

2012-447 Electronics Engineering Laboratory

Module: วงจรขยายคลื่นไฟฟ้าหัวใจ และการประมวลผลสัญญาณเบื้องต้น

Part B: วงจรขยายแบบอินสตรูเมนต์ (Instrumentation Amplifier)

อาภรณ์ ชีริมงคลศรี (rev. 2 สิงหาคม 2565, rev 1. มีนาคม 2564, สิงหาคม 2562)

บทนำ

วงจรขยายแบบอินสตรูเมนต์เป็นวงจรที่ออกแบบเฉพาะสำหรับการขยายสัญญาณผลต่าง (difference mode signal) หรือศักย์ไฟฟ้าผลต่างระหว่างจุดสองจุด ซึ่งอาจมีการรบกวนจากสัญญาณผลรวม (common mode signal) ที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้นวงจรขยายแบบอินสตรูเมนต์จึงเหมาะสำหรับการวัดหรือขยายสัญญาณจากวงจรบริดจ์ที่มีแขนหนึ่งเป็นเซนเซอร์ เช่น RTD (resistance temperature detector) ตัวต้านทานที่ไวกับอุณหภูมิ สเตรนเกจ (strain gauge) ที่ใช้ในเครื่องชั่งน้ำหนัก หรือ ใช้กับการวัดศักย์ไฟฟ้าทางชีวภาพ เช่น คลื่นไฟฟ้าหัวใจ คลื่นไฟฟ้ากล้ามเนื้อ เป็นต้น

ความรู้เบื้องต้นวงจรขยายแบบอินสตรูเมนต์

วงจรขยายแบบอินสตรูเมนต์เป็นวงจรขยายผลต่างที่มีความต้านทานขาเข้าสูงมาก ค่าอัตราขยายสามารถตั้งได้โดยการปรับค่าความต้านทานภายนอกที่มาต่ออยู่ วงจรขยายชนิดนี้มีอัตราการทำงานจัดสัญญาณผลรวม (CMRR) ที่สูงมากทำให้วงจรขยายชนิดนี้สามารถขยายสัญญาณผลต่างที่ปนอยู่ในสัญญาณผลรวมขนาดใหญ่ได้ดีกว่าวงจรขยายทั่วไป

วงจรขยายแบบอินสตรูเมนต์จะประกอบด้วยออปแอมป์จำนวน 2 หรือ 3 ตัว ซึ่งในรูปแบบทั่วไปจะประกอบด้วยออปแอมป์จำนวน 3 ตัวดังแสดงรูปที่ 1 สัญญาณเข้าของวงจรประกอบด้วยสัญญาณ v_1 และ v_2 ในที่นี้เราต้องการขยายสัญญาณผลต่างระหว่าง v_1 และ v_2 เท่านั้น

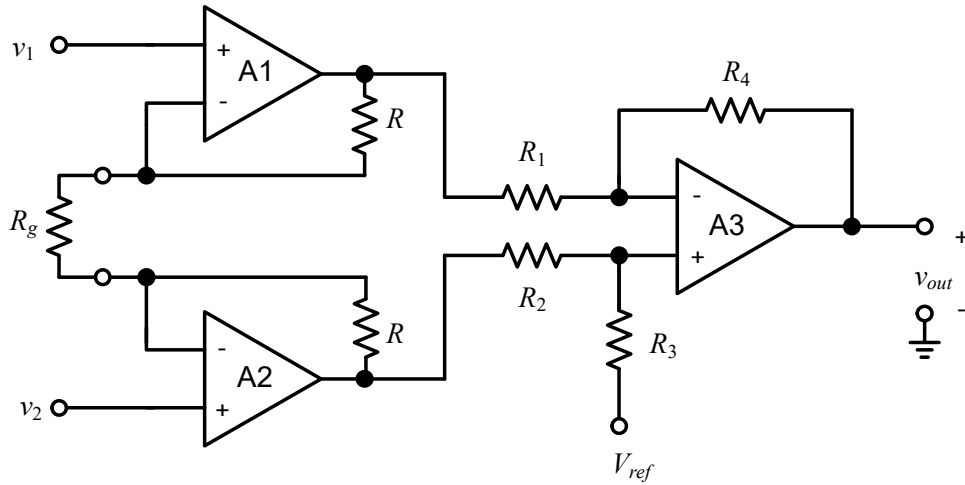
นิยามของสัญญาณผลต่าง (difference mode signal) คือ

