

ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น

AEL-09 วงจร Op-Amp (2)

วัตถุประสงค์ของการทดลอง

1. ศึกษาการใช้ op-amp ในการเปรียบเทียบสัญญาณ.
2. ศึกษาวงจร op-amp ที่มีการป้อนกลับแบบบวก.
3. ศึกษาวงจรกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยมโดยใช้ op-amp.
4. ศึกษาวงจรกำเนิดสัญญาณ sine โดยใช้ op-amp.

ในการทดลองนี้ จะเป็นการศึกษาวงจร op-amp ที่ไม่ได้มีการป้อนกลับ, มีการป้อนกลับแบบบวก และที่มีการป้อนกลับแบบบวกและลบ. การใช้งานของ op-amp ที่ไม่ได้มีการป้อนกลับ มักใช้เป็นวงจรเปรียบเทียบแรงดันระหว่างขา input(+) และ input(-). ส่วน op-amp ที่มีการป้อนกลับแบบบวก ก็จะทำหน้าที่เปรียบเทียบแรงดันเช่นกัน แต่แรงดันที่ขา input(+) จะมีค่าเปลี่ยนไปตาม output. การต่อ op-amp ทั้งสองแบบมีการประยุกต์ใช้งานมากมาย เช่น วงจร flash converter ซึ่งเป็นวงจรที่แปลงสัญญาณ analog เป็นสัญญาณ digital ที่เร็วที่สุด, วงจรกำเนิดสัญญาณต่างๆ, ฯลฯ.

Op-amp ที่มีการป้อนกลับทั้งบวกและลบนั้น มักใช้ในการสร้างสัญญาณ sine. การป้อนกลับแบบบวกจะทำโดยผ่านวงจรเลือกความถี่ (band-pass filter) เพื่อสร้างสัญญาณที่มีความถี่ตรงกับความถี่ที่ผ่านวงจรเลือกความถี่ได้มากที่สุด. ส่วนการป้อนกลับแบบลบจะทำให้สัญญาณ sine ที่ได้มีขนาดจำกัด ไม่ใหญ่จนกระทั่งถูกขลิบ.

9.1. วงจรเปรียบเทียบแรงดัน (Voltage Comparator)

วงจรเปรียบเทียบแรงดัน ได้แสดงไว้ในรูปที่ 9.1. ในทางปฏิบัติ จะมีผลจาก input offset voltage เข้ามาเกี่ยวข้อง ทำให้ระดับแรงดันที่ขา input ทั้งสองอาจคลาดเคลื่อนไปเล็กน้อยในระดับ μV ถึง mV ขึ้นอยู่กับ op-amp ที่ใช้.

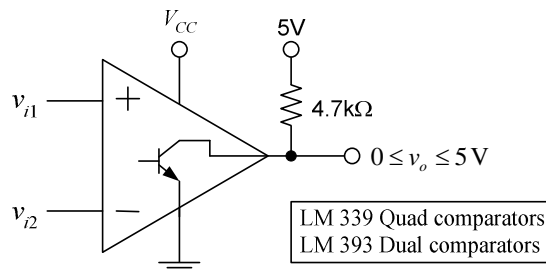
$$\begin{array}{c} v_{i1} \\ \text{+} \\ \text{---} \\ v_{i2} \\ \text{-} \end{array} \begin{array}{c} \diagup \\ \diagdown \end{array} \begin{array}{c} v_o = \begin{cases} +V_{CC} & \text{if } v_{i1} > v_{i2} \\ -V_{CC} & \text{if } v_{i1} < v_{i2} \end{cases} \end{array}$$

รูปที่ 9.1 การใช้ op-amp เปรียบเทียบแรงดัน.

