}{R_1 \parallel R_2} \right)$
1	1	1	1	$1 + \left( \frac{R_{f1} \parallel R_{f2}}{R_1 \parallel R_2} \right)$

จากตารางที่ 7.1 และตารางที่ 7.2 จะเห็นได้ว่า หากมีการออกแบบวงจรโดยใช้สัญญาณควบคุมเป็นสัญญาณดิจิทัลหรือสัญญาณนาฬิกาไปควบคุมการทำงานของวงจรแอนะล็อกสวิตช์ เพื่อใช้สำหรับควบคุมค่าสัญญาณเอาต์พุตหรืออัตราขยายของวงจรสำหรับวงจรขยายทั้งแบบกลับเฟส

และไม่กลับเฟสได้ โดยไม่จำเป็นต้องทำการเปลี่ยนแปลงตัวต้านทาน อีกทั้งวงจรแอนะล็อกสวิตช์ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานสำหรับวงจรรวมสัญญาณได้ด้วย ซึ่งจะได้กล่าวในลำดับหัวข้อถัดไป

**ตัวอย่างที่ 7.1**

จงหาค่าอัตราขยายของวงจรดังรูป เมื่อค่าบิตข้อมูลดิจิทัลของวงจรแอนะล็อกสวิตช์  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{21}$  และ  $S_{22}$  เท่ากับ 1010 ตามลำดับ



(ธนัสถ์, 2565)

**วิธีทำ**

จากโจทย์ คือ วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟสโดยมีการประยุกต์ใช้วงจรแอนะล็อกสวิตช์ ซึ่งค่าบิตข้อมูลดิจิทัลของวงจรแอนะล็อกสวิตช์ เท่ากับ 1010 ดังนั้น เมื่อทำการเปรียบเทียบกับสวิตช์ในวงจร สถานะของสวิตช์  $S_{11}$  และ  $S_{21}$  จะมีสถานะ “ปิด” และสถานะของสวิตช์  $S_{12}$  และ  $S_{22}$  จะมีสถานะ “เปิด” ดังนั้นสามารถหาค่าอัตราขยายของวงจรได้จากตารางที่ 7.2 คือ

$$Gain = 1 + \left( \frac{R_{f1}}{R_1} \right)$$

แทนค่า  $R_{f1} = 10 \text{ k}\Omega$  และ  $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$  จะได้

$$Gain = 1 + \left( \frac{10 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega} \right)$$

$$\therefore Gain = 11$$

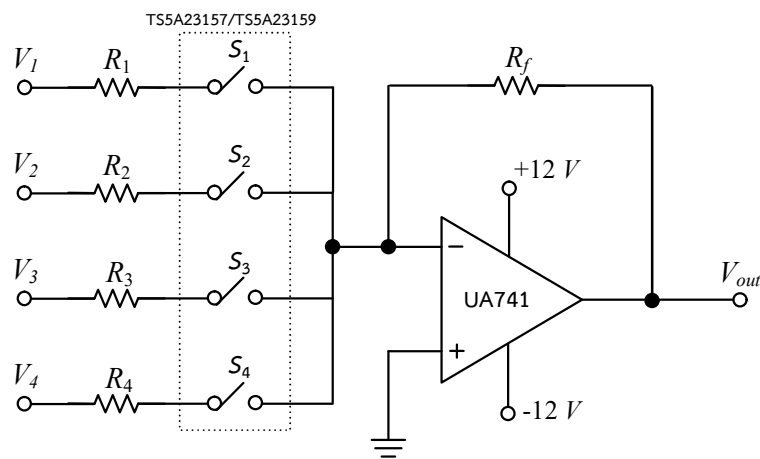
**ตอบ** เมื่อค่าบิตข้อมูลดิจิทัลของวงจรแอนะล็อกสวิตช์ เท่ากับ 1010 ค่าอัตราขยายของวงจรในรูป มีค่าอัตราขยาย เท่ากับ 11 เท่า

### 7.3 วงจรแอนะล็อกสวิตช์สำหรับวงจรรวมสัญญาณ

วงจรแอนะล็อกสวิตช์สามารถนำมาต่อร่วมกับวงจรรวมสัญญาณได้ โดยใช้โอปแอมป์เป็นอุปกรณ์หลักต่อร่วมกับตัวต้านทานเพื่อให้สามารถรวมสัญญาณได้โดยไม่จำเป็นต้องมีการเปลี่ยนแปลงค่าอินพุต ทั้งนี้วงจรแอนะล็อกสวิตช์ สามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับวงจรรวมสัญญาณแบบกลับเฟส (Inverting summer) และแบบไม่กลับเฟส (Non-inverting summer) ได้ ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

#### 7.3.1 วงจรแอนะล็อกสวิตช์สำหรับวงจรรวมสัญญาณแบบกลับเฟส

วงจรแอนะล็อกสวิตช์สำหรับวงจรรวมสัญญาณแบบกลับเฟสแสดงได้ดังรูปที่ 7.5 ประกอบไปด้วยสองส่วน คือ ส่วนของวงจรแอนะล็อกสวิตช์  $S_1$  สวิตช์  $S_2$  สวิตช์  $S_3$  และสวิตช์  $S_4$  ของไอซีเบอร์ TS5A23157 หรือ TS5A23159 ที่ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของวงจร ให้สามารถแสดงค่าเอาต์พุตที่ต้องการจากสัญญาณควบคุมได้ และอีกส่วน คือ ส่วนของวงจรรวมสัญญาณแบบกลับเฟสที่ใช้โอปแอมป์เบอร์ UA741 เป็นอุปกรณ์หลักต่อร่วมกับตัวต้านทาน ดังนั้น จากรูปที่ 7.5 แสดงให้เห็นว่าวงจรรวมสัญญาณซึ่งมีค่าอินพุตเป็นแรงดัน ทำการต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน และต่อร่วมกับวงจรแอนะล็อกสวิตช์ของไอซีเบอร์ TS5A23157 หรือ TS5A23159 โดยที่สวิตช์  $S_1$  สวิตช์  $S_2$  สวิตช์  $S_3$  และสวิตช์  $S_4$  คอยทำหน้าที่ควบคุมหรือเลือกให้มีค่าแรงดันอินพุตป้อนให้กับวงจร เข้าไปยังขาอินพุตลบของโอปแอมป์ จากสัญญาณควบคุมหรือสัญญาณนาฬิกาที่สามารถควบคุมการทำงานได้ ทำให้ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จะขึ้นอยู่กับการทำงานของวงจรแอนะล็อกสวิตช์นั่นเอง



รูปที่ 7.5 วงจรแอนะล็อกสวิตช์สำหรับวงจรรวมสัญญาณแบบกลับเฟส (ธันส์ถ์, 2565)

จะเห็นได้ว่า วงจรรวมสัญญาณแบบกลับเฟส เมื่อนำมาต่อร่วมกับวงจรแอนะล็อกสวิตช์ ในกรณีที่สวิตช์  $S_1$  สวิตช์  $S_2$  สวิตช์  $S_3$  และสวิตช์  $S_4$  ทุกตัวมีสถานะ “ปิด” สามารถหาค่าแรงดันเอาต์พุต  $V_{out}$  โดยอาศัยการวิเคราะห์โหนดทางไฟฟ้า สามารถหาค่าแรงดันเอาต์พุต  $V_{out}$  ได้จากสมการที่ (7.37)

ตารางที่ 7.3 ค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรรวมสัญญาณแบบกลับเฟสเมื่อวงจรแอนะล็อกสวิตช์ ถูกควบคุมการทำงานจากค่าบิตข้อมูลดิจิทัล (ธน์สัถ์, 2565)

$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	ค่าแรงดันเอาต์พุต $V_{out}$
0	0	0	1	$-V_4$
0	0	1	0	$-V_3$
0	0	1	1	$-(V_3 + V_4)$
0	1	0	0	$-V_2$
0	1	0	1	$-(V_2 + V_4)$
0	1	1	0	$-(V_2 + V_3)$
0	1	1	1	$-(V_2 + V_3 + V_4)$
1	0	0	0	$-V_1$
1	0	0	1	$-(V_1 + V_4)$
1	0	1	0	$-(V_1 + V_3)$
1	0	1	1	$-(V_1 + V_3 + V_4)$
1	1	0	0	$-(V_1 + V_2)$
1	1	0	1	$-(V_1 + V_2 + V_4)$
1	1	1	0	$-(V_1 + V_2 + V_3)$
1	1	1	1	$-(V_1 + V_2 + V_3 + V_4)$

$$V_{out} = - \left[ \left( \frac{R_f}{R_1} V_1 \right) + \left( \frac{R_f}{R_2} V_2 \right) + \left( \frac{R_f}{R_3} V_3 \right) + \left( \frac{R_f}{R_4} V_4 \right) \right] \quad (7.37)$$

หากกำหนดให้ค่าความต้านทาน  $R = R_1 = R_2 = R_3 = R_4$  ดังนั้นจากสมการที่ (7.37) ค่าแรงดันเอาต์พุต  $V_{out}$  สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$V_{out} = - \frac{R_f}{R} (V_1 + V_2 + V_3 + V_4) \quad (7.38)$$

เมื่อกำหนดให้  $R = R_f$  ดังนั้น สมการที่ (7.38) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$V_{out} = -(V_1 + V_2 + V_3 + V_4) \tag{7.39}$$

จากสมการที่ (7.39) และจากรูปที่ 7.5 จะเห็นได้ว่า ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้ เกิดจาก ค่าแรงดันอินพุต  $V_1, V_2, V_3$  และ  $V_4$  ทุกตัวรวมกัน เพื่อให้ได้ค่าเอาต์พุตที่ต้องการ โดยค่าแรงดัน อินพุตแต่ละตัวจะถูกควบคุมจากวงจรแอนะล็อกสวิตช์ คือ สวิตช์  $S_1$  สวิตช์  $S_2$  สวิตช์  $S_3$  และ สวิตช์  $S_4$  ของไอซีเบอร์ TS5A23157 หรือ TS5A23159 ที่สามารถควบคุมค่าแรงดันอินพุต  $V_1, V_2, V_3$  และ  $V_4$  ตามลำดับ ลักษณะการทำงานนี้มีการทำงานเช่นเดียวกันกับในกรณีของการทำงาน ของวงจรในรูปที่ 7.3 และ 7.4 ดังนั้น เมื่อทำการเปรียบเทียบสถานะการ ปิด - เปิด จากวงจรแอนะล็อก สวิตช์ของไอซีเบอร์ TS5A23157 หรือ TS5A23159 โดยใช้สัญญาณควบคุมหรือสัญญาณนาฬิกา ไปประยุกต์ใช้งานควบคุมสวิตช์  $S_1$  สวิตช์  $S_2$  สวิตช์  $S_3$  และสวิตช์  $S_4$  ในรูปแบบสัญญาณ บิตข้อมูลดิจิทัลไปควบคุมสวิตช์ ในขณะที่สวิตช์มีสถานะ “ปิด” บิตข้อมูลดิจิทัลจะมีค่าเท่ากับ “1” และเมื่อสวิตช์มีสถานะ “เปิด” บิตข้อมูลดิจิทัลมีค่าเท่ากับ “0” ค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรรวม สัญญาณแบบกลับเฟสที่ได้จากสมการที่ (7.39) สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 7.3

### 7.3.2 วงจรแอนะล็อกสวิตช์สำหรับวงจรรวมสัญญาณแบบไม่กลับเฟส

วงจรแอนะล็อกสวิตช์สำหรับวงจรรวมสัญญาณแบบไม่กลับเฟสแสดงได้ดังรูปที่ 7.6 ซึ่งมีลักษณะการต่อของวงจรมีความคล้ายคลึงกันกับวงจรรวมสัญญาณแบบไม่กลับเฟส ต่างกันเพียง แค่ส่วนของการป้อนค่าแรงดันอินพุตจะต่อเข้ากันกับขาอินพุตบวกของออปแอมป์เบอร์ UA741 แทน โดยค่าแรงดันอินพุตจะถูกควบคุมจากวงจรแอนะล็อกสวิตช์ คือ สวิตช์  $S_1$  สวิตช์  $S_2$  สวิตช์  $S_3$  และ สวิตช์  $S_4$  ของไอซีเบอร์ TS5A23157 หรือ TS5A23159

ทั้งนี้ โดยอาศัยการวิเคราะห์โหนดทางไฟฟ้าของวงจรรวมสัญญาณแบบไม่กลับเฟส เมื่อต่อร่วมกับวงจรแอนะล็อกสวิตช์ของไอซีเบอร์ TS5A23157 หรือ TS5A23159 ในกรณีที่สวิตช์  $S_1$  สวิตช์  $S_2$  สวิตช์  $S_3$  และสวิตช์  $S_4$  ทุกตัวมีสถานะ “ปิด” ดังนั้นจากรูปที่ 7.6 สามารถ หาค่าแรงดันเอาต์พุต  $V_{out}$  ได้คือ

$$V_{out} = \left(1 + \frac{R_f}{R_g}\right) \left[ \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} + \frac{V_4}{R_4} \right] R_T \tag{7.40}$$

หากกำหนดให้ค่าความต้านทาน  $R = R_1 = R_2 = R_3 = R_4$  และจะได้  $R_T = \frac{R}{4}$

ดังนั้นจากคุณสมบัติของวงจรขนาน ทำให้สมการที่ (7.40) สามารถเขียนใหม่ได้ คือ



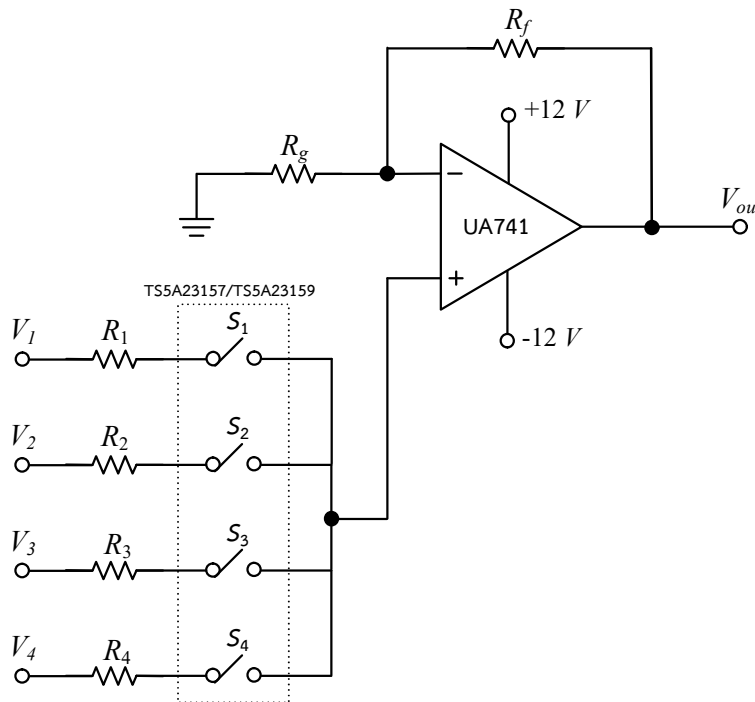
$$V_{out} = \frac{1}{4} \left( 1 + \frac{R_f}{R_g} \right) (V_1 + V_2 + V_3 + V_4) \tag{7.41}$$

และหากกำหนดให้  $\frac{1}{4} \left( 1 + \frac{R_f}{R_g} \right) = \alpha$  สมการที่ (7.41) สามารถเขียนใหม่ได้ คือ

$$V_{out} = \alpha (V_1 + V_2 + V_3 + V_4) \tag{7.42}$$

เมื่อ  $\alpha$  คืออัตราขยายของวงจรรวมสัญญาณแบบไม่กลับเฟส ทั้งนี้ จากสมการที่ (7.41) หากกำหนดให้  $\frac{R_f}{R_g} = 3$  ทำให้ค่าอัตราขยายของวงจรรวมสัญญาณแบบไม่กลับเฟส จะมีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้น สมการที่ (7.42) สามารถเขียนใหม่ได้คือ

$$V_{out} = (V_1 + V_2 + V_3 + V_4) \tag{7.43}$$



รูปที่ 7.6 วงจรแอนะล็อกสวิตช์สำหรับวงจรรวมสัญญาณแบบไม่กลับเฟส (ธันส์ถ์, 2565)

จะเห็นได้ว่า ทั้งสมการที่ (7.42) และ (7.43) คือ ค่าแรงดันเอาต์พุต  $V_{out}$  ของวงจรรวมสัญญาณแบบไม่กลับเฟสที่มีอัตราขยายและไม่มีอัตราขยายของวงจร ตามลำดับ ซึ่งเกิดจาก

ค่าของแรงดันอินพุต  $V_1, V_2, V_3$  และ  $V_4$  รวมกันทุกตัว ทั้งนี้ หากนำสัญญาณบิตข้อมูลดิจิทัลไปควบคุมสวิตช์ของไอซีเบอร์ TS5A23157 หรือ TS5A23159 ในขณะที่สวิตช์มีสถานะ “ปิด” บิตข้อมูลดิจิทัลจะมีค่าเท่ากับ “1” และเมื่อสวิตช์มีสถานะ “เปิด” บิตข้อมูลดิจิทัลมีค่าเท่ากับ “0” ค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรรวมสัญญาณแบบไม่กลับเฟสที่ได้จากสมการที่ (7.43) แสดงดังตารางที่ 7.4

ตารางที่ 7.4 ค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรรวมสัญญาณแบบไม่กลับเฟสเมื่อวงจรแอนะล็อกสวิตช์ถูกควบคุมการทำงานจากค่าบิตข้อมูลดิจิทัล (ธน์สท์, 2565)

$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	ค่าแรงดันเอาต์พุต $V_{out}$
0	0	0	1	$V_4$
0	0	1	0	$V_3$
0	0	1	1	$V_3 + V_4$
0	1	0	0	$V_2$
0	1	0	1	$V_2 + V_4$
0	1	1	0	$V_2 + V_3$
0	1	1	1	$V_2 + V_3 + V_4$
1	0	0	0	$V_1$
1	0	0	1	$V_1 + V_4$
1	0	1	0	$V_1 + V_3$
1	0	1	1	$V_1 + V_3 + V_4$
1	1	0	0	$V_1 + V_2$
1	1	0	1	$V_1 + V_2 + V_4$
1	1	1	0	$V_1 + V_2 + V_3$
1	1	1	1	$V_1 + V_2 + V_3 + V_4$

สำหรับในกรณีที่กำหนดให้ตัวต้านทานที่ใช้ภายในวงจรทุกตัวมีค่าเท่ากัน และมีจำนวนเท่ากับ  $N$  ตัว ทำให้สมการที่ (7.41) สามารถเขียนใหม่ได้ คือ

$$V_{out} = \frac{1}{N} \left( 1 + \frac{R_f}{R_g} \right) (V_1 + V_2 + \dots + V_N) \quad (7.44)$$

ดังนั้น ค่าอัตราขยายของวงจรรวมสัญญาณแบบไม่กลับเฟส คือ

$$\alpha = \frac{1}{N} \left( 1 + \frac{R_f}{R_g} \right) \quad (7.45)$$

ในกรณีที่ ค่าอัตราขยายของวงจรรวมสัญญาณแบบไม่กลับเฟส มีค่าเท่ากับ 1 จะได้

$$N = 1 + \frac{R_f}{R_g} \quad (7.46)$$

ทั้งนี้ สำหรับในหัวข้อที่ 7.3.1 นั้น วงจรรวมสัญญาณแบบกลับเฟสที่ใช้การควบคุมการทำงานจากวงจรแอนะล็อกสวิตช์ที่มีการป้อนบิตข้อมูลดิจิทัลเพื่อให้วงจรแอนะล็อกสวิตช์สามารถแสดงค่าสัญญาณแรงดันเอาต์พุตที่ต้องการได้ แต่เมื่อกำหนดให้อัตราส่วนตัวต้านทานที่ใช้ภายในวงจร คือ  $\frac{R_f}{R_1}, \frac{R_f}{R_2}, \frac{R_f}{R_3}$  และ  $\frac{R_f}{R_4}$  มีค่าอัตราส่วนที่ลดลงเป็นเท่าตัว วงจรรวมสัญญาณแบบกลับเฟสก็จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อกได้ ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

## ตัวอย่างที่ 7.2

จงออกแบบวงจรรวมสัญญาณแบบไม่กลับเฟสโดยใช้วงจรแอนะล็อกสวิตช์ เมื่อทำการป้อนบิตข้อมูลให้กับวงจรแอนะล็อกสวิตช์ เท่ากับ 101 และต้องการค่าแรงดันเอาต์พุต  $V_{out}$  เท่ากับ 10 โวลต์

**วิธีทำ** จากโจทย์ ต้องทำการออกแบบวงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส โดยมีการประยุกต์ใช้วงจรแอนะล็อกสวิตช์ ค่าบิตข้อมูลดิจิทัลของวงจรแอนะล็อกสวิตช์ เท่ากับ 101 ดังนั้น เมื่อทำการเปรียบเทียบกับสถานะการทำงานของสวิตช์ในวงจร จะมีการประยุกต์ใช้แอนะล็อกสวิตช์ ของไอซีเบอร์ TS5A23157 หรือ TS5A23159 จำนวน 3 ตัว ประกอบด้วย สวิตช์  $S_1$  สวิตช์  $S_2$  และสวิตช์  $S_3$  ที่มีสถานะการทำงาน “ปิด” และ “เปิด” เมื่อเปรียบเทียบกับค่าบิตข้อมูลดิจิทัล “101” คือ สวิตช์  $S_1$  และสวิตช์  $S_3$  มีสถานะ “ปิด” แต่สวิตช์  $S_2$  มีสถานะ “เปิด”

เนื่องจากโจทย์มีเงื่อนไข คือ ต้องการค่าแรงดันเอาต์พุต  $V_{out}$  เท่ากับ 10 โวลต์ โดยในที่นี้ ค่าแรงดันอินพุตที่ใช้กำหนดให้มีค่าเท่ากันทุกตัวคือ  $V_1$ ,  $V_2$  และ  $V_3$  เท่ากับ 5 โวลต์ และตัวต้านทานที่ใช้ มีจำนวน 3 ตัว คือ  $R_1$ ,  $R_2$  และ  $R_3$  โดยทุกตัวมีค่าเท่ากัน คือ มีค่าเท่ากับ 10 k $\Omega$  ดังนั้น อาศัยสมการที่ (7.44) สามารถหาค่าแรงดันเอาต์พุตได้ คือ

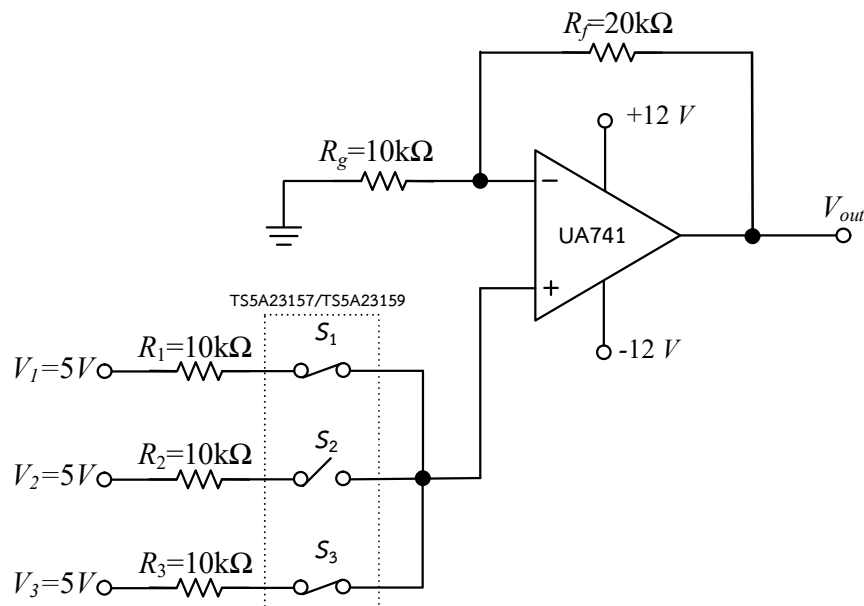
$$V_{out} = \frac{1}{3} \left( 1 + \frac{R_f}{R_g} \right) (V_1 + V_2 + V_3)$$

ดังนั้น เพื่อให้เป็นไปตามเงื่อนไขของโจทย์ พจน์ของค่าอัตราขยายของวงจรรวมสัญญาณแบบไม่กลับเฟส คือ  $\frac{1}{3} \left( 1 + \frac{R_f}{R_g} \right)$  ต้องมีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้นโดยอาศัยสมการที่ (7.46) จะได้

$$3 = 1 + \frac{R_f}{R_g}$$

$$2 = \frac{R_f}{R_g}$$

ในที่นี้จะทำการเลือกใช้ค่าความต้านทาน  $R_f$  เท่ากับ 20 k $\Omega$  และค่าความต้านทาน  $R_g$  เท่ากับ 10 k $\Omega$  ทำให้วงจรที่ทำการออกแบบเป็นไปตามเงื่อนไขที่โจทย์ต้องการ แสดงดังรูป



(ธนัสถ์, 2565)

**ตอบ** จากวงจรที่ได้ทำการออกแบบ เมื่อทำการป้อนบิตข้อมูลเท่ากับ 101 เพื่อควบคุมการทำงานของวงจรแอนะล็อกสวิตช์โดยใช้ไอซีเบอร์ TS5A23157 หรือ TS5A23159 ประยุกต์ใช้งานสำหรับวงจรรวมสัญญาณแบบไม่กลับเฟส สามารถหาค่าแรงดันเอาต์พุตได้ คือ

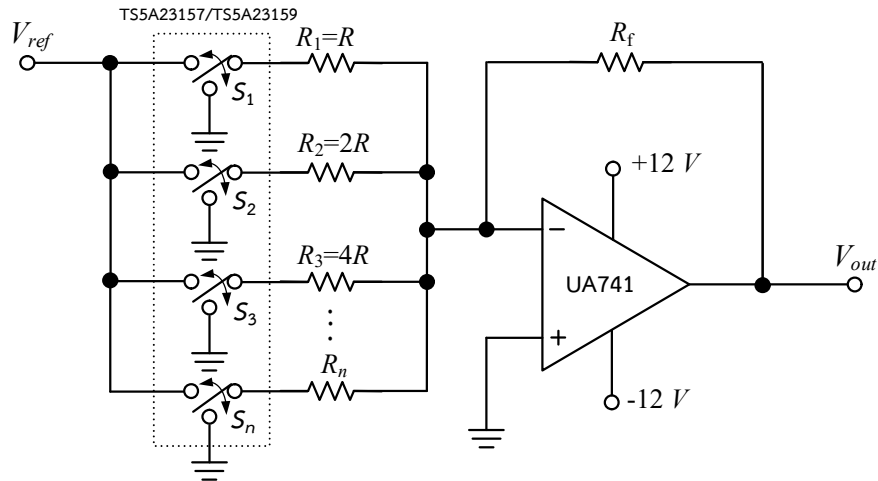
$$\begin{aligned} V_{out} &= V_1 + V_2 \\ &= 5\text{ V} + 5\text{ V} \end{aligned}$$

$$V_{out} = 10\text{ V}$$

#### 7.4 วงจรแอนะล็อกสวิตช์สำหรับวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก

วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก หมายถึง วงจรที่มีการป้อนสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณบิตข้อมูลหรือสัญญาณทางดิจิทัลแล้วผ่านกระบวนการของวงจรที่สามารถทำการแปลงสัญญาณเอาต์พุตให้เป็นสัญญาณแอนะล็อกหรือสัญญาณที่ต่อเนื่องได้ การออกแบบวงจรสามารถสร้างได้จากอุปกรณ์แอกทิฟต่อร่วมกับแพสซีฟ เช่น ออปแอมป์ต่อร่วมกับตัวต้านทาน ซึ่งเป็นวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อกอย่างง่ายที่สุด หรือวงจรสายพานกระแสยุคที่ 2 ต่อร่วมกับตัวต้านทานที่ใช้การควบคุมการทำงานจากการป้อนกระแสจากภายนอกวงจร ทำให้วงจรสายพานกระแสยุคที่ 2 สามารถทำงานเป็นวงจรแอนะล็อกสวิตช์สำหรับแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก (Nonthaputha et al., 2016) เป็นต้น

สำหรับหัวข้อนี้ จะกล่าวถึงวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อกโดยการประยุกต์ใช้วงจรแอนะล็อกสวิตช์โดยใช้ไอซีเบอร์ TS5A23157 หรือ TS5A23159 ต่อรวมกันกับออปแอมป์และตัวต้านทาน ในรูปแบบของวงจรรวมสัญญาณแบบกลับเฟส ที่มีการกำหนดให้อัตราส่วนของตัวต้านทานที่ใช้ภายในวงจร มีค่าอัตราส่วนที่ลดลงเป็นเท่าตัว และลักษณะการทำงานคล้ายคลึงกับวงจรในรูปที่ 7.5 แต่จะแตกต่างกันคือ จะมีการต่อแรงดันอินพุตที่มีค่าเท่ากันเพื่อเป็นค่าแรงดันอ้างอิง  $V_{ref}$  (Voltage reference) สำหรับใช้เป็นแรงดันอ้างอิงเข้าที่ขาอินพุตลบของออปแอมป์ และตัวต้านทานแต่ละตัวที่ต่อเข้าที่ขาอินพุตลบนั้น จะทำการออกแบบให้มีอัตราส่วนที่แตกต่างกันออกไป ตามค่าน้ำหนักของแต่ละบิตตามตำแหน่งของบิตข้อมูลดิจิทัล วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อกดังกล่าวสามารถเรียกอีกอย่างหนึ่งได้ว่า วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อกแบบ Binary weight resistor



รูปที่ 7.7 วงจรแอนะล็อกสวิตช์สำหรับวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อกแบบ Binary weight resistor (ธน์สัถ์, 2565)

ในรูปที่ 7.7 แสดงวงจรแอนะล็อกสวิตช์โดยใช้ไอซีเบอร์ TS5A23157 หรือ TS5A23159 ที่นำมาประยุกต์ใช้งานเพื่อให้วงจรสามารถทำการควบคุมการทำงานของสวิตช์  $S_1, S_2, S_3, \dots, S_N$  จากข้อมูลบิตดิจิทัล ในการแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก โดยค่าความต้านทานของวงจรที่ใช้จะต้องออกแบบให้มีค่าเท่ากับ

$$R_n = R(2^{n-1}) \tag{7.47}$$

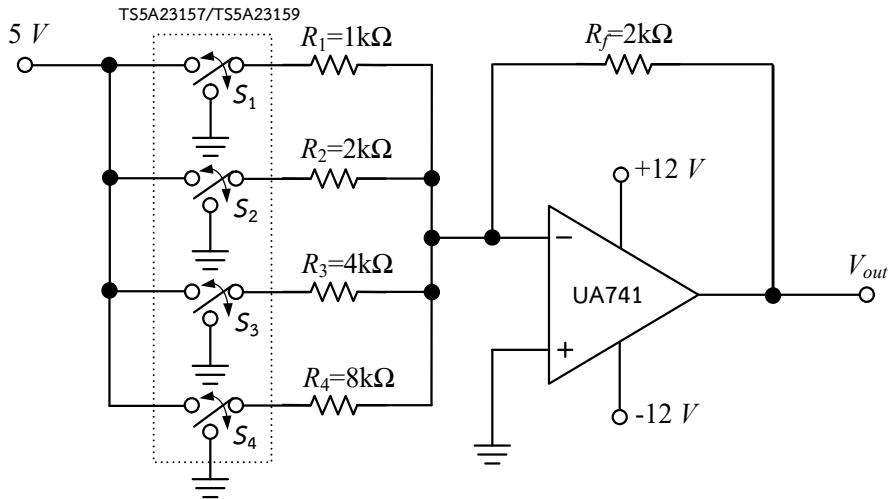
เมื่อ  $n$  คือ จำนวนบิตและลำดับของจำนวนตัวต้านทานที่ใช้ ( $n=1,2,3,\dots,N$ ) จะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานที่ต่อกับขาอินพุตลบในแต่ละตัว จะมีค่าเพิ่มขึ้นทีละ 2 เท่า ในทุก ๆ หลัก ที่เพิ่มขึ้นของสัญญาณอินพุตที่เป็นสัญญาณดิจิทัล ดังนั้นสามารถหาค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรในรูปที่ 7.7 ได้คือ

$$V_{out} = \left( \frac{-V_{ref} \times R_f}{R} \right) \sum_{i=0}^{i=N-1} \frac{b_i}{2^{(n-1)-i}} \tag{7.48}$$

เมื่อ  $b_i$  คือ ลำดับของจำนวนบิตที่ป้อนให้กับวงจรแอนะล็อกสวิตช์ ซึ่งต้องสอดคล้องกับจำนวนตัวต้านทานที่ใช้ตามสมการที่ (7.47)

ตัวอย่างที่ 7.3

จงหาค่าแรงดันเอาต์พุต  $V_{out}$  จากวงจรดังรูป เมื่อข้อมูลบิตดิจิทัลที่ทำการควบคุมการทำงานของสวิตช์  $S_1, S_2, S_3$  และ  $S_4$  มีค่าเท่ากับ 0110 และ 1010



(ธน์สร์, 2565)

**วิธีทำ** จากโจทย์จะเห็นได้ว่าวงจรในรูป คือ วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อกแบบ Binary weight resistor ที่ต่อร่วมกับวงจรแอนะล็อกสวิตช์ เพื่ออำนวยความสะดวกให้กับวงจร โดยไม่จำเป็นต้องทำการเปลี่ยนแปลงวงจรจากการทำงานของสวิตช์  $S_1, S_2, S_3$  และ  $S_4$  แต่จะใช้บิตข้อมูลดิจิทัลมาควบคุมการทำงานแทนสวิตช์ได้ ดังนั้นจากวงจรสามารถหาค่าแรงดันเอาต์พุต  $V_{out}$  ได้โดยอาศัยสมการที่ (7.48)

$$V_{out} = \left( \frac{-V_{ref} \times R_f}{R} \right) \sum_{i=0}^{i=N-1} \frac{b_i}{2^{(n-1)-i}}$$

จากโจทย์ เมื่อค่าแรงดันอ้างอิง มีค่าเท่ากับ  $5\text{ V}$  ค่าความต้านทาน  $R_f = 2\text{ k}\Omega$  ค่าความต้านทาน  $R = 1\text{ k}\Omega$  และ  $N = 4$  จะได้

$$V_{out} = \left( \frac{-5\text{ V} \times 2\text{ k}\Omega}{1\text{ k}\Omega} \right) \sum_{i=0}^{i=3} \frac{b_i}{2^{(n-1)-i}}$$

$$V_{out} = \left( \frac{-5\text{ V} \times 2\text{ k}\Omega}{1\text{ k}\Omega} \right) \left( \frac{b_3}{2^0} + \frac{b_2}{2^1} + \frac{b_1}{2^2} + \frac{b_0}{2^3} \right)$$

ในกรณีที่บิตข้อมูลดิจิทัลมีค่าเท่ากับ 0110 ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้ คือ

$$V_{out} = -10 V \left( \frac{0}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{0}{8} \right)$$

$$V_{out} = -10 V (0.75)$$

$$V_{out} = -7.5 V$$

ในกรณีที่บิตข้อมูลดิจิทัลมีค่าเท่ากับ 1010 ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้ คือ

$$V_{out} = -10 V \left( \frac{1}{1} + \frac{0}{2} + \frac{1}{4} + \frac{0}{8} \right)$$

$$V_{out} = -10 V (1.25)$$

$$V_{out} = -12.5 V$$

**ตอบ** จากวงจрдังรูป เมื่อข้อมูลบิตดิจิทัลที่ทำการควบคุมการทำงานของสวิตช์  $S_1, S_2, S_3$  และ  $S_4$  มีค่าเท่ากับ 0110 และ 1010 ค่าแรงดันเอาต์พุต  $V_{out}$  ที่ได้คือ  $-7.5 V$  และ  $-12.5 V$  ตามลำดับ

วงจรรวมแอนะล็อกสวิตช์สำหรับวงจรรวมแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อกแบบ Binary weight resistor ในรูปที่ 7.7 และตัวอย่างที่ 7.3 หากแทนค่าลำดับบิตของข้อมูลดิจิทัลตามลำดับ คือ ค่าบิตข้อมูลดิจิทัลเริ่มต้น มีค่าเท่ากับ 0000 (สวิตช์  $S_1, S_2, S_3$  และ  $S_4$  ทุกตัวมีสถานะ “เปิด”) ไปจนถึงค่าบิตข้อมูลดิจิทัลมีค่าเท่ากับ 1111 (สวิตช์  $S_1, S_2, S_3$  และ  $S_4$  ทุกตัวมีสถานะ “ปิด”) ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้แสดงดังตารางที่ 7.5

จากหัวข้อที่ 7.2 – หัวข้อที่ 7.4 จะเห็นได้ว่าวงจรรวมแอนะล็อกสวิตช์สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานสำหรับวงจรรวมสัญญาณและวงจรรวมสัญญาณทั้งแบบกลับเฟสและไม่กลับเฟส อีกทั้งนำไปประยุกต์ใช้งานสำหรับวงจรรวมแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อกได้ โดยทั่วไปสำหรับการออกแบบวงจรขั้นที่สูงขึ้นเพื่อให้สามารถนำไปสร้างเป็นวงจรรวมได้นั้น วงจรรวมแอนะล็อกสวิตช์มีประโยชน์อย่างมาก สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานสำหรับวงจรรวมกระแสแบบเต็มคลื่นโดยใช้วงจรรวมแอนะล็อกสวิตช์สายพานกระแส (Nonthaputha & Kumngern, 2019) หรือนำไปประยุกต์ใช้งานสำหรับวงจรรวมกำเนิดสัญญาณ (Kumngern et al., 2019) ระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์



(Nonthaputha & Kumngern, 2021) และวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ Kumngern et al., 2018) เป็นต้น

ตารางที่ 7.5 ค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรจากตัวอย่างที่ 7.3 (ธน์สัถ์, 2565)

$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	ค่าแรงดันเอาต์พุต $V_{out}$
0	0	0	1	-1.25 V
0	0	1	0	-2.50 V
0	0	1	1	-3.75 V
0	1	0	0	-5.00 V
0	1	0	1	-6.25 V
0	1	1	0	-7.50 V
0	1	1	1	-8.75 V
1	0	0	0	-10.00 V
1	0	0	1	-11.25 V
1	0	1	0	-12.50 V
1	0	1	1	-13.75 V
1	1	0	0	-15.00 V
1	1	0	1	-16.25 V
1	1	1	0	-17.50 V
1	1	1	1	-18.75 V

## 7.5 สรุป

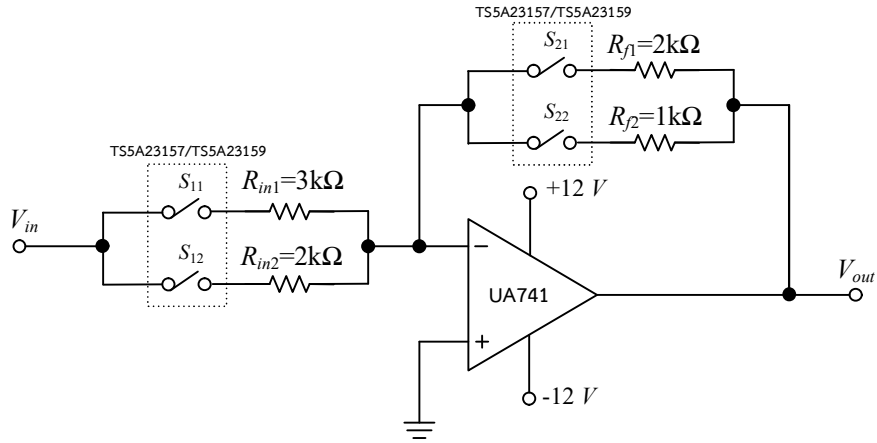
วงจรแอนะล็อกสวิตช์ คือ วงจรที่ใช้สัญญาณดิจิทัลหรือสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณควบคุมสำหรับการเปิด - ปิดการทำงานให้กับวงจรไฟฟ้าหรือวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เหมือนลักษณะการทำงานของสวิตช์ โดยที่ขนาดของสัญญาณทางด้านอินพุตจะต้องมีค่าเท่ากับขนาดของสัญญาณทางด้านเอาต์พุต ลักษณะการทำงานของวงจรจะประกอบไปด้วย 3 ส่วน คือ สัญญาณอินพุต สวิตช์ และสัญญาณเอาต์พุต การทำงานของสวิตช์ในวงจรนั้น สามารถควบคุมได้ด้วยสัญญาณดิจิทัลหรือสัญญาณแอนะล็อกก็ได้ แต่โดยส่วนใหญ่แล้วจะใช้สัญญาณดิจิทัลในการควบคุมการทำงานของสวิตช์ให้มีสถานะ เปิด - ปิด การทำงาน โดยสวิตช์ที่ถูกควบคุมได้นั้น จะใช้เป็นตัวควบคุมว่าให้มีหรือไม่มีสัญญาณเอาต์พุต สำหรับในกรณีที่มีสัญญาณเอาต์พุตนั้น ค่าของสัญญาณเอาต์พุตจะต้องมี