$$v_{dm} = v_2 - v_1 \quad (1)$$

นิยามของสัญญาณผลรวม (common mode signal) คือ

$$v_{cm} = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (2)$$

วงจรขยายแบบอินสตรูเมนต์ดังในรูปที่ 1 แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ วงจรภาคแรกซึ่งประกอบด้วยออปแอมป์ A1 และ A2 วงจรส่วนนี้จะให้ค่าความต้านทานขาเข้าที่สูงกับสัญญาณขาเข้าทั้งสอง และสามารถกำหนดค่าอัตราขยายผ่านตัวต้านทานภายนอก R_g



รูปที่ 1: วงจรขยายแบบอินสตรูเมนเตชันซึ่งสร้างจากออปแอมป์ 3 ตัว

วงจรภาคที่สองเป็นวงจรขยายผลต่าง (difference amplifier) ซึ่งโดยปกติแล้วจะมีค่าอัตราขยายเท่ากับ 1 (เพื่อให้อัตราขยาย เท่ากับ 1 โดยปกติจะเลือกให้ค่า $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$) นอกจากนี้เพื่อให้เกิดความยืดหยุ่นของการใช้งาน ผู้ผลิตนิยมให้อิสระแก่ผู้ใช้ในการกำหนดแรงดันอ้างอิง โดยปล่อยให้ขาอ้างอิงของวงจรขยายผลต่างในภาคที่สองให้ผู้ใช้เลือกต่อกับกราวด์ หรือที่แรงดันอ้างอิง V_{ref} ค่าอื่นที่ต้องการความสัมพันธ์ของแรงดันขาออกกับค่าแรงดันผลต่างขาเข้าสามารถแสดงได้ด้วยความสัมพันธ์

$$v_{out} = \left(1 + \frac{2R}{R_g}\right)(v_2 - v_1) + V_{ref} \quad (3)$$

ผู้ผลิตจะให้ข้อมูลหรือสมการของอัตราขยายมาเพื่อให้ผู้ใช้เลือกค่าได้เหมาะสมกับการใช้งาน วงจรขยายแบบอินสตรูเมนเตชันที่ดีจะขยายสัญญาณผลต่าง $v_2 - v_1$ ได้ดีโดยไม่ขยายสัญญาณผลรวมเลยหรือขยายน้อยมาก ผู้ผลิตจะให้ข้อมูลของอัตราการจัดสัญญาณผลรวม (common mode rejection ratio: CMRR) ซึ่งกำหนดเป็นอัตราส่วนของอัตราขยายผลต่างต่ออัตราขยายผลรวม และนิยมมีหน่วยเป็น dB

$$CMRR = 20 \log_{10} \left(\frac{A_{dm}}{A_{cm}} \right) \quad (4)$$

โดยที่ A_{dm} คือ อัตราขยายผลต่าง และ A_{cm} คือ อัตราขยายผลรวม โดยทั่วไปแล้วค่า CMRR ของวงจรขยายแบบอินสตรูเมนเตชันจะมีค่าอยู่ในช่วง 80–120 dB ในการประยุกต์ใช้งานด้านการวัดสัญญาณหรือพัฒนาระบบวัด วงจรขยายแบบอินสตรูเมนเตชันจะถูกนำไปเป็นภาคแรกของวงจรหรือระบบเพื่อดึงข้อมูลของสัญญาณผลต่างออกมาขยายและส่งต่อไปยังวงจรภาคต่อไป เช่น การขยายหรือกรองสัญญาณ การแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (analog to digital converter)