Op-amp บางตัวถูกออกแบบให้มีหน้าที่เปรียบเทียบสัญญาณโดยเฉพาะ ไม่เหมาะกับการนำไปใช้ขยายสัญญาณโดยการป้อนกลับแบบลบ ซึ่งอาจทำให้เกิดการ oscillate ที่ output ได้. Op-amp เหล่านี้มีชื่อเรียกว่า voltage comparator. เนื่องจาก voltage comparator มีพื้นฐานมาจาก op-amp จึงใช้สัญลักษณ์เดียวกันกับ op-amp. ตัวอย่าง IC เช่น LM339 quad voltage comparators และ LM 393 dual voltage comparators.

Voltage comparator ส่วนใหญ่จะถูกออกแบบให้มี output เป็นแบบ open-collector เพื่อสามารถปรับระดับแรงดัน output ได้. ในการใช้งาน ต้องมีการต่อ pull-up resistor (ตัวต้านทานที่ต่อระหว่าง output

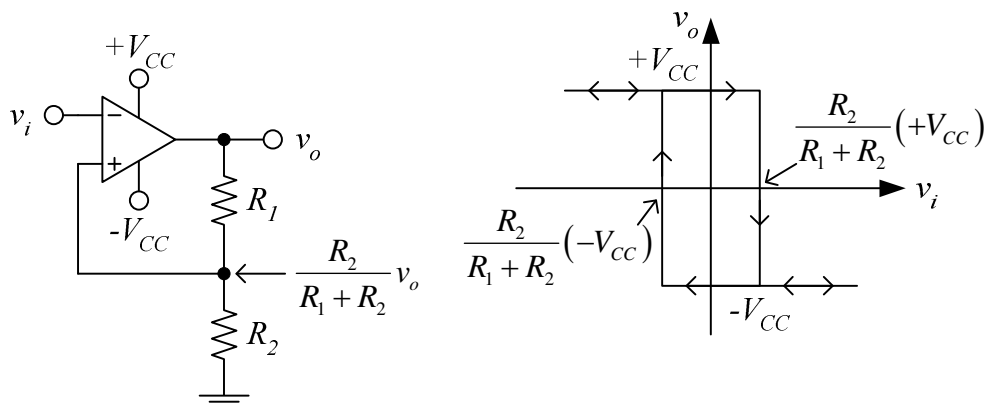
กับแรงดันไฟบวก เช่น $+5\text{ V}$) ไว้ด้วย ดังแสดงไว้ในรูปที่ 9.2. ถ้าแรงดันไฟเลี้ยงทางด้านลบของ voltage comparator ต่อดึงกราวด์ แรงดัน input ทั้งสอง (v_{i1} และ v_{i2}) จะต้องมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง V_{CC} เท่านั้น.



รูปที่ 9.2 Voltage comparator ที่มี output แบบ open collector.

9.2. วงจร Op-Amp ที่มีการป้อนกลับแบบบวก

การป้อนกลับแบบบวก เป็นการนำสัญญาณ output ส่วนหนึ่ง ต่อเข้ากับขา input(+) ของ op-amp ทำให้แรงดันที่ขา input(+) เปลี่ยนไปตามแรงดันของ output ดังแสดงในรูปที่ 9.3. การต่อแบบนี้มีชื่อเรียกว่า regenerative comparator, Schmitt trigger หรือ hysteresis comparator. การต่อแบบนี้จะทำให้ แรงดัน output ของวงจร มีสองสถานะที่คงตัว คือ แรงดันสูงสุด ($+V_{CC}$) หรือแรงดันต่ำสุด ($-V_{CC}$) เท่านั้น.



ก) วงจร.

ข) Transfer characteristic.