ค่าเท่ากับสัญญาณอินพุต ซึ่งการทำงานของสวิตช์จะต้องไม่ส่งผลกระทบต่อสัญญาณเอาต์พุต สำหรับการนำวงจรแอนะล็อกสวิตช์ไปใช้งานนั้น ต้องคำนึงถึงค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญที่เกี่ยวข้องคือ ค่าความต้านทานภายในของวงจรในขณะที่สวิตช์ของวงจรมีสถานะ “ปิด” และ “เปิด” ค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดและสูงสุดและค่าผลกระทบที่เกิดขึ้นในกรณีที่สวิตช์ของวงจรมีสถานะ “ปิด” สามารถสร้างได้จากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หลายชนิด เช่น ทรานซิสเตอร์ เอสซีอาร์ เฟต มอสเฟต และซีมอส เป็นต้น และได้มีการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย เช่น คอมพิวเตอร์ เครื่องมือวัด และวงจรทางด้านระบบสื่อสาร นอกเหนือจากนั้น วงจรแอนะล็อกสวิตช์ยังสามารถนำไปใช้งานแทนอุปกรณ์ประเภทรีเลย์ สวิตช์สองทางสำหรับวงจรอย่างง่าย วงจรขยายสัญญาณและวงจรรวมสัญญาณทั้งแบบกลับเฟสและไม่กลับเฟส อีกทั้งวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อกได้ โดยทั่วไปสำหรับการออกแบบวงจรขั้นที่สูงขึ้นเพื่อให้สามารถนำไปสร้างเป็นวงจรรวมได้นั้น วงจรแอนะล็อกสวิตช์มีประโยชน์อย่างมาก สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานสำหรับวงจรกรองความถี่ที่สามารถเลือกโปรแกรมเอาต์พุตให้วงจรกรองความถี่มีเอาต์พุตตามที่ต้องการได้จากการออกแบบโดยใช้อุปกรณ์แอกทิฟที่เรียกว่า *วงจขยายความนำถ่ายโอนสายพานกระแส* หรือนำไปประยุกต์ใช้งานสำหรับวงจรถักกำเนิดสัญญาณ วงจรควบคุม แบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ และวงจรมุมและคงค่าสัญญาณ เป็นต้น

### แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 7

1. จงอธิบายลักษณะการทำงานของวงจรแอนะล็อกสวิตช์
2. ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของวงจรแอนะล็อกสวิตช์ มีอะไรบ้าง จงอธิบาย
3. จากวงจรในรูป จงคำนวณหาค่าอัตราขยายเมื่อการทำงานของสวิตช์แต่ละตัวเป็นไปตามตารางนี้ (ธนัสถ์, 2565)

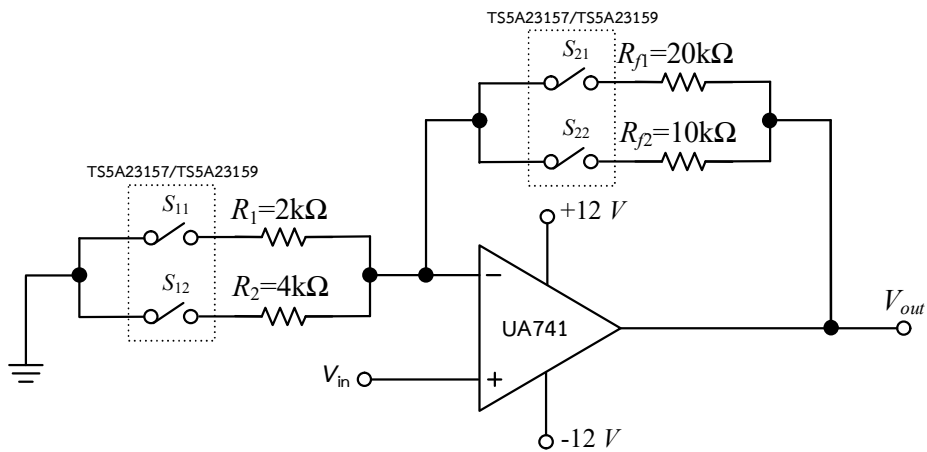
$S_{11}$	$S_{12}$	$S_{21}$	$S_{22}$
0	1	0	1
0	1	1	1
1	1	0	1
1	1	1	0
1	0	0	1



(ธน์สัถ์, 2565)

4. จงคำนวณหาค่าอัตราขยายจากวงจรในรูป เมื่อการทำงานของสวิตช์แต่ละตัวเป็นไปตามตารางนี้ (ธน์สัถ์, 2565)

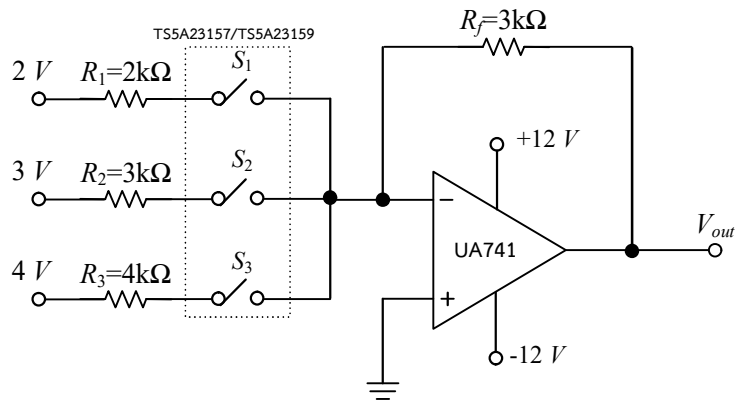
$S_{11}$	$S_{12}$	$S_{21}$	$S_{22}$
0	1	0	1
1	1	0	1
1	1	1	0
1	0	0	1



(ธน์สัถ์, 2565)

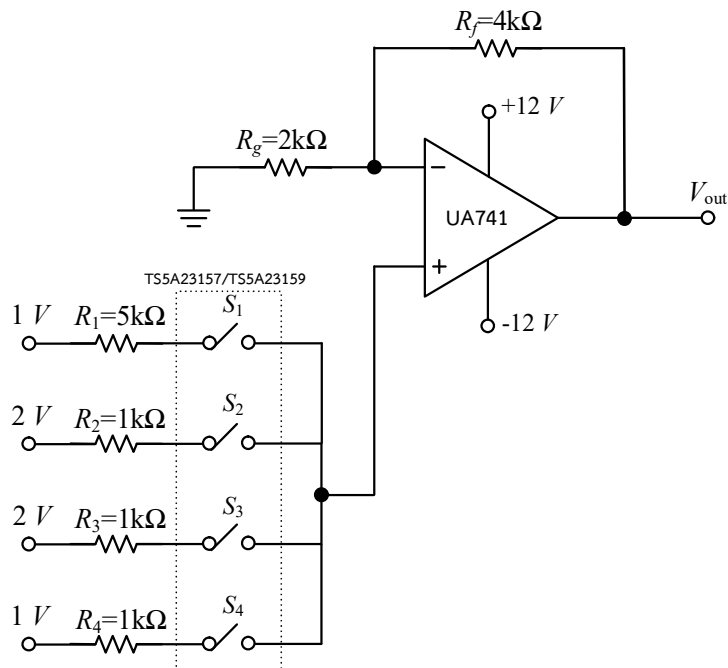
5. จากข้อที่ 4 เมื่อ  $V_{in}$  มีค่าเท่ากับ 5 โวลต์ จงหาค่าแรงดันเอาต์พุต  $V_{out}$  ในกรณีที่สัญญาณบิตข้อมูลดิจิทัลที่ควบคุมสวิตช์  $S_{11}, S_{12}, S_{21}$  และ  $S_{22}$  มีค่าเท่ากับ 1010 ตามลำดับ

6. จงออกแบบการป้อนสัญญาณดิจิทัลเพื่อควบคุมวงจรแอนะล็อกสวิตช์สำหรับไอซีเบอร์ TS5A23157/ TS5A23159 ที่นำมาประยุกต์ใช้งานสำหรับวงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส และวงจรนี้ต้องการอัตราขยายของวงจรเท่ากับ 20 เท่า
7. จงหาค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรดังรูป เมื่อสัญญาณบิตข้อมูลดิจิทัลที่ควบคุมสวิตช์  $S_1, S_2$  และ  $S_3$  มีค่าเท่ากับ 111



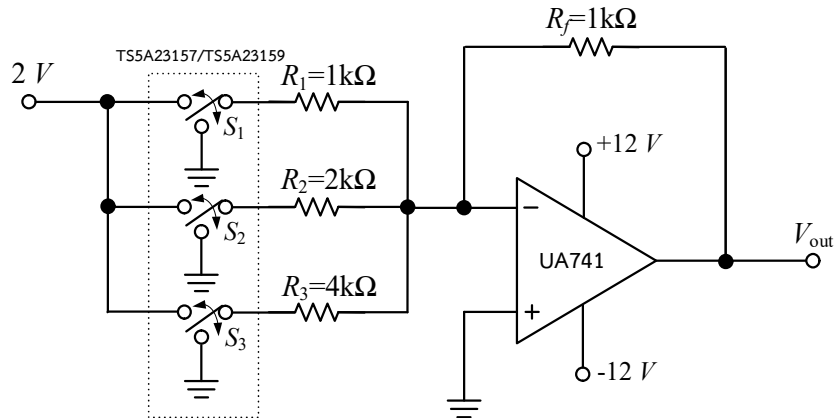
(ธน์สถ์, 2565)

8. จากรูป เมื่อสัญญาณบิตข้อมูลดิจิทัลที่ควบคุมสวิตช์  $S_1, S_2, S_3$  และ  $S_4$  มีค่าเท่ากับ 0111 จงหาค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจร



(ธน์สถ์, 2565)

9. จงหาค่าแรงดันเอาต์พุต  $V_{out}$  จากวงจรดังรูป เมื่อข้อมูลบิตดิจิทัลที่ทำการควบคุมการทำงานของสวิตช์  $S_1, S_2$  และ  $S_3$  มีค่าเท่ากับ 110 ตามลำดับ



(ธนัสถ์, 2565)

10. จงออกแบบวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อกแบบ Binary weight resistor ต่อร่วมกับวงจรแอนะล็อกสวิตช์ โดยใช้สัญญาณดิจิทัลจำนวน 4 บิต เป็นสัญญาณควบคุมการทำงานของวงจรแอนะล็อกสวิตช์ ทำให้ได้สัญญาณเอาต์พุต  $V_{out}$  เท่ากับ 25 โวลต์

### บรรณานุกรม

Analog Devices. (2021). *Analog switch*.

<https://www.analog.com>

Horn, D. (1990). *Analog switches: applications and projects* (1st ed.). TAB Books Blue Ridge Summit.

James, M. F. (2021). *Operational amplifiers & linear integrated circuits: Theory and application* (3rd ed.). Creative Commons.

Kumngern, M., Nonthaputha, T., & Khateb, F. (2018). Low power sample and hold circuits using current conveyor analogue switches. *IET Circuits, Devices & Systems*, 12, 397 - 402.

Kumngern, M., Nonthaputha, T., & Khateb, F. (2019). Arbitrary waveform generators using current-controlled current conveyor transconductance amplifier and current conveyor analog switches. *Journal of Circuits, Systems, and Computers*, 27, 1950179-1 - 1950179-20.

- Maxim integrated. (2021). *Low-voltage single-supply dual SPST/SPDT analog switches*.  
<https://www.datasheets.maximintegrated.com>
- Moore, S. (1991). *Designing with analog switches*. Marcel Dekker.
- Nonthaputha, T., Kumngern, M., & Moungnoul, P. (2016). CMOS D/A converter using current conveyor analogue switches. *International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS)*. (pp. 1-4). IEEE.
- Nonthaputha, T., & Kumngern, M. (2019). CMOS programmable full-wave rectifier using current conveyor analogue switches. *International Conference on ICT and Knowledge Engineering (ICT&KE)*. (pp. 1–4). IEEE.
- Nonthaputha, T., & Kumngern, M. (2021). CMOS programmable PID controller circuit based analogue switches. *Przeglad Elektrotechniczny*, 07, 35-41.
- NXP Semiconductor. (2021). *Analog switch*.  
<https://www.nxp.com>
- On Semiconductor. (2000). *Analog switches*, Semiconductor Components Industries.
- ST Microelectronics. (2021). *Analog switch*.  
<https://www.st.com>
- Texas Instruments. (2021). *Analog switch guide*.  
<https://www.ti.com>



## บรรณานุกรม

- Abuelmaatti, M. T. (2001). New ASK/FSK/PSK/QAM wave generator using multiple-output operational transconductance amplifiers. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 48, 487–490.
- Abuelmaatti, M. T. (2002). New ASK/FSK/PSK/QAM wave generator using a single current-controlled multiple output current conveyor. *International Journal of Electronics*, 89, 35–43.
- All about electronics. (2021). *Wien bridge oscillator (using op-amp) explained*.  
<https://www.youtube.com/watch?v=gbUXbaxvX94>
- Analog Devices. (2021). *AD650 data sheet*.  
<https://www.analog.com>
- Analog Devices. (2021). *Analog switch*.  
<https://www.analog.com>
- Barkhausen, H. (1935). *Electron Tubes and their Technical Applications*. Leipzig.
- Bertemes, F. P., Brown, B., & Wilson, A. J. (2000). A comparison of modified Howland circuits as current generators with current mirror type circuits. *Physiological Measurement*, 21, 1-6.
- Christopher S., Judy L. S. (2023). *Fabricating ICs*. Britannic
- Coughlin, R. F., & Driscoll F. F. (2001). *Operational amplifiers and linear integrated circuits*. Prentice-Hill.
- Eeeguide. (2022). *Square wave generator using op-amp*.  
<https://www.eeeguide.com/square-wave-generator-using-op-amp/>
- Elprocus. (2021). *RC phase shift oscillator working and its applications*.  
<https://www.elprocus.com/rc-phase-shift-oscillator-circuit-using-bjt-frequency/>
- Fernando, S. M. (2007). *Electrical bioimpedance cerebral monitoring: Fundamental steps towards clinical application*. Chalmers University of Technology.



- Franco, S. (2009). *Design with operational amplifiers and analog integrated circuits* (3rd ed.). McGraw-Hill.
- Gaensslen, F., Rideout, V., Walker, E. & Walker, J. (1977). Very small MOSFET's for low temperature operation. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 24, 218.
- Horn, D. (1990). *Analog switches: applications and projects* (1st ed.). TAB Books Blue Ridge Summit.
- Huijsing, J. (2011). *Operational amplifiers: Theory and design*. Springer.
- James, M. F. (2021). *Operational amplifiers & linear integrated circuits: Theory and application* (3rd ed.). Creative Commons.
- Johns, D., & Martin, K. (1996). *Analog integrated circuit design*. John Wiley & Sons.
- Kaewpoonsuk, A., & Rerkratn, A. (2017). Op-amps based schmitt trigger with controllable threshold voltage and its application to voltage-to-period converter. *International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*. (pp. 314-317). IEEE.
- Kumngern, M., & Nonthaputha, T. (2017). BFSK/FM signal generator circuits. *International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer, and Optimization Techniques (ICEECCOT)*. (pp. 1 – 4). IEEE.
- Kumngern, M., Nonthaputha, T., & Khateb, F. (2018). Low power sample and hold circuits using current conveyor analogue switches. *IET Circuits, Devices & Systems*, 12, 397 - 402.
- Kumngern, M., Nonthaputha, T., & Khateb, F. (2019). Arbitrary waveform generators using current-controlled current conveyor transconductance amplifier and current conveyor analog switches. *Journal of Circuits, Systems, and Computers*, 27, 1950179-1 - 1950179-20.
- Lindberg, E. (2010). The Barkhausen criterion (Observation?). *International Conference on IEEE Workshop on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems (NDES2010)*. (pp. 15–18). IEEE.
- Lindberg, E. (2012). The Barkhausen criterion. *International Conference on ELECTRONICS' 2012*. (pp. 1 – 50). IEEE.

- Maxim integrated. (2021). *Low-voltage single-supply dual SPST/SPDT analog switches*.  
<https://www.datasheets.maximintegrated.com>
- McGille, C. D., & Cooper, G. R. (1984). *Continuous and discrete signal and system analysis* (2nd ed.). CBS College Publishing.
- Moore, G. E. (1965). Cramming more components onto integrated circuits. *Electronics*, 38, 114-117.
- Moore, S. (1991). *Designing with analog switches*. Marcel Dekker.
- Muhammad, H. R. (2011). *Microelectronic circuits: Analysis and design* (2nd ed.). Cengage Learning.
- Naik, N. S. (2022). *Op-amp as square wave generator*.  
<https://www.youtube.com/watch?v=Wh1jU3alWMk>
- Naik, N. S. (2022). *Op-amp as triangular wave generator*.  
<https://www.youtube.com/watch?v=hPp1KAl6xPg>
- Nonthaputha, T., & Kumngern, M. (2019). CMOS programmable full-wave rectifier using current conveyor analogue switches. *International Conference on ICT and Knowledge Engineering (ICT&KE)*. (pp. 1–4). IEEE.
- Nonthaputha, T., & Kumngern, M. (2021). CMOS programmable PID controller circuit based analogue switches. *Przeglad Elektrotechniczny*, 7, 35-41.
- Nonthaputha, T., & Kumngern, M. (2021). CMOS single input multiple output universal biquad filter current-mode using only OTAs. *Przeglad Elektrotechniczny*, 11, 64-68.
- Nonthaputha, T., Kumngern, M., & Lerkvaranyu, S. (2016). CMOS sample-and-hold circuit using current conveyor analogue switch. *IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems*. (pp. 1 – 4)
- Nonthaputha, T., Kumngern, M., & Moungnoul, P. (2016). CMOS D/A converter using current conveyor analogue switches, *International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems*, (pp. 1-4).
- Nonthaputha, T., Kumngern, M. & Thepnarin, N. (2020). A simple and accurate CMOS sample-and-hold circuit using dual output-OTA. *Przeglad Elektrotechniczny*, 10, 163-166.

- NXP Semiconductor. (2021). *Analog switch*.  
<https://www.nxp.com>
- On Semiconductor. (2000). *Analog switches*, Semiconductor Components Industries.
- On Semiconductor. (2023). *2N3055(NPN) data sheet*.  
<https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/2n3055-d.pdf>
- Philips Semiconductors Linear Products. (2021). *NE/SE566 function generator product specification*.  
<https://www.datasheetcatalog.com>
- Premont, C., Abouchi, N., Grisel, R. & Chante, J. P. (1998). A current conveyor-based high-frequency analog switch. *IEEE Transactions on Circuits and Systems-I*, 45, 298-300.
- Ramakant, A. G. (2011). *Op-amps and linear integrated circuits* (4th ed.). Prentice Hall International.
- Ramon, V. P. (2018). *RC Phase-Shift Oscillators*. Instituto Nacional de Investigación Y Capacitación de Telecomunicaciones. Peru.
- Razavi, B. (1997). Design of sample-and-hold amplifiers for high-speed low voltage A/D converters. *IEEE Custom Integrated Circuits Conference*. (pp. 59 – 66).
- Razavi, B. (2017). *Design of analog CMOS integrated circuits* (2nd ed.). McGraw-Hill Education.
- Richard, C. J. (2000). *Microelectronic circuit design* (4th ed.). McGraw-Hill.
- Rudy, V. D. P. (2003). *CMOS Integrated analog-to-digital and digital-to-analog converters* (2th ed.). Kluwer Academic Publishers.
- Sah, T. (1964). Characteristics of the metal-oxide-semiconductor transistor. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 11, 324-325.
- Seoane, F., Bragos, R., & Lindecrantz, K. (2007). *Current source for wideband multifrequency*. Electrical Bioimpedance Measurements.
- Sergio, F. (2003). *Design with operational amplifiers and analog integrated circuits*. McGraw Hill Higher Education.

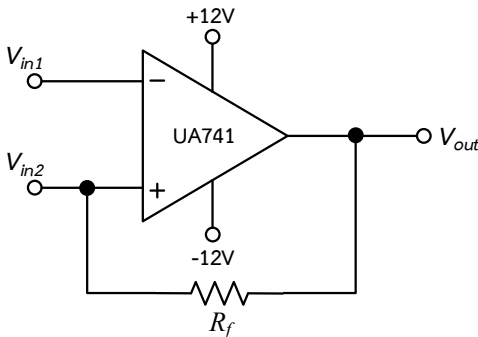
- Shilov, A. (2022). *TSMC roadmap update: N3E in 2024, N2 in 2026, major changes incoming*. Anandtech.
- Shilov, A. (2023). *Samsung update foundry roadmap: 2nm in 2025, 1.4nm in 2027*. Anandtech.
- Steve, M. (2011). *Using the AD650 voltage-to-frequency converter as a frequency-to-voltage converter*. Analog Devices.
- ST Microelectronics. (2021). *Analog switch*.  
<https://www.st.com>
- Stojcev, M., Toki, T. & Milentijevi, I. (2005). The limits of semiconductor technology and oncoming challenges in computer microarchitectures and architectures. *Facta universitatis - series: Electronics and Energetics*, 17, 285-312. 10.2298/FUEE0403285S.
- Texas Instruments. (2021). *Analog switch guide*.  
<https://www.ti.com>
- Texas Instruments. (2021). *LF198 -N, LF298, LF398-N, LF198A-N, LF398A-N data sheet*.  
<https://www.ti.com>
- Texas Instruments. (2021). *LMx31x precision voltage-to-frequency converters data sheet*.  
<https://www.ti.com>
- Texas Instruments. (2021). *OPA615 data sheet*.  
<https://www.ti.com>
- Texas Instruments. (2021). *UA741 data sheet*.  
[https://www.ti.com/product/UA741?utm\\_source=supplyframe&utm\\_medium=SEP&utm\\_campaign=not\\_alldatasheet&DCM=yes&dclid=CMmX8u\\_6ovgCFWGhSwUdosAKtQ#params](https://www.ti.com/product/UA741?utm_source=supplyframe&utm_medium=SEP&utm_campaign=not_alldatasheet&DCM=yes&dclid=CMmX8u_6ovgCFWGhSwUdosAKtQ#params)
- Thomas, L. F. (2012). *Electronic devices: Electron flow version (9th ed.)*. Prentice Hall International.
- Toumazou, C., Lidgley, F. J., & Haigh, D. G. (1998). *Analogue IC design: The current-mode approach*. Peter Peregrinus.
- จิรยุทธ์ มหัทธกุล. (2553). *การออกแบบวงจรรวมแอนะล็อก*. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร. พิมพ์ครั้งที่ 3.

- ธนันต์ ศรีสกุล. (2557). *ออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วย OrCAD*. วิตตี้กรุ๊ป.
- มนตรี คำเงิน. (2558). *การออกแบบวงจรมอส*. คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- มนตรี ศิริปรัชญานันท์ และ ธนุศักดิ์ อรุณไพโร. (2558). *ออปแอมป์และลิเนียร์ไอซี*. ซีเอ็ดยูเคชั่น.
- วรากร เกษมสุวรรณ. (2553). *การวิเคราะห์วงจรซีมอสแบบแอนะล็อก*. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. พิมพ์ครั้งที่ 2.

ภาคผนวก

ใบงาน

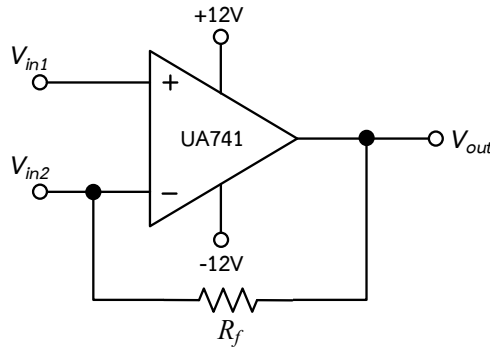


ใบงานที่ 1 เรื่อง การต่อวงจรออปแอมป์พื้นฐานเบื้องต้น	
<b>วัตถุประสงค์</b>	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. เข้าใจการต่อวงจรออปแอมป์พื้นฐานเบื้องต้น</li> <li>2. อธิบายความแตกต่างระหว่างการต่อออปแอมป์ที่มีการป้อนกลับแบบบวกและแบบลบ</li> <li>3. อธิบายการต่อออปแอมป์ที่มีอัตราขยายเท่ากับ 1</li> <li>4. อธิบายการต่อออปแอมป์ที่มีอัตราขยายไม่เท่ากับ 1</li> <li>5. เข้าใจการใช้งานออปแอมป์อย่างถูกวิธีและเข้าใจการหาอัตราขยายของออปแอมป์</li> </ol>	
<b>เครื่องมือและอุปกรณ์</b>	<b>จำนวน</b>
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ไอซีออปแอมป์เบอร์ UA741</li> <li>2. ตัวต้านทานค่า 10 k<math>\Omega</math></li> <li>3. ตัวต้านทานค่า 100 k<math>\Omega</math></li> <li>4. ตัวต้านทานค่า 200 k<math>\Omega</math></li> <li>5. มัลติมิเตอร์</li> <li>6. Oscilloscope พร้อมสาย</li> <li>7. Power supply พร้อมสาย</li> <li>8. Signal generator พร้อมสาย</li> <li>9. แผงวงจรทดลอง</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1 ตัว</li> <li>2 ตัว</li> <li>2 ตัว</li> <li>2 ตัว</li> <li>1 เครื่อง</li> <li>1 เครื่อง</li> <li>1 เครื่อง</li> <li>1 เครื่อง</li> <li>1 อัน</li> </ol>
<b>ลำดับขั้นตอนการทดลอง</b>	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ต่อวงจรดังรูปที่ บ1.1</li> </ol> <div style="text-align: center;">  <p>รูปที่ บ1.1 (ธันส์ถ์, 2565)</p> </div> <ol style="list-style-type: none"> <li>2. ป้อนแรงดัน <math>V_{in1}</math> และ <math>V_{in2}</math> และทำการเปลี่ยนค่า <math>R_f</math> ตามตาราง ใช้มัลติมิเตอร์วัดแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต <math>V_{out}</math> แล้วบันทึกผลการทดลองในตาราง</li> </ol>	



$V_{in1}$	$V_{in2}$	$R_f$	$V_{out}$ (V)	$V_{in1}$	$V_{in2}$	$R_f$	$V_{out}$ (V)
1 V	1 V	10 k $\Omega$		1 V	2 V	200 k $\Omega$	
1 V	1 V	100 k $\Omega$		2 V	1 V	100 k $\Omega$	
1 V	1 V	200 k $\Omega$		2 V	1 V	200 k $\Omega$	
1 V	2 V	100 k $\Omega$		2 V	2 V	200 k $\Omega$	

3. ต่อวงจรดังรูปที่ บ1.2

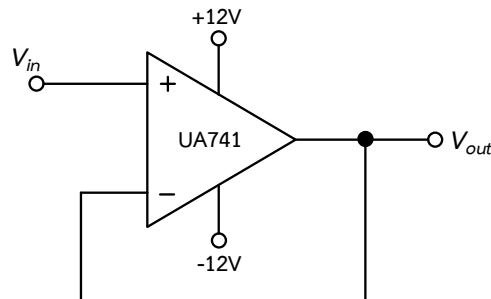


รูปที่ บ1.2 (ธনীส์ถ์, 2565)

4. ป้อนแรงดัน  $V_{in1}$  และ  $V_{in2}$  และทำการเปลี่ยนค่า  $R_f$  ตามตาราง ใช้มัลติมิเตอร์วัดแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต  $V_{out}$  แล้วบันทึกผลการทดลองในตารางที่ บ1.2

$V_{in1}$	$V_{in2}$	$R_f$	$V_{out}$ (V)	$V_{in1}$	$V_{in2}$	$R_f$	$V_{out}$ (V)
1 V	1 V	10 k $\Omega$		1 V	2 V	200 k $\Omega$	
1 V	1 V	100 k $\Omega$		2 V	1 V	100 k $\Omega$	
1 V	1 V	200 k $\Omega$		2 V	1 V	200 k $\Omega$	
1 V	2 V	100 k $\Omega$		2 V	2 V	200 k $\Omega$	

5. ต่อวงจรดังรูปที่ บ1.3

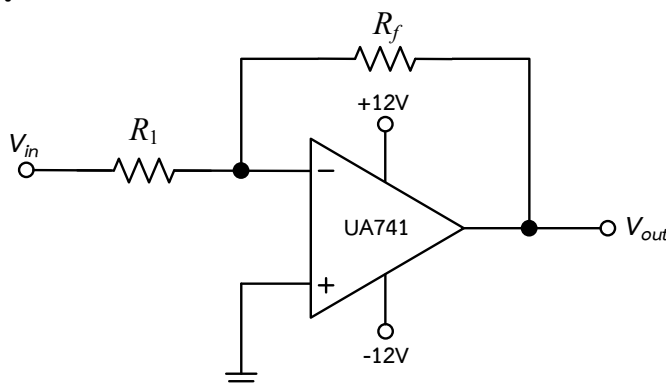


รูปที่ บ1.3 (ธনীส์ถ์, 2565)

6. ทำการป้อนแรงดัน  $V_{in}$  ตามตารางและใช้มัลติมิเตอร์วัดแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต  $V_{out}$  แล้วบันทึกผลการทดลองในตาราง

$V_{in}$	$V_{out}$ (V)	$V_{in}$	$V_{out}$ (V)
0.5 V		2 V	
1 V		2.5 V	
1.5 V		3 V	

7. ต่อวงจรดังรูปที่ บ1.4



รูปที่ บ1.4 (ธนัสต์, 2565)

8. ทำการป้อนแรงดันอินพุต  $V_{in}$  ตามตารางและใช้มัลติมิเตอร์วัดแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต  $V_{out}$  แล้วบันทึกผลการทดลองพร้อมทั้งหาค่าอัตราขยายแรงดัน  $A_v$  ในตาราง

$V_{in}$	$R_1$	$R_f$	$V_{out}$ (V)	$A_v$
1 V	10 k $\Omega$	10 k $\Omega$		
1 V	10 k $\Omega$	100 k $\Omega$		
1 V	10 k $\Omega$	200 k $\Omega$		
1 V	200 k $\Omega$	100 k $\Omega$		
2 V	10 k $\Omega$	10 k $\Omega$		
2 V	10 k $\Omega$	100 k $\Omega$		
2 V	10 k $\Omega$	200 k $\Omega$		
2 V	200 k $\Omega$	100 k $\Omega$		

9. จากรูปที่ บ1.4 ทำการเปลี่ยนค่าแรงดันอินพุต  $V_{in}$  เป็นค่าแรงดันอินพุตรูปคลื่นไซน์ ขนาด 1  $V_{p-p}$  ค่าตัวต้านทาน  $R_f$  มีค่าเท่ากับ 100 k $\Omega$  และค่าตัวต้านทาน  $R_1$  มีค่าเท่ากับ 10 k $\Omega$

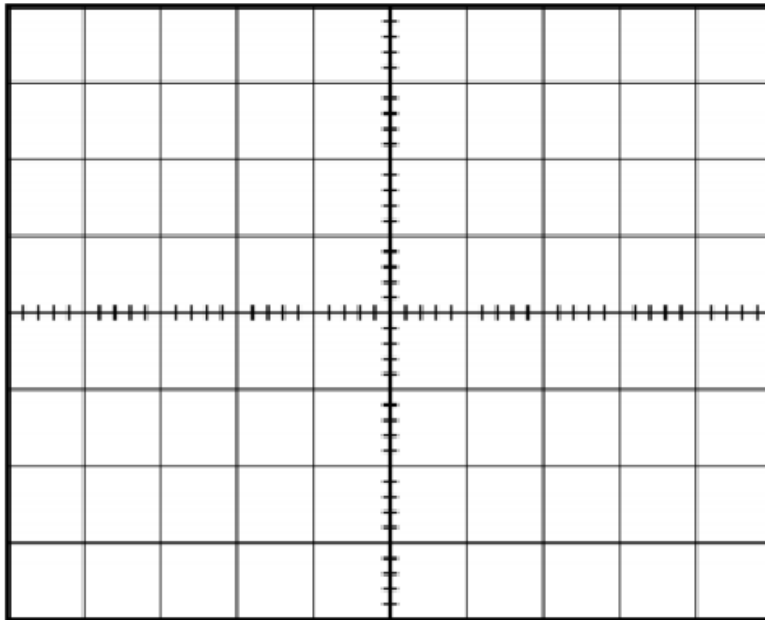


<b>ใบงานที่ 2</b> <b>เรื่อง วงจรเปรียบเทียบแรงดัน วงจรตรวจระดับสัญญาณค่าเข้าใกล้ศูนย์</b> <b>และวงจรตรวจระดับสัญญาณค่าไม่เข้าใกล้ศูนย์</b>	
<b>วัตถุประสงค์</b>	
<ol style="list-style-type: none"> <li>เข้าใจหลักการทำงานของวงจรเปรียบเทียบแรงดัน วงจรตรวจระดับสัญญาณค่าเข้าใกล้ศูนย์ และวงจรตรวจระดับสัญญาณค่าไม่เข้าใกล้ศูนย์</li> <li>อธิบายความแตกต่างของวงจรเปรียบเทียบแรงดัน วงจรตรวจระดับสัญญาณค่าเข้าใกล้ศูนย์ และวงจรตรวจระดับสัญญาณค่าไม่เข้าใกล้ศูนย์</li> </ol>	
<b>เครื่องมือและอุปกรณ์</b>	<b>จำนวน</b>
<ol style="list-style-type: none"> <li>ไอซีออปแอมป์เบอร์ UA741</li> <li>ตัวต้านทานค่า 2 k<math>\Omega</math></li> <li>ตัวต้านทานค่า 8 k<math>\Omega</math></li> <li>ตัวต้านทานค่า 20 k<math>\Omega</math></li> <li>ตัวต้านทานค่า 100 k<math>\Omega</math></li> <li>ตัวต้านทานค่า 200 k<math>\Omega</math></li> <li>มัลติมิเตอร์</li> <li>Oscilloscope พร้อมสาย</li> <li>Power supply พร้อมสาย</li> <li>Signal generator พร้อมสาย</li> <li>แผงวงจรทดลอง</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1 ตัว</li> <li>1 ตัว</li> <li>1 ตัว</li> <li>2 ตัว</li> <li>2 ตัว</li> <li>2 ตัว</li> <li>1 เครื่อง</li> <li>1 เครื่อง</li> <li>1 เครื่อง</li> <li>1 เครื่อง</li> <li>1 อัน</li> </ol>
<b>ลำดับขั้นตอนการทดลอง</b>	
<ol style="list-style-type: none"> <li>ต่อวงจรดังรูปที่ บ2.1</li> </ol>	
<p>รูปที่ บ2.1 (ธนส์ถ์, 2565)</p>	

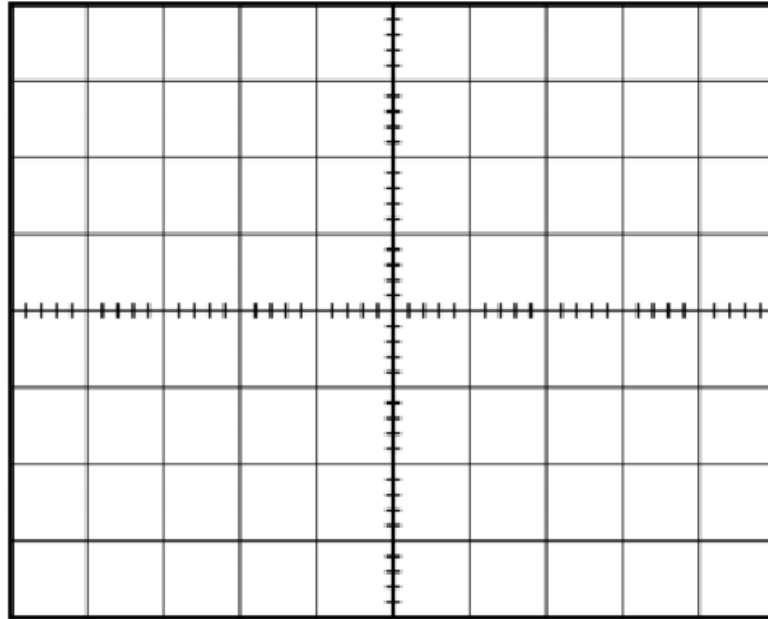
2. ป้อนแรงดัน  $V_1$  และ  $V_2$  และทำการเปลี่ยนค่าตัวต้านทาน  $R_1$ ,  $R_2$  และ  $R_L$  ตามตาราง ใช้มัลติมิเตอร์วัดค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต  $V_{out}$  แล้วบันทึกผลการทดลองในตาราง

$V_1$	$V_2$	$R_1$	$R_2$	$R_L$	$V_{out}$ (V)
1 V	1 V	100 k $\Omega$	100 k $\Omega$	20 k $\Omega$	
2 V	1 V	100 k $\Omega$	100 k $\Omega$	20 k $\Omega$	
3 V	1 V	100 k $\Omega$	100 k $\Omega$	20 k $\Omega$	
4 V	1 V	100 k $\Omega$	100 k $\Omega$	20 k $\Omega$	
1 V	2 V	100 k $\Omega$	100 k $\Omega$	20 k $\Omega$	
1 V	3 V	100 k $\Omega$	100 k $\Omega$	20 k $\Omega$	
1 V	4 V	200 k $\Omega$	200 k $\Omega$	20 k $\Omega$	

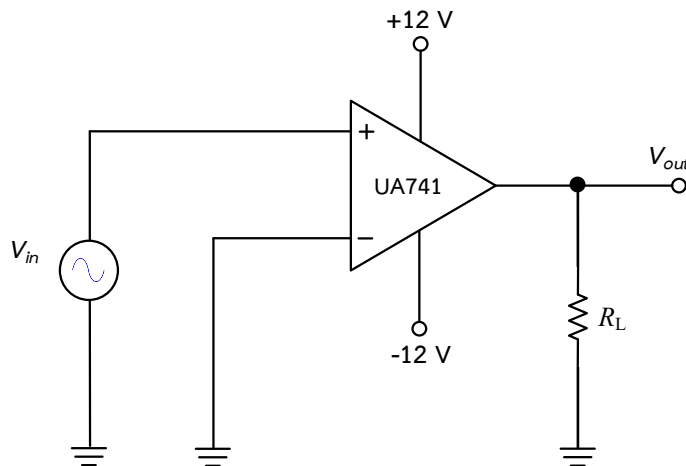
3. จากกรณีแรงดัน  $V_1$  มีค่าเท่ากับ 2 V และแรงดัน  $V_2$  มีค่าเท่ากับ 1 V .ใช้ Oscilloscope วัดค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต  $V_{out}$  เปรียบเทียบกับค่าแรงดัน  $V_1$  และ  $V_2$  บันทึกรูปภาพสัญญาณที่ได้



4. จากกรณีแรงดัน  $V_1$  มีค่าเท่ากับ 1 V และแรงดัน  $V_2$  มีค่าเท่ากับ 2 V .ใช้ Oscilloscope วัดค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต  $V_{out}$  เปรียบเทียบกับค่าแรงดัน  $V_1$  และ  $V_2$  บันทึกรูปภาพสัญญาณที่ได้