ใบงานประกอบการทดลอง เรื่อง วงจรกรองสัญญาณ

ชื่อ นามสกุล นายธนภัฏ กรังพิพธร รหัสสถิติ ๒43๐149421 ตอนเรียนที่ 2 กลุ่มที่ 5

ชื่อ นามสกุล นายณณิศร อนันต์วัฒนาวินัย รหัสสถิติ ๒43๐๐32๒21

ชื่อ นามสกุล นายณณานิธิ บำรุงพันธ์ รหัสสถิติ ๒43๐๐๔4221

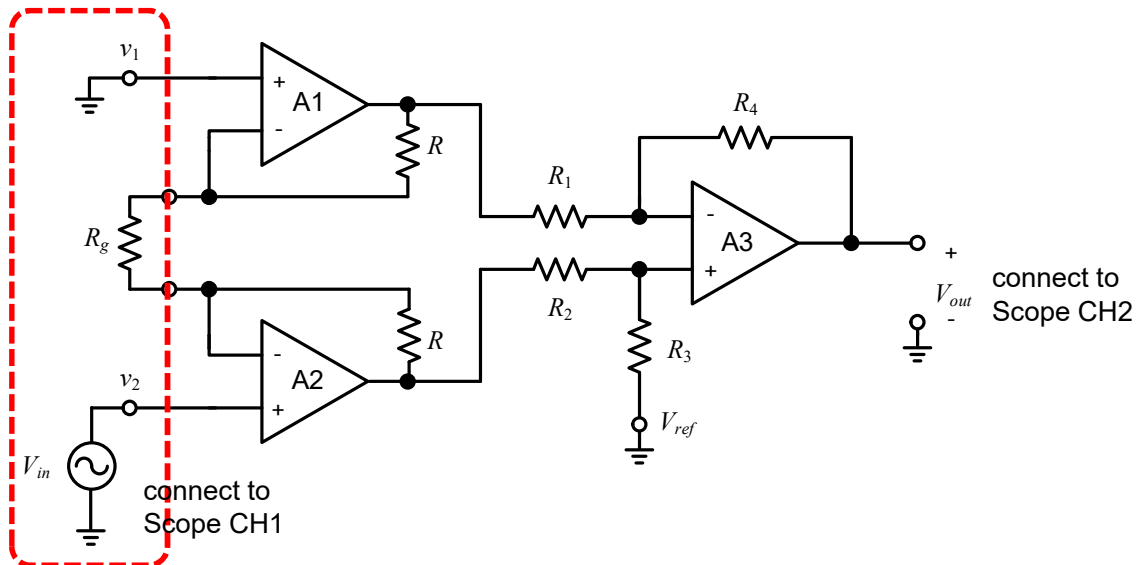
ลายเซ็นอาจารย์ผู้ตรวจ

- ALT

การทดลองที่ 1: วงจรขยายแบบอินสตรูเมนต์ชันที่ใช้โอปแอมป์ 3 ตัว

ให้ออกแบบและสร้างวงจรขยายแบบอินสตรูเมนต์ชัน ที่ใช้โอปแอมป์ 3 ตัว กำหนดให้ วงจรขยายแบบอินสตรูเมนต์ชัน มีอัตราขยาย เท่ากับ 5

- ใช้แรงดันอ้างอิง เท่ากับ 0 โวลต์
- แรงดันของแหล่งจ่าย กำหนดให้มีค่าเท่ากับ $\pm 9\text{ V}$
- ค่าความต้านทานที่ใช้ในวงจร สามารถเลือกใช้ได้ คือ ค่า $10\text{ k}\Omega - 500\text{ k}\Omega^{***}$
- ไอซีของโอปแอมป์ที่ใช้ในการทดลองกำหนดให้ คือ TL064