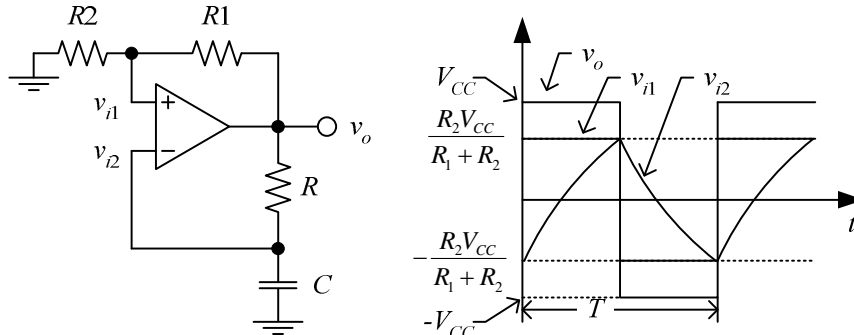
รูปที่ 9.3 วงจร inverting Schmitt-trigger.

จากรูปที่ 9.3 ถ้าสมมติให้ v_o มีค่าเป็น $+V_{CC}$ ในตอนเริ่มต้น แรงดันที่ขา input(+) จะเป็น $\frac{R_2(+V_{CC})}{R_1 + R_2}$. ดังนั้น ถ้าจะให้ v_o เปลี่ยนมาเป็น $-V_{CC}$ จะต้องให้ v_i ขา input(-) มากกว่าแรงดันที่ขา input(+) นี้. เมื่อ v_o เป็น $-V_{CC}$ แรงดันที่ขา input(+) จะเป็น $\frac{R_2(-V_{CC})}{R_1 + R_2}$. ถ้าจะให้ v_o เปลี่ยนมาเป็น $+V_{CC}$ จะต้องให้ v_i ขา input(-) น้อยกว่าแรงดันที่ขา input(+) นี้. ดังนั้น v_i ที่ทำให้ v_o เปลี่ยนจาก $+V_{CC}$ ไปเป็น $-V_{CC}$ และเปลี่ยนจาก $-V_{CC}$ ไปเป็น $+V_{CC}$ เป็นคนละค่ากัน ดังแสดงไว้ในกราฟ transfer characteristic ด้านขวาของรูปที่ 9.3 ซึ่งคล้ายกับ hysteresis loop ในสารแม่เหล็ก.

วงจรประเภทนี้มีการประยุกต์ใช้งานมากมาย เช่น วงจรป้องกันสัญญาณรบกวน และวงจรกำเนิดสัญญาณ ซึ่งจะได้กล่าวถึงบางส่วนในหัวข้อถัดไป.

9.3. วงจรกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยม

เราสามารถใช่วงจร op-amp ที่มีการป้อนกลับแบบบวก ให้กำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยมได้ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 9.4. สัญญาณที่ขา input(-) เป็นแบบ exponential function เนื่องจากต่ออยู่กับวงจร RC. ส่วนสัญญาณที่ขา input(+) จะมีขนาดลดลงตามวงจรแบ่งดันซึ่งประกอบด้วย $R1$ และ $R2$ และมีค่าเป็นบวกหรือลบตาม v_o .



รูปที่ 9.4 วงจรกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยม.

คาบเวลาของสัญญาณสี่เหลี่ยมสามารถคำนวณได้จาก

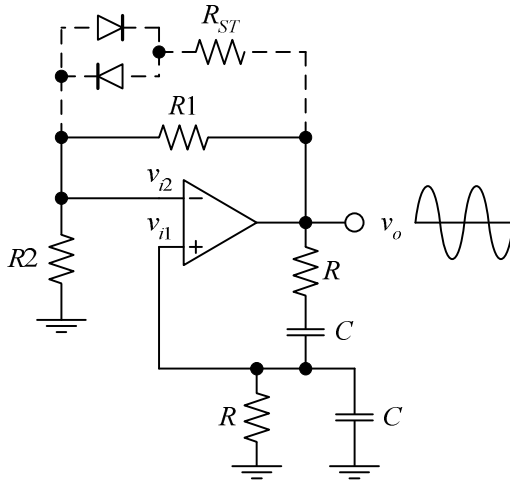
$$T = 2RC \ln \left(1 + \frac{2R_2}{R_1} \right).$$

สัญญาณสี่เหลี่ยมที่ได้ควรจะมี duty cycle 50%. แต่ในทางปฏิบัติ เนื่องจากขนาดของแรงดันสูงสุดและต่ำสุดของ v_o มีค่าไม่เท่ากันพอดี ทำให้ duty cycle อาจไม่ได้เท่ากับ 50% เช่นกัน.