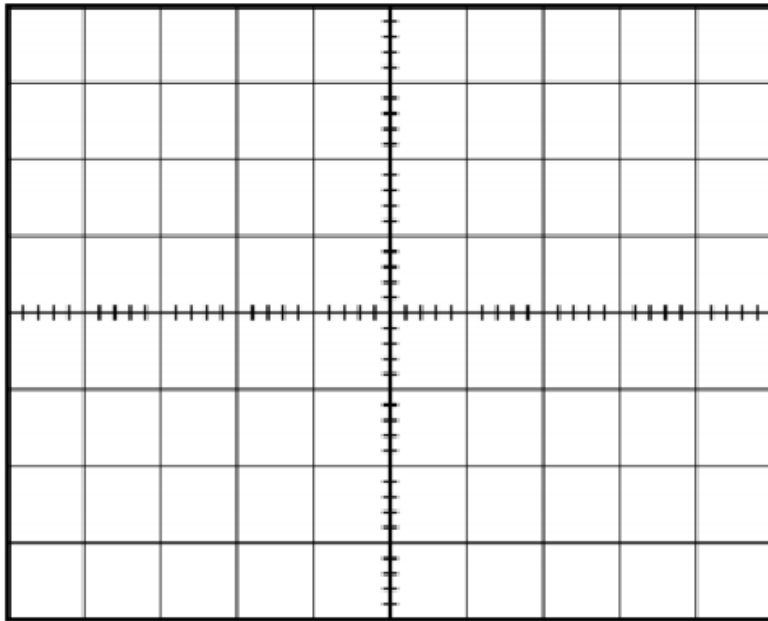


5. ต่ วงจรดังรูปที่ บ2.2

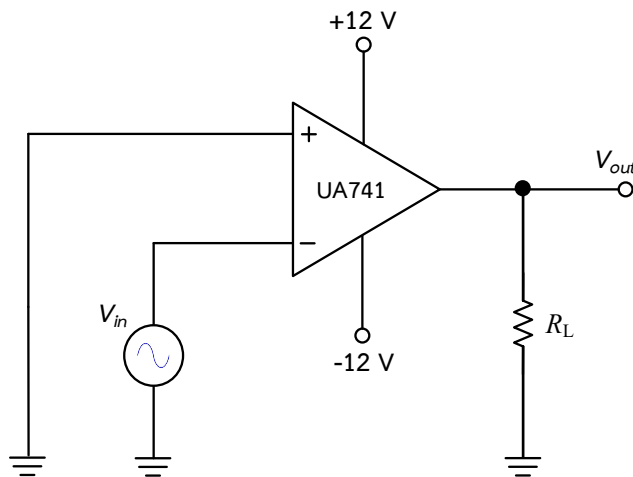


รูปที่ บ2.2 (ธนัสต์, 2565)

6. ป้อนค่าแรงดันอินพุต  $V_{in}$  เป็นค่าแรงดันอินพุตรูปคลื่นไซน์ ขนาด  $1 V_{p-p}$  ค่าตัวต้านทาน  $R_L$  มีค่าเท่ากับ  $20 k\Omega$
7. ทำการวัดค่าสัญญาณแรงดันอินพุต  $V_{in}$  เทียบกับค่าสัญญาณแรงดันเอาต์พุต  $V_{out}$  โดยใช้ Oscilloscope พร้อมทั้งบันทึกรูปภาพสัญญาณที่ได้

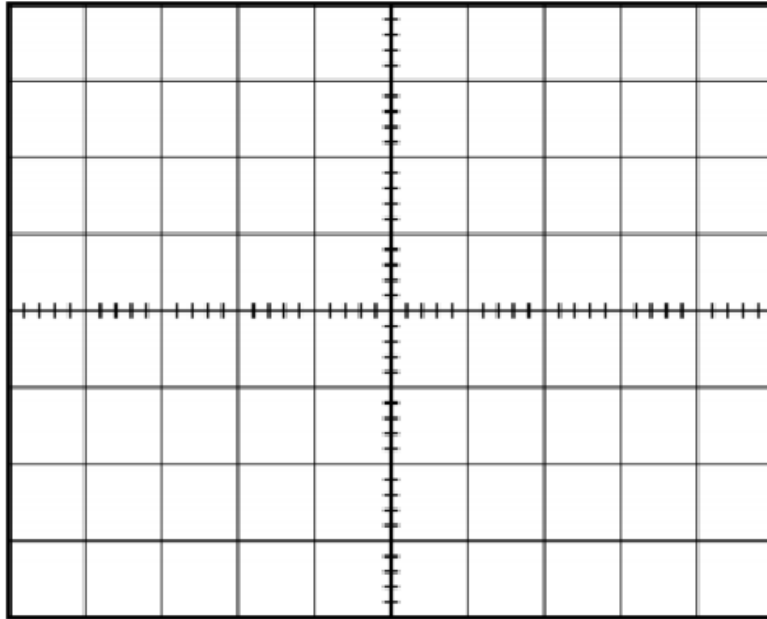


8. ต่ วงจรดังรูปที่ บ2.3

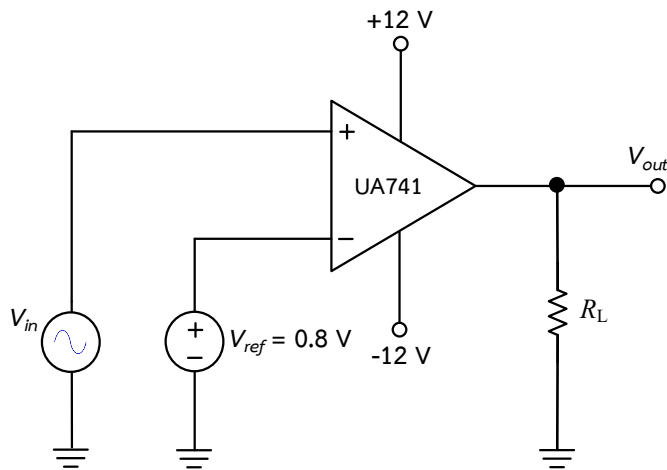


รูปที่ บ2.3 (ธน์สฎ, 2565)

9. ป้อนค่าแรงดันอินพุต  $V_{in}$  เป็นค่าแรงดันอินพุตรูปคลื่นไซน์ ขนาด  $1 V_{p-p}$  ค่าตัวต้านทาน  $R_L$  มีค่าเท่ากับ  $20 k\Omega$
10. ทำการวัดค่าสัญญาณแรงดันอินพุต  $V_{in}$  เทียบกับค่าสัญญาณแรงดันเอาต์พุต  $V_{out}$  โดยใช้ Oscilloscope พร้อมทั้งบันทึกรูปภาพสัญญาณที่ได้



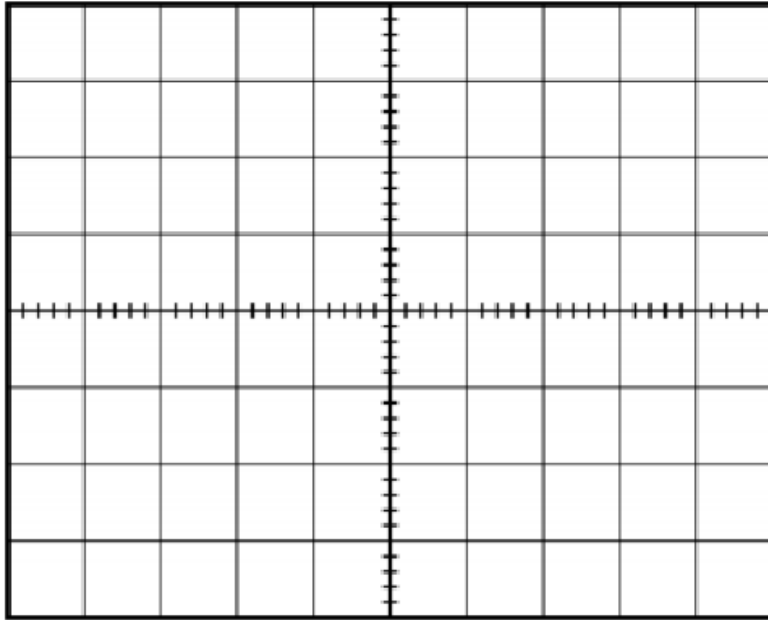
11. ต่อดังรูปที่ บ2.4



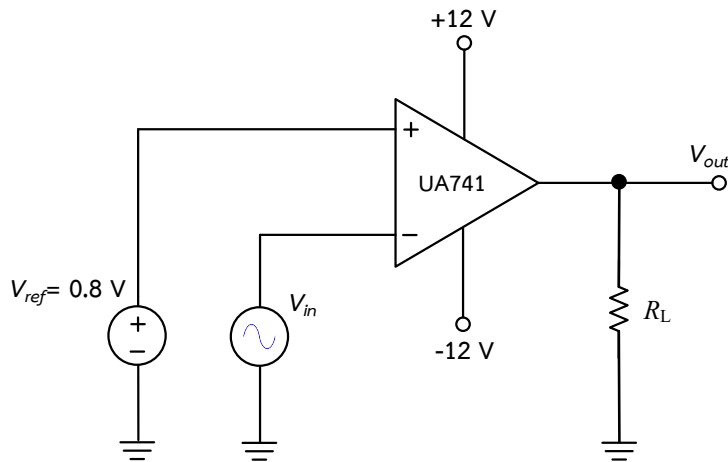
รูปที่ บ2.4 (ธนส์ถ์, 2565)

12. ป้อนค่าแรงดันอินพุต  $V_{in}$  เป็นค่าแรงดันอินพุตรูปคลื่นไซน์ ขนาด 1  $V_{p-p}$  ค่าตัวต้านทาน  $R_L$  มีค่าเท่ากับ 20 k $\Omega$  และปรับค่าแรงดันอ้างอิง  $V_{ref}$  เท่ากับ 0.8 V
13. ทำการวัดค่าสัญญาณแรงดันอินพุต  $V_{in}$  เทียบกับค่าสัญญาณแรงดันเอาต์พุต  $V_{out}$  โดยใช้ Oscilloscope พร้อมทั้งบันทึกรูปภาพสัญญาณที่ได้





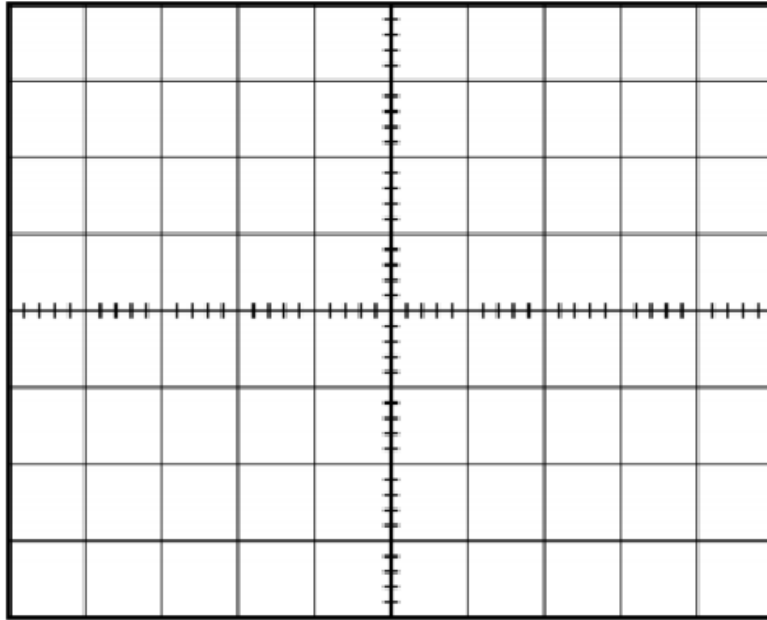
14. ต่อดังรูปที่ บ2.4



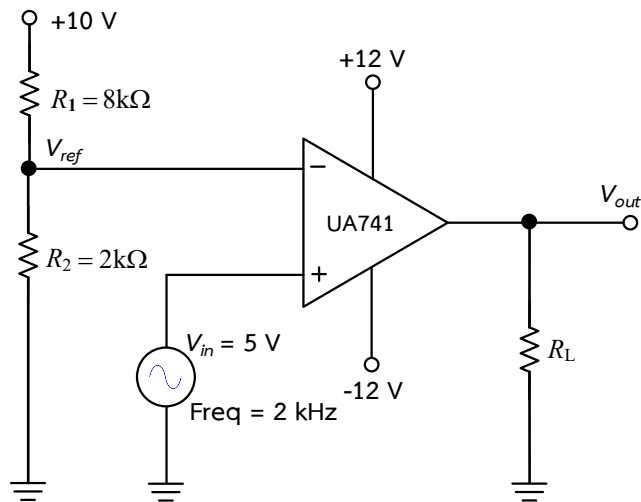
รูปที่ บ2.4 (ธนัสต์, 2565)

15. ป้อนค่าแรงดันอินพุต  $V_{in}$  เป็นค่าแรงดันอินพุตรูปคลื่นไซน์ ขนาด  $1 V_{p-p}$  ค่าตัวต้านทาน  $R_L$  มีค่าเท่ากับ  $20\text{ k}\Omega$  และปรับค่าแรงดันอ้างอิง  $V_{ref}$  เท่ากับ  $0.8\text{ V}$

16. ทำการวัดค่าสัญญาณแรงดันอินพุต  $V_{in}$  เทียบกับค่าสัญญาณแรงดันเอาต์พุต  $V_{out}$  โดยใช้ Oscilloscope พร้อมทั้งบันทึกรูปภาพสัญญาณที่ได้

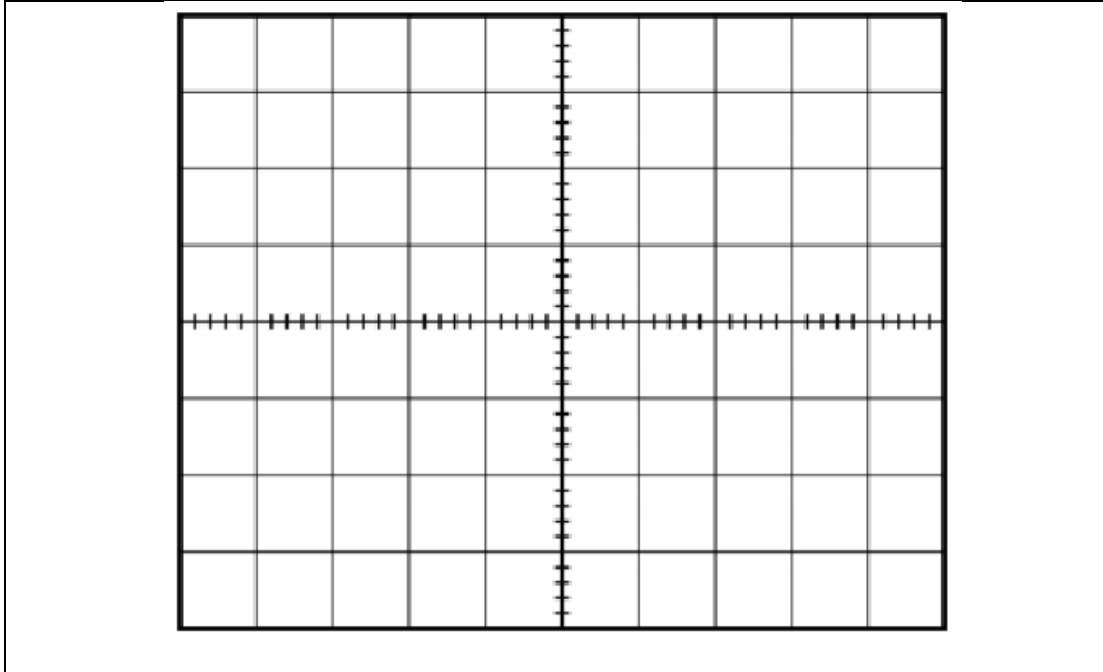


17. ต่อวงจรดังรูปที่ บ2.5



รูปที่ บ2.5 (ธนัสถ์, 2565)

18. ป้อนค่าแรงดันอินพุต  $V_{in}$  เป็นค่าแรงดันอินพุตรูปคลื่นไซน์ ขนาด  $5 V_{p-p}$  ความถี่  $2 \text{ kHz}$  ค่าตัวต้านทาน  $R_L$  มีค่าเท่ากับ  $20 \text{ k}\Omega$
19. ทำการวัดค่าสัญญาณแรงดันอินพุต  $V_{in}$  เทียบกับค่าสัญญาณแรงดันเอาต์พุต  $V_{out}$  โดยใช้ Oscilloscope พร้อมทั้งบันทึกรูปภาพสัญญาณที่ได้



สรุปผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

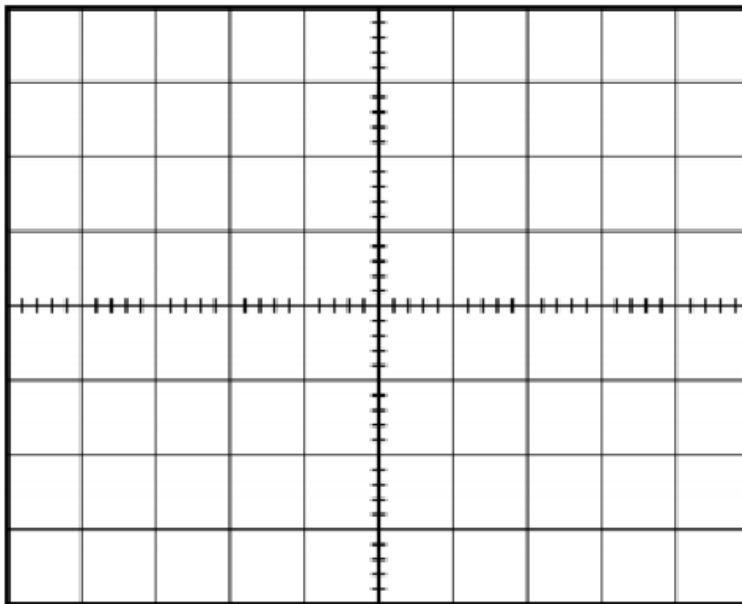
.....

.....

ใบงานที่ 3	
เรื่อง วงจรเปรียบเทียบเฟสของสัญญาณและวงจรจุดชนวนแบบขมิตต์	
<b>วัตถุประสงค์</b>	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. เข้าใจหลักการทำงานของวงจรเปรียบเทียบเฟสของสัญญาณและวงจรจุดชนวนแบบขมิตต์</li> <li>2. อธิบายการทำงานของวงจรเปรียบเทียบเฟสของสัญญาณและวงจรจุดชนวนแบบขมิตต์</li> </ol>	
<b>เครื่องมือและอุปกรณ์</b>	<b>จำนวน</b>
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ไอซีออปแอมป์เบอร์ UA741</li> <li>2. ตัวต้านทานค่า 10 k<math>\Omega</math></li> <li>3. ตัวต้านทานค่า 20 k<math>\Omega</math></li> <li>4. ตัวต้านทานค่า 100 k<math>\Omega</math></li> <li>5. ตัวต้านทานค่า 200 k<math>\Omega</math></li> <li>6. Oscilloscope พร้อมสาย</li> <li>7. Power supply พร้อมสาย</li> <li>8. Signal generator พร้อมสาย</li> <li>9. แผงวงจรทดลอง</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1 ตัว</li> <li>3 ตัว</li> <li>1 ตัว</li> <li>2 ตัว</li> <li>2 ตัว</li> <li>1 เครื่อง</li> <li>1 เครื่อง</li> <li>1 เครื่อง</li> <li>1 อัน</li> </ol>
<b>ลำดับขั้นตอนการทดลอง</b>	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ต่อวงจรดังรูปที่ บ3.1</li> </ol>	
รูปที่ บ3.1 (ธนัสต์, 2565)	

2. จากวงจรรูปที่ บ3.1 ป้อนค่าแรงดันอินพุต  $V_{in1}$  และ  $V_{in2}$  เป็นค่าแรงดันอินพุตรูปคลื่นไซน์ที่มีค่าขนาดแอมพลิจูด ค่าความถี่ ค่าตัวต้านทาน  $R_1$  ค่าตัวต้านทาน  $R_2$  และค่าตัวต้านทาน  $R_L$  ตามตาราง ใช้ Oscilloscope วัดสัญญาณเอาต์พุตพร้อมทั้งบันทึกรูปภาพสัญญาณเอาต์พุต  $V_{out}$  ที่ได้ทุกรูป

$V_{in1}$	$V_{in2}$	$R_1$	$R_2$	$R_L$
1 $V_{p-p}$ 50 Hz	1 $V_{p-p}$ 50 Hz	100 k $\Omega$	100 k $\Omega$	20 k $\Omega$
2 $V_{p-p}$ 50 Hz	1 $V_{p-p}$ 50 Hz	100 k $\Omega$	100 k $\Omega$	20 k $\Omega$
1 $V_{p-p}$ 50 Hz	2 $V_{p-p}$ 50 Hz	100 k $\Omega$	100 k $\Omega$	20 k $\Omega$
1 $V_{p-p}$ 50 Hz	1 $V_{p-p}$ 50 Hz	200 k $\Omega$	200 k $\Omega$	20 k $\Omega$



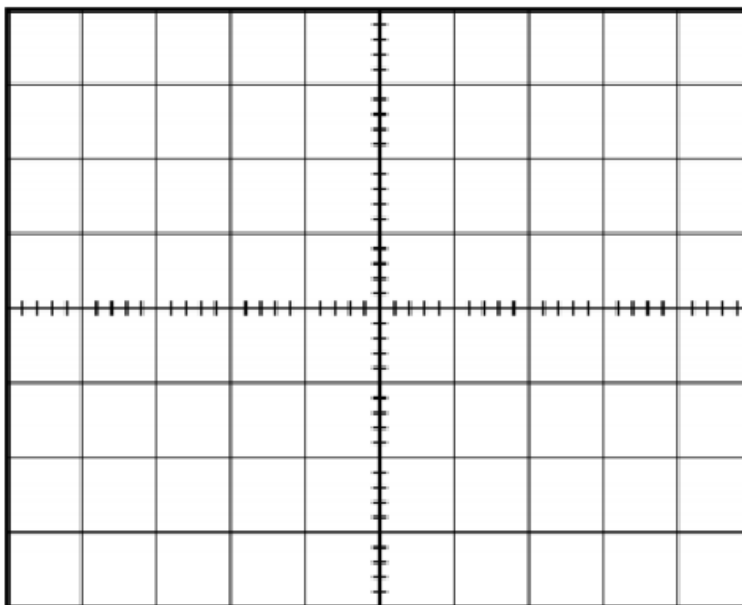
$V_{in1} = \dots\dots\dots$

$V_{in2} = \dots\dots\dots$

$R_1 = \dots\dots\dots$

$R_2 = \dots\dots\dots$

$R_L = \dots\dots\dots$



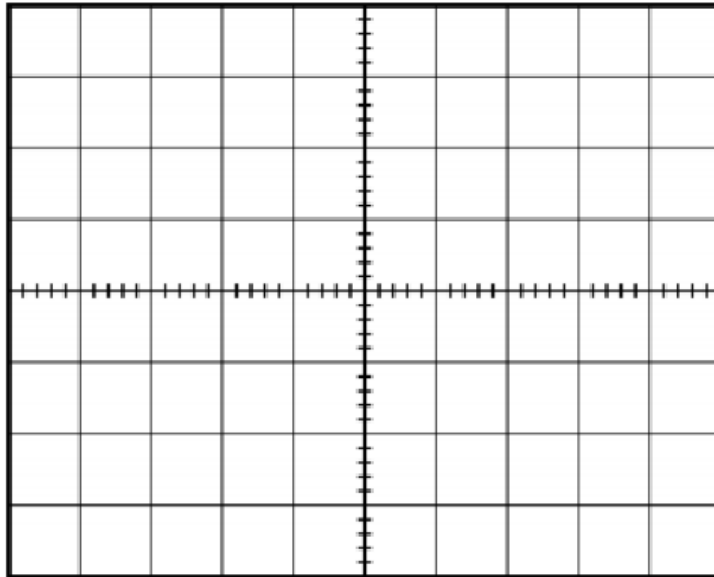
$V_{in1} = \dots\dots\dots$

$V_{in2} = \dots\dots\dots$

$R_1 = \dots\dots\dots$

$R_2 = \dots\dots\dots$

$R_L = \dots\dots\dots$



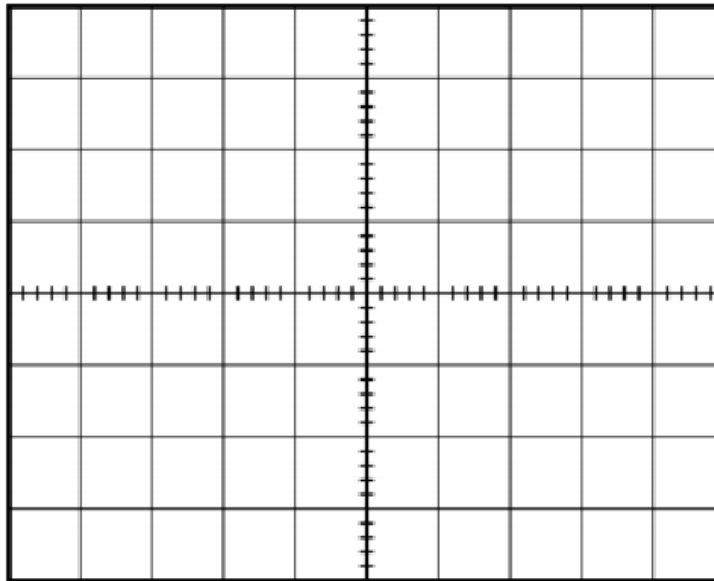
$V_{in1} = \dots\dots\dots$

$V_{in2} = \dots\dots\dots$

$R_1 = \dots\dots\dots$

$R_2 = \dots\dots\dots$

$R_L = \dots\dots\dots$



$V_{in1} = \dots\dots\dots$

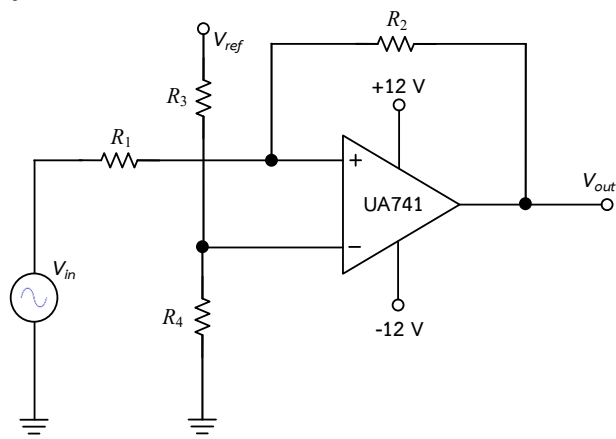
$V_{in2} = \dots\dots\dots$

$R_1 = \dots\dots\dots$

$R_2 = \dots\dots\dots$

$R_L = \dots\dots\dots$

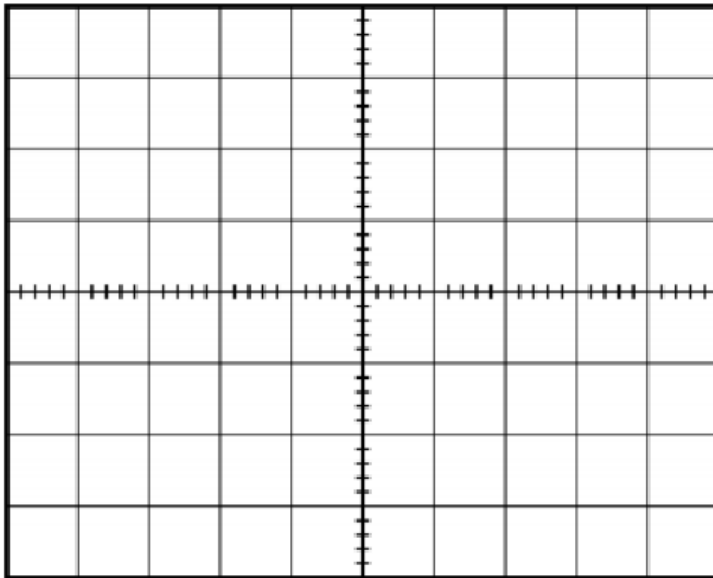
3. ต่อดังรูปที่ บ3.2



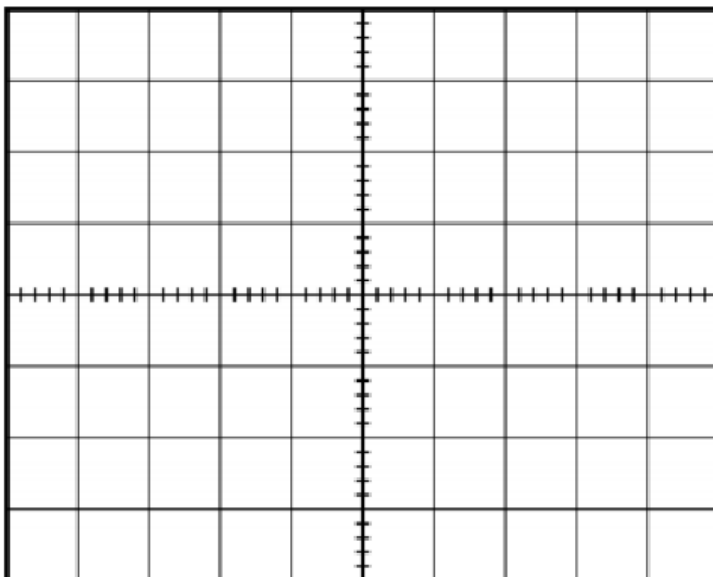
รูปที่ บ3.2 (ธน์สิทธิ์, 2565)

4. จากวงจรรูปที่ บ3.2 ป้อนค่าแรงดันอินพุต  $V_{in}$  เป็นค่าแรงดันอินพุตรูปคลื่นไซน์ที่มีค่าขนาดแอมพลิจูด ค่าความถี่ ค่าแรงดันอ้างอิง  $V_{ref}$  ค่าตัวต้านทาน  $R_1$  ค่าตัวต้านทาน  $R_2$  ค่าตัวต้านทาน  $R_3$  และค่าตัวต้านทาน  $R_4$  ตามตาราง ใช้ Oscilloscope วัดสัญญาณเอาต์พุตพร้อมทั้งบันทึกรูปภาพสัญญาณเอาต์พุต  $V_{out}$  ที่ได้ทุกรูป

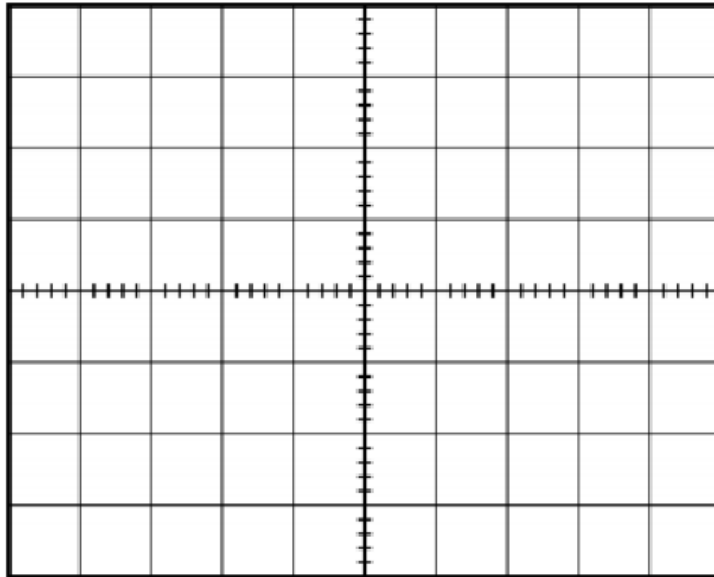
$V_{in}$	$V_{ref}$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$
1 $V_{p-p}$ 1 kHz	5 V	2 k $\Omega$	10 k $\Omega$	10 k $\Omega$	10 k $\Omega$
1 $V_{p-p}$ 1 kHz	10 V	2 k $\Omega$	10 k $\Omega$	10 k $\Omega$	10 k $\Omega$
1 $V_{p-p}$ 1 kHz	5 V	2 k $\Omega$	10 k $\Omega$	100 k $\Omega$	10 k $\Omega$
1 $V_{p-p}$ 1 kHz	10 V	2 k $\Omega$	10 k $\Omega$	100 k $\Omega$	10 k $\Omega$



$V_{in} = \dots\dots\dots$   
 $V_{ref} = \dots\dots\dots$   
 $R_1 = \dots\dots\dots$   
 $R_2 = \dots\dots\dots$   
 $R_3 = \dots\dots\dots$   
 $R_4 = \dots\dots\dots$



$V_{in} = \dots\dots\dots$   
 $V_{ref} = \dots\dots\dots$   
 $R_1 = \dots\dots\dots$   
 $R_2 = \dots\dots\dots$   
 $R_3 = \dots\dots\dots$   
 $R_4 = \dots\dots\dots$



$V_{in} = \dots\dots\dots$

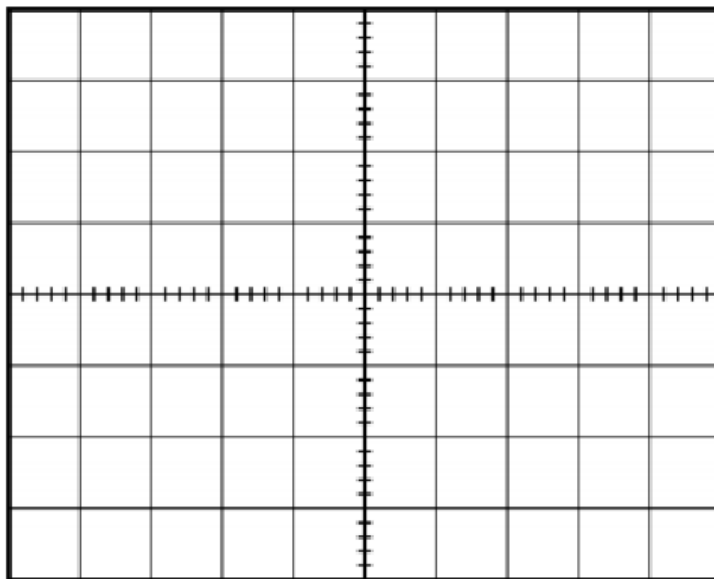
$V_{ref} = \dots\dots\dots$

$R_1 = \dots\dots\dots$

$R_2 = \dots\dots\dots$

$R_3 = \dots\dots\dots$

$R_4 = \dots\dots\dots$



$V_{in} = \dots\dots\dots$

$V_{ref} = \dots\dots\dots$

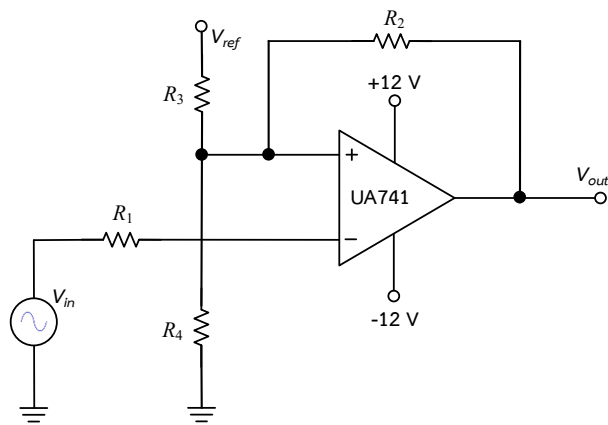
$R_1 = \dots\dots\dots$

$R_2 = \dots\dots\dots$

$R_3 = \dots\dots\dots$

$R_4 = \dots\dots\dots$

5. ต่อวงจรดังรูปที่ บ3.3

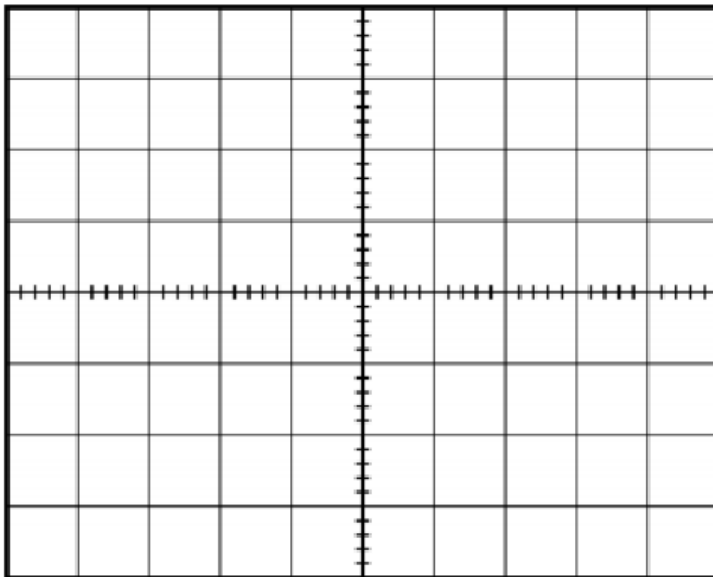


รูปที่ บ3.3 (ธน์สิทธิ์, 2565)



6. จากวงจรรูปที่ บ3.3 ป้อนค่าแรงดันอินพุต  $V_{in}$  เป็นค่าแรงดันอินพุตรูปคลื่นไซน์ที่มีค่าขนาดแอมพลิจูด ค่าความถี่ ค่าแรงดันอ้างอิง  $V_{ref}$  ค่าตัวต้านทาน  $R_1$  ค่าตัวต้านทาน  $R_2$  ค่าตัวต้านทาน  $R_3$  และค่าตัวต้านทาน  $R_4$  ตามตาราง ใช้ Oscilloscope วัดสัญญาณเอาต์พุตพร้อมทั้งบันทึกรูปภาพสัญญาณเอาต์พุต  $V_{out}$  ที่ได้ทุกรูป

$V_{in}$	$V_{ref}$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$
1 $V_{p-p}$ 1 kHz	5 V	2 k $\Omega$	10 k $\Omega$	10 k $\Omega$	10 k $\Omega$
1 $V_{p-p}$ 1 kHz	10 V	2 k $\Omega$	10 k $\Omega$	10 k $\Omega$	10 k $\Omega$
1 $V_{p-p}$ 1 kHz	5 V	2 k $\Omega$	10 k $\Omega$	100 k $\Omega$	10 k $\Omega$
1 $V_{p-p}$ 1 kHz	10 V	2 k $\Omega$	10 k $\Omega$	100 k $\Omega$	10 k $\Omega$



$V_{in} = \dots\dots\dots$

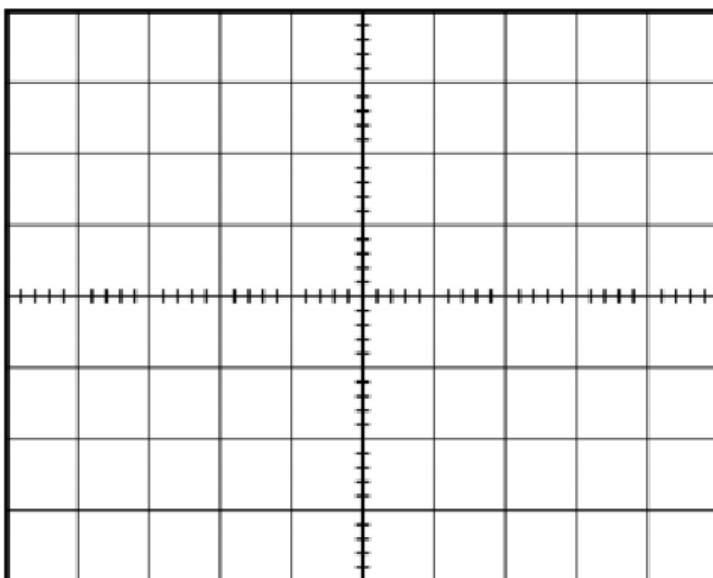
$V_{ref} = \dots\dots\dots$

$R_1 = \dots\dots\dots$

$R_2 = \dots\dots\dots$

$R_3 = \dots\dots\dots$

$R_4 = \dots\dots\dots$



$V_{in} = \dots\dots\dots$

$V_{ref} = \dots\dots\dots$

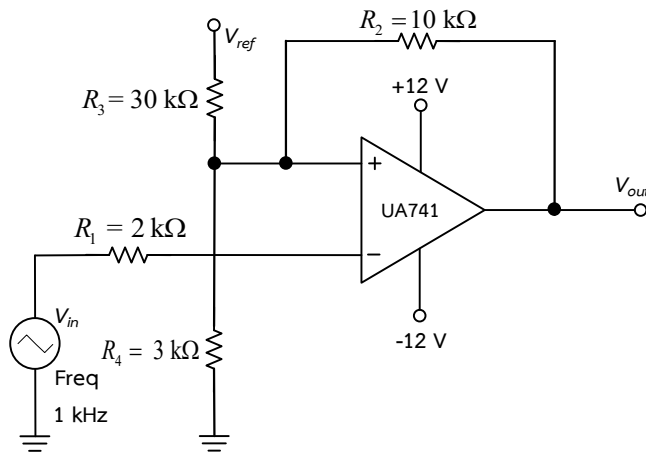
$R_1 = \dots\dots\dots$

$R_2 = \dots\dots\dots$

$R_3 = \dots\dots\dots$

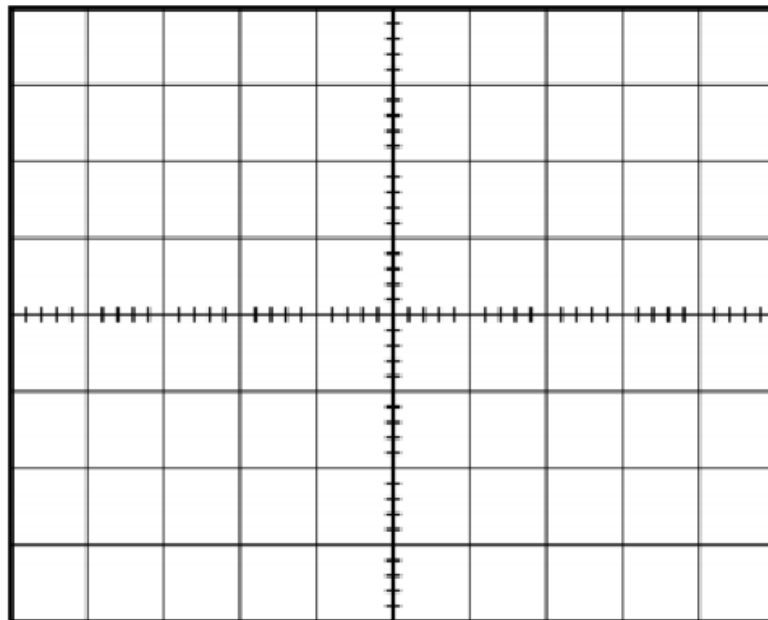
$R_4 = \dots\dots\dots$

7. ต่อดังรูปที่ บ3.4



รูปที่ บ3.4 (ธนัสถ์, 2565)