รูปที่ 2: วงจรที่ใช้ในการทดลองเพื่อวัดอัตราขยายผลต่าง

$$V_2 = V_i, V_1 = 0$$

$$V_{out} = \left(1 + \frac{2R}{R_g}\right)(V_i) + \cancel{V_{ref}}^0; R_4 = R_3 = R_2 = R_1$$

$$A = \frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + \frac{2R}{R_g}$$

Chọn $A = 5$

$$5 = 1 + \frac{2R}{R_g}$$

$$R = 2R_g$$

Chọn $R_g = 10 \text{ k}\Omega$

$$R = 20 \text{ k}\Omega$$

บันทึกค่าความต้านทานที่ได้ออกแบบไว้ เทียบกับค่าความต้านทานจริงที่ได้จากการวัดด้วยมัลติมิเตอร์***

ตัวต้านทาน	ค่าที่ออกแบบไว้ (k Ω)	ค่าที่วัดด้วยมัลติมิเตอร์ (k Ω)
R	20, 20	19.43, 19.50
R_g	10	9.83
R_1	10	9.75
R_2	10	9.77
R_3	10	9.76
R_4	10	9.76

หมายเหตุ ตัวต้านทาน R ที่ใช้ในวงจร ให้ระบุค่าทั้งสองตัว คำนวณด้วยเครื่องหมายจุลภาค “,”

การวัดอัตราขยายผลต่าง

ต่อวงจรขยายแบบอินสตรูเมนเตชันลงบน breadboard เมื่อต่อเรียบร้อยแล้ว ตรวจสอบว่า วงจรทำงานถูกต้อง ให้วัดค่าอัตราขยายผลต่างโดยใช้วงจรในรูปที่ 2 ด้วยการป้อนสัญญาณไซน์ ความถี่ 1000 Hz จากเครื่องกำเนิดสัญญาณ (Function generator) ซึ่งมีค่าสอดคล้องตามที่กำหนดไว้ในตาราง แล้วใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคปวัดค่ายอดของแรงดันขาเข้า V_{in} และแรงดันขาออก V_{out} บันทึกค่าที่ได้จากการทดลองลงในตาราง

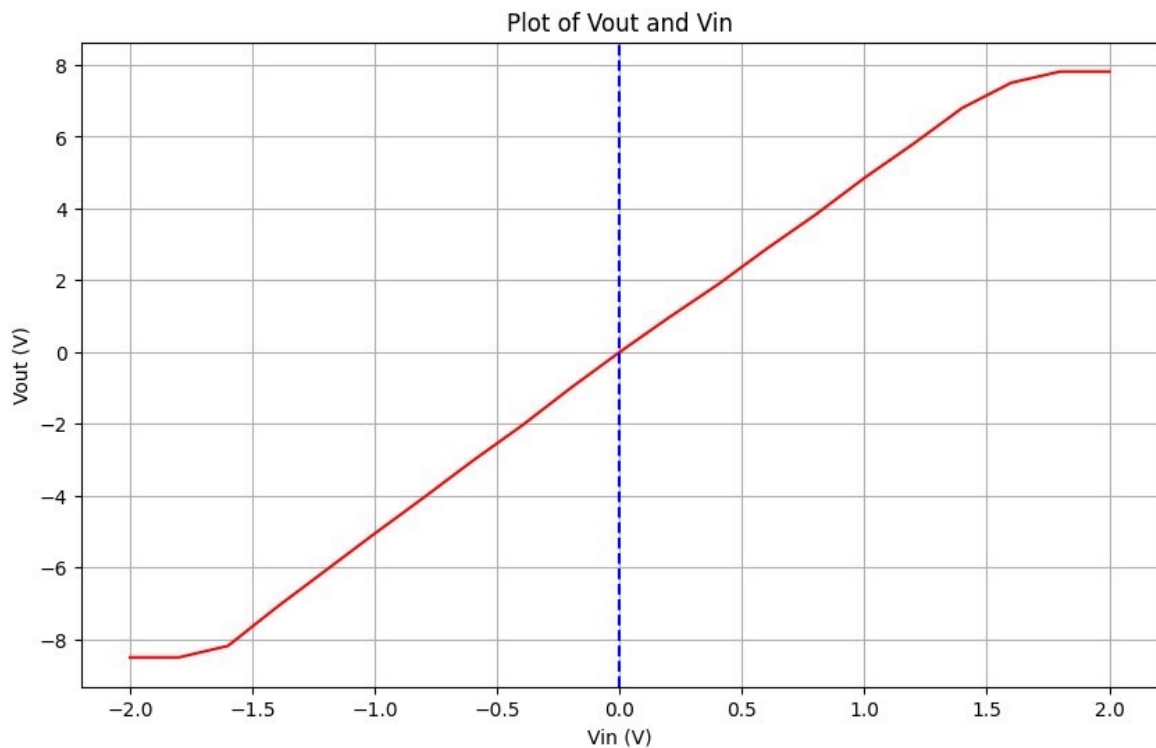
หมายเหตุ ให้สังเกตค่ายอดของแรงดันขาเข้าที่เป็นบวก เทียบกับ ค่ายอดของแรงดันขาออกที่เป็นบวก ให้สังเกตค่ายอดของแรงดันขาเข้าที่เป็นลบ เทียบกับ ค่ายอดของแรงดันขาออกที่เป็นลบ