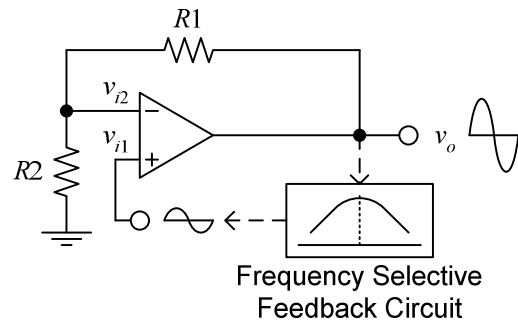
อุปกรณ์ใดที่มี output สองสถานะ มีชื่อเรียกทางเทคนิคว่า multivibrator. วงจรในรูปที่ 9.4 จึงมีชื่อเรียกทางเทคนิคอีกอย่างหนึ่งว่า astable multivibrator เนื่องจากให้ output กลับไปมาระหว่างสองสถานะ. เราสามารถต่อ op-amp ให้เป็นวงจร monostable multivibrator (ซึ่งให้สถานะคงตัวเพียงสถานะเดียว อีกสถานะหนึ่งไม่คงตัว) หรือเป็นวงจร bistable multivibrator (ซึ่งมีสถานะคงตัวสองสถานะสลับกันตาม input). การต่อ op-amp ให้ทำหน้าที่เหล่านี้สามารถทำได้ แต่จะต้องต่ออุปกรณ์เพิ่มอีกหลายตัว. เนื่องจากมี IC ที่ถูกออกแบบให้ทำงานเป็น multivibrator โดยตรง เช่น LM555 (timer) และ LM556 (dual timer) เป็นต้น การใช้ IC เหล่านี้จะทำให้สะดวกกว่าการใช้ op-amp.

9.4. วงจรกำเนิดสัญญาณ Sine

การกำเนิดสัญญาณรูป sine โดยใช้ op-amp นั้น เราจะป้อนกลับแบบบวกผ่านวงจรที่มีคุณสมบัติเลือกเฉพาะความถี่ที่ต้องการ และป้อนกลับแบบลบเพื่อทำให้ขนาดของ output ไม่ใหญ่เกินไป จนถูกขลิบ. วงจรเลือกความถี่นั้นอาจประกอบด้วย RC หรือ RLC ก็ได้. วงจรเลือกความถี่ที่แสดงในรูปที่ 9.5 ก เป็นวงจรที่มีตัวต้านทาน (R) และตัวเก็บประจุ (C) อย่างละสองตัว ป้อนส่วนหนึ่งของแรงดัน v_o ไปยังขา input(+). การป้อนกลับแบบลบเป็นวงจรแบ่งแรงดัน ซึ่งประกอบด้วย $R1$ และ $R2$. วงจรนี้มีชื่อว่า Wien bridge oscillator. ถ้าววงจรมีการป้อนกลับแบบบวกมากกว่าแบบลบ ขนาดของ v_o จะใหญ่ขึ้นเรื่อยๆจนถูกขลิบ. แต่ถ้าการป้อนกลับแบบลบมากกว่าแบบบวก วงจรจะไม่กำเนิดสัญญาณออกมา.



ก) Wien-bridge oscillator



ข) การทำงาน

รูปที่ 9.5 วงจรกำเนิดสัญญาณรูป sine.