8. จากวงจรรูปที่ บ3.4 ป้อนค่าแรงดันอินพุต  $V_{in}$  เป็นค่าแรงดันอินพุตรูปคลื่นสามเหลี่ยม มีค่าขนาดแอมพลิจูดเท่ากับ 5 โวลต์ ค่าความถี่ 1 kHz ค่าแรงดันอ้างอิง  $V_{ref}$  5 โวลต์ ใช้ Oscilloscope วัดสัญญาณเอาต์พุตพร้อมทั้งบันทึกรูปภาพสัญญาณเอาต์พุต  $V_{out}$  ที่ได้



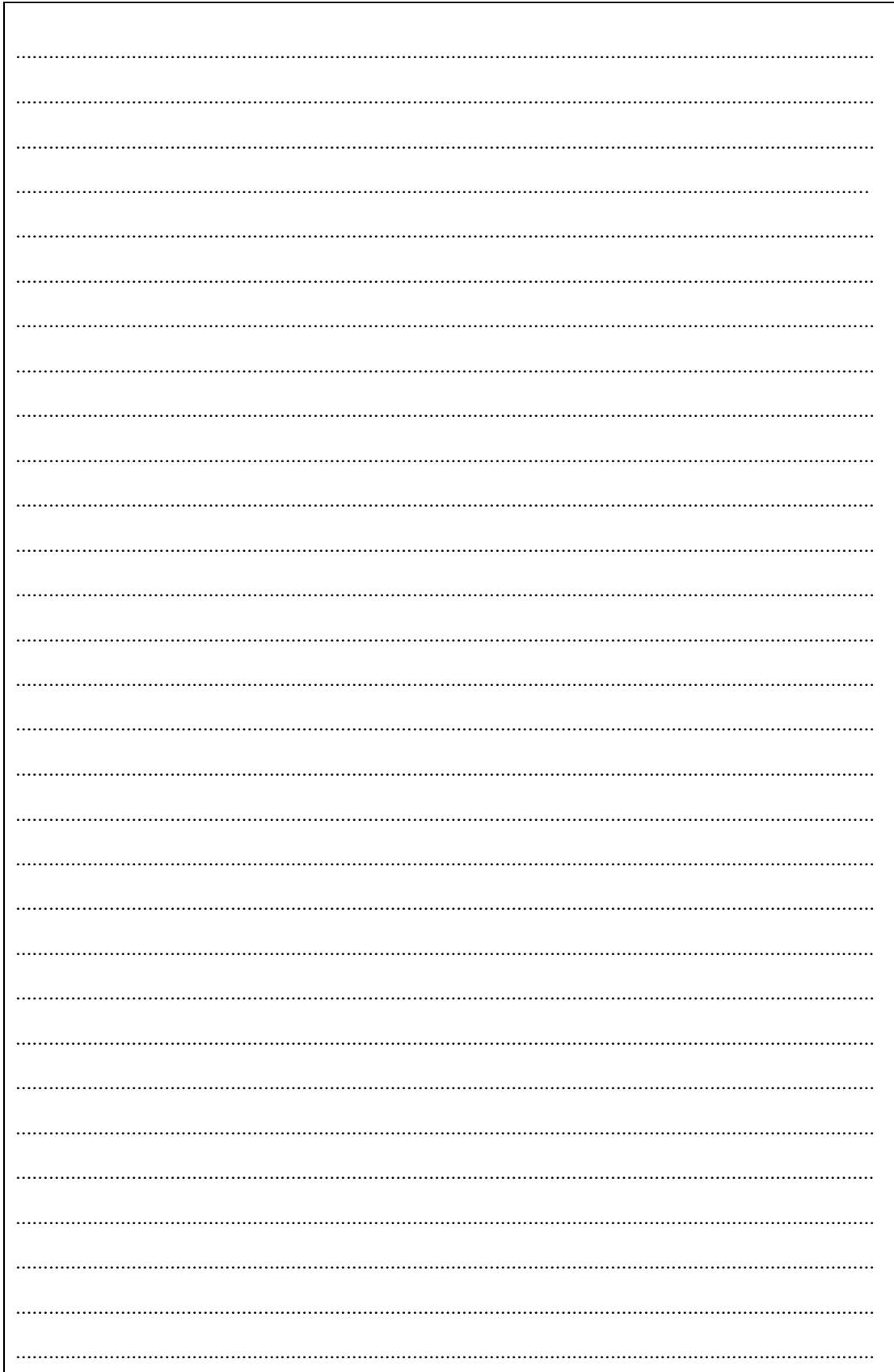
สรุปผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....



**ใบงานที่ 4**  
**เรื่อง วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์**

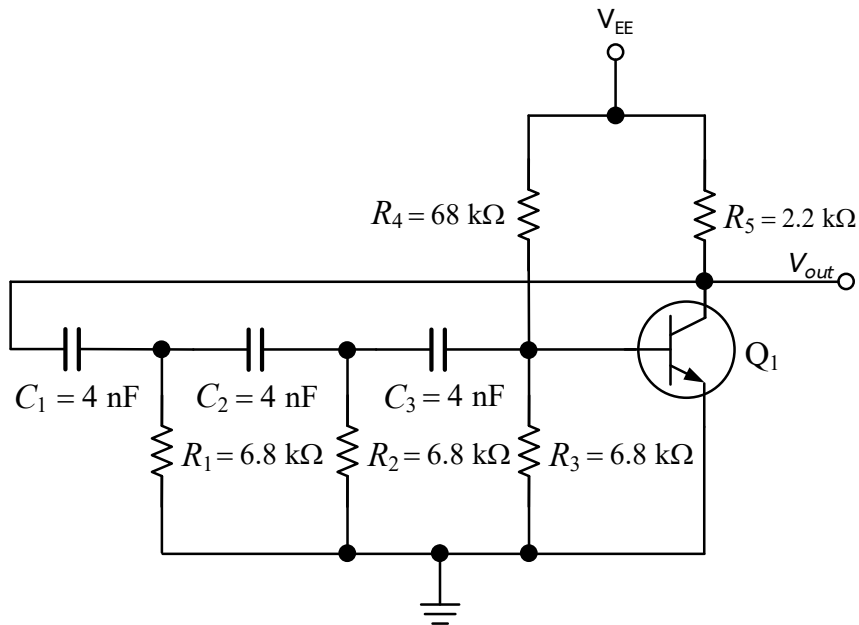
**วัตถุประสงค์**

1. เข้าใจหลักการทำงานของวงจรกิจกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์
2. อธิบายการทำงานของวงจรกิจกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์

เครื่องมือและอุปกรณ์	จำนวน
1. ไอซีออปแอมป์เบอร์ UA741	1 ตัว
2. ทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N3904/2N2222	1 ตัว
3. ตัวต้านทานค่า 2.2 kΩ และ 68 kΩ	1 ตัว
4. ตัวต้านทานค่า 6.8 kΩ	3 ตัว
5. ตัวเก็บประจุ 4 nF	4 ตัว
6. Oscilloscope พร้อมสาย	1 เครื่อง
7. Power supply พร้อมสาย	1 เครื่อง
8. แผงวงจรทดลอง	1 อัน

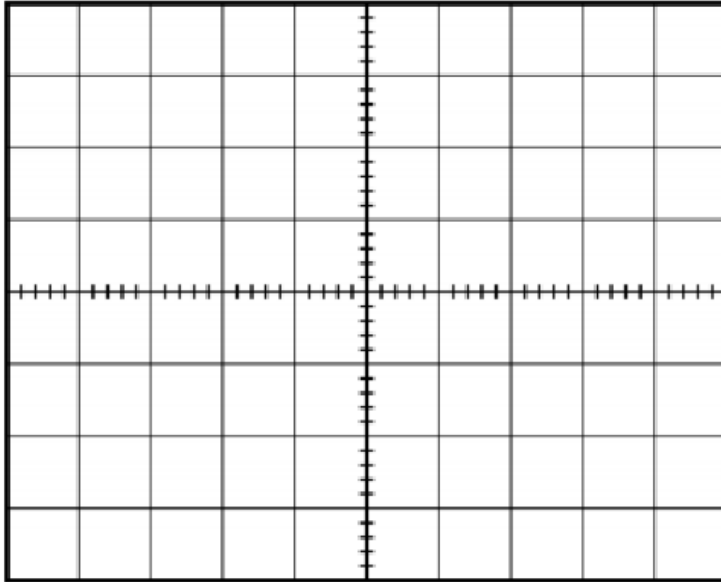
**ลำดับขั้นตอนการทดลอง**

1. ต่อวงจรดังรูปที่ บ4.1 โดยป้อนค่าแรงดัน  $V_{EE}$  เท่ากับ 12 โวลต์



รูปที่ บ4.1 (ธนัสต์, 2565)

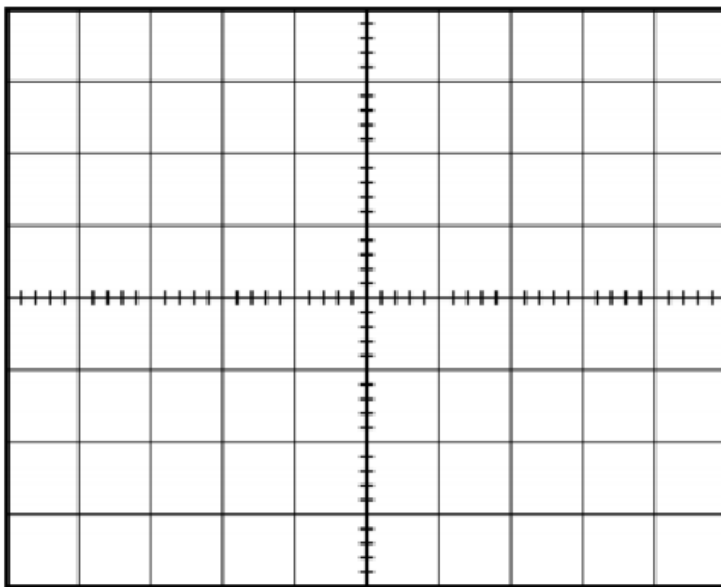
2. ใช้ Oscilloscope วัดสัญญาณเอาต์พุตพร้อมทั้งบันทึกรูปภาพสัญญาณเอาต์พุต  $V_{out}$



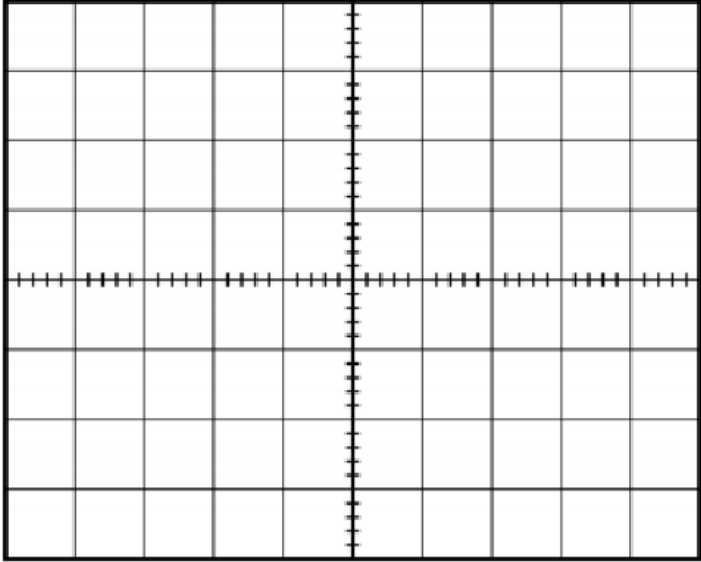
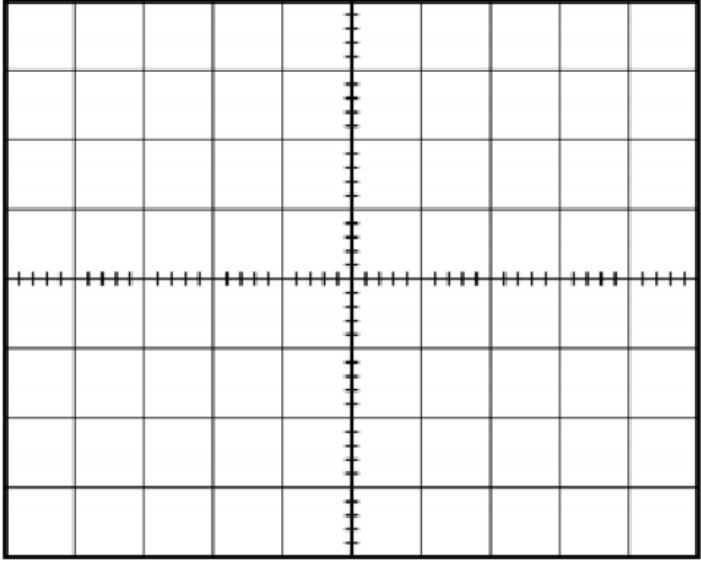
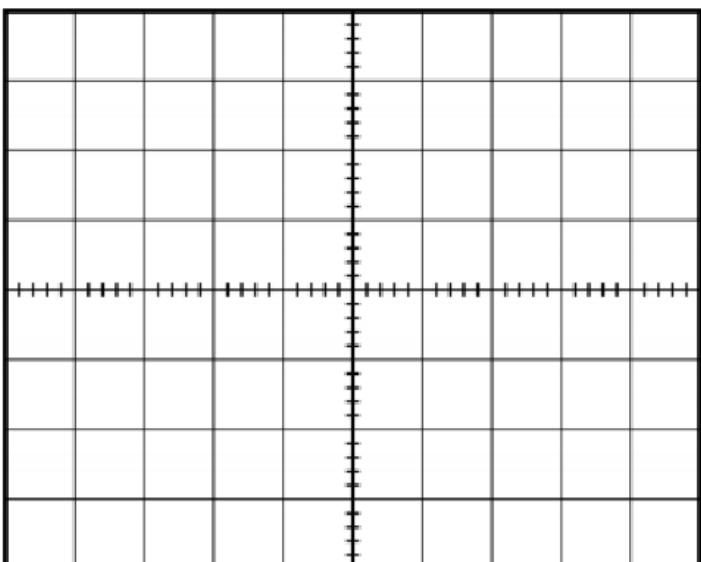
$f_0 = \dots\dots\dots$

3. จากวงจรรูปที่ บ4.1 ป้อนค่าแรงดัน  $V_{EE}$  เท่ากับ 12 โวลต์ และทำการเปลี่ยนค่าตัวต้านทาน  $R_1$  ค่าตัวต้านทาน  $R_2$  ค่าตัวต้านทาน  $R_3$  ค่าตัวต้านทาน  $R_4$  ค่าตัวต้านทาน  $R_5$  ตัวเก็บประจุ  $C_1$  ตัวเก็บประจุ  $C_2$  และตัวเก็บประจุ  $C_3$  เพื่อให้ได้ค่าความถี่  $f_0$  ดังตาราง พร้อมทั้งใช้ Oscilloscope วัดสัญญาณเอาต์พุตพร้อมทั้งบันทึกรูปภาพสัญญาณเอาต์พุต  $V_{out}$  ที่ได้ทุกรูป

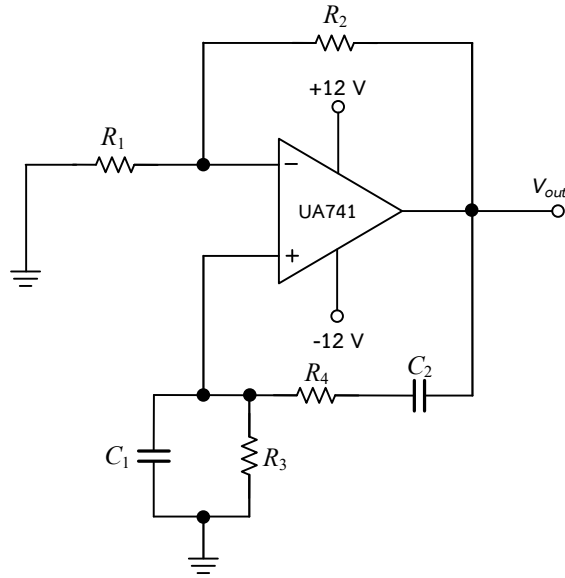
$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$f_0$
								500 Hz
								1 kHz
								2 kHz
								3 kHz



$R_1 = \dots\dots\dots$   
 $R_2 = \dots\dots\dots$   
 $R_3 = \dots\dots\dots$   
 $R_4 = \dots\dots\dots$   
 $R_5 = \dots\dots\dots$   
 $C_1 = \dots\dots\dots$   
 $C_2 = \dots\dots\dots$   
 $C_3 = \dots\dots\dots$   
 $f_0 = \dots\dots\dots$

	$R_1 = \dots\dots\dots$ $R_2 = \dots\dots\dots$ $R_3 = \dots\dots\dots$ $R_4 = \dots\dots\dots$ $R_5 = \dots\dots\dots$ $C_1 = \dots\dots\dots$ $C_2 = \dots\dots\dots$ $C_3 = \dots\dots\dots$ $f_0 = \dots\dots\dots$
	$R_1 = \dots\dots\dots$ $R_2 = \dots\dots\dots$ $R_3 = \dots\dots\dots$ $R_4 = \dots\dots\dots$ $R_5 = \dots\dots\dots$ $C_1 = \dots\dots\dots$ $C_2 = \dots\dots\dots$ $C_3 = \dots\dots\dots$ $f_0 = \dots\dots\dots$
	$R_1 = \dots\dots\dots$ $R_2 = \dots\dots\dots$ $R_3 = \dots\dots\dots$ $R_4 = \dots\dots\dots$ $R_5 = \dots\dots\dots$ $C_1 = \dots\dots\dots$ $C_2 = \dots\dots\dots$ $C_3 = \dots\dots\dots$ $f_0 = \dots\dots\dots$

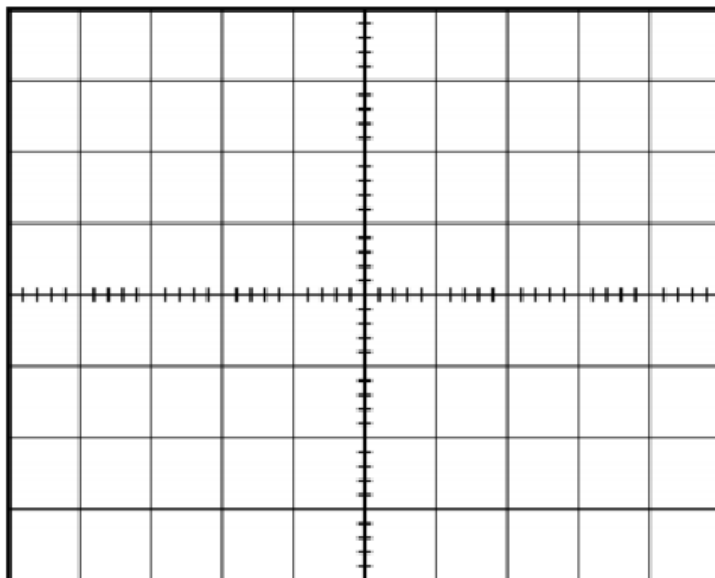
4. ต่อวงจรดังรูปที่ บ4.2



รูปที่ บ4.2 (ธনীส์ถ์, 2565)

5. จากวงจรรูปที่ บ4.2 ทำการเปลี่ยนค่าตัวต้านทาน  $R_1$  ค่าตัวต้านทาน  $R_2$  ค่าตัวต้านทาน  $R_3$  ค่าตัวต้านทาน  $R_4$  ตัวเก็บประจุ  $C_1$  และตัวเก็บประจุ  $C_2$  เพื่อให้ได้ค่าความถี่  $f_0$  ดังตาราง พร้อมทั้งใช้ Oscilloscope วัดสัญญาณเอาต์พุตพร้อมทั้งบันทึกรูปภาพสัญญาณเอาต์พุต  $V_{out}$  ที่ได้ทุกรูป

$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$C_1$	$C_2$	$f_0$
						500 Hz
						1 kHz
						2 kHz



$R_1 = \dots\dots\dots$

$R_2 = \dots\dots\dots$

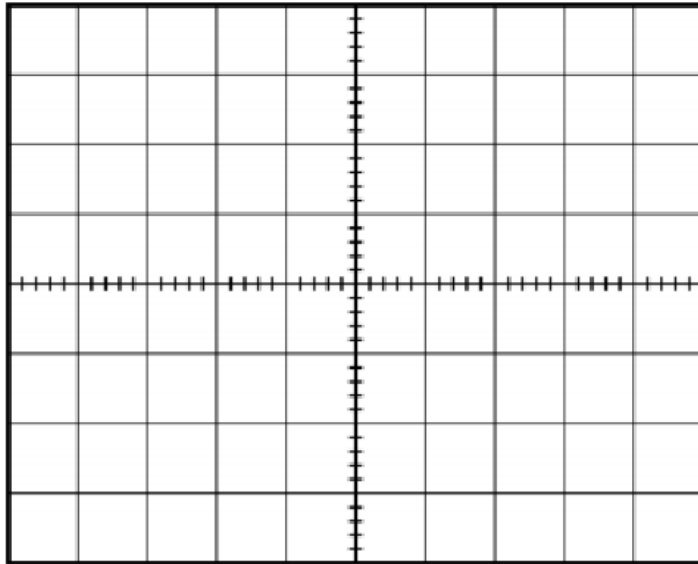
$R_3 = \dots\dots\dots$

$R_4 = \dots\dots\dots$

$C_1 = \dots\dots\dots$

$C_2 = \dots\dots\dots$

$f_0 = \dots\dots\dots$



$R_1 = \dots\dots\dots$

$R_2 = \dots\dots\dots$

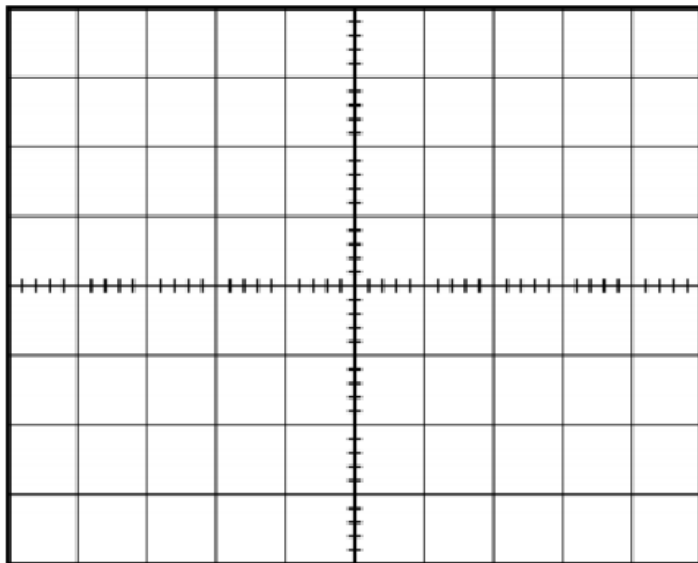
$R_3 = \dots\dots\dots$

$R_4 = \dots\dots\dots$

$C_1 = \dots\dots\dots$

$C_2 = \dots\dots\dots$

$f_0 = \dots\dots\dots$



$R_1 = \dots\dots\dots$

$R_2 = \dots\dots\dots$

$R_3 = \dots\dots\dots$

$R_4 = \dots\dots\dots$

$C_1 = \dots\dots\dots$

$C_2 = \dots\dots\dots$

$f_0 = \dots\dots\dots$

สรุปผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

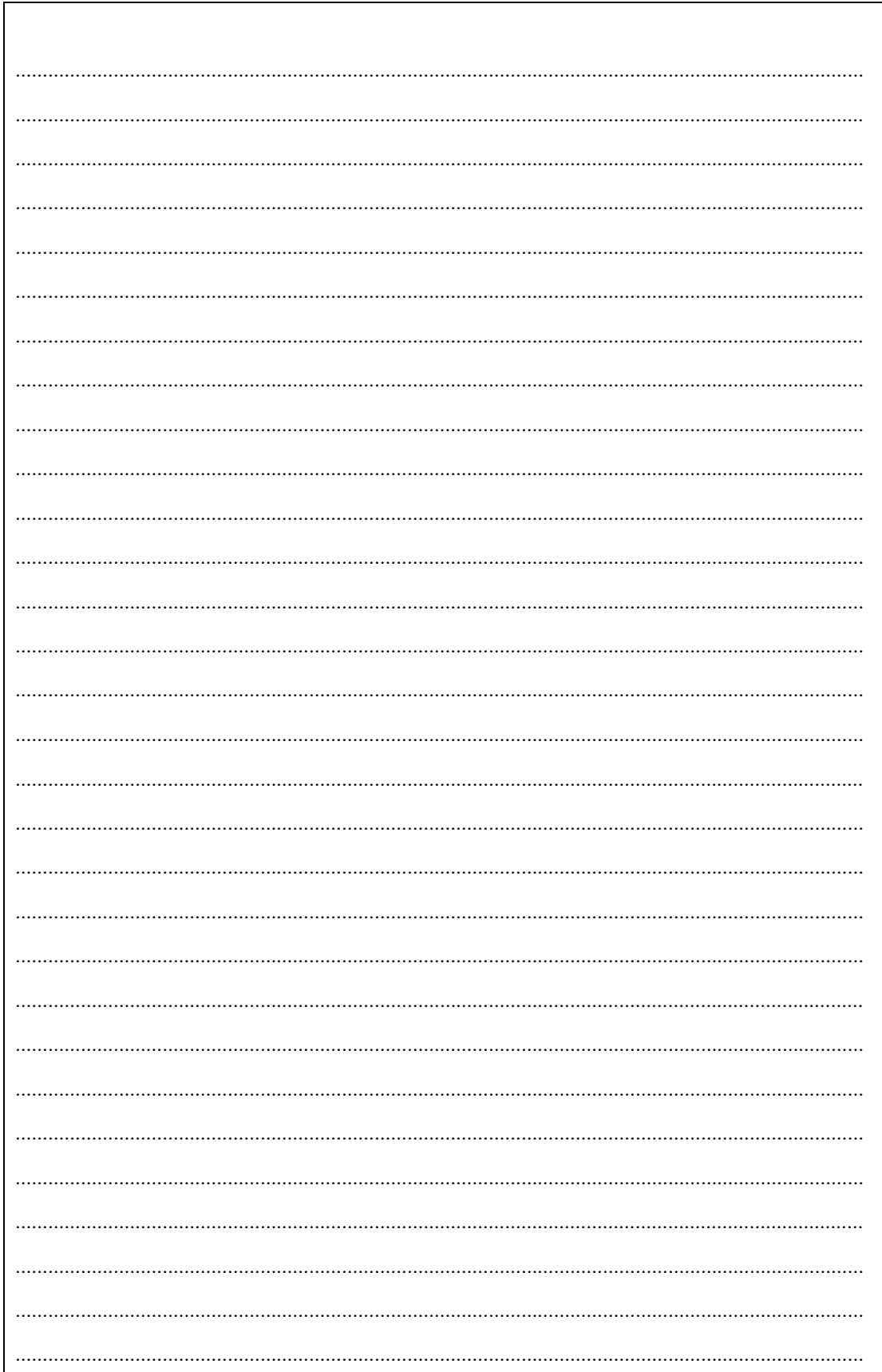
.....

.....

.....

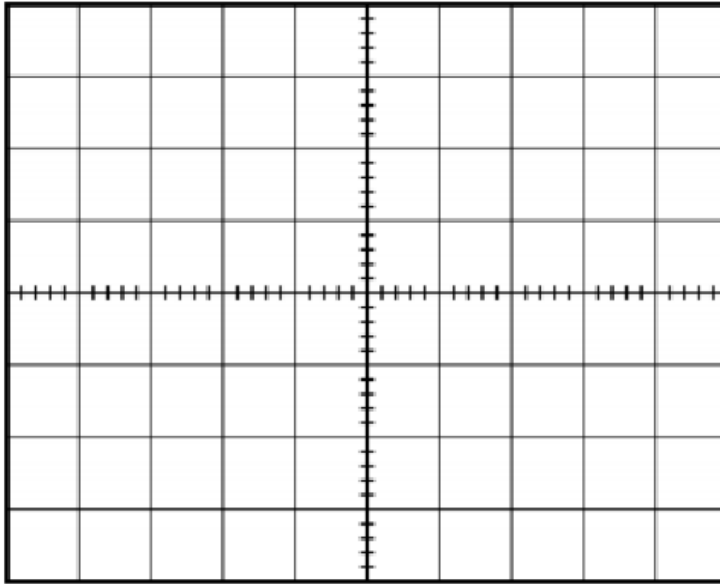
.....





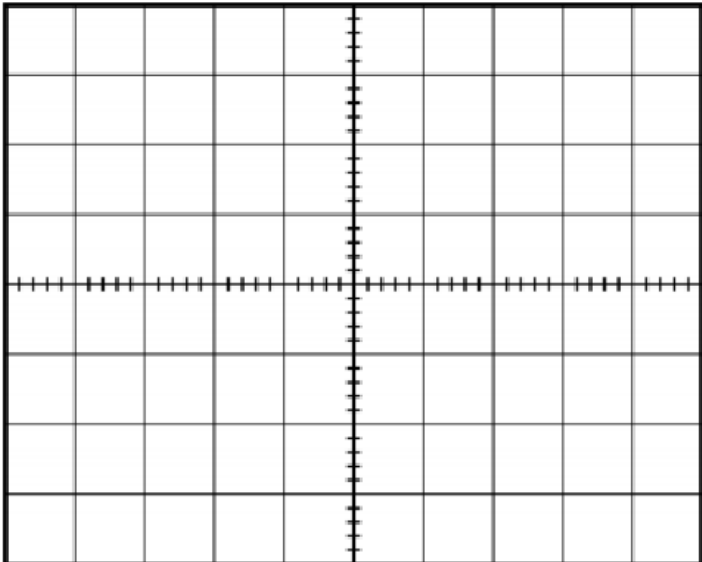
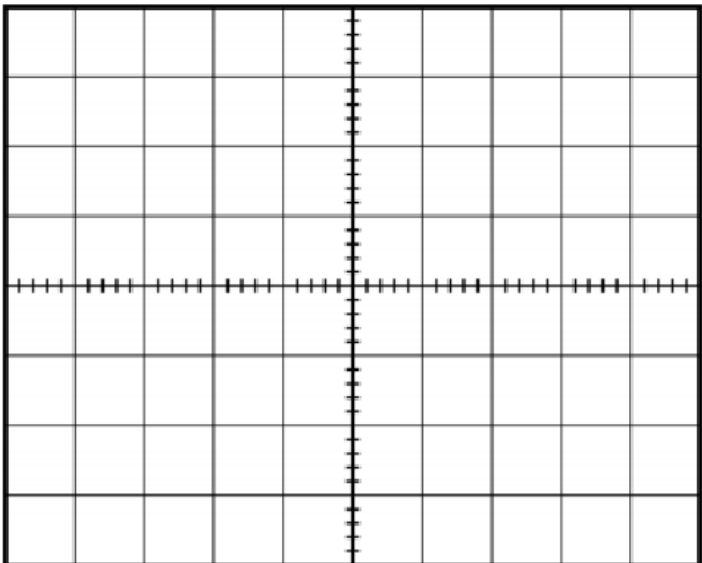
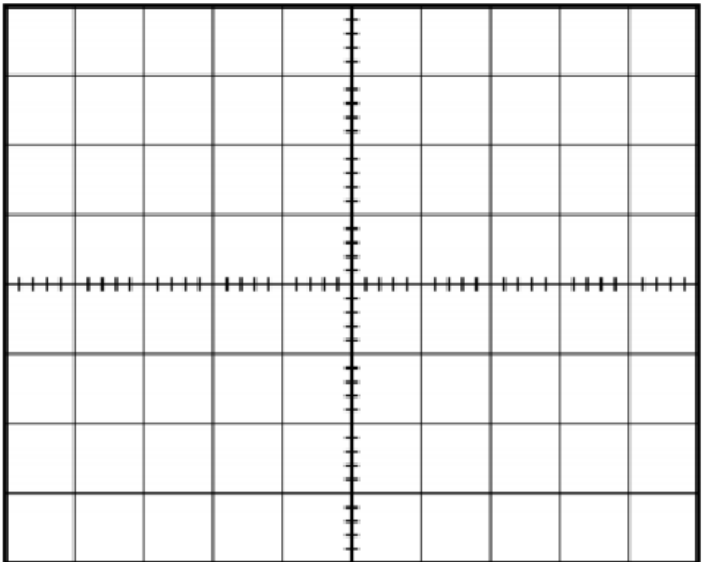
ใบงานที่ 5 เรื่อง วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม	
<b>วัตถุประสงค์</b>	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. เข้าใจหลักการทำงานของวงจรถ่ายสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม</li> <li>2. อธิบายการทำงานของวงจรถ่ายสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม</li> </ol>	
<b>เครื่องมือและอุปกรณ์</b>	<b>จำนวน</b>
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ไอซีออปแอมป์เบอร์ UA741</li> <li>2. ตัวต้านทานค่า 4.5 k<math>\Omega</math></li> <li>3. ตัวต้านทานค่า 10 k<math>\Omega</math></li> <li>4. ตัวเก็บประจุ 10 nF</li> <li>5. มัลติมิเตอร์</li> <li>6. Oscilloscope พร้อมสาย</li> <li>7. Power supply พร้อมสาย</li> <li>8. แผงวงจรทดลอง</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1 ตัว</li> <li>1 ตัว</li> <li>2 ตัว</li> <li>1 ตัว</li> <li>1 เครื่อง</li> <li>1 เครื่อง</li> <li>1 เครื่อง</li> <li>1 อัน</li> </ol>
<b>ลำดับขั้นตอนการทดลอง</b>	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ต่อวงจรดังรูปที่ บ5.1</li> </ol> <div style="text-align: center;"> <p style="text-align: center;">รูปที่ บ5.1 (ธันส์ถ์, 2565)</p> </div> <ol style="list-style-type: none"> <li>2. ใช้มัลติมิเตอร์ วัดค่าแรงดันอ้างอิง <math>V_{ref}</math> มีค่าเท่ากับ .....</li> </ol>	

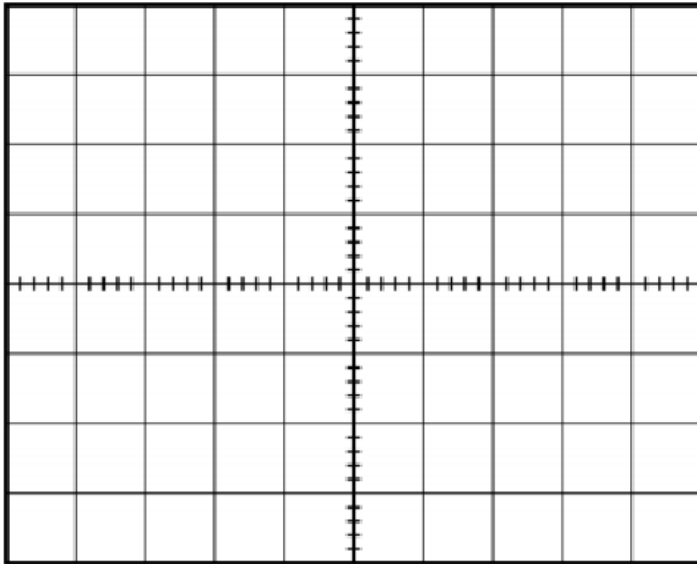
3. ใช้ Oscilloscope วัดสัญญาณเอาต์พุตพร้อมทั้งบันทึกรูปภาพสัญญาณเอาต์พุต  $V_{out}$



4. จากวงจรรูปที่ บ5.1 ทำการเปลี่ยนค่าตัวต้านทาน  $R_1$  ค่าตัวต้านทาน  $R_2$  ค่าตัวต้านทาน  $R_3$  และตัวเก็บประจุ  $C_1$  เพื่อให้ได้ค่าความถี่  $f_0$  ดังตาราง พร้อมทั้งใช้ Oscilloscope วัดสัญญาณเอาต์พุตพร้อมทั้งบันทึกรูปภาพสัญญาณเอาต์พุต  $V_{out}$  ที่ได้ทุกรูป และใช้มัลติมิเตอร์ วัดค่าแรงดันอ้างอิง  $V_{ref}$  บันทึกค่าที่ได้ลงตาราง

$R_1$	$R_2$	$R_3$	$C_1$	$V_{ref}$	$f_0$
					20 kHz
					30 kHz
					50 kHz
					60 kHz
					70 kHz
					80 kHz
					90 kHz
					100 kHz
					200 kHz
					300 kHz

	<p><math>R_1 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>R_2 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>R_3 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>C_1 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>V_{ref} = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>f_0 = \dots\dots\dots</math></p>
	<p><math>R_1 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>R_2 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>R_3 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>C_1 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>V_{ref} = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>f_0 = \dots\dots\dots</math></p>
	<p><math>R_1 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>R_2 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>R_3 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>C_1 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>V_{ref} = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>f_0 = \dots\dots\dots</math></p>