V_{in} (V _p)	-2	-1.8	-1.6	-1.4	-1.2	-1.0	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	0
V_{out} (V _p)	-8.50	-8.50	-8.18	-7.10	-6.075	-5.05	-4.050	-3.025	-2.05	-1.00	0

V_{in} (V _p)	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2
V_{out} (V _p)	0.956	1.875	2.875	3.825	4.850	5.90	6.80	7.50	7.813	7.813

(V.)

วาดกราฟของสัญญาณขาเข้าเทียบกับสัญญาณขาออก คำนวณอัตราขยายผลต่างในช่วงที่วงจรทำงานเชิงเส้น



เปรียบเทียบค่าอัตราขยายผลต่างในทางทฤษฎี กับค่าได้จากการทดลอง บันทึกผลลงในตาราง

	ค่าทางทฤษฎี: $Adm = 1 + \frac{2R}{R_g}$	ค่าจากการทดลอง: ความชันของกราฟ
ค่าอัตราขยายผลต่าง	5	4.91

ค่าแรงดันอินพุตด้านบวก + 7.813 V.

ค่าแรงดันอินพุตด้านลบ - 8.50 V.

อภิปรายและตอบคำถาม

นิสิตคิดว่า เหตุใดแรงดันอินพุตด้านบวกหรือด้านลบจึงไม่เท่ากับแรงดันไฟเลี้ยงบวกหรือลบ

เนื่องจาก ทรานซิสเตอร์ที่ทำงานในโหมดอิ่มตัวจะมีแรงดันตกคร่อมที่ต่ำกว่าที่ออกแบบไว้