การทำงานของวงจรได้แสดงไว้ในรูปที่ 9.5 ข. แรงดัน v_o เมื่อผ่านวงจรป้อนกลับแบบเลือกความถี่แล้ว ได้สัญญาณ v_{i1} ที่มีขนาดเล็กลงแต่มีเฟสคงเดิม. สัญญาณ v_o นี้ถูกขยายขึ้นมาโดยวงจรขยายแบบไม่กลับขั้ว ด้วยอัตราขยาย $1+R1/R2$. ถ้าเมื่อขยายแล้วได้สัญญาณเหมือนกับ v_o ทั้งขนาดและเฟส วงจรจะกำเนิดสัญญาณที่ความถี่นี้ต่อไปได้เรื่อยๆ โดยมีขนาดและความถี่ไม่เปลี่ยนแปลงจากเดิม. แต่ถ้าขยายแล้วได้สัญญาณที่แตกต่างจาก v_o วงจรอาจไม่สามารถกำเนิดสัญญาณได้หรือสัญญาณที่กำเนิดมีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆจนถูกขลิบ.

วงจรเลือกความถี่ในรูปที่ 9.5 ก จะให้ขนาดของแรงดันป้อนกลับสูงสุดเมื่อ $f_{mid} = \frac{1}{2\pi RC}$ และที่ความถี่นี้ $\frac{v_{i1}}{v_o} = \frac{1}{3}$. ดังนั้น อัตราขยายของวงจรไม่กลับขั้วควรมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{3}$ นี้ด้วย. ในทางปฏิบัติ เราจะไม่สามารปรับให้การป้อนกลับแบบบวกและลบมีขนาดที่สมดุลกันด้วยการเลือกค่าตัวต้านทานมาใส่ในวงจร. เราจะใช้วิธีสร้างตัวต้านทานที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นเล็กน้อย เพื่อควบคุมขนาดของ v_o . ถ้าขนาดสัญญาณต่ำหรือไม่มีสัญญาณ เราจะมีป้อนกลับแบบบวกมากกว่าแบบลบ เพื่อให้วงจรสามารถกำเนิดสัญญาณขึ้นมาได้. แต่เมื่อสัญญาณมีขนาดใหญ่แล้ว เราจะมีป้อนกลับแบบบวกเท่ากับแบบลบ เพื่อจะคงขนาดสัญญาณที่ได้เอาไว้.

ในรูปที่ 9.5 ก นี้ สมมุติให้สัญญาณ v_o มีขนาดเล็ก ใดโอดทั้งสองตัวไม่นำกระแส. เราจะต้องเลือกให้ $1+R1/R2$ มากกว่า 3 เพียงเล็กน้อย. เมื่อสัญญาณ v_o มีขนาดใหญ่ ใดโอดสามารถนำกระแสได้ จะทำให้ได้ R_{ST} ขนานกับ $R1$ ซึ่งทำให้อัตราขยายแรงดันเปลี่ยนไปเป็น $1+(R1//R_{ST})/R2$. เราต้องเลือกค่า R_{ST} เพื่อให้ได้อัตราขยายค่าใหม่นี้ต่ำกว่า 3 เล็กน้อย. ถ้าเราเลือกค่าของตัวต้านทานต่างๆอย่างเหมาะสม จะทำให้ความเพี้ยนของสัญญาณ sine ต่ำกว่า 1% ได้.

9.5. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

Op-amp เบอร์ LM741	1 ตัว
R 1/4W 5% 10k Ω	2 ตัว
R 1/4W 5% 1k Ω , 2.7k Ω , 3.9k Ω , 5.6k Ω , 8.2k Ω ค่าละ	1 ตัว
R 1/4W 5% 12k Ω , 120k Ω ค่าละ	1 ตัว
C 15nF	2 ตัว
C 100nF	1 ตัว
ไดโอด 1N4148	2 ตัว
แหล่งจ่ายแรงดัน	1 เครื่อง
Digital Multimeters	2 ตัว
Oscilloscope	1 เครื่อง

9.6. การทดลอง

9.6.1. วงจรเปรียบเทียบแรงดัน

ต่อวงจรตามรูปที่ 9.6. ปรับ V_S ให้มีค่าประมาณ 15 V.