$R_1 = \dots\dots\dots$

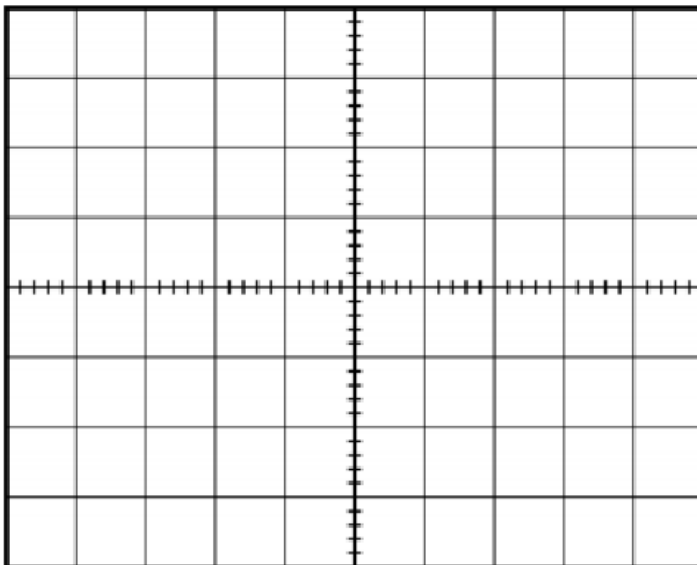
$R_2 = \dots\dots\dots$

$R_3 = \dots\dots\dots$

$C_1 = \dots\dots\dots$

$V_{ref} = \dots\dots\dots$

$f_0 = \dots\dots\dots$



$R_1 = \dots\dots\dots$

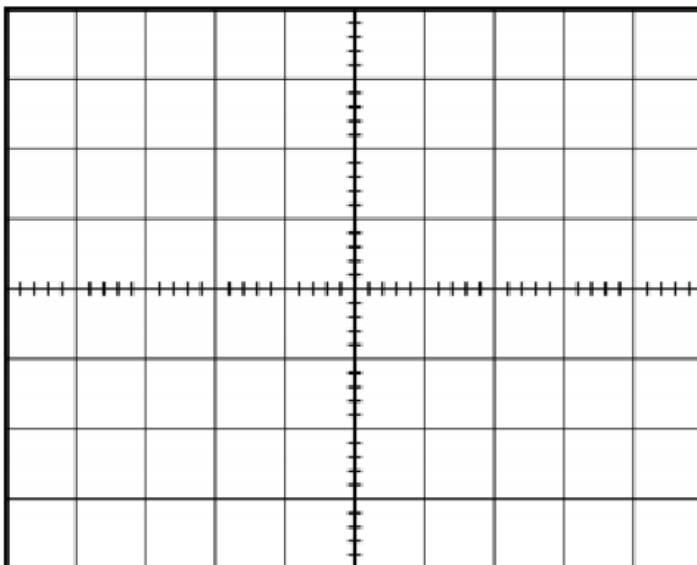
$R_2 = \dots\dots\dots$

$R_3 = \dots\dots\dots$

$C_1 = \dots\dots\dots$

$V_{ref} = \dots\dots\dots$

$f_0 = \dots\dots\dots$



$R_1 = \dots\dots\dots$

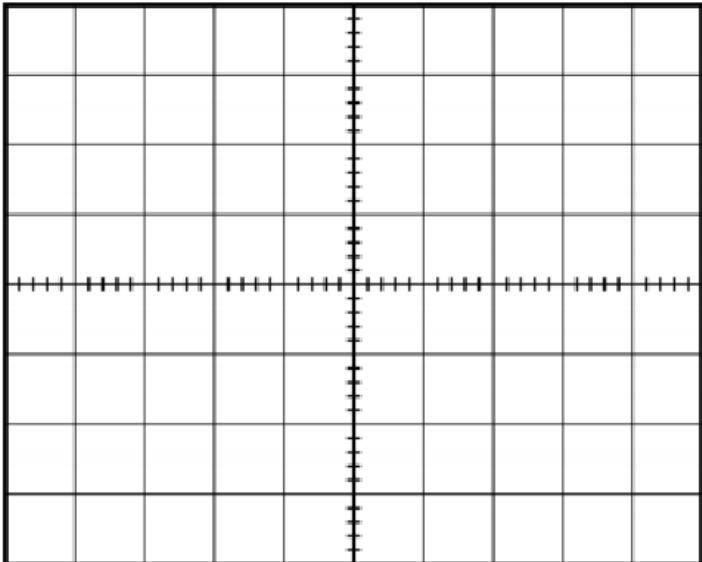
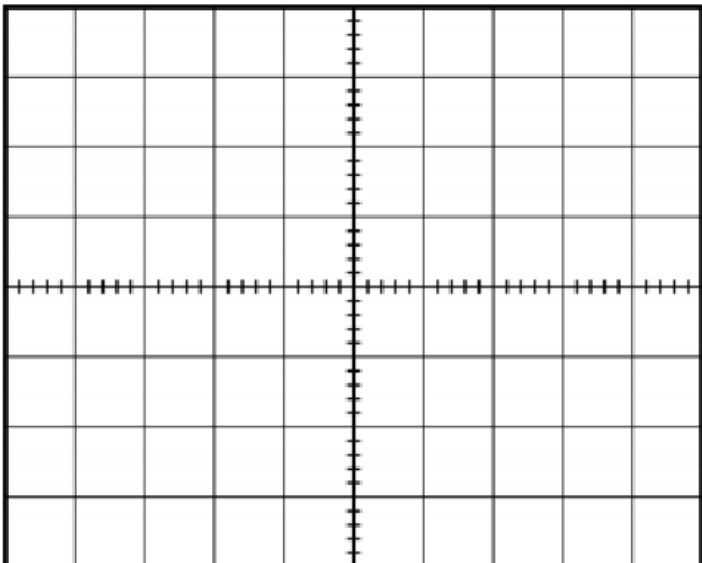
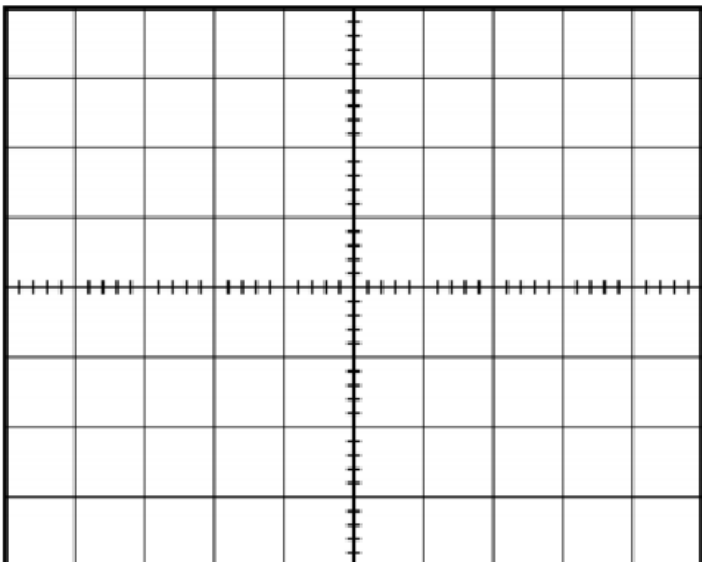
$R_2 = \dots\dots\dots$

$R_3 = \dots\dots\dots$

$C_1 = \dots\dots\dots$

$V_{ref} = \dots\dots\dots$

$f_0 = \dots\dots\dots$

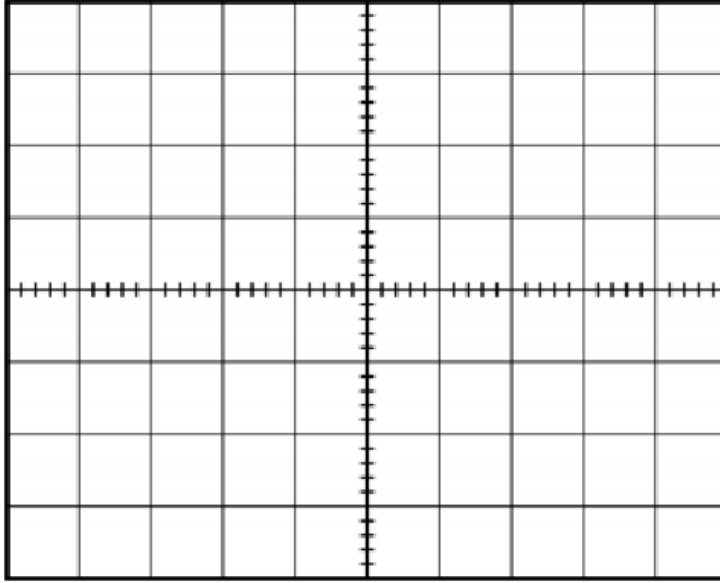
	<p><math>R_1 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>R_2 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>R_3 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>C_1 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>V_{ref} = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>f_0 = \dots\dots\dots</math></p>
	<p><math>R_1 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>R_2 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>R_3 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>C_1 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>V_{ref} = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>f_0 = \dots\dots\dots</math></p>
	<p><math>R_1 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>R_2 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>R_3 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>C_1 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>V_{ref} = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>f_0 = \dots\dots\dots</math></p>



ใบงานที่ 6 เรื่อง วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม	
<b>วัตถุประสงค์</b>	
1. เข้าใจหลักการทำงานของวงจรถูกกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม 2. อธิบายการทำงานของวงจรถูกกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม	
<b>เครื่องมือและอุปกรณ์</b>	<b>จำนวน</b>
1. ไอซีออปแอมป์เบอร์ UA741 2. ตัวต้านทานค่า 3.1 k $\Omega$ 3. ตัวต้านทานค่า 10 k $\Omega$ 4. ตัวต้านทานค่า 25 k $\Omega$ 5. ตัวเก็บประจุ 0.1 uF 6. มัลติมิเตอร์ 7. Oscilloscope พร้อมสาย 8. Power supply พร้อมสาย 9. แผงวงจรทดลอง	2 ตัว 1 ตัว 1 ตัว 1 ตัว 1 ตัว 1 เครื่อง 1 เครื่อง 1 เครื่อง 1 อัน
<b>ลำดับขั้นตอนการทดลอง</b>	
1. ต่อวงจรดังรูปที่ บ6.1 <div style="text-align: center;"> </div>	
รูปที่ บ6.1 (ธันส์, 2565)	
2. ใช้มัลติมิเตอร์ วัดค่าแรงดัน ณ จุด $V_D$ มีค่าเท่ากับ .....	

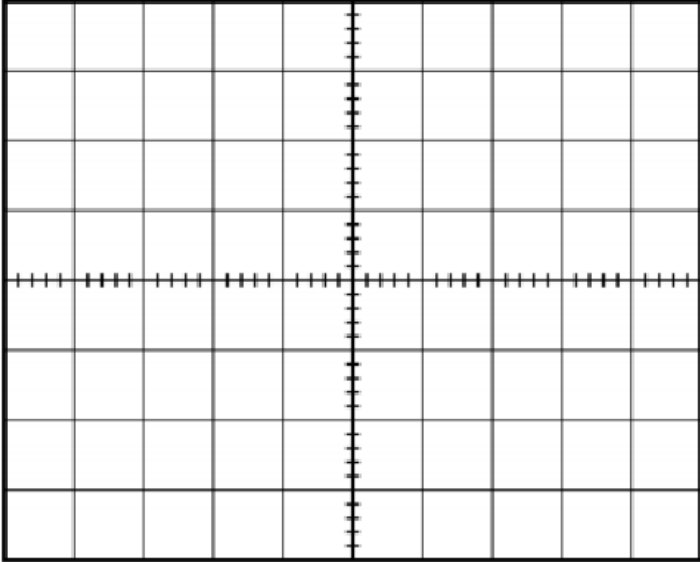
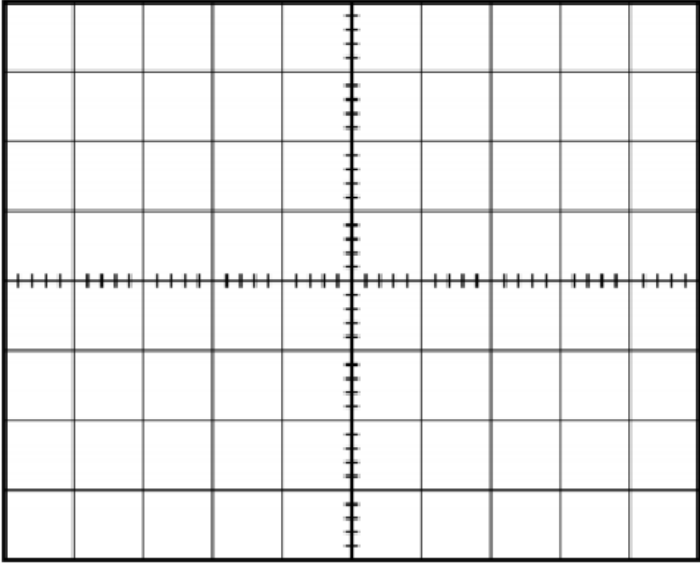
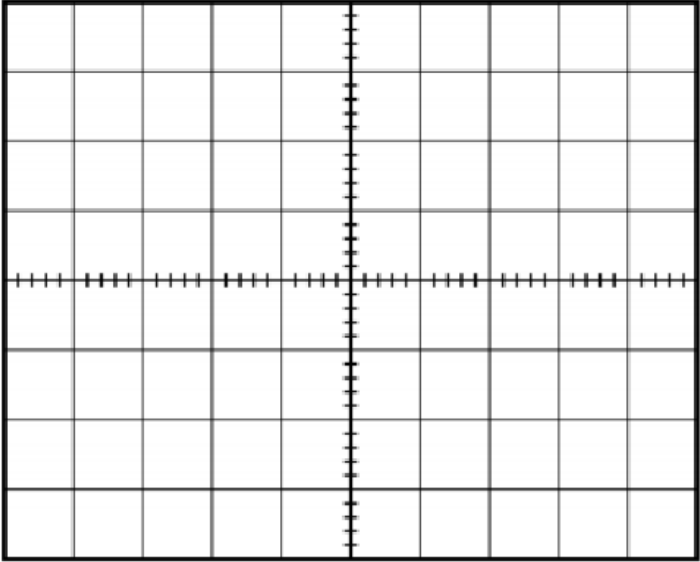


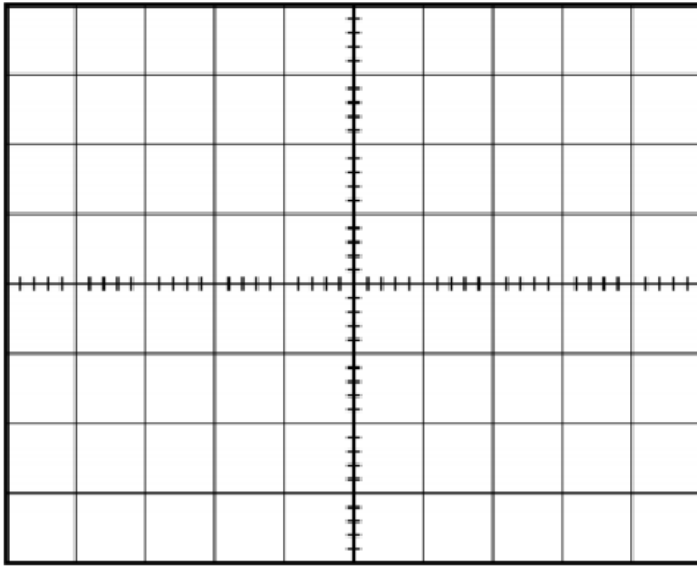
3. ใช้ Oscilloscope วัดสัญญาณเอาต์พุต  $V_{o1}$  และสัญญาณเอาต์พุต  $V_{o2}$  พร้อมทั้งบันทึกรูปภาพที่ได้



4. จากวงจรรูปที่ บ.6.1 ทำการเปลี่ยนค่าตัวต้านทาน  $R_1$  ค่าตัวต้านทาน  $R_2$  ค่าตัวต้านทาน  $R_3$  และตัวเก็บประจุ  $C$  เพื่อให้ได้ค่าความถี่  $f_0$  ดังตาราง พร้อมทั้งใช้ Oscilloscope วัดสัญญาณเอาต์พุตพร้อมทั้งบันทึกรูปภาพสัญญาณเอาต์พุต  $V_{o1}$  และสัญญาณเอาต์พุต  $V_{o2}$  ที่ได้ทุกรูป และใช้มัลติมิเตอร์ วัดค่าแรงดันอ้างอิง  $V_D$  บันทึกค่าที่ได้ลงตาราง

$R_1$	$R_2$	$R_3$	$C$	$V_D$	$f_0$
					10 kHz
					20 kHz
					30 kHz
					40 kHz
					50 kHz
					60 kHz
					70 kHz
					80 kHz
					90 kHz
					100 kHz

	<p><math>R_1 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>R_2 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>R_3 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>C = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>V_D = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>f_0 = \dots\dots\dots</math></p>
	<p><math>R_1 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>R_2 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>R_3 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>C = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>V_D = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>f_0 = \dots\dots\dots</math></p>
	<p><math>R_1 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>R_2 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>R_3 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>C = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>V_D = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>f_0 = \dots\dots\dots</math></p>



$R_1 = \dots\dots\dots$

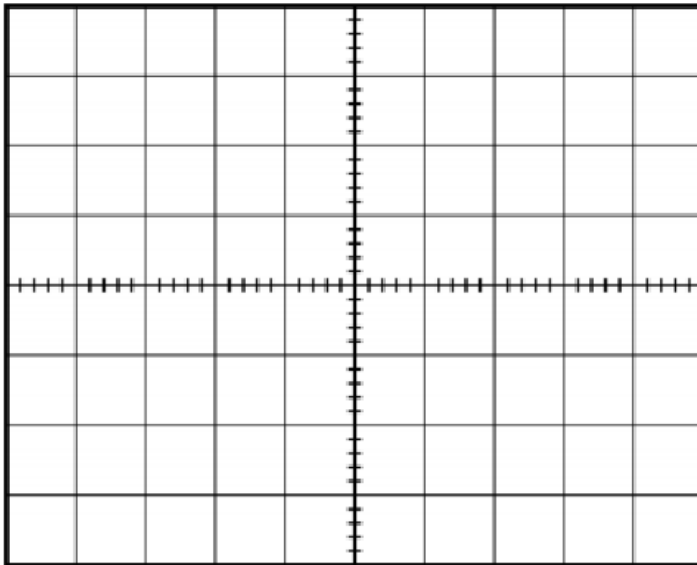
$R_2 = \dots\dots\dots$

$R_3 = \dots\dots\dots$

$C = \dots\dots\dots$

$V_D = \dots\dots\dots$

$f_0 = \dots\dots\dots$



$R_1 = \dots\dots\dots$

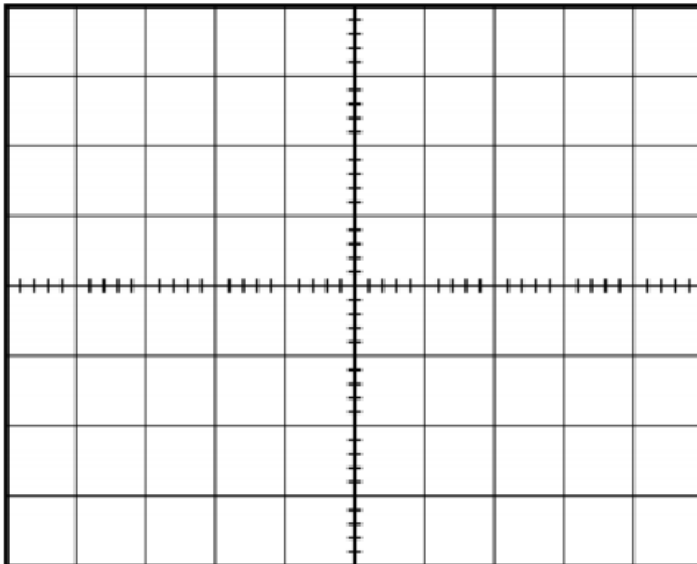
$R_2 = \dots\dots\dots$

$R_3 = \dots\dots\dots$

$C = \dots\dots\dots$

$V_D = \dots\dots\dots$

$f_0 = \dots\dots\dots$



$R_1 = \dots\dots\dots$

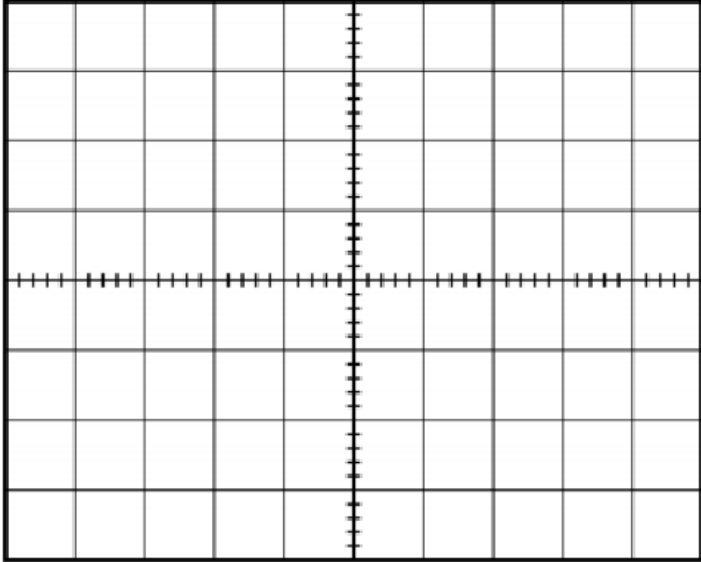
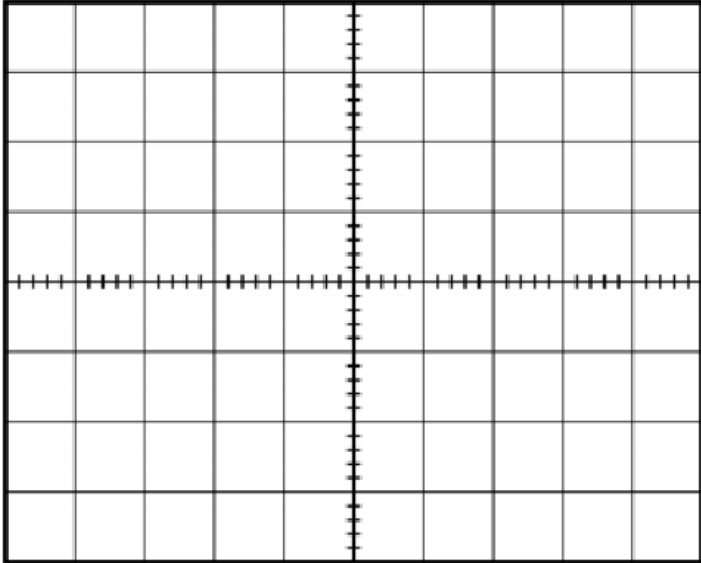
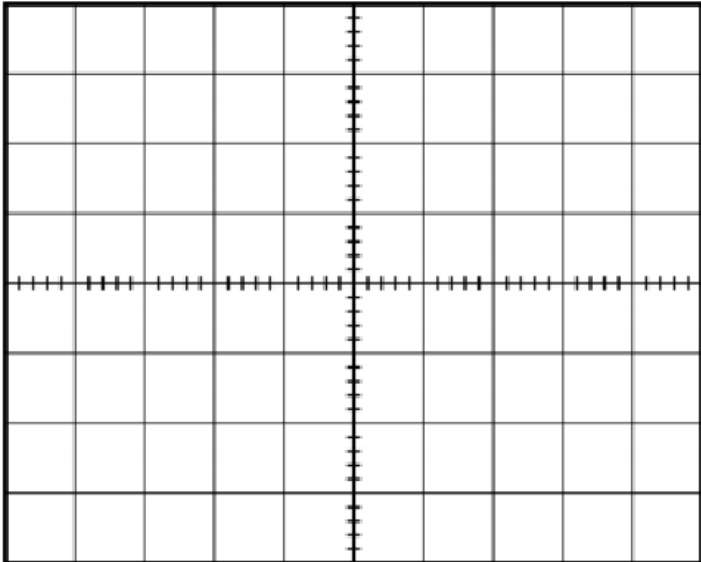
$R_2 = \dots\dots\dots$

$R_3 = \dots\dots\dots$

$C = \dots\dots\dots$

$V_D = \dots\dots\dots$

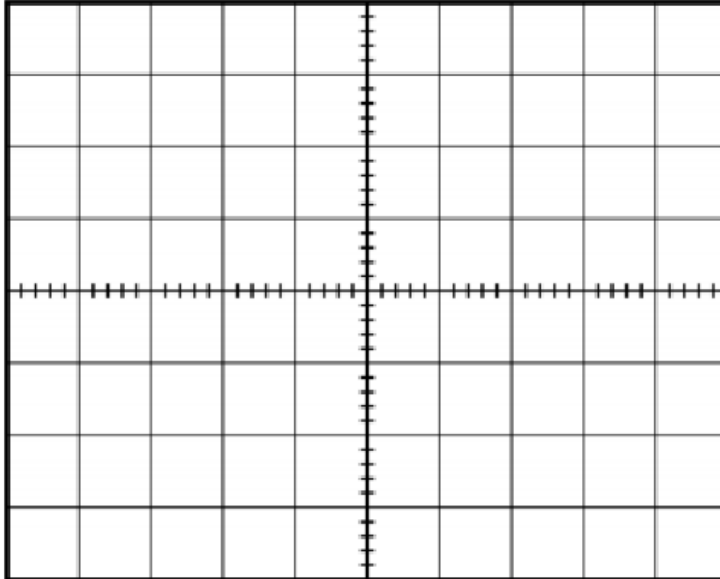
$f_0 = \dots\dots\dots$

	<p><math>R_1 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>R_2 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>R_3 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>C = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>V_D = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>f_0 = \dots\dots\dots</math></p>
	<p><math>R_1 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>R_2 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>R_3 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>C = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>V_D = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>f_0 = \dots\dots\dots</math></p>
	<p><math>R_1 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>R_2 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>R_3 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>C = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>V_D = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>f_0 = \dots\dots\dots</math></p>



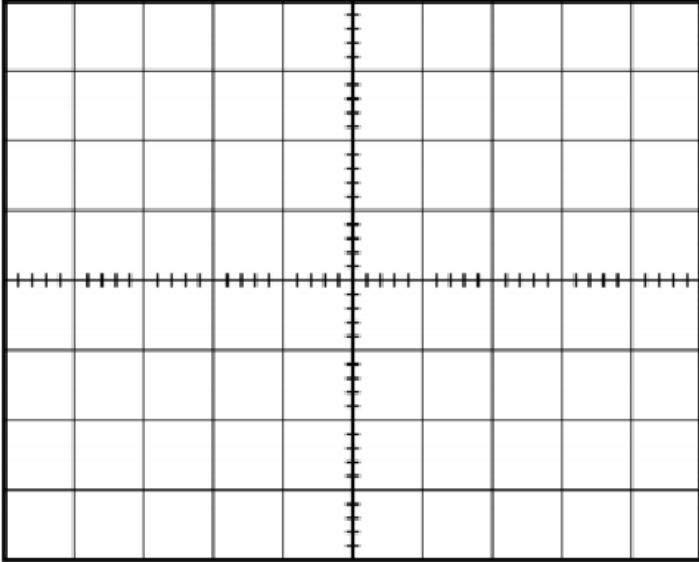
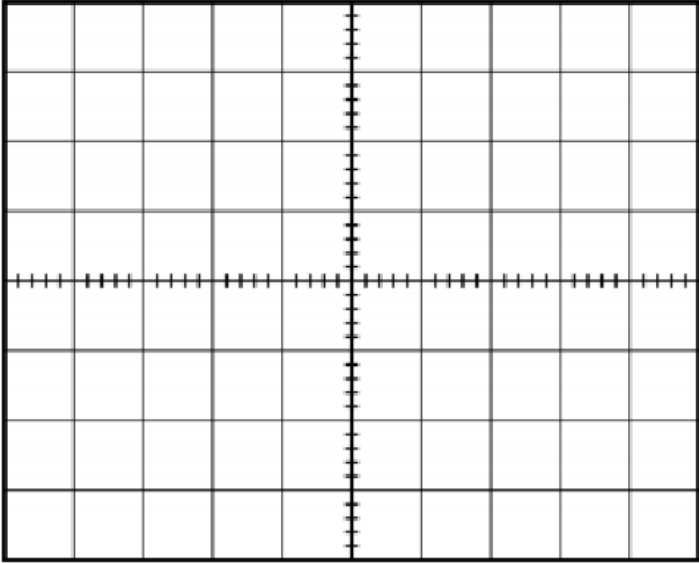
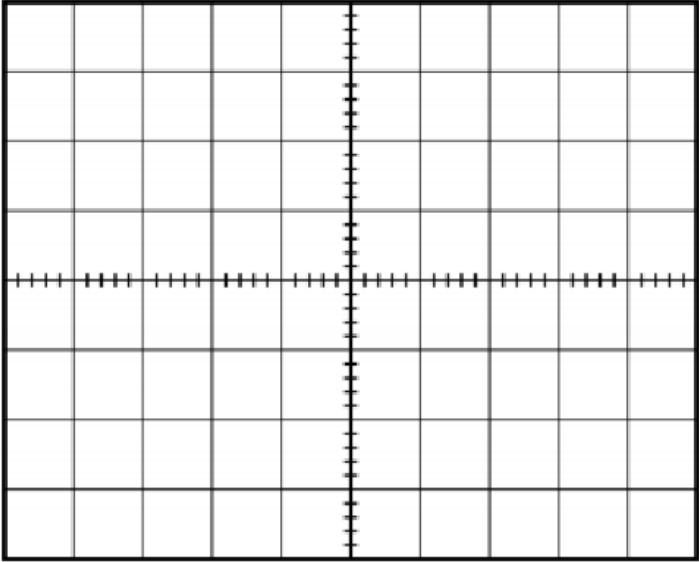
<b>ใบงานที่ 7</b> <b>เรื่อง วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อย</b>	
<b>วัตถุประสงค์</b>	
1. เข้าใจหลักการทำงานของวงจรถูกกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อย 2. อธิบายการทำงานของวงจรถูกกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อย	
<b>เครื่องมือและอุปกรณ์</b>	
	<b>จำนวน</b>
1. ไอซีออปแอมป์เบอร์ UA741 2. ตัวต้านทานค่า 150 Ω 3. ตัวต้านทานค่า 10 kΩ 4. ตัวต้านทานค่า 25 kΩ 5. ตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้ 10 kΩ 6. ตัวเก็บประจุ 0.1 uF 7. มัลติมิเตอร์ 8. Oscilloscope พร้อมสาย 9. Power supply พร้อมสาย 10. แผงวงจรทดลอง	2 ตัว 1 ตัว 1 ตัว 1 ตัว 1 ตัว 1 ตัว 1 เครื่อง 1 เครื่อง 1 เครื่อง 1 อัน
<b>ลำดับขั้นตอนการทดลอง</b>	
1. ต่อวงจรดังรูปที่ บ7.1	
<b>รูปที่ บ7.1 (ธนัสต์, 2565)</b>	

2. ใช้มัลติมิเตอร์ วัดค่าแรงดัน ณ จุด  $V_D$  มีค่าเท่ากับ .....
3. ใช้ Oscilloscope วัดสัญญาณเอาต์พุต  $V_{o1}$  และสัญญาณเอาต์พุต  $V_{o2}$  พร้อมทั้งบันทึกรูปภาพสัญญาณที่ได้

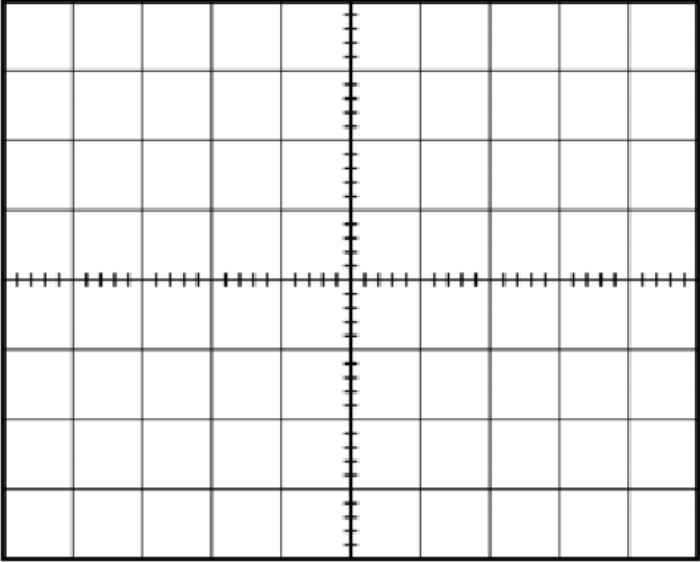
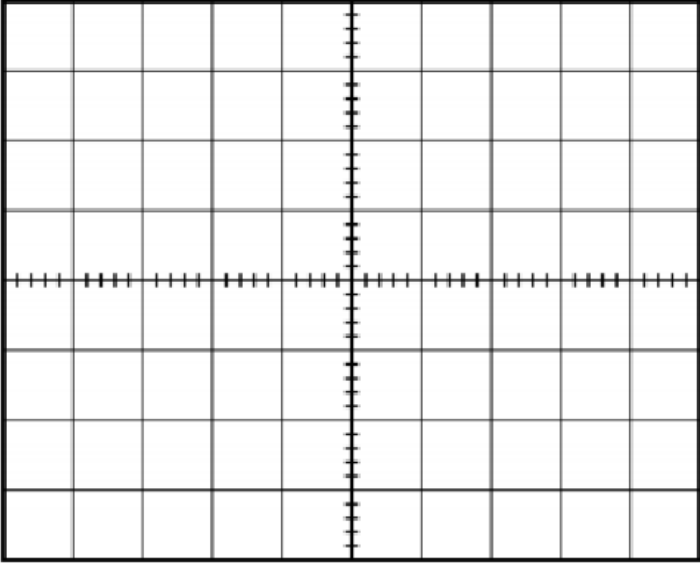
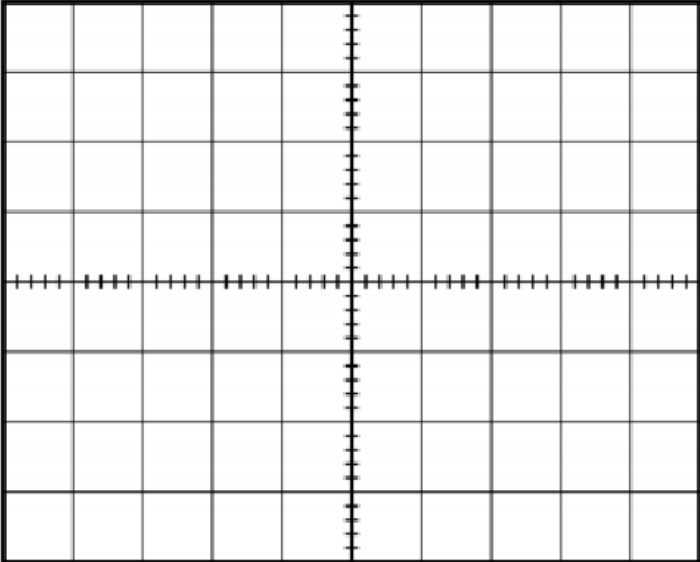


4. จากวงจรรูปที่ บ.7.1 ทำการเปลี่ยนค่าตัวต้านทาน  $R_1$  ค่าตัวต้านทาน  $R_2$  ค่าตัวต้านทาน  $R_3$  ตัวเก็บประจุ  $C$  โดยปรับค่าตัวต้านทาน  $R_4$  เพื่อให้ได้ค่า Duty Cycle และค่าความถี่  $f_0$  ดังตาราง พร้อมทั้งใช้ Oscilloscope วัดสัญญาณเอาต์พุตพร้อมทั้งบันทึกรูปภาพสัญญาณเอาต์พุต  $V_{o1}$  และสัญญาณเอาต์พุต  $V_{o2}$  ที่ได้ทุกรูป และใช้มัลติมิเตอร์ วัดค่าแรงดันอ้างอิง  $V_D$  บันทึกค่าที่ได้ลงตาราง

$R_1$	$R_2$	$R_3$	$C$	$V_D$	Duty Cycle	$f_0$
					0.3	10 kHz
					0.7	10 kHz
					0.3	20 kHz
					0.7	20 kHz
					0.3	30 kHz
					0.7	30 kHz
					0.3	40 kHz
					0.7	40 kHz
					0.3	50 kHz
					0.7	50 kHz

	<p><math>R_1 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>R_2 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>R_3 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>C = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>V_D = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>f_0 = \dots\dots\dots</math></p> <p>Duty cycle = <math>\dots\dots\dots</math></p>
	<p><math>R_1 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>R_2 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>R_3 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>C = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>V_D = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>f_0 = \dots\dots\dots</math></p> <p>Duty cycle = <math>\dots\dots\dots</math></p>
	<p><math>R_1 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>R_2 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>R_3 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>C = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>V_D = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>f_0 = \dots\dots\dots</math></p> <p>Duty cycle = <math>\dots\dots\dots</math></p>



	<p><math>R_1 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>R_2 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>R_3 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>C = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>V_D = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>f_0 = \dots\dots\dots</math></p> <p><i>Duty cycle</i> = <math>\dots\dots\dots</math></p>
	<p><math>R_1 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>R_2 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>R_3 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>C = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>V_D = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>f_0 = \dots\dots\dots</math></p> <p><i>Duty cycle</i> = <math>\dots\dots\dots</math></p>
	<p><math>R_1 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>R_2 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>R_3 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>C = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>V_D = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>f_0 = \dots\dots\dots</math></p> <p><i>Duty cycle</i> = <math>\dots\dots\dots</math></p>

	<p><math>R_1 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>R_2 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>R_3 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>C = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>V_D = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>f_0 = \dots\dots\dots</math></p> <p>Duty cycle = <math>\dots\dots\dots</math></p>
	<p><math>R_1 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>R_2 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>R_3 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>C = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>V_D = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>f_0 = \dots\dots\dots</math></p> <p>Duty cycle = <math>\dots\dots\dots</math></p>
	<p><math>R_1 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>R_2 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>R_3 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>C = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>V_D = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>f_0 = \dots\dots\dots</math></p> <p>Duty cycle = <math>\dots\dots\dots</math></p>



## ใบงานที่ 8 เรื่อง วงจรออสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดัน

### วัตถุประสงค์

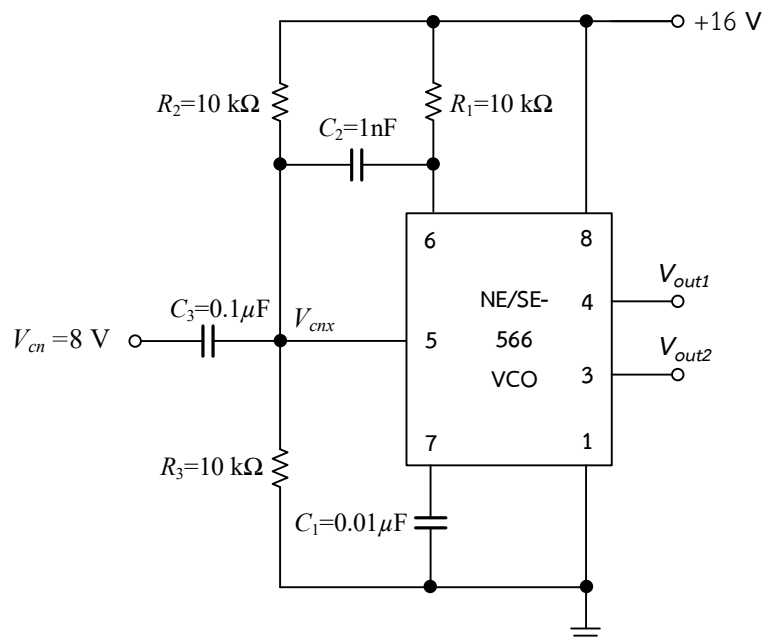
1. เข้าใจหลักการทำงานของวงจรออสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดัน
2. อธิบายการทำงานของวงจรออสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดัน

เครื่องมือและอุปกรณ์	จำนวน
----------------------	-------

1. ไอซีเบอร์ NE/SE-566 VCO	1 ตัว
2. ตัวต้านทานค่า 10 kΩ	3 ตัว
3. ตัวเก็บประจุ 0.01 uF	1 ตัว
4. ตัวเก็บประจุ 0.1 uF	1 ตัว
5. ตัวเก็บประจุ 1 nF	1 ตัว
6. มัลติมิเตอร์	1 เครื่อง
7. Oscilloscope พร้อมสาย	1 เครื่อง
8. Power supply พร้อมสาย	1 เครื่อง
9. แผงวงจรทดลอง	1 อัน

### ลำดับขั้นตอนการทดลอง

1. ต่อวงจรดังรูปที่ บ8.1

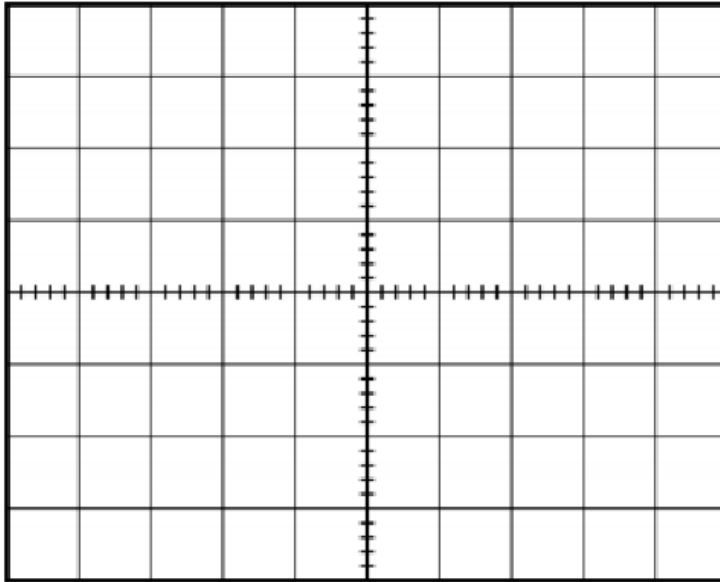


รูปที่ บ8.1 (ธันส์ถ์, 2565)

2. ใช้มัลติมิเตอร์ วัดค่าแรงดัน

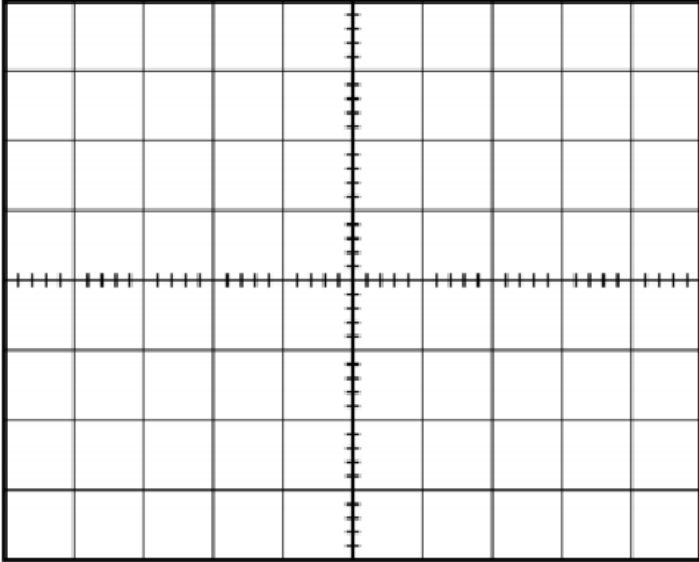
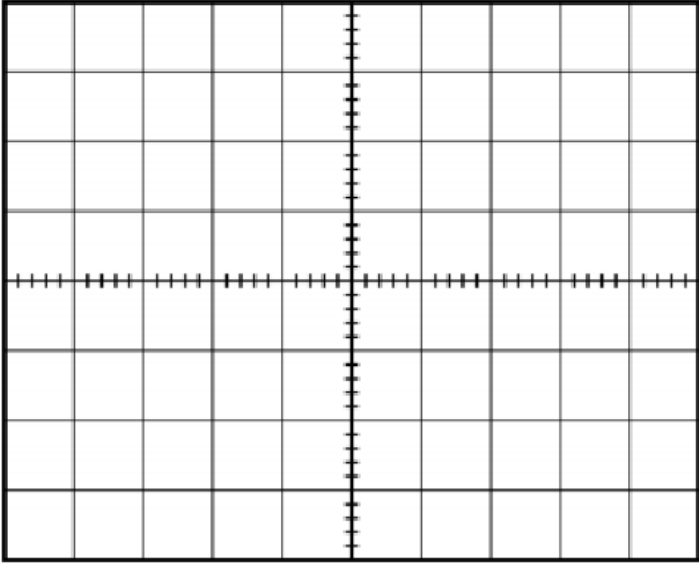
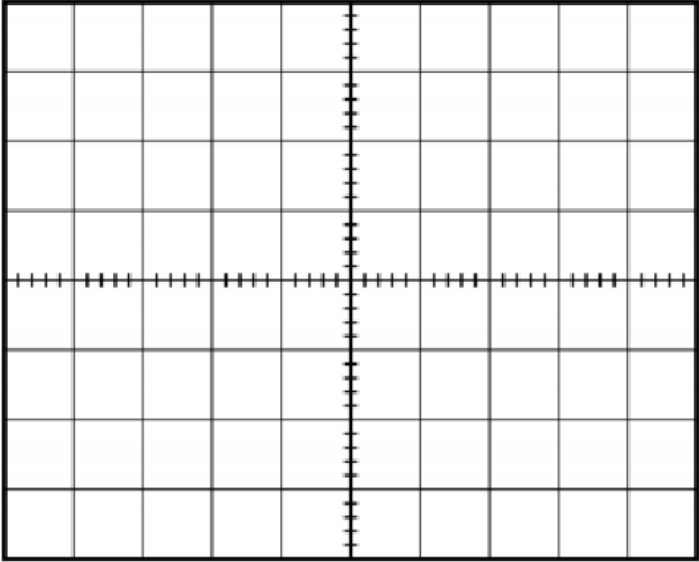
ณ จุด  $V_{cn}$  มีค่าเท่ากับ ..... และ  $V_{cnx}$  มีค่าเท่ากับ .....