วัด $v_{i2} =$ _____ V.

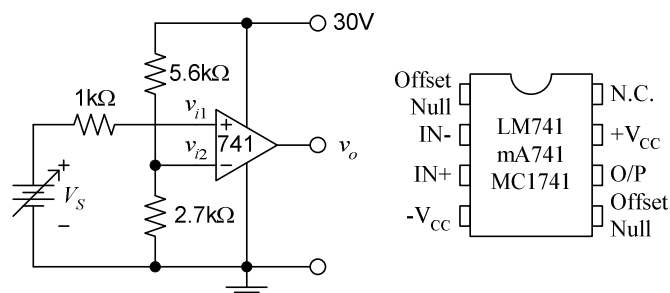
วัด $v_o =$ _____ V.

ปรับ V_S ให้มีค่าประมาณ 5 V.

วัด $v_o =$ _____ V.

ปรับ V_S เพื่อหาแรงดัน V_S ที่ทำให้ v_o เปลี่ยนระดับแรงดัน.

วัด $V_S =$ _____ V. (V_S ที่ทำให้ v_o เปลี่ยนระดับแรงดัน.)

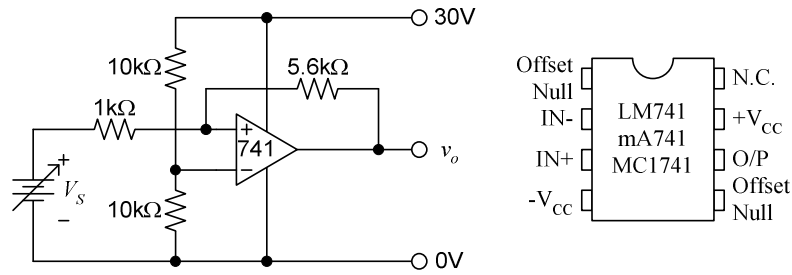


รูปที่ 9.6 วงจรเปรียบเทียบแรงดัน.

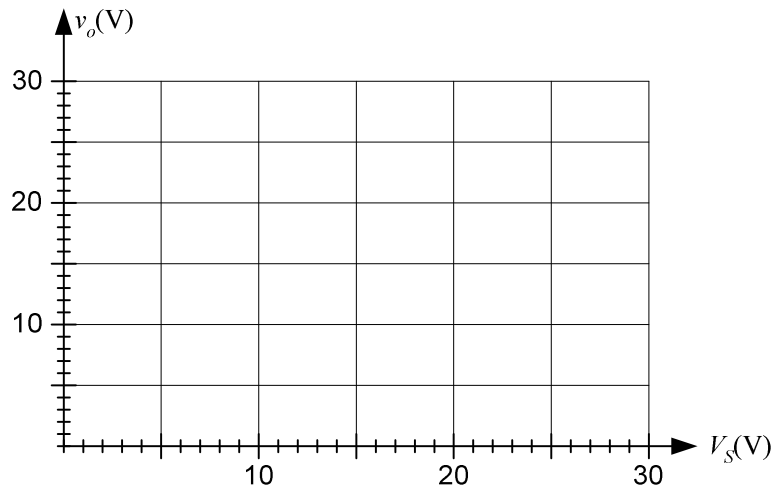
ในรายงานให้อภิปรายโดยเปรียบเทียบค่า v_{i2} ที่วัดได้กับค่า V_S ที่ทำให้ v_o เปลี่ยนระดับแรงดัน.

9.6.2. วงจร Op-Amp ที่มีการป้อนกลับแบบบวก

ต่อวงจรตามรูปที่ 9.7. ให้วัดแรงดันที่จุดต่างๆ เพื่อเขียน transfer characteristic ระหว่างแรงดัน v_o และ V_S . ลงในพื้นที่ในรูปที่ 9.8.