3. ใช้ Oscilloscope วัดสัญญาณเอาต์พุต  $V_{out1}$  (ขา 4) และสัญญาณเอาต์พุต  $V_{out2}$  (ขา 3) ของไอซีเบอร์ NE/SE-566 VCO พร้อมทั้งบันทึกรูปภาพสัญญาณที่ได้



4. จากวงจรรูปที่ บ8.1 ทำการเปลี่ยนค่าตัวต้านทาน  $R_1$  ค่าตัวต้านทาน  $R_2$  ค่าตัวต้านทาน  $R_3$  ตัวเก็บประจุ  $C_1$  ตัวเก็บประจุ  $C_2$  และตัวเก็บประจุ  $C_3$  เพื่อให้ได้ค่าความถี่  $f_0$  ดังตาราง ใช้ Oscilloscope วัดสัญญาณเอาต์พุตพร้อมทั้งบันทึกรูปภาพสัญญาณเอาต์พุต  $V_{out1}$  (ขา 4) และสัญญาณเอาต์พุต  $V_{out2}$  (ขา 3) ของไอซีเบอร์ NE/SE-566 VCO ที่ได้ทุกรูป และใช้มัลติมิเตอร์วัดค่าแรงดัน  $V_{cnx}$  บันทึกค่าที่ได้ลงตาราง

$R_1$	$R_2$	$R_3$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$V_{cnx}$	$f_0$
							50 kHz
							100 kHz
							200 kHz
							300 kHz

	$R_1 = \dots\dots\dots$ $R_2 = \dots\dots\dots$ $R_3 = \dots\dots\dots$ $C_1 = \dots\dots\dots$ $C_2 = \dots\dots\dots$ $C_3 = \dots\dots\dots$ $V_{cnx} = \dots\dots\dots$ $f_0 = \dots\dots\dots$
	$R_1 = \dots\dots\dots$ $R_2 = \dots\dots\dots$ $R_3 = \dots\dots\dots$ $C_1 = \dots\dots\dots$ $C_2 = \dots\dots\dots$ $C_3 = \dots\dots\dots$ $V_{cnx} = \dots\dots\dots$ $f_0 = \dots\dots\dots$
	$R_1 = \dots\dots\dots$ $R_2 = \dots\dots\dots$ $R_3 = \dots\dots\dots$ $C_1 = \dots\dots\dots$ $C_2 = \dots\dots\dots$ $C_3 = \dots\dots\dots$ $V_{cnx} = \dots\dots\dots$ $f_0 = \dots\dots\dots$



## ใบงานที่ 9 เรื่อง วงจรเฟสล็อกกลุบ

### วัตถุประสงค์

1. เข้าใจหลักการทำงานของวงจรเฟสล็อกกลุบ
2. อธิบายการทำงานของวงจรเฟสล็อกกลุบ

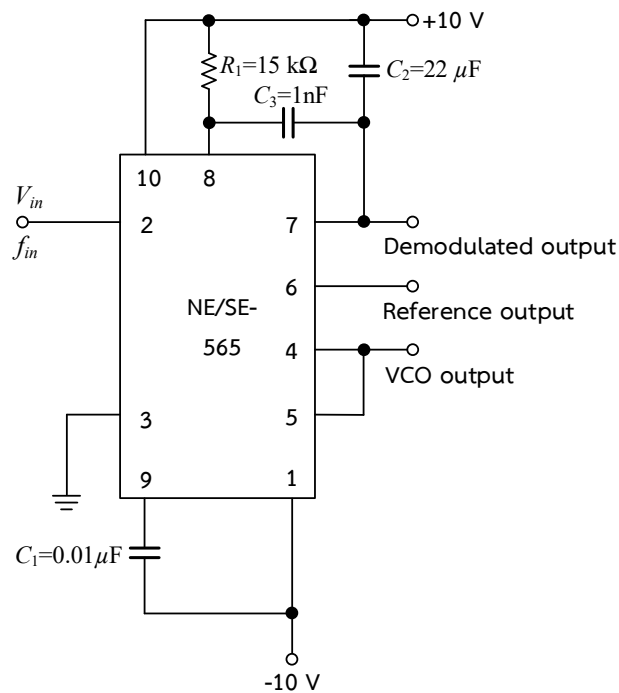
### เครื่องมือและอุปกรณ์

### จำนวน

- |                                |           |
|--------------------------------|-----------|
| 1. ไอซีเบอร์ NE/SE-565         | 1 ตัว     |
| 2. ตัวต้านทานค่า 15 k $\Omega$ | 3 ตัว     |
| 3. ตัวเก็บประจุ 0.01 $\mu$ F   | 1 ตัว     |
| 4. ตัวเก็บประจุ 22 $\mu$ F     | 1 ตัว     |
| 5. ตัวเก็บประจุ 1 nF           | 1 ตัว     |
| 6. Oscilloscope พร้อมสาย       | 1 เครื่อง |
| 7. Power supply พร้อมสาย       | 1 เครื่อง |
| 8. Signal generator พร้อมสาย   | 1 เครื่อง |
| 9. แผงวงจรทดลอง                | 1 อัน     |

### ลำดับขั้นตอนการทดลอง

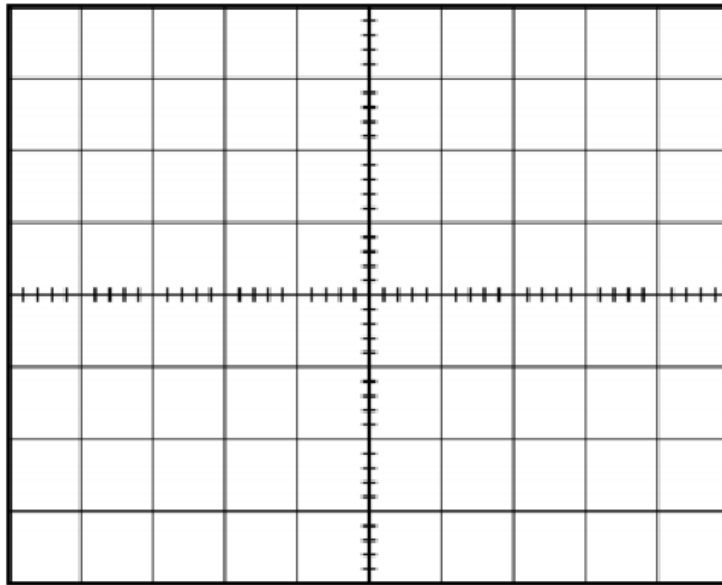
1. ต่อวงจรดังรูปที่ บ9.1



รูปที่ บ9.1 (ธน์สดี, 2565)

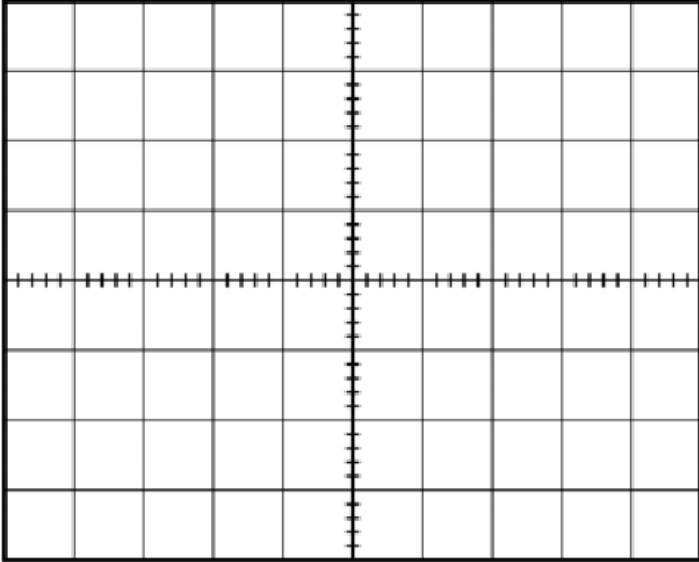
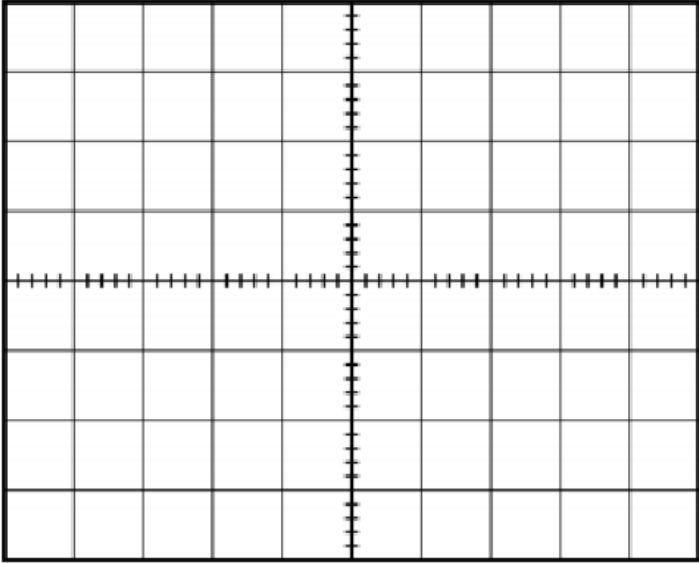
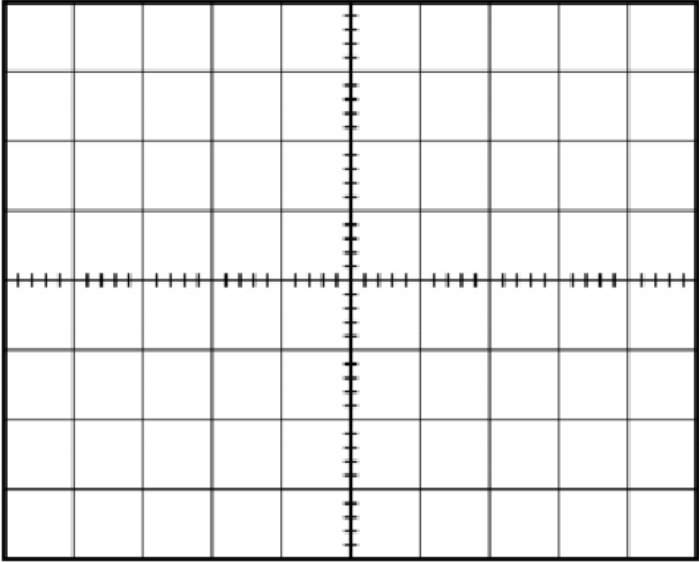


2. ทำการป้อนแรงดันอินพุต  $V_{in}$  เป็นค่าแรงดันอินพุตรูปคลื่นไซน์ ขนาด  $1 V_{p-p}$  ความถี่ 5 kHz
3. ใช้ Oscilloscope วัดสัญญาณเอาต์พุต (ขา 4) ของไอซีเบอร์ NE/SE-565 พร้อมทั้งบันทึกรูปภาพสัญญาณที่ได้



4. จากวงจรรูปที่ บ9.1 เมื่อกำหนดค่าความถี่ศูนย์กลาง  $f_0$  และค่าความถี่ย่านแคบเตอร์  $f_c$  ทำการออกแบบวงจรเพื่อให้ได้ค่าดังกล่าวตามตาราง โดยทำการป้อนแรงดันอินพุต  $V_{in}$  เป็นค่าแรงดันอินพุตรูปคลื่นไซน์ บันทึกค่าที่ได้ลงตารางและใช้ Oscilloscope วัดสัญญาณเอาต์พุต (ขา 4) ของไอซีเบอร์ NE/SE-565 พร้อมทั้งบันทึกรูปภาพสัญญาณเอาต์พุตที่ได้ทุกรูป

$V_{in}$	$R_1$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$f_L$	$f_c$	$f_0$
$1 V_{p-p}$ 5 kHz						25 Hz	1 kHz
$1 V_{p-p}$ 5 kHz						50 Hz	1 kHz
$1 V_{p-p}$ 5 kHz						100 Hz	1 kHz
$1 V_{p-p}$ 5 kHz						25 Hz	2.5 kHz
$1 V_{p-p}$ 5 kHz						50 Hz	2.5 kHz
$1 V_{p-p}$ 5 kHz						100 Hz	2.5 kHz
$1 V_{p-p}$ 10 kHz						25 Hz	5 kHz
$1 V_{p-p}$ 10 kHz						50 Hz	5 kHz
$1 V_{p-p}$ 10 kHz						100 Hz	5 kHz

	<p><math>V_{in} = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>R_1 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>C_1 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>C_2 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>C_3 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>f_r = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>f_c = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>f_0 = \dots\dots\dots</math></p>
	<p><math>V_{in} = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>R_1 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>C_1 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>C_2 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>C_3 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>f_r = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>f_c = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>f_0 = \dots\dots\dots</math></p>
	<p><math>V_{in} = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>R_1 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>C_1 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>C_2 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>C_3 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>f_r = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>f_c = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>f_0 = \dots\dots\dots</math></p>

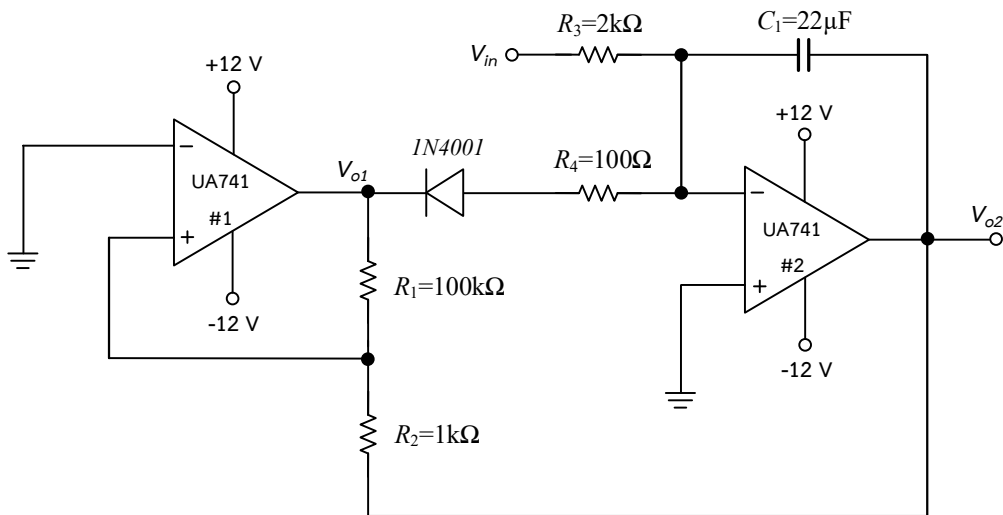
	$V_{in} = \dots\dots\dots$ $R_1 = \dots\dots\dots$ $C_1 = \dots\dots\dots$ $C_2 = \dots\dots\dots$ $C_3 = \dots\dots\dots$ $f_r = \dots\dots\dots$ $f_c = \dots\dots\dots$ $f_0 = \dots\dots\dots$
	$V_{in} = \dots\dots\dots$ $R_1 = \dots\dots\dots$ $C_1 = \dots\dots\dots$ $C_2 = \dots\dots\dots$ $C_3 = \dots\dots\dots$ $f_r = \dots\dots\dots$ $f_c = \dots\dots\dots$ $f_0 = \dots\dots\dots$
	$V_{in} = \dots\dots\dots$ $R_1 = \dots\dots\dots$ $C_1 = \dots\dots\dots$ $C_2 = \dots\dots\dots$ $C_3 = \dots\dots\dots$ $f_r = \dots\dots\dots$ $f_c = \dots\dots\dots$ $f_0 = \dots\dots\dots$

	<p><math>V_{in} = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>R_1 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>C_1 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>C_2 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>C_3 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>f_r = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>f_c = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>f_0 = \dots\dots\dots</math></p>
	<p><math>V_{in} = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>R_1 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>C_1 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>C_2 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>C_3 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>f_r = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>f_c = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>f_0 = \dots\dots\dots</math></p>
	<p><math>V_{in} = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>R_1 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>C_1 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>C_2 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>C_3 = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>f_r = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>f_c = \dots\dots\dots</math></p> <p><math>f_0 = \dots\dots\dots</math></p>

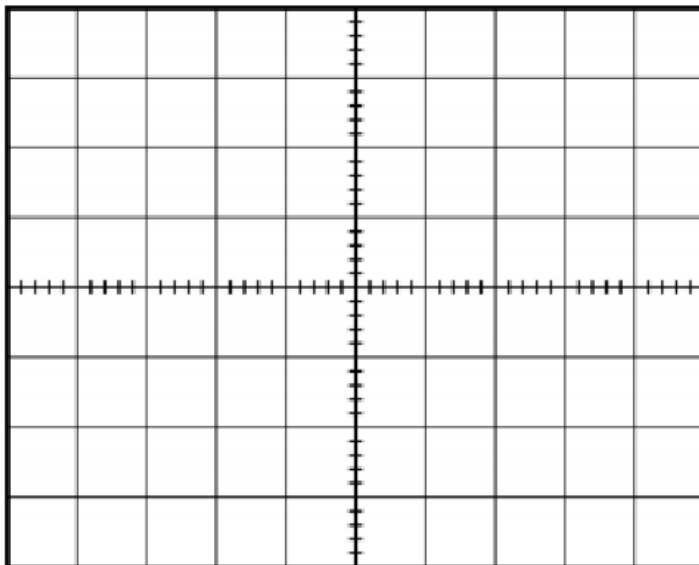


<b>ใบงานที่ 10</b> <b>เรื่อง วงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่</b>	
<b>วัตถุประสงค์</b>	
1. เข้าใจหลักการทำงานของวงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่ 2. อธิบายการทำงานของวงจรแปลงแรงดันเป็นความถี่	
<b>เครื่องมือและอุปกรณ์</b>	<b>จำนวน</b>
1. ไอซีเบอร์ LM331 2. ไอซีเบอร์ AD650 3. ไอซีออปแอมป์เบอร์ UA741 4. ตัวต้านทานค่า 47 $\Omega$ 5. ตัวต้านทานค่า 100 $\Omega$ 6. ตัวต้านทานค่า 1 k $\Omega$ 7. ตัวต้านทานค่า 2 k $\Omega$ 8. ตัวต้านทานค่า 6.8 k $\Omega$ 9. ตัวต้านทานค่า 10 k $\Omega$ 10. ตัวต้านทานค่า 100 k $\Omega$ 11. ตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้ 5 k $\Omega$ 12. ตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้ 22 k $\Omega$ 13. ตัวเก็บประจุ 0.01 $\mu\text{F}$ 14. ตัวเก็บประจุ 0.1 $\mu\text{F}$ 15. ตัวเก็บประจุ 1 $\mu\text{F}$ 16. ตัวเก็บประจุ 22 $\mu\text{F}$ 17. ไดโอดเบอร์ 1N4001 18. Oscilloscope พร้อมสาย 19. Power supply พร้อมสาย 20. แผงวงจรทดลอง	1 ตัว 1 ตัว 2 ตัว 1 ตัว 1 ตัว 1 ตัว 1 ตัว 2 ตัว 3 ตัว 1 ตัว 1 ตัว 1 ตัว 1 ตัว 1 ตัว 1 ตัว 1 ตัว 1 ตัว 1 ตัว 1 ตัว 1 ตัว 1 เครื่อง 1 เครื่อง 1 อัน
<b>ลำดับขั้นตอนการทดลอง</b>	
1. ต่อวงจรดังรูปที่ บ10.1 2. ทำการป้อนแรงดันอินพุต $V_{in}$ ดังตาราง และใช้ Oscilloscope วัดสัญญาณเอาต์พุต $V_{o1}$ และสัญญาณเอาต์พุต $V_{o2}$ พร้อมทั้งบันทึกค่าความถี่ของการเกิดการออสซิลเลต $f_o$ และรูปร่างสัญญาณที่ได้	

$V_{in}$	$f_0$
1 V	
2 V	
3 V	
4 V	
5 V	

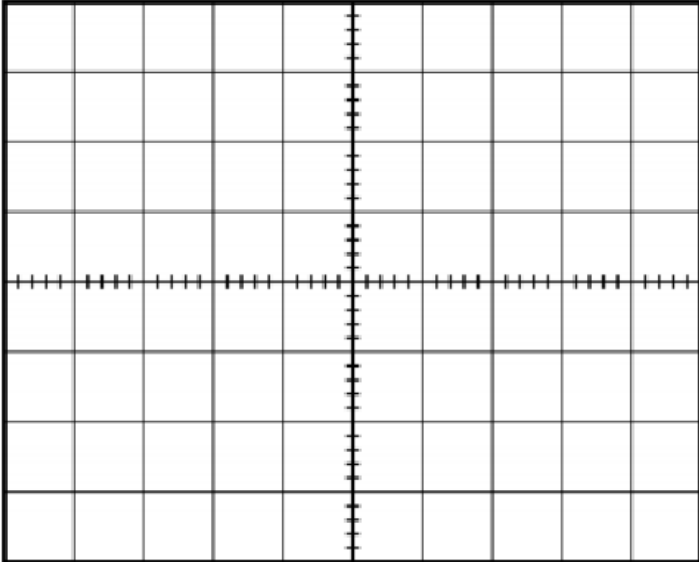
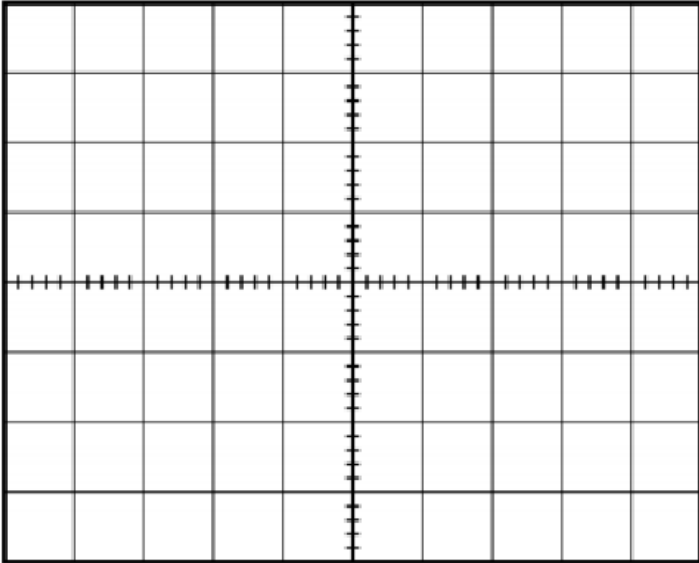
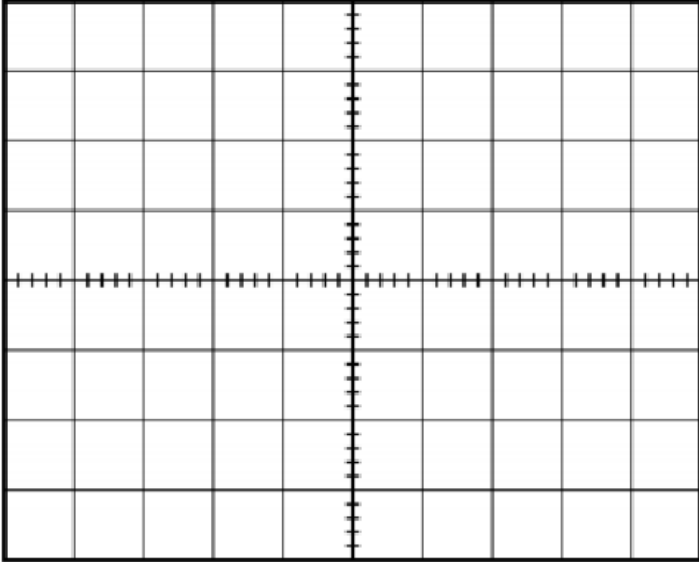


รูปที่ บ10.1 (ธน์สัถ์, 2565)

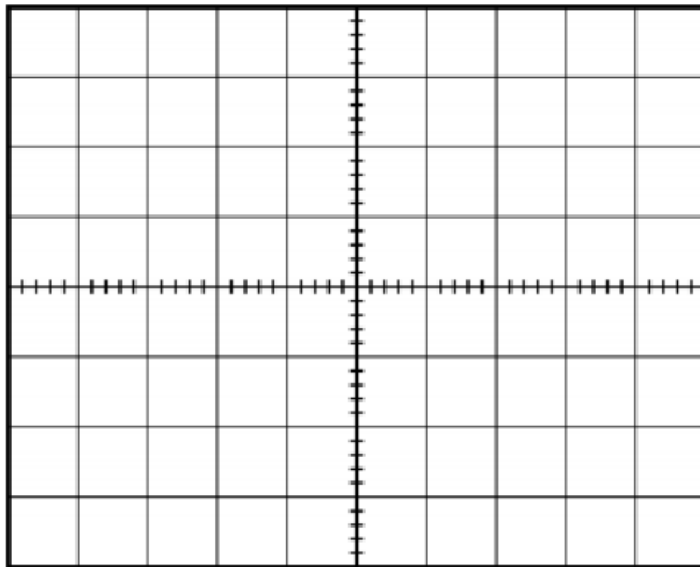


$V_{in} = \dots\dots\dots$

$f_0 = \dots\dots\dots$

	$V_{in} = \dots\dots\dots$ $f_0 = \dots\dots\dots$
	$V_{in} = \dots\dots\dots$ $f_0 = \dots\dots\dots$
	$V_{in} = \dots\dots\dots$ $f_0 = \dots\dots\dots$

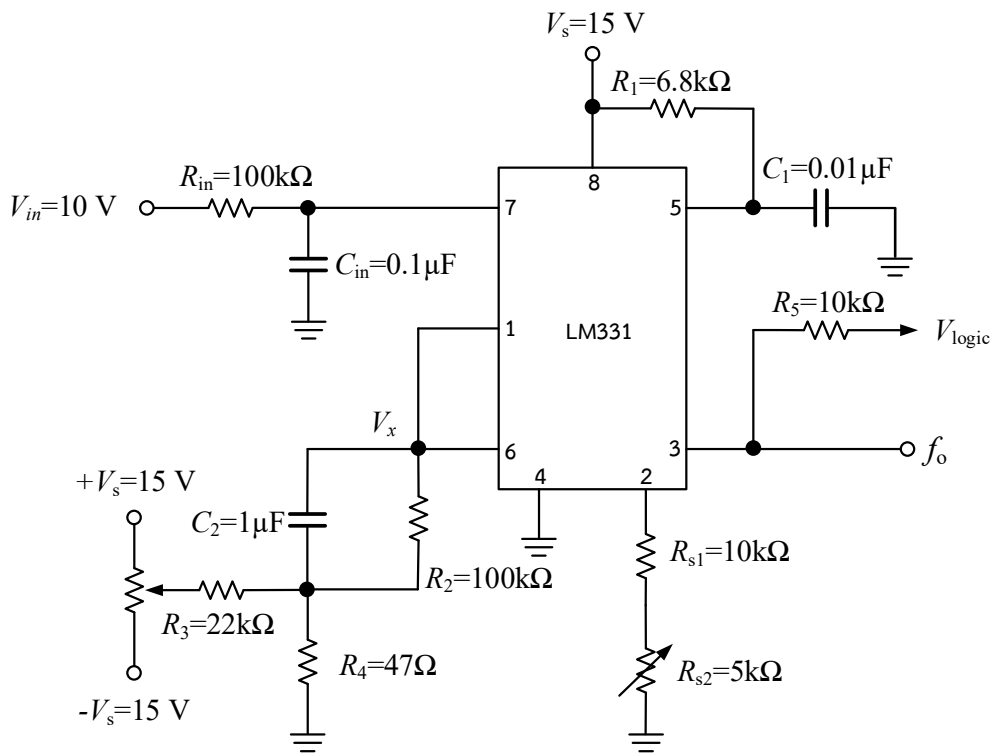




$V_{in} = \dots\dots\dots$

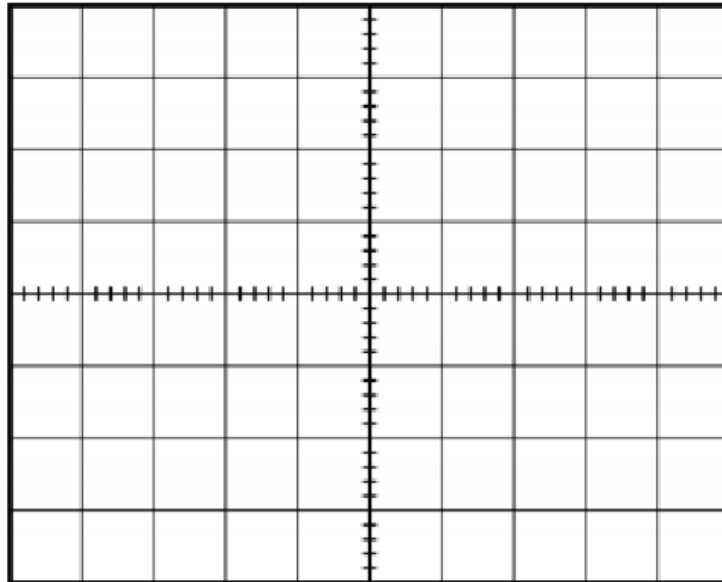
$f_0 = \dots\dots\dots$

3. ต่อดังรูปที่ บ10.2



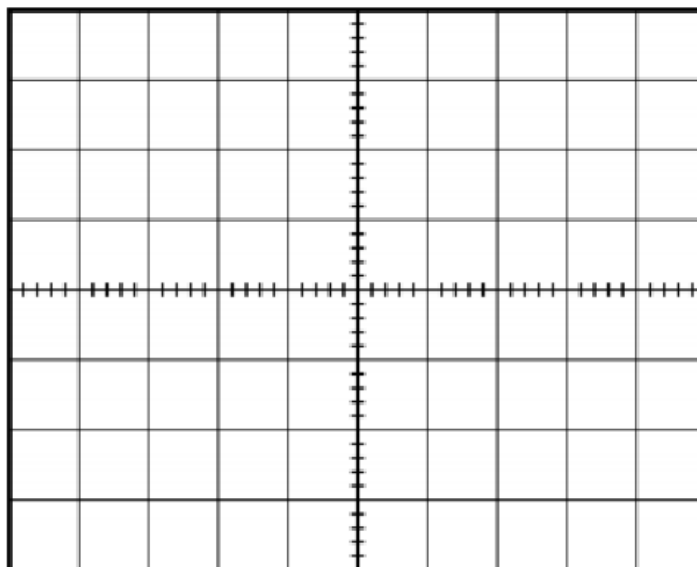
รูปที่ บ10.2 (ธันส์, 2565)

4. ทำการปรับค่าตัวต้านทาน  $R_3$  และ ค่าตัวต้านทาน  $R_2$  ให้ค่าความถี่ของการเกิดการออสซิลเลต  $f_0$  มีค่าเท่ากับ 10 kHz และใช้ Oscilloscope วัดสัญญาณเอาต์พุต  $f_0$  (ขา 3 ของไอซีเบอร์ LM331) พร้อมทั้งบันทึกรูปภาพสัญญาณที่ได้



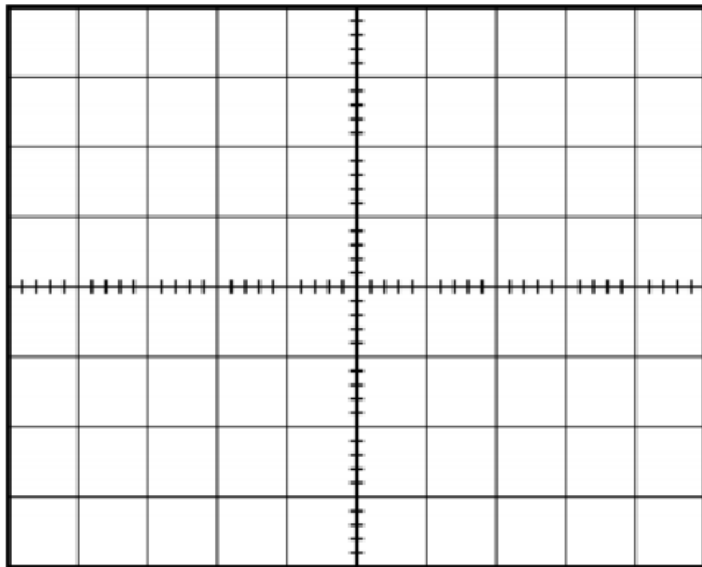
5. จากรูปที่ บ10.2 ทำการป้อนแรงดันอินพุต  $V_{in}$  (ขา 7 ของไอซีเบอร์ LM331) ดังตาราง และใช้ Oscilloscope วัดสัญญาณเอาต์พุต  $f_o$  (ขา 3 ของไอซีเบอร์ LM331) พร้อมทั้งบันทึกรูปภาพสัญญาณที่ได้

$V_{in}$	$f_o$
1 V	
2 V	
3 V	
4 V	
5 V	



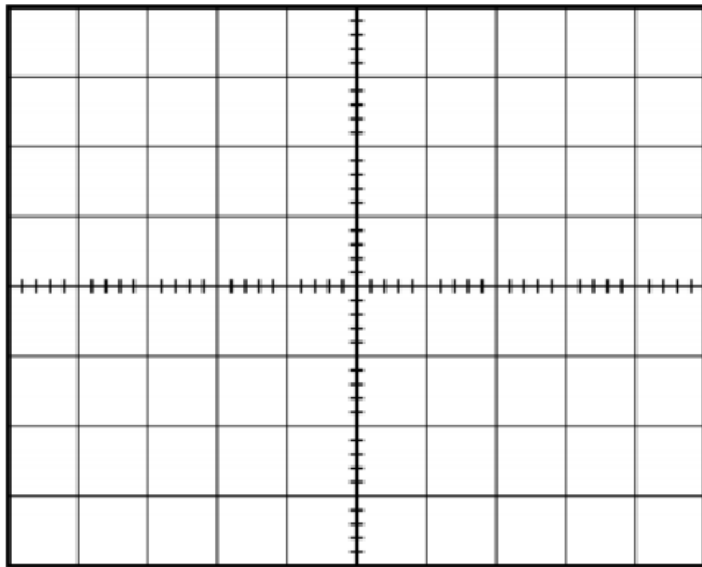
$V_{in} = \dots\dots\dots$

$f_o = \dots\dots\dots$



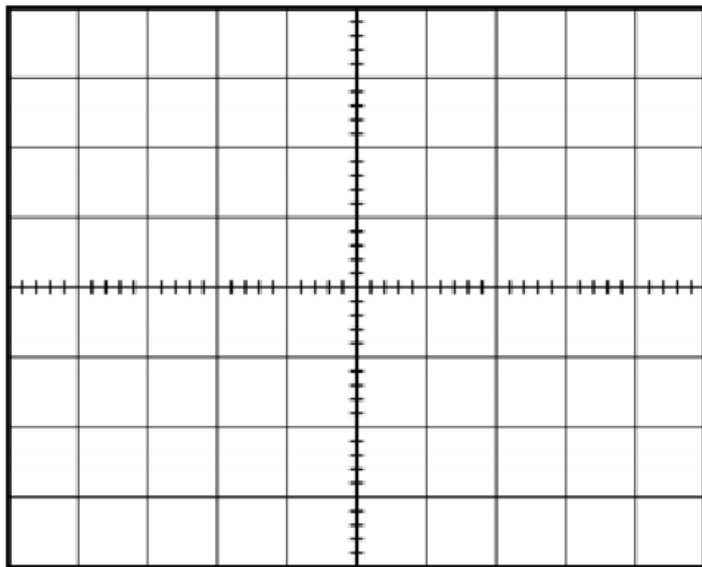
$V_{in} = \dots\dots\dots$

$f_0 = \dots\dots\dots$



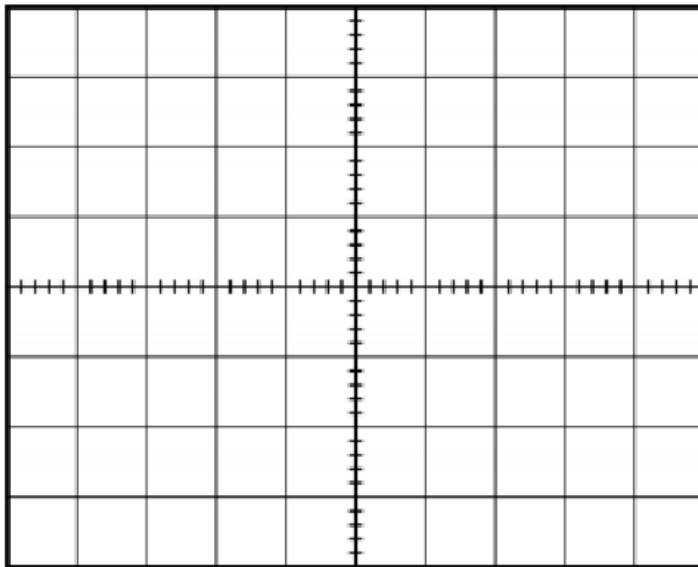
$V_{in} = \dots\dots\dots$

$f_0 = \dots\dots\dots$



$V_{in} = \dots\dots\dots$

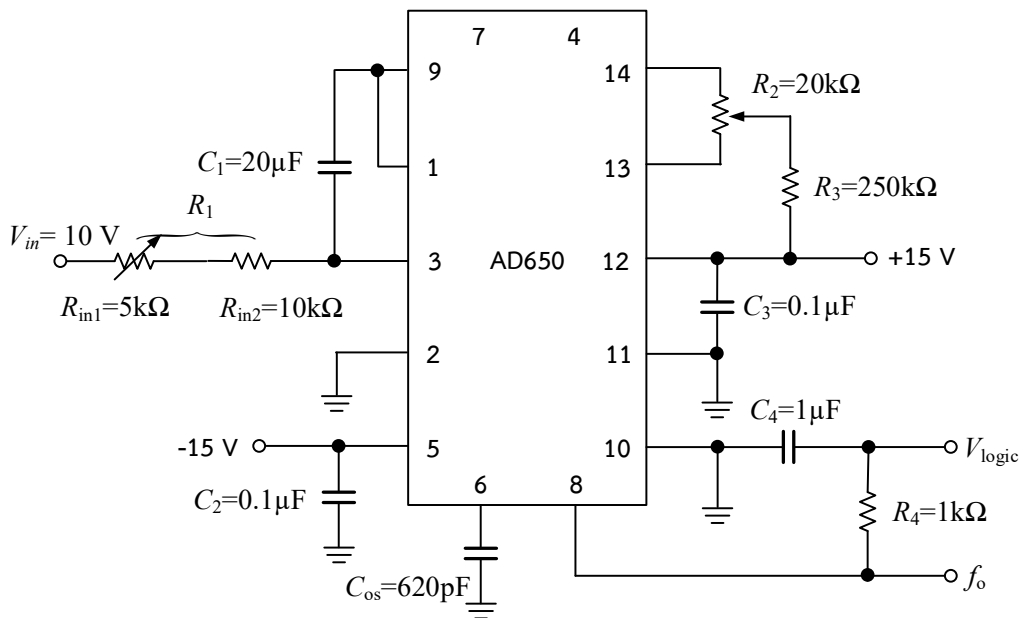
$f_0 = \dots\dots\dots$



$V_{in} = \dots\dots\dots$

$f_0 = \dots\dots\dots$

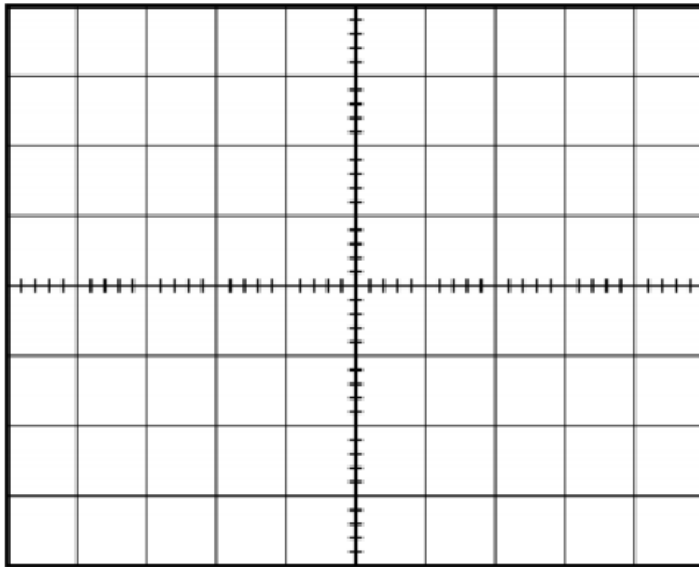
6. ต่ วงจรดังรูปที่ บ10.3



รูปที่ บ10.3 (ธน์สัถ์, 2565)

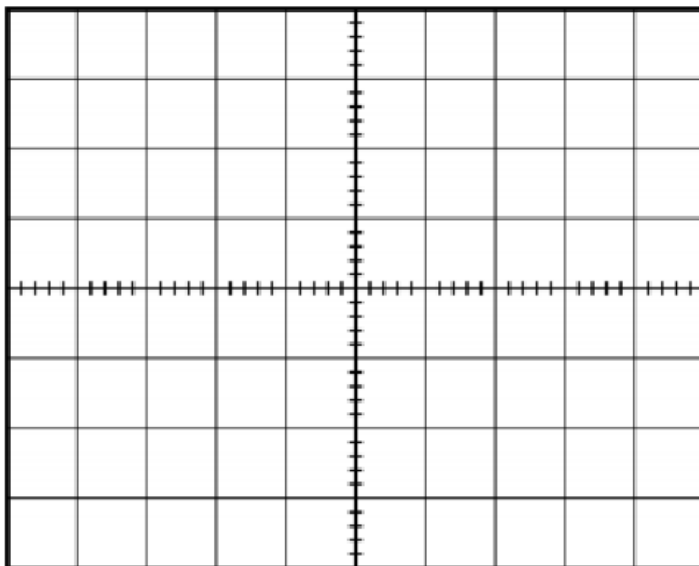
7. จากรูปที่ บ10.3 ทำการป้อนแรงดันอินพุต  $V_{in}$  (ขา 3 ของไอซีเบอร์ AD650) ดังตาราง และใช้ Oscilloscope วัดสัญญาณเอาต์พุต  $f_0$  (ขา 8 ของไอซีเบอร์ AD650) พร้อมทั้งบันทึกรูปภาพสัญญาณที่ได้

$V_{in}$	$f_0$
2 V	
4 V	
6 V	
8 V	
10 V	



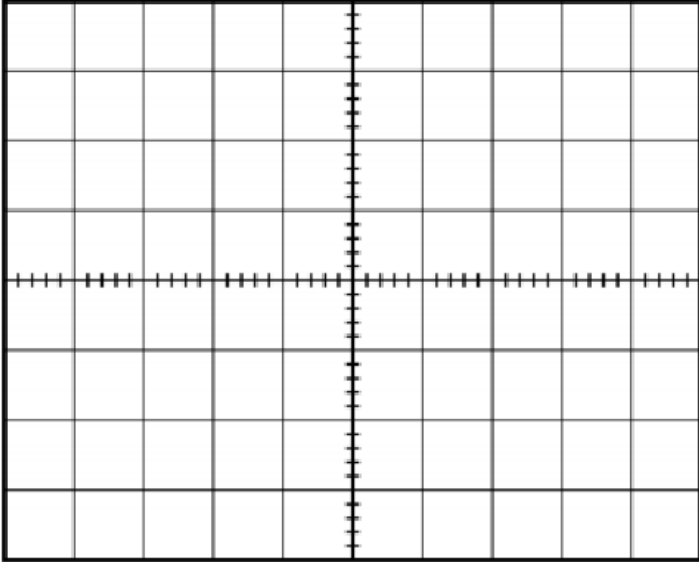
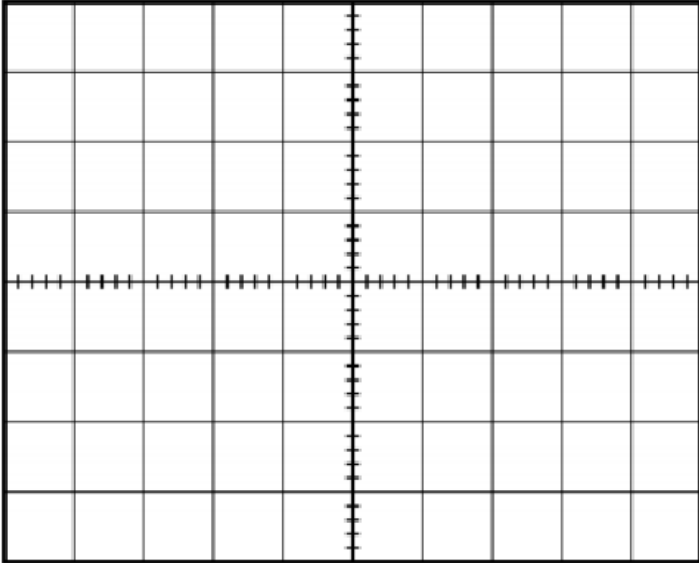
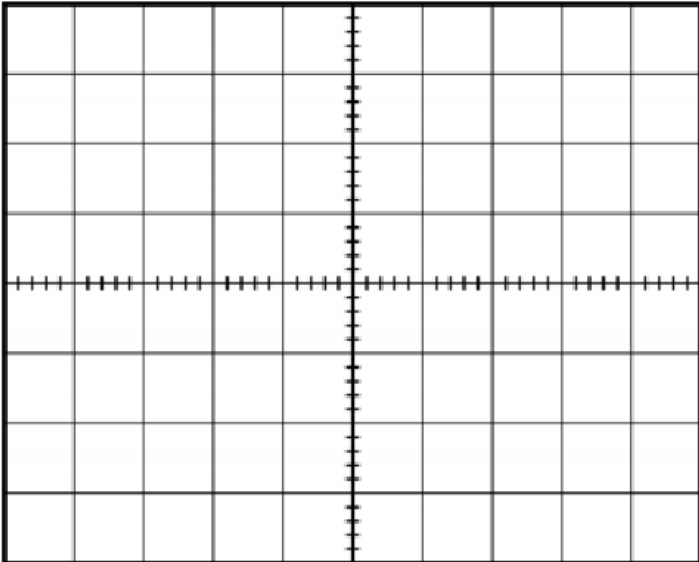
$V_{in} = \dots\dots\dots$

$f_0 = \dots\dots\dots$



$V_{in} = \dots\dots\dots$

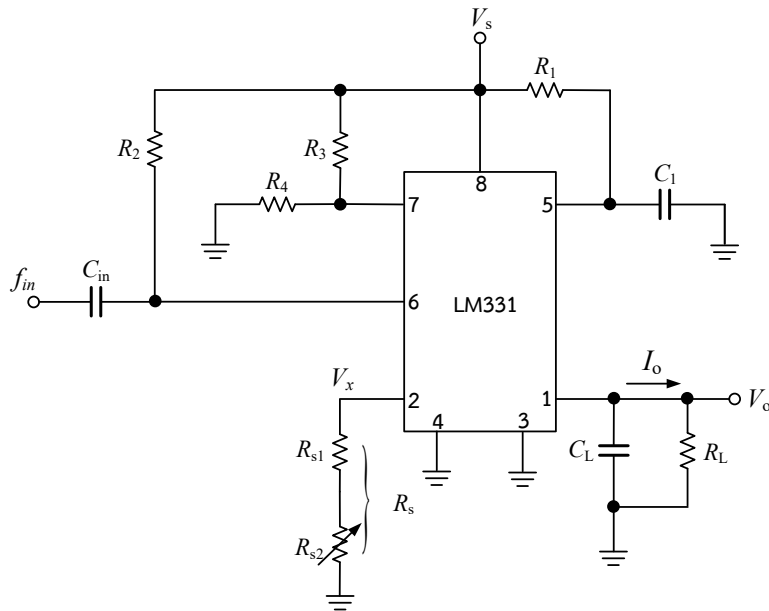
$f_0 = \dots\dots\dots$

	$V_{in} = \dots\dots\dots$ $f_0 = \dots\dots\dots$
	$V_{in} = \dots\dots\dots$ $f_0 = \dots\dots\dots$
	$V_{in} = \dots\dots\dots$ $f_0 = \dots\dots\dots$

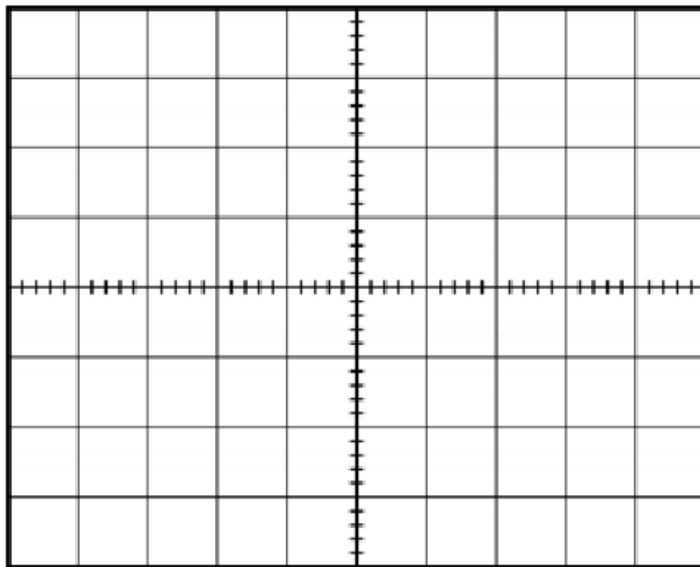


<b>ใบงานที่ 11</b> <b>เรื่อง วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน</b>																																			
<b>วัตถุประสงค์</b>																																			
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. เข้าใจหลักการทำงานของวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน</li> <li>2. อธิบายการทำงานของวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน</li> </ol>																																			
<b>เครื่องมือและอุปกรณ์</b>	<b>จำนวน</b>																																		
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ไอซีเบอร์ LM331</li> <li>2. ไอซีเบอร์ AD650</li> <li>3. ไอซีออปแอมป์เบอร์ UA741</li> <li>4. ตัวต้านทานค่า 2 k<math>\Omega</math></li> <li>5. ตัวต้านทานค่า 50 k<math>\Omega</math></li> <li>6. ตัวต้านทานค่า 10 k<math>\Omega</math></li> <li>7. ตัวต้านทานค่า 200 k<math>\Omega</math></li> <li>8. ตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้ 5 k<math>\Omega</math></li> <li>9. ตัวเก็บประจุ 0.1 <math>\mu</math>F</li> <li>10. ตัวเก็บประจุ 470 pF</li> <li>11. ตัวเก็บประจุ 20 pF</li> <li>12. Oscilloscope พร้อมสาย</li> <li>13. Power supply พร้อมสาย</li> <li>14. Signal generator พร้อมสาย</li> <li>15. แผงวงจรทดลอง</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1 ตัว</li> <li>1 ตัว</li> <li>1 ตัว</li> <li>1 ตัว</li> <li>1 ตัว</li> <li>4 ตัว</li> <li>1 ตัว</li> <li>1 ตัว</li> <li>2 ตัว</li> <li>1 ตัว</li> <li>1 ตัว</li> <li>1 เครื่อง</li> <li>1 เครื่อง</li> <li>1 เครื่อง</li> <li>1 อัน</li> </ol>																																		
<b>ลำดับขั้นตอนการทดลอง</b>																																			
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ต่อวงจรดังรูปที่ บ11.1</li> <li>2. บันทึกค่าอุปกรณ์แพสซีฟที่ได้ในตาราง เมื่อกำหนดค่าความถี่อินพุต <math>f_m</math> (ขา 6 ของไอซีเบอร์ LM331) เพื่อให้ได้ค่าแรงดัน <math>V_o</math> ที่ต้องการ พร้อมทั้งใช้ Oscilloscope วัดสัญญาณเอาต์พุต <math>V_o</math> (ขา 1 ของไอซีเบอร์ LM331) บันทึกรูปภาพสัญญาณที่ได้</li> </ol>																																			
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th><math>f_m</math></th> <th><math>R_1</math></th> <th><math>R_2</math></th> <th><math>R_1</math></th> <th><math>R_3</math></th> <th><math>R_4</math></th> <th><math>R_s</math></th> <th><math>R_L</math></th> <th><math>C_{in}</math></th> <th><math>C_I</math></th> <th><math>C_L</math></th> <th><math>V_o</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>5 kHz</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>												$f_m$	$R_1$	$R_2$	$R_1$	$R_3$	$R_4$	$R_s$	$R_L$	$C_{in}$	$C_I$	$C_L$	$V_o$	5 kHz											
$f_m$	$R_1$	$R_2$	$R_1$	$R_3$	$R_4$	$R_s$	$R_L$	$C_{in}$	$C_I$	$C_L$	$V_o$																								
5 kHz																																			





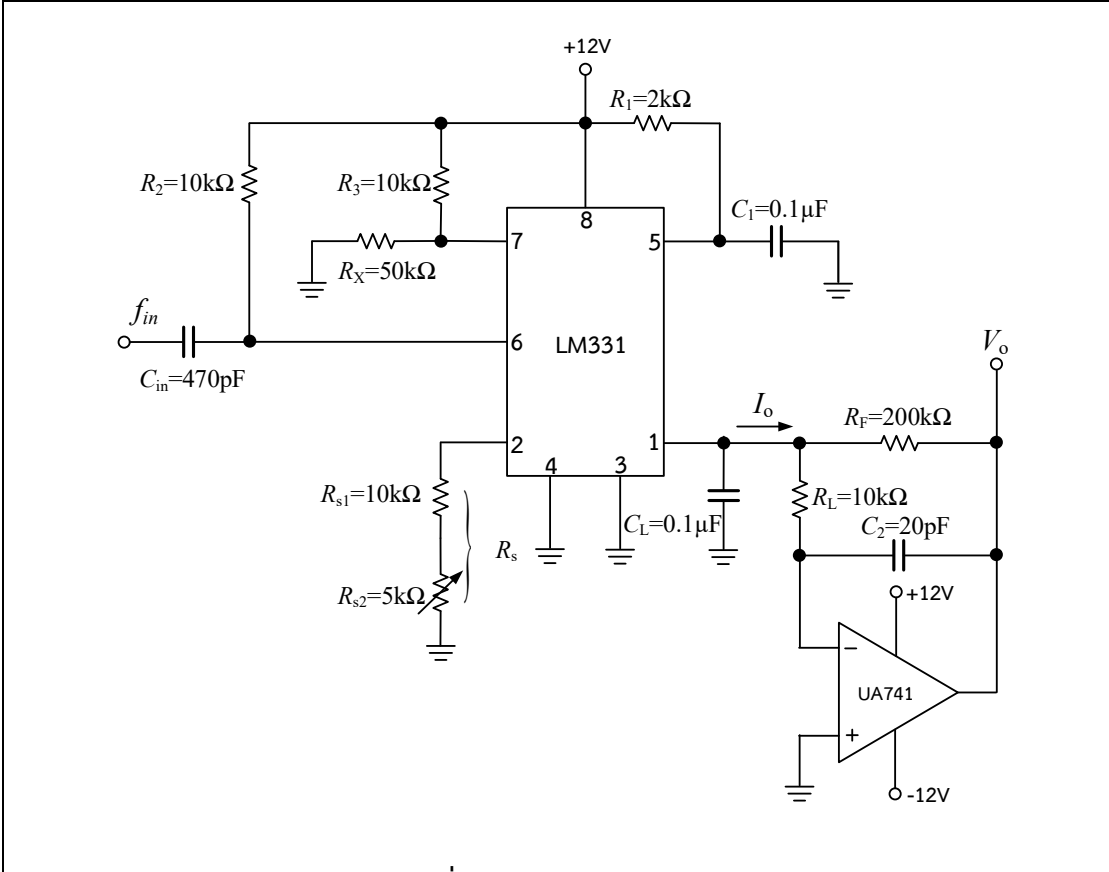
รูปที่ บ11.1 (ธนส์ถ์, 2565)



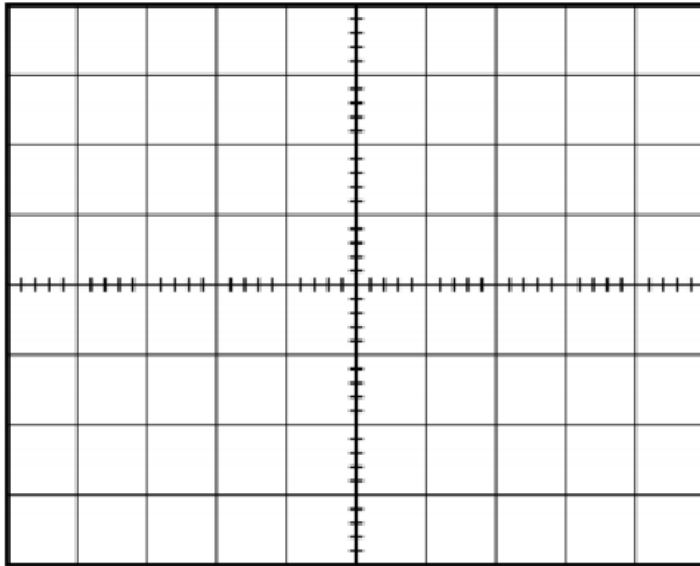
$f_{in} = \dots\dots\dots$   
 $V_o = \dots\dots\dots$

3. ต่อดวงจรถัดรูปที่ บ11.2
4. ป้อนค่าความถี่อินพุต  $f_{in}$  (ขา 6 ของไอซีเบอร์ LM331) ตามตาราง และใช้ Oscilloscope วัดสัญญาณเอาต์พุต  $V_o$  (ขา 1 ของไอซีเบอร์ LM331) ที่ได้ บันทึกค่าแรงดันเอาต์พุต  $V_o$  ลงตาราง พร้อมทั้งบันทึกรูปภาพสัญญาณที่ได้

$f_{in}$	$V_o$
5 kHz	
10 kHz	
15 kHz	



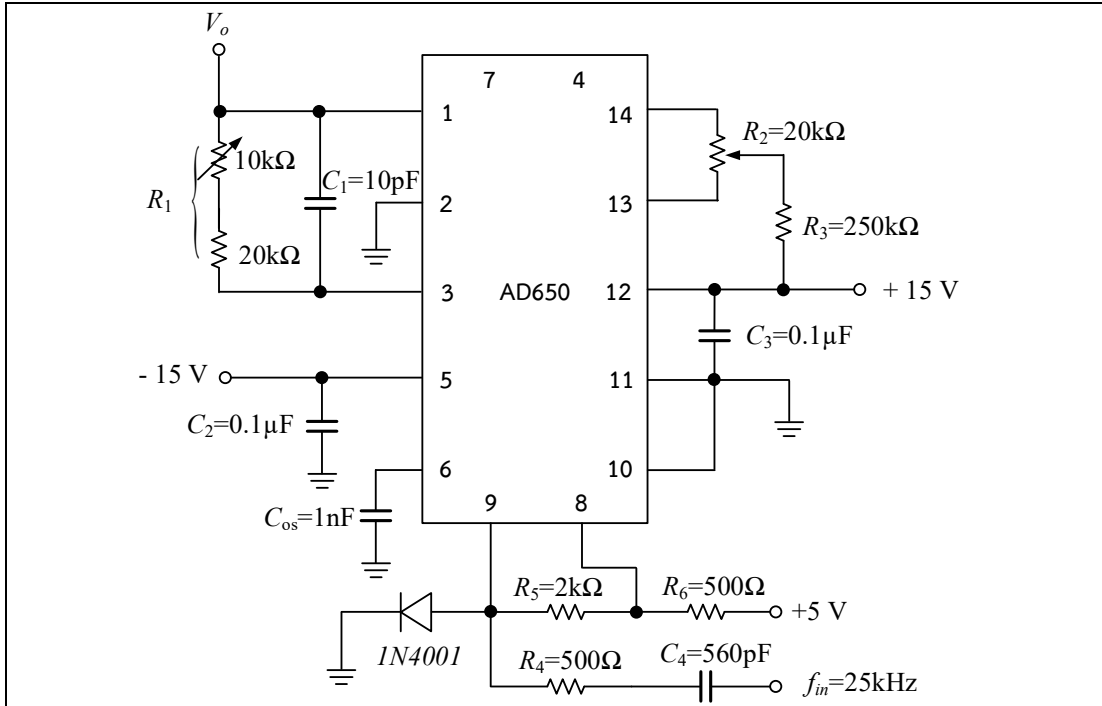
รูปที่ บ11.2 (ธน์สัถ์, 2565)



$f_{in} = \dots\dots\dots$

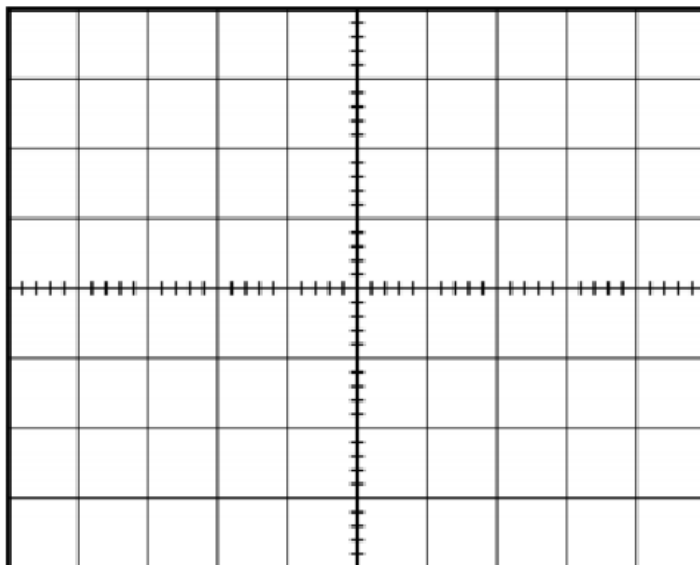
$V_0 = \dots\dots\dots$

5. ต่่วงจรดังรูปที่ บ11.3



รูปที่ บ11.3 (ธันส์, 2565)

6. ป้อนค่าความถี่อินพุต  $f_{in}$  (ขา 9 ของไอซีเบอร์ AD650) เท่ากับ 25 kHz ใช้ Oscilloscope วัดสัญญาณเอาต์พุต  $V_o$  (ขา 1 และขา 3 ของไอซีเบอร์ AD650) พร้อมทั้งบันทึกรูปภาพสัญญาณที่ได้

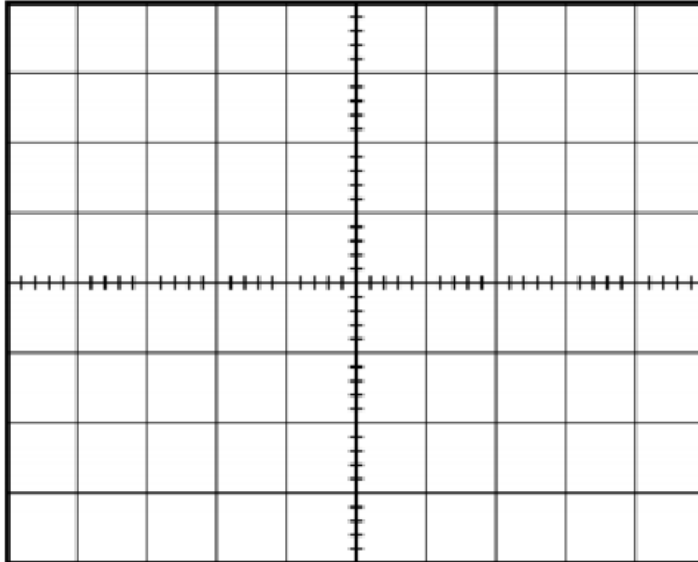


$f_{in} = \dots\dots\dots$

$V_o = \dots\dots\dots$

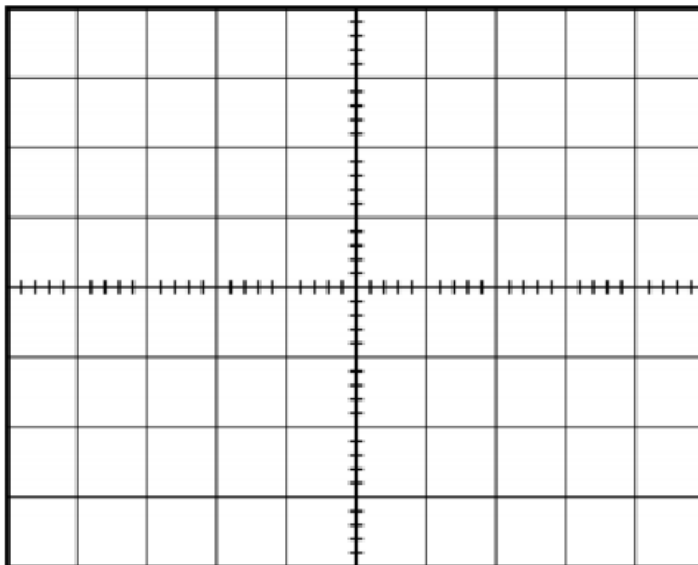
7. จากวงจรรูปที่ บ11.3 ทำการเปลี่ยนค่าความถี่อินพุต  $f_{in}$  (ขา 9 ของไอซีเบอร์ AD650) ดังตาราง ใช้ Oscilloscope วัดสัญญาณเอาต์พุต  $V_o$  (ขา 1 และขา 3 ของไอซีเบอร์ AD650) พร้อมทั้งบันทึกรูปภาพสัญญาณที่ได้ทุกรูป

$f_{in}$	$V_0$
10 kHz	
50 kHz	
100 kHz	



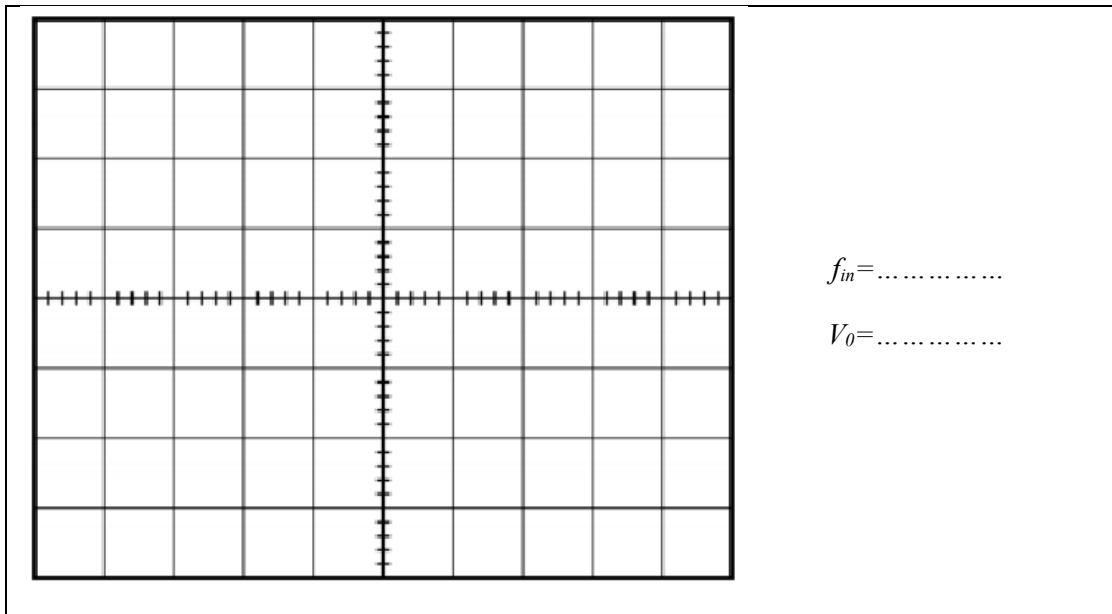
$f_{in} = \dots\dots\dots$

$V_0 = \dots\dots\dots$



$f_{in} = \dots\dots\dots$

$V_0 = \dots\dots\dots$



สรุปผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

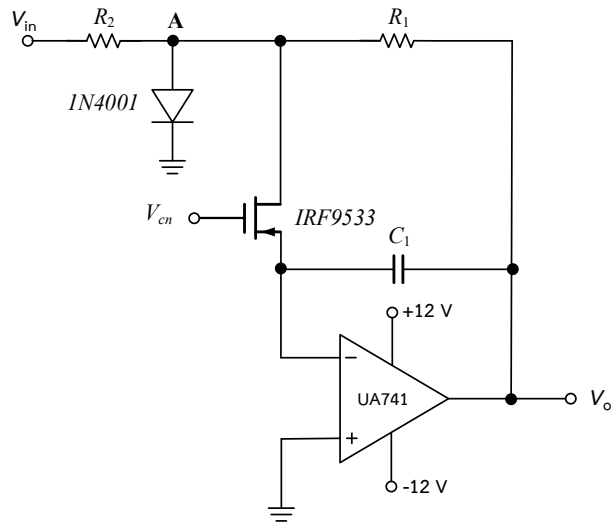
.....

.....

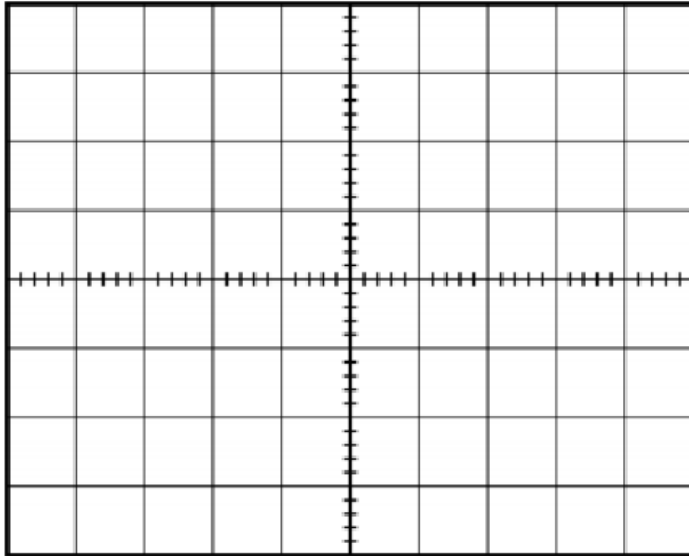
.....

.....

ใบงานที่ 12 เรื่อง วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ																													
<b>วัตถุประสงค์</b>																													
<ol style="list-style-type: none"> <li>เข้าใจหลักการการทำงานของวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ</li> <li>อธิบายการทำงานของวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ</li> </ol>																													
<b>เครื่องมือและอุปกรณ์</b>	<b>จำนวน</b>																												
<ol style="list-style-type: none"> <li>ไอซีเบอร์ OPA615</li> <li>ไอซีเบอร์ LF198</li> <li>ไอซีออปแอมป์เบอร์ UA741</li> <li>ตัวต้านทานค่า 50 <math>\Omega</math></li> <li>ตัวต้านทานค่า 150 <math>\Omega</math></li> <li>ตัวต้านทานค่า 300 <math>\Omega</math></li> <li>ตัวต้านทานค่า 100 k<math>\Omega</math></li> <li>ตัวเก็บประจุ 2 nF</li> <li>ไดโอดเบอร์ 1N4001</li> <li>มอสเฟต เบอร์ IRF9533</li> <li>Oscilloscope พร้อมสาย</li> <li>Power supply พร้อมสาย</li> <li>Signal generator พร้อมสาย</li> <li>มัลติมิเตอร์ พร้อมสาย</li> <li>แผงวงจรทดลอง</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1 ตัว</li> <li>1 ตัว</li> <li>1 ตัว</li> <li>1 ตัว</li> <li>1 ตัว</li> <li>2 ตัว</li> <li>1 ตัว</li> <li>1 ตัว</li> <li>1 ตัว</li> <li>1 ตัว</li> <li>1 เครื่อง</li> <li>1 เครื่อง</li> <li>1 เครื่อง</li> <li>1 เครื่อง</li> <li>1 อัน</li> </ol>																												
<b>ลำดับขั้นตอนการทดลอง</b>																													
<ol style="list-style-type: none"> <li>ต่อวงจรดังรูปที่ บ12.1</li> <li>บันทึกค่าอุปกรณ์แพสซีฟและใช้มัลติมิเตอร์วัดแรงดันที่ได้ ณ จุด <b>A</b> บันทึกค่าที่ได้ลงในตาราง ป้อนค่าแรงดันอินพุต <math>V_{in}</math> สัญญาณรูปคลื่นไซน์ พร้อมทั้งใช้ Oscilloscope วัดสัญญาณเอาต์พุต <math>V_o</math> และบันทึกรูปภาพสัญญาณที่ได้</li> </ol>																													
<table border="1"> <thead> <tr> <th><math>V_{in}</math></th> <th><math>V_{cn}</math></th> <th><math>R_1</math></th> <th><math>R_2</math></th> <th><math>C_1</math></th> <th><b>A</b></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">1 <math>V_{p-p}</math> 500 Hz</td> <td>0 V</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>5 V</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td rowspan="2">1 <math>V_{p-p}</math> 1 kHz</td> <td>0 V</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>5 V</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		$V_{in}$	$V_{cn}$	$R_1$	$R_2$	$C_1$	<b>A</b>	1 $V_{p-p}$ 500 Hz	0 V					5 V					1 $V_{p-p}$ 1 kHz	0 V					5 V				
$V_{in}$	$V_{cn}$	$R_1$	$R_2$	$C_1$	<b>A</b>																								
1 $V_{p-p}$ 500 Hz	0 V																												
	5 V																												
1 $V_{p-p}$ 1 kHz	0 V																												
	5 V																												



รูปที่ บ12.1 (ธনীส์, 2565)

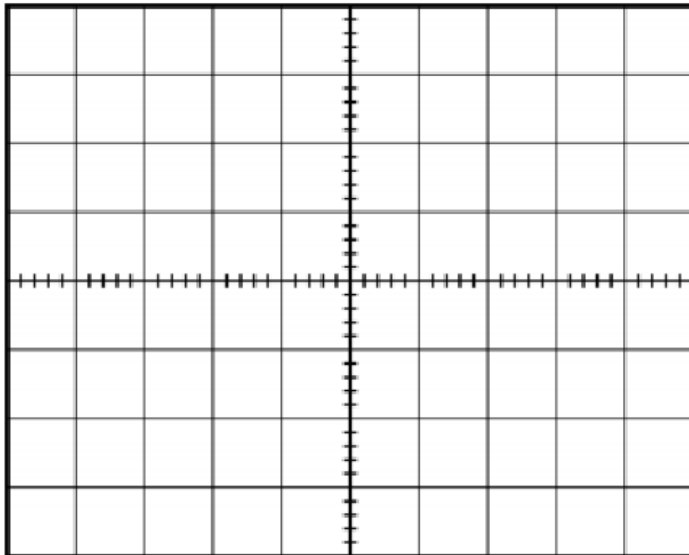


$V_{in} = \dots\dots\dots$

$R_1 = \dots\dots\dots$

$R_2 = \dots\dots\dots$

$C_1 = \dots\dots\dots$



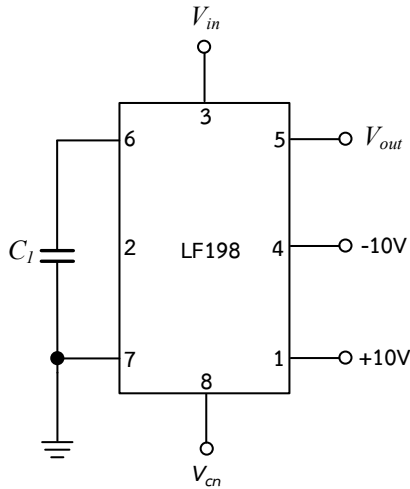
$V_{in} = \dots\dots\dots$

$R_1 = \dots\dots\dots$

$R_2 = \dots\dots\dots$

$C_1 = \dots\dots\dots$

3. ต่อดังรูปที่ บ12.2

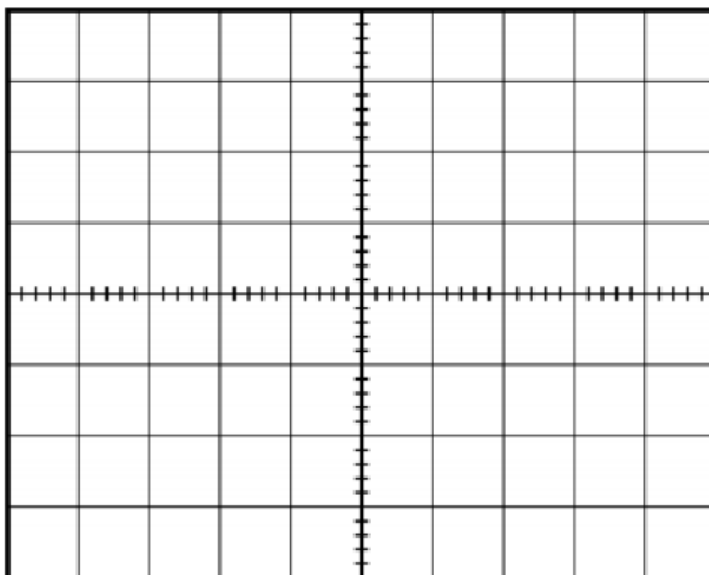


รูปที่ บ12.2 (ธนัสถ์, 2565)