รูปที่ 9.7 วงจร op-amp ที่มีการป้อนกลับแบบบวก.



รูปที่ 9.8 Transfer characteristic ของวงจรในรูปที่ 9.7.

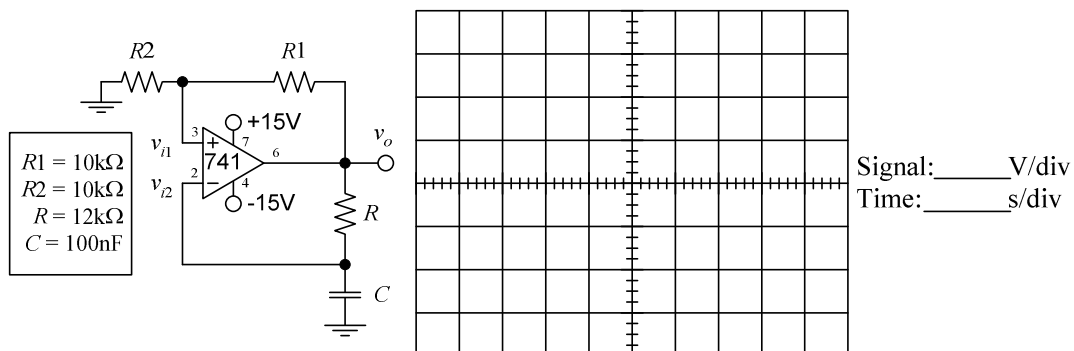
ในรายงานให้อภิปรายเปรียบเทียบกราฟ transfer characteristic ที่ได้จากการทดลองกับทฤษฎี.

9.6.3. วงจรกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยม

ต่อวงจรตามรูปที่ 9.9. ใช้ oscilloscope ดูรูปคลื่นของ v_{i1} , v_{i2} , และ v_o . บันทึกรูปคลื่นแรงดันทั้งสามบนพื้นที่กราฟเดียวกัน.

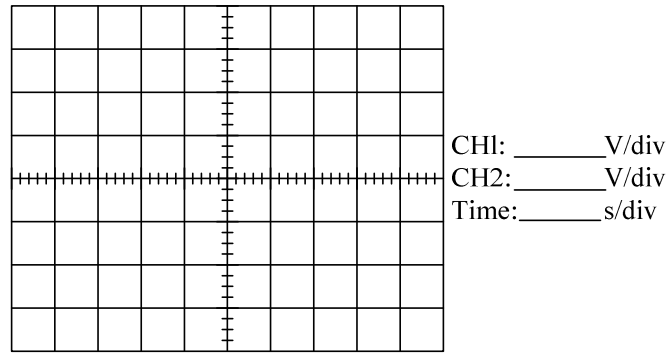
วัด duty cycle ของ $v_o =$ _____ %

วัดความถี่ของ $v_o =$ _____ Hz



รูปที่ 9.9 วงจรกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยม และพื้นที่วัดสัญญาณ.

ให้ปิดแหล่งจ่ายไฟ. ต่อ probe ของ oscilloscope เพื่อวัดสัญญาณของแหล่งจ่ายไฟด้านบวกและ v_o . เปิดสวิทช์ของแหล่งจ่ายไฟ. บันทึกรูปคลื่นสัญญาณ v_o ขณะที่เริ่มต้นจ่ายไฟในรูปที่ 9.10.



รูปที่ 9.10 พื้นที่วัดสัญญาณเมื่อเริ่มต้นจ่ายไฟฟ้า.