4. ป้อนค่าแรงดันอินพุต  $V_{in}$  สัญญาณรูปคลื่นไซน์ (ขา 3 ของไอซีเบอร์ LF198) กำหนดค่าตัวเก็บประจุ  $C_1$  และป้อนสัญญาณพัลส์แรงดันควบคุม  $V_{cn}$  (ขา 8 ของไอซีเบอร์ LF198) ลงในตาราง

$V_{in}$	$V_{cn}$	$C_1$

5. ใช้ Oscilloscope วัดสัญญาณเอาต์พุต  $V_{out}$  (ขา 5 ของไอซีเบอร์ LF198) และบันทึกรูปภาพสัญญาณที่ได้

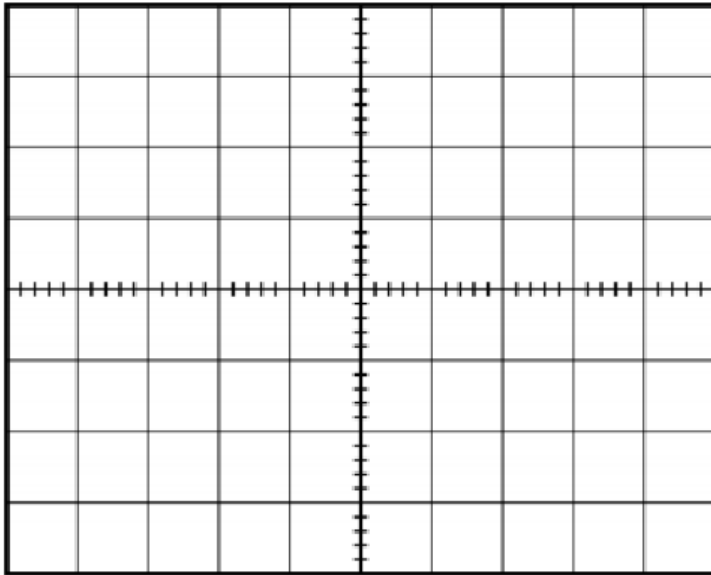


$V_{in} = \dots\dots\dots$

$V_{cn} = \dots\dots\dots$

$C_1 = \dots\dots\dots$



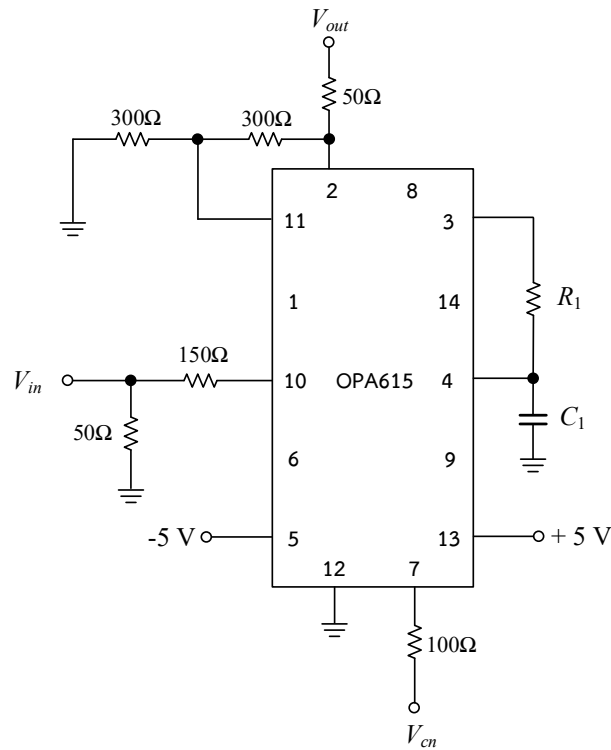


$V_{in} = \dots\dots\dots$

$V_{cn} = \dots\dots\dots$

$C_I = \dots\dots\dots$

6. ต่อดังรูปที่ บ12.3

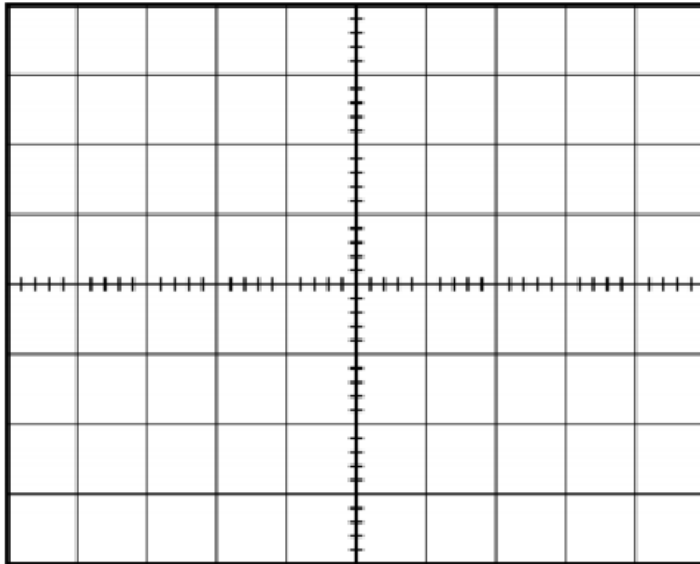


รูปที่ บ12.3 (ธันส์, 2565)

7. ป้อนค่าแรงดันอินพุต  $V_{in}$  รูปคลื่นสัญญาณไซน์ (ขา 10 ของไอซีเบอร์ OPA615) กำหนดค่าตัวต้านทาน  $R_I$  ตัวเก็บประจุ  $C_I$  และป้อนสัญญาณพัลส์แรงดันควบคุม  $V_{cn}$  (ขา 7 ของไอซีเบอร์ OPA615) บันทึกค่าที่ได้กำหนดลงในตาราง พร้อมทั้งใช้

Oscilloscope วัดสัญญาณเอาต์พุต  $V_o$  (ขา 2 และขา 11 ของไอซีเบอร์ OPA615) บันทึก  
รูปภาพสัญญาณที่ได้

$V_{in}$	$V_{cn}$	$R_I$	$C_I$

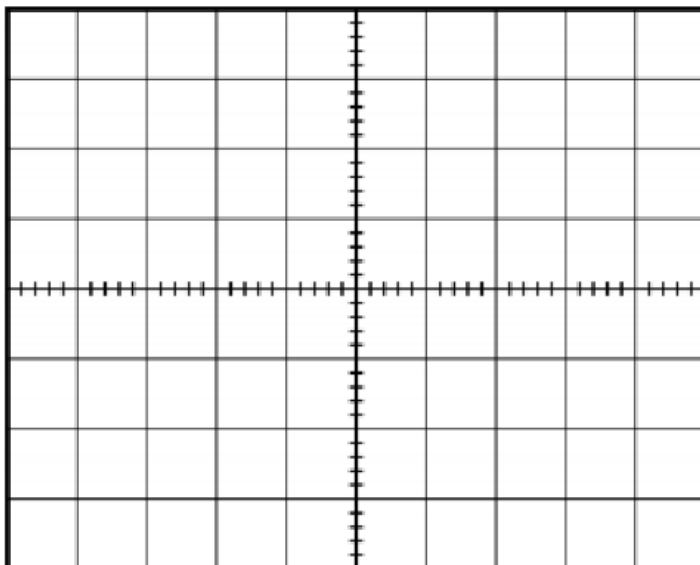


$V_{in} = \dots\dots\dots$

$V_{cn} = \dots\dots\dots$

$R_I = \dots\dots\dots$

$C_I = \dots\dots\dots$



$V_{in} = \dots\dots\dots$

$V_{cn} = \dots\dots\dots$

$R_I = \dots\dots\dots$

$C_I = \dots\dots\dots$

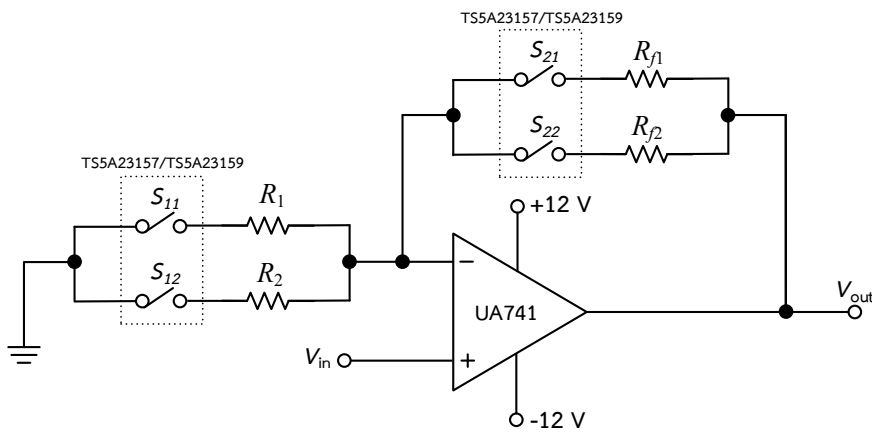


ใบงานที่ 13	
เรื่อง วงจรแอนะล็อกสวิตช์สำหรับวงจรขยายสัญญาณ	
<b>วัตถุประสงค์</b>	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. เข้าใจหลักการทำงานของวงจรแอนะล็อกสวิตช์</li> <li>2. อธิบายการทำงานของวงจรแอนะล็อกสวิตช์</li> <li>3. ประยุกต์ใช้งานวงจรแอนะล็อกสวิตช์สำหรับวงจรขยายสัญญาณ</li> </ol>	
<b>เครื่องมือและอุปกรณ์</b>	<b>จำนวน</b>
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ไอซีเบอร์ TS5A23157/ไอซีเบอร์ TS5A23159</li> <li>2. ไอซีออปแอมป์เบอร์ UA741</li> <li>3. ตัวต้านทานค่า 1 k<math>\Omega</math></li> <li>4. ตัวต้านทานค่า 2 k<math>\Omega</math></li> <li>5. ตัวต้านทานค่า 10 k<math>\Omega</math></li> <li>6. ตัวต้านทานค่า 20 k<math>\Omega</math></li> <li>7. Power supply พร้อมสาย</li> <li>8. มัลติมิเตอร์ พร้อมสาย</li> <li>9. แผงวงจรทดลอง</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>2 ตัว</li> <li>1 ตัว</li> <li>1 ตัว</li> <li>1 ตัว</li> <li>1 ตัว</li> <li>1 ตัว</li> <li>1 เครื่อง</li> <li>1 เครื่อง</li> <li>1 อัน</li> </ol>
<b>ลำดับขั้นตอนการทดลอง</b>	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ต่อวงจรดังรูปที่ บ13.1 โดยใช้ไอซีเบอร์ TS5A23157 หรือ TS5A23159 แทน <math>S_{11}</math> สวิตช์ <math>S_{12}</math> สวิตช์ <math>S_{21}</math> และสวิตช์ <math>S_{22}</math></li> </ol>	
รูปที่ บ13.1 (ฉบับสั, 2565)	

2. กำหนดค่าตัวต้านทานแต่ละตัว พร้อมทั้งป้อนค่าแรงดันอินพุต  $V_{in}$  ใช้มัลติมิเตอร์วัดแรงดัน  $V_{out}$  และทำการหาค่าอัตราขยาย เมื่อวงจรแอนะล็อกสวิตช์ของไอซีเบอร์ TS5A23157 หรือ TS5A23159 ถูกควบคุมจากบิตข้อมูลดิจิทัลให้ สวิตช์  $S_{11}$  สวิตช์  $S_{12}$  สวิตช์  $S_{21}$  และสวิตช์  $S_{22}$  ทำงานดังตาราง บันทึกค่าที่ได้

$V_{in}$	$V_{out}$	$R_{in1}$	$R_{in2}$	$R_{f1}$	$R_{f2}$	$S_{11}$	$S_{12}$	$S_{21}$	$S_{22}$	ค่าอัตราขยาย
						0	1	0	1	
						0	1	1	0	
						0	1	1	1	
						1	0	0	1	
						1	0	1	0	
						1	0	1	1	
						1	1	0	1	
						1	1	1	0	
						1	1	1	1	

3. ต่อวงจรดังรูปที่ บ13.2 โดยใช้ไอซีเบอร์ TS5A23157 หรือ TS5A23159 แทน  $S_{11}$  สวิตช์  $S_{12}$  สวิตช์  $S_{21}$  และสวิตช์  $S_{22}$

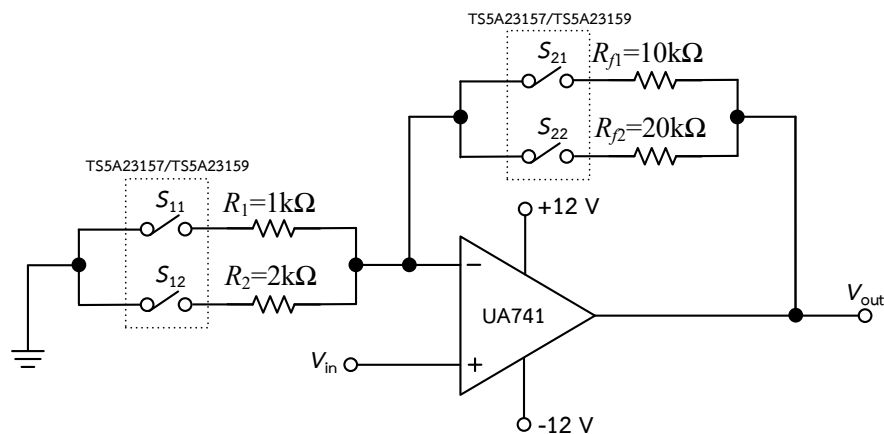


รูปที่ บ13.2 (ธนัสต์, 2565)

4. กำหนดค่าตัวต้านทานแต่ละตัว พร้อมทั้งป้อนค่าแรงดันอินพุต  $V_{in}$  ใช้มัลติมิเตอร์วัดแรงดัน  $V_{out}$  และทำการหาค่าอัตราขยาย เมื่อวงจรแอนะล็อกสวิตช์ของไอซีเบอร์ TS5A23157 หรือ TS5A23159 ถูกควบคุมจากบิตข้อมูลดิจิทัลให้ สวิตช์  $S_{11}$  สวิตช์  $S_{12}$  สวิตช์  $S_{21}$  และสวิตช์  $S_{22}$  ทำงานดังตาราง บันทึกค่าที่ได้

$V_{in}$	$V_{out}$	$R_{in1}$	$R_{in2}$	$R_{f1}$	$R_{f2}$	$S_{11}$	$S_{12}$	$S_{21}$	$S_{22}$	ค่าอัตราขยาย
						0	1	0	1	
						0	1	1	0	
						0	1	1	1	
						1	0	0	1	
						1	0	1	0	
						1	0	1	1	
						1	1	0	1	
						1	1	1	0	
						1	1	1	1	

5. ต่ วงจรดังรูปที่ บ13.3 โดยใช้ไอซีเบอร์ TS5A23157 หรือ TS5A23159 แทน  $S_{11}$  สวิตช์  $S_{12}$  สวิตช์  $S_{21}$  และสวิตช์  $S_{22}$



รูปที่ บ13.3 (ธนัสถ์, 2565)



ใบงานที่ 14 เรื่อง วงจรแอนะล็อกสวิตช์สำหรับวงจรรวมสัญญาณ	
<b>วัตถุประสงค์</b>	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. เข้าใจหลักการทำงานของวงจรแอนะล็อกสวิตช์</li> <li>2. อธิบายการทำงานของวงจรแอนะล็อกสวิตช์</li> <li>3. ประยุกต์ใช้งานวงจรแอนะล็อกสวิตช์สำหรับวงจรรวมสัญญาณ</li> </ol>	
<b>เครื่องมือและอุปกรณ์</b>	<b>จำนวน</b>
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ไอซีเบอร์ TS5A23157/ไอซีเบอร์ TS5A23159</li> <li>2. ไอซีออปแอมป์เบอร์ UA741</li> <li>3. ตัวต้านทานค่า 1 k<math>\Omega</math></li> <li>4. ตัวต้านทานค่า 2 k<math>\Omega</math></li> <li>5. ตัวต้านทานค่า 3 k<math>\Omega</math></li> <li>6. ตัวต้านทานค่า 10 k<math>\Omega</math></li> <li>7. ตัวต้านทานค่า 20 k<math>\Omega</math></li> <li>8. Power supply พร้อมสาย</li> <li>9. มัลติมิเตอร์ พร้อมสาย</li> <li>10. แผงวงจรทดลอง</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>2 ตัว</li> <li>1 ตัว</li> <li>5 ตัว</li> <li>5 ตัว</li> <li>1 ตัว</li> <li>5 ตัว</li> <li>5 ตัว</li> <li>1 เครื่อง</li> <li>1 เครื่อง</li> <li>1 อัน</li> </ol>
<b>ลำดับขั้นตอนการทดลอง</b>	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ต่อวงจรดังรูปที่ บ14.1 โดยใช้ไอซีเบอร์ TS5A23157 หรือ TS5A23159 จำนวน 2 ตัว ใช้แทน <math>S_1</math> สวิตช์ <math>S_2</math> สวิตช์ <math>S_3</math> และสวิตช์ <math>S_4</math></li> </ol>	
รูปที่ บ14.1 (หนังสือ, 2565)	



2. กำหนดค่าตัวต้านทานแต่ละตัวดังตาราง พร้อมทั้งป้อนค่าแรงดันอินพุต  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  และ  $V_4$  เท่ากับ 1 โวลต์ เมื่อวงจรแอนะล็อกสวิตช์ของไอซีเบอร์ TS5A23157 หรือ TS5A23159 ตัวที่ 1 ถูกควบคุมจากบิตข้อมูลดิจิทัลสำหรับ สวิตช์  $S_1$  และสวิตช์  $S_2$  และตัวที่ 2 ถูกควบคุมจากบิตข้อมูลดิจิทัลสำหรับสวิตช์  $S_3$  และสวิตช์  $S_4$  ดังตาราง ใช้มัลติมิเตอร์วัดแรงดันเอาต์พุต  $V_{out}$  บันทึกค่าที่ได้ในตาราง

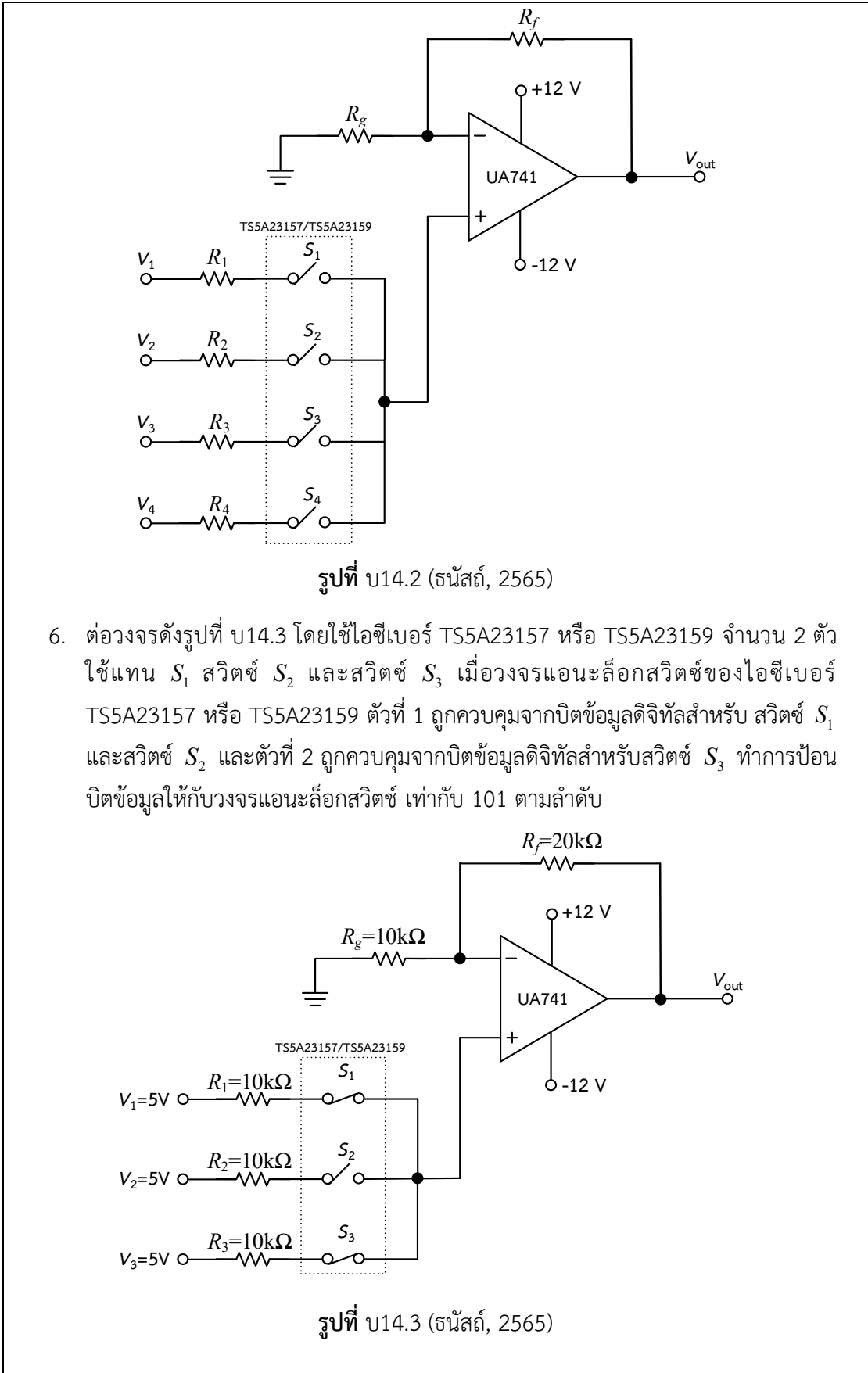
$R_f$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$V_{out}$
1 k $\Omega$					0	0	0	0	
1 k $\Omega$					0	0	0	1	
1 k $\Omega$					0	0	1	0	
1 k $\Omega$					0	0	1	1	
2 k $\Omega$					0	1	0	0	
2 k $\Omega$					0	1	0	1	
2 k $\Omega$					0	1	1	0	
2 k $\Omega$					0	1	1	1	
10 k $\Omega$					1	0	0	0	
10 k $\Omega$					1	0	0	1	
10 k $\Omega$					1	0	1	0	
10 k $\Omega$					1	0	1	1	
20 k $\Omega$					1	1	0	0	
20 k $\Omega$					1	1	0	1	
20 k $\Omega$					1	1	1	0	
20 k $\Omega$					1	1	1	1	

3. จากรูปที่ 14.1 กำหนดค่าตัวต้านทานแต่ละตัวดังตาราง พร้อมทั้งป้อนค่าแรงดันอินพุต  $V_1, V_2, V_3$  และ  $V_4$  เท่ากับ 1 โวลต์ เมื่อวงจรแอนะล็อกสวิตช์ของไอซีเบอร์ TS5A23157 หรือ TS5A23159 ตัวที่ 1 ถูกควบคุมจากบิตข้อมูลดิจิทัลสำหรับ สวิตช์  $S_1$  และสวิตช์  $S_2$  และตัวที่ 2 ถูกควบคุมจากบิตข้อมูลดิจิทัลสำหรับสวิตช์  $S_3$  และสวิตช์  $S_4$  ดังตาราง ใช้มัลติมิเตอร์วัดแรงดันเอาต์พุต  $V_{out}$  บันทึกค่าที่ได้ในตาราง

$R_f$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$V_{out}$
2 k $\Omega$	1 k $\Omega$				0	0	0	0	
2 k $\Omega$	1 k $\Omega$				0	0	0	1	
2 k $\Omega$	1 k $\Omega$				0	0	1	0	
2 k $\Omega$	1 k $\Omega$				0	0	1	1	
1 k $\Omega$	2 k $\Omega$				0	1	0	0	
1 k $\Omega$	2 k $\Omega$				0	1	0	1	
1 k $\Omega$	2 k $\Omega$				0	1	1	0	
1 k $\Omega$	2 k $\Omega$				0	1	1	1	
20 k $\Omega$	10 k $\Omega$				1	0	0	0	
20 k $\Omega$	10 k $\Omega$				1	0	0	1	
20 k $\Omega$	10 k $\Omega$				1	0	1	0	
20 k $\Omega$	10 k $\Omega$				1	0	1	1	
10 k $\Omega$	20 k $\Omega$				1	1	0	0	
10 k $\Omega$	20 k $\Omega$				1	1	0	1	
10 k $\Omega$	20 k $\Omega$				1	1	1	0	
10 k $\Omega$	20 k $\Omega$				1	1	1	1	

4. ต่อวงจรดังรูปที่ บ14.2 โดยใช้ไอซีเบอร์ TS5A23157 หรือ TS5A23159 จำนวน 2 ตัว ใช้แทน  $S_1$  สวิตช์  $S_2$  สวิตช์  $S_3$  และสวิตช์  $S_4$
5. กำหนดค่าตัวต้านทานดังตาราง พร้อมทั้งป้อนค่าแรงดันอินพุต  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  และ  $V_4$  เท่ากับ 1 โวลต์ เมื่อวงจรแอนะล็อกสวิตช์ของไอซีเบอร์ TS5A23157 หรือ TS5A23159 ตัวที่ 1 ถูกควบคุมจากบิตข้อมูลดิจิทัลสำหรับ สวิตช์  $S_1$  และสวิตช์  $S_2$  และตัวที่ 2 ถูกควบคุมจากบิตข้อมูลดิจิทัลสำหรับสวิตช์  $S_3$  และสวิตช์  $S_4$  ดังตาราง ใช้มัลติมิเตอร์วัดแรงดันเอาต์พุต  $V_{out}$  บันทึกค่าที่ได้ในตาราง

$R_f$	$R_g$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$V_{out}$
3 k $\Omega$	1 k $\Omega$	1 k $\Omega$				0	0	0	1	
3 k $\Omega$	1 k $\Omega$	1 k $\Omega$				0	0	1	0	
3 k $\Omega$	1 k $\Omega$	1 k $\Omega$				0	0	1	1	
3 k $\Omega$	1 k $\Omega$	2 k $\Omega$				0	1	0	0	
3 k $\Omega$	1 k $\Omega$	2 k $\Omega$				0	1	0	1	
3 k $\Omega$	1 k $\Omega$	2 k $\Omega$				0	1	1	0	
3 k $\Omega$	1 k $\Omega$	2 k $\Omega$				0	1	1	1	
20 k $\Omega$	2 k $\Omega$	10 k $\Omega$				1	0	0	0	
20 k $\Omega$	2 k $\Omega$	10 k $\Omega$				1	0	0	1	
20 k $\Omega$	2 k $\Omega$	10 k $\Omega$				1	0	1	0	
20 k $\Omega$	2 k $\Omega$	10 k $\Omega$				1	0	1	1	
10 k $\Omega$	2 k $\Omega$	20 k $\Omega$				1	1	0	0	
10 k $\Omega$	2 k $\Omega$	20 k $\Omega$				1	1	0	1	
10 k $\Omega$	2 k $\Omega$	20 k $\Omega$				1	1	1	0	
10 k $\Omega$	2 k $\Omega$	20 k $\Omega$				1	1	1	1	





ใบงานที่ 15	
เรื่อง วงจรแอนะล็อกสวิตช์สำหรับวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก	
<b>วัตถุประสงค์</b>	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. เข้าใจหลักการทำงานของวงจรแอนะล็อกสวิตช์</li> <li>2. อธิบายการทำงานของวงจรแอนะล็อกสวิตช์</li> <li>3. ประยุกต์ใช้งานวงจรแอนะล็อกสวิตช์สำหรับวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก</li> </ol>	
<b>เครื่องมือและอุปกรณ์</b>	<b>จำนวน</b>
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ไอซีเบอร์ TS5A23157/ไอซีเบอร์ TS5A23159</li> <li>2. ไอซีออปแอมป์เบอร์ UA741</li> <li>3. ตัวต้านทานค่า 1 k<math>\Omega</math></li> <li>4. ตัวต้านทานค่า 2 k<math>\Omega</math></li> <li>5. ตัวต้านทานค่า 4 k<math>\Omega</math></li> <li>6. ตัวต้านทานค่า 8 k<math>\Omega</math></li> <li>7. Power supply พร้อมสาย</li> <li>8. มัลติมิเตอร์ พร้อมสาย</li> <li>9. แผงวงจรทดลอง</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>2 ตัว</li> <li>1 ตัว</li> <li>1 ตัว</li> <li>1 ตัว</li> <li>1 ตัว</li> <li>1 ตัว</li> <li>1 เครื่อง</li> <li>1 เครื่อง</li> <li>1 อัน</li> </ol>
<b>ลำดับขั้นตอนการทดลอง</b>	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ต่อวงจรดังรูปที่ บ15.1 โดยใช้ไอซีเบอร์ TS5A23157 หรือ TS5A23159 จำนวน 2 ตัว ใช้แทน <math>S_1</math> สวิตช์ <math>S_2</math> สวิตช์ <math>S_3</math> และสวิตช์ <math>S_4</math></li> </ol>	
รูปที่ บ15.1 (ธนัสถ์, 2565)	

2. ป้อนค่าแรงดันอ้างอิง  $V_{ref}$  เท่ากับ 1 โวลต์ เมื่อวงจรแอนะล็อกสวิตช์ของไอซีเบอร์ TS5A23157 หรือ TS5A23159 ตัวที่ 1 ถูกควบคุมจากบิตข้อมูลดิจิทัลสำหรับ สวิตช์  $S_1$  และสวิตช์  $S_2$  และตัวที่ 2 ถูกควบคุมจากบิตข้อมูลดิจิทัลสำหรับสวิตช์  $S_3$  และสวิตช์  $S_4$  ดังตาราง ใช้มัลติมิเตอร์วัดแรงดันเอาต์พุต  $V_{out}$  บันทึกค่าที่ได้ในตาราง

$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$V_{out}$
0	0	0	0	
0	0	0	1	
0	0	1	0	
0	0	1	1	
0	1	0	0	
0	1	0	1	
0	1	1	0	
0	1	1	1	
1	0	0	0	
1	0	0	1	
1	0	1	0	
1	0	1	1	
1	1	0	0	
1	1	0	1	
1	1	1	0	
1	1	1	1	

3. จากรูปที่ 14.1 ทำการป้อนค่าแรงดันอ้างอิง  $V_{ref}$  เท่ากับ 5 โวลต์ เมื่อวงจรแอนะล็อกสวิตช์ของไอซีเบอร์ TS5A23157 หรือ TS5A23159 ตัวที่ 1 ถูกควบคุมจากบิตข้อมูลดิจิทัลสำหรับ สวิตช์  $S_1$  และสวิตช์  $S_2$  และตัวที่ 2 ถูกควบคุมจากบิตข้อมูลดิจิทัลสำหรับสวิตช์  $S_3$  และสวิตช์  $S_4$  ดังตาราง ใช้มัลติมิเตอร์วัดแรงดันเอาต์พุต  $V_{out}$  บันทึกค่าที่ได้ในตาราง

$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$V_{out}$
0	0	0	0	
0	0	0	1	
0	0	1	0	
0	0	1	1	
0	1	0	0	
0	1	0	1	
0	1	1	0	
0	1	1	1	
1	0	0	0	
1	0	0	1	
1	0	1	0	
1	0	1	1	
1	1	0	0	
1	1	0	1	
1	1	1	0	
1	1	1	1	





# ดัชนี

## A

Acquisition time, 143  
Active devices, 1  
Active region, 8  
Address Bus, 2  
ALU, 2  
Analog switch, 157  
Aperture time, 143  
Arithmetic Logic Unit, 2  
Arithmetic Unit, 2  
ASK, 63  
Astable multivibrator, 74

## B

Band-pass filter, 70  
Barkhausen, 64  
Base, 4  
Binary weight resistor, 182  
Bipolar Junction Transistor, 1  
BJT, 1  
Body, 9  
Breakdown operation, 13

## C

Capture mode, 109  
CCI, 63  
CCII, 63  
CCTA, 63  
Central Processing Unit, 2  
Channel length, 10  
Channel width, 10  
Charge-balance, 117, 124  
Chip, 1

CMOS, 1, 14  
CMOS converter, 15  
Collector, 4  
Common emitter configuration, 7  
Comparator, 41  
Complementary Metal-Oxide-Semiconductor, 1  
Control Bus, 2  
Current switch, 98  
Cut-off region, 8

## D

Data Bus, 2  
Depletion-mode MOSFET, 9  
Die, 1  
Digital-to-analog converter, 14  
Drain, 9  
Duty Cycle, 90  
Dynamic characteristic, 110

## E

Emitter, 4  
Enhancement-mode MOSFET, 9  
Error voltage, 109

## F

Fall time, 87  
Filter, 16  
First-order low-pass filter, 111  
Forward bias, 5  
Free-running frequency, 110  
Free-running mode, 109  
FSK, 63

**G**

Gate, 10  
Glitch, 158

**H**

Harmonic Oscillator, 70  
High-pass filter, 70  
Hold, 141  
Howland, 103  
Hysteresis width, 54

**I**

IC, 1  
In-phase, 22  
Integrated Circuit, 1  
Integrator circuit, 80  
Inverting amplifier, 159  
Inverting summer, 175

**J**

Junction temperature, 8

**L**

Loop gain, 65  
Low-pass filter, 70  
Lower threshold voltage, 97

**M**

Medium Scale Integration, 2  
Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect  
Transistor, 1  
Mixed-signal, 16  
MSI, 2

**N**

Negative feedback, 64  
NMOS, 10  
NPN, 3  
Noise, 22  
Non-inverting amplifier, 159  
Non-inverting summer, 175  
NOT gate, 17  
N-type, 10  
n-well, 17, 36

**O**

One-shot timer, 120,121,135  
Op-Amp, 1  
Operational Amplifier, 1  
Operational Transconductance Amplifier,  
63  
OTA, 63  
Out-of-phase, 22

**P**

Passive device, 63  
peak-to-peak output voltage, 21  
Phase-locked loop, 97  
Phase-locked mode, 109  
PID Controller, 16  
Pinch off, 16  
PLL, 97  
PMOS, 10  
PNP, 3  
Positive feedback, 64  
PSK, 63  
P-type, 10  
p-well, 17, 36

**Q**

Quiescent output voltage, 30

**R**

RC filter, 111

RC Oscillator, 67

Reference frequency, 108

Register, 2

Relaxation oscillator, 74

Reverse bias, 5, 118

Rise time, 87

RLC Oscillator, 67

**S**

Sample, 142

Sample-and-hold, 16, 141

Saturation region, 9, 16

Schmitt trigger, 52

Schmitt-trigger oscillator, 74

Settling time, 143

Silicon, 1, 3

Sinusoidal signal, 43

Small Scale Integration, 2

Source, 10

SPDT, 159

Spike, 158

Square-wave generator, 63

SSI, 2

**T**

Telemetry, 117

Tracking, 108

Triangular-wave generator, 63

**U**

Unity gain, 33

Upper threshold voltage, 97

**V**

VCO, 97

Very Large Scale Integration, 2

VLSI, 2

Voltage reference, 182

Voltage-controlled oscillator, 97

**W**

Wafer, 1

Wein Bridge Oscillator, 70

**ก**

การนำกระแสในโหมดเชิงเส้น, 15

การป้อนกลับแบบบวก, 64

การป้อนกลับแบบลบ, 64

**ข**

ขอบขาลง, 87

ขาเกต, 10

ขาเดรน, 10

ขาเบส, 4

ขาคอลเล็กเตอร์, 4

ขาซอร์ส, 10

ขาบอดี, 10

ขาอิมิตเตอร์, 4

**ค**

คงค่าสัญญาณ, 141

ความแม่นยำ, 142

ความกว้างช่องทางเดินกระแส, 11

ความกว้างฮิสเทอรีซิส, 54

ความต้านทานอินพุต, 10, 26  
 ความยาวช่องทางเดินกระแส, 11  
 ค่าแบนด์วิดท์ของสัญญาณ, 143  
 ค่าแรงดันเอาต์พุตสงบ, 30  
 ค่าแรงดันผิดพลาด, 109  
 ค่าคงที่ทางเวลาอาร์ซี, 142  
 ค่าบิตข้อมูลดิจิทัล, 172  
 ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า, 20  
 ค่าอิมพีแดนซ์ด้านออก, 20  
 คุณสมบัติทางพลวัต, 110

**ช**

ช่วงเวลาการปรับพันธ์, 91  
 ช่วงเวลาการรีเซ็ต, 124, 125  
 ช่วงเวลาขอบขาขึ้น, 87  
 ชิป, 1, 2

**ด**

ตาย, 1

**ท**

ทรานซิสเตอร์, 1, 16  
 ทรานซิสเตอร์คู่ประกอบชนิดโลหะ-ออกไซด์-  
 สารกึ่งตัวนำ, 1, 16  
 ทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์, 1, 3, 101, 102  
 ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าแบบโลหะ-ออกไซด์-  
 สารกึ่งตัวนำ, 1, 10

**บ**

บ่อเอ็น, 17  
 บ่อพี, 17  
 บัสข้อมูล, 2  
 บัสควบคุม, 2  
 บัสที่อยู่, 2

**ป**

ปรากฏการณ์พินชออฟ, 16

**พ**

พีเอ็นพี, 3  
 พีมอส, 10

**ม**

มอสเฟต, 1, 9  
 มอสเฟตแบบวิธีเพิ่มขนาดช่อง, 10  
 มอสเฟตแบบวิธีเพิ่มขนาดช่องชนิดเอ็นมอส, 13  
 มอสเฟตแบบวิธีเพิ่มขนาดช่องชนิดพีมอส, 12  
 มอสเฟตแบบวิธีลดขนาดช่อง, 10  
 มอสเฟตแบบวิธีลดขนาดช่องชนิดเอ็นมอส, 12  
 มอสเฟตแบบวิธีลดขนาดช่องชนิดพีมอส, 13  
 มอสเฟตชนิดเอ็นมอส, 13  
 มอสเฟตชนิดพี, 148

**ย**

ย่านแอกทิฟ, 9, 36  
 ย่านคัตออฟ, 9  
 ย่านอิมิตัว, 9

**ร**

ระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์, 16

**ว**

วงจรถูกแบบน็อด, 17  
 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ, 41  
 วงจรเฟสล็อกกลูป, 108  
 วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก  
 , 16, 180  
 วงจรแอนะล็อกสวิตช์, 157, 177  
 วงจรไมโครโปรเซสเซอร์, 2  
 วงจรกรองความถี่, 16

วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับหนึ่ง, 111  
 วงจรกรองความถี่ต่ำอาร์ซี, 111  
 วงจรขยายความนำถ่ายโอน, 63  
 วงจรจุดขนวนแบบขมิตต์, 52, 58, 74  
 วงจรรวม, 1  
 วงจรรวมสัญญาณแบบผสม, 1  
 วงจรสมมูลไฮบริด, 8  
 วงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่ง, 93  
 วงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ, 141  
 วงจรหาปริพันธ์, 80  
 วงจรออสซิลเลเตอร์แบบพ่นคลาย, 74  
 วงจรอะสเตเบิล, 74  
 วงจรอาร์แอลซีออสซิลเลเตอร์, 67  
 วงจรอาร์ซีออสซิลเลเตอร์, 67  
 วงจรอิมิตเตอร์ร่วม, 8

## ฮ

ฮิสเทอรีซิส, 54

## ห

หน่วยคำนวณ, 2  
 หน่วยประมวลผลกลาง, 2

## ส

สภาวะเฟสล็อก, 97  
 สภาวะแคปเตอร์, 97  
 สภาวะทำงานอิสระ, 109  
 สัญญาณรบกวน, 1, 10, 22

## อ

ออปแอมป์, 2, 22  
 ออปแอมป์อุดมคติ, 20, 26  
 อัตราขยายเบตา, 7  
 อัตราขยายแอลฟา, 8  
 อัตราขยายวงรอบ, 65  
 อัตราสุ่ว, 30  
 อัตราส่วนการขจัดโหมตร่วม, 24  
 อุปกรณ์แพสซีฟ, 63, 127