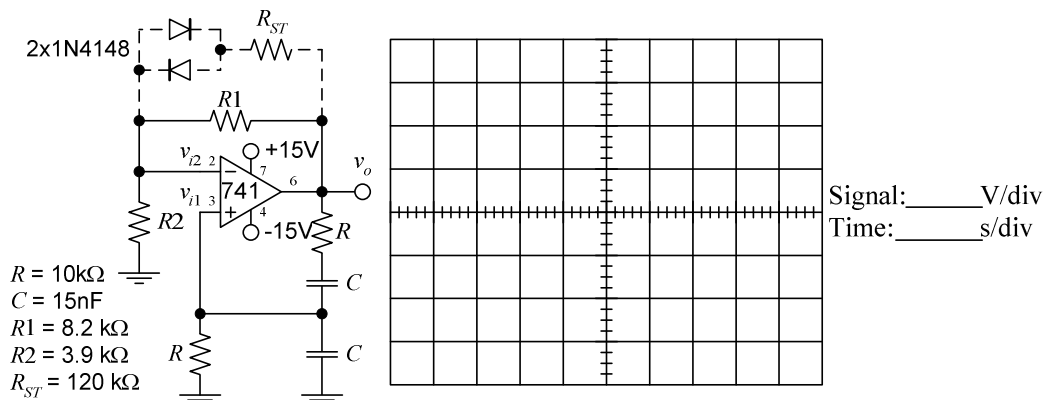
ในรายงานให้อภิปรายเปรียบเทียบความถี่และ duty cycle ของสัญญาณ v_o ที่วัดได้กับทฤษฎี.

9.6.4. วงจรกำเนิดสัญญาณ Sine

ต่อวงจรตามรูปที่ 9.11. ใช้ oscilloscope ดูรูปคลื่นของ v_{i1} , v_{i2} , และ v_o . บันทึกรูปคลื่นแรงดันทั้งสามบนพื้นที่กราฟเดียวกัน.

วัดขนาดของ $v_o =$ _____ V_{pp}.

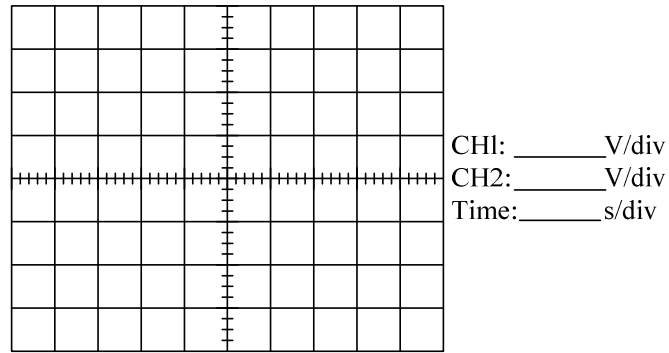
วัดความถี่ของ $v_o =$ _____ Hz



รูปที่ 9.11 วงจรกำเนิดสัญญาณ sine และพื้นที่วัดสัญญาณ.

ถ้าตัด R_{ST} ออกจากวงจร จะได้ output เป็นอย่างไร.

ให้ปิดแหล่งจ่ายไฟ. ต่อตัวต้านทาน R_{ST} ลงในวงจร และต่อ probe ของ oscilloscope เพื่อวัดสัญญาณของแหล่งจ่ายไฟด้านบวกและ v_o . เปิดสวิทช์ของแหล่งจ่ายไฟ. บันทึกรูปคลื่นสัญญาณ v_o ขณะที่เริ่มต้นจ่ายไฟฟ้าลงในรูปที่ 9.12.



รูปที่ 9.12 พื้นที่วัดสัญญาณเมื่อเริ่มต้นจ่ายไฟฟ้า.

ในรายงานให้อภิปรายเปรียบเทียบความถี่ของสัญญาณ v_o ที่วัดได้กับทฤษฎี.

9.7. สรุปสิ่งที่ได้เรียนรู้

ให้สรุปสิ่งที่เรียนรู้ทั้งหมดจากการทดลองแยกเป็นอีกหัวข้อหนึ่งในท้ายรายงาน โดยสรุปเรียงตามลำดับเรื่องที่ทดลอง.