คำนวณอีกทั้งใน Op amp เกิดแรงดันตก จึงทำให้แรงดันออกสูงสุดที่ด้านบวกและด้านลบไม่

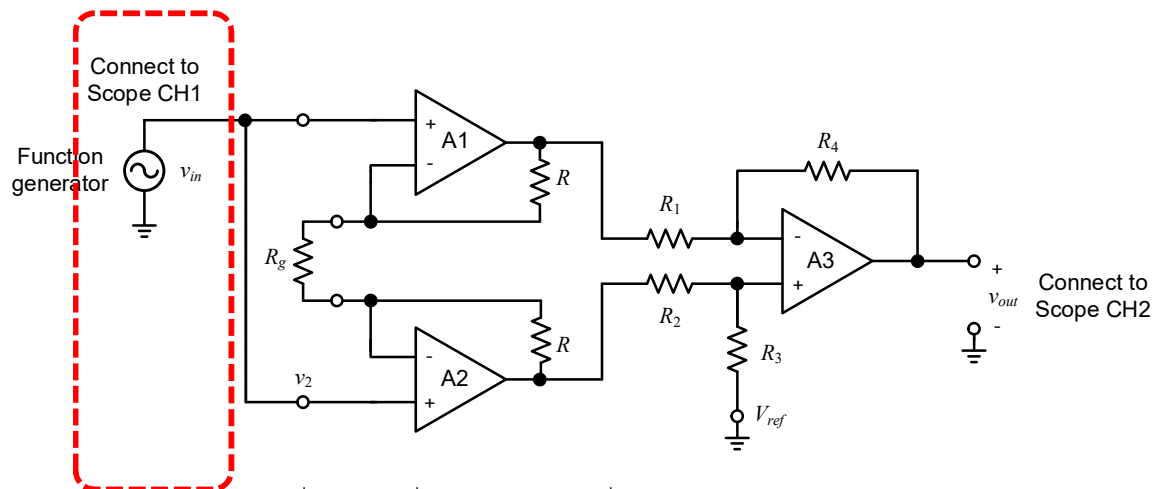
สามารถขยับถึงค่าแรงดันไฟเลี้ยง จากการทดลองนี้จะพบว่า ค่าแรงดันอินพุตด้านบวก = 7.813 V.

ส่วนความคลาดเคลื่อนจากแรงดันไฟเลี้ยง : $\frac{|9 - 7.813|}{9} \times 100 \% = 13.19 \%$ และค่าแรงดันอินพุต

ด้านลบ : -8.50 V. ส่วนความคลาดเคลื่อนจากแรงดันไฟเลี้ยง : $\frac{|-9 - (-8.5)|}{-9} \times 100 \% = 5.56 \%$

การวัดอัตราขยายผลรวม

ต่อวงจรตามรูปที่ 3 ลัดขั้วเข้าทั้งสองของวงจรขยายแบบอินสตรูเมนเตชันเข้าด้วยกัน ป้อนสัญญาณไซน์ที่มีความถี่ 50 Hz เพิ่มขนาดของสัญญาณไซน์จนกระทั่งสามารถสังเกตเห็นสัญญาณขาออกที่ขั้วออก (อาจจะใช้การปรับสเกลแกนตั้งของดิจิทัลออสซิลโลสโคป (DSO) ช่วยด้วย) วัดขนาดจากยอดถึงยอด (peak-to-peak value) ของสัญญาณขาเข้าและขาออกเพื่อใช้คำนวณหาอัตราขยายผลรวม



รูปที่ 3: วงจรที่ใช้ในการทดลองเพื่อวัดอัตราขยายผลรวม

	<p>คำนวณจากความไม่เข้าคู่ (mismatch) ของค่าความต้านทาน โดยใช้ค่าความต้านทานในตารางที่ 1</p> $A_{cm} = \left(\frac{R_3}{R_2 + R_3} \right) \left(1 + \frac{R_4}{R_1} \right) - \frac{R_4}{R_1}$	<p>ค่าจากการทดลอง:</p> $A_{cm} = \frac{ v_{out} }{ v_{in} }$
ค่าอัตราขยายผลรวม	1.03×10^{-3}	$\frac{30.25 \times 10^{-3}}{5} = 6.05 \times 10^{-3}$

ให้ใช้ค่าอัตราขยายผลต่างและผลรวมที่ได้จากการทดลอง คำนวณค่า CMRR ตามสมการ

$$CMRR = 20 \log \left(\frac{A_{dm}}{A_{cm}} \right)$$

ค่า CMRR จากการทดลอง 58.19

ค่า CMRR จากการคำนวณ 73.72

อธิบายผลการทดลองเทียบกับค่าจากการคำนวณ

จากการทดลองพบว่าค่า CMRR ที่ได้จากการทดลองจริงมีค่าต่ำกว่าจากการคำนวณ
พอสมควรเนื่องจากค่าความต้านทานที่หามาจากการคำนวณและค่าความผิดพลาดของ
อุปกรณ์และสภาพแวดล้อมโดยมีค่าตามมาตรฐานดังนี้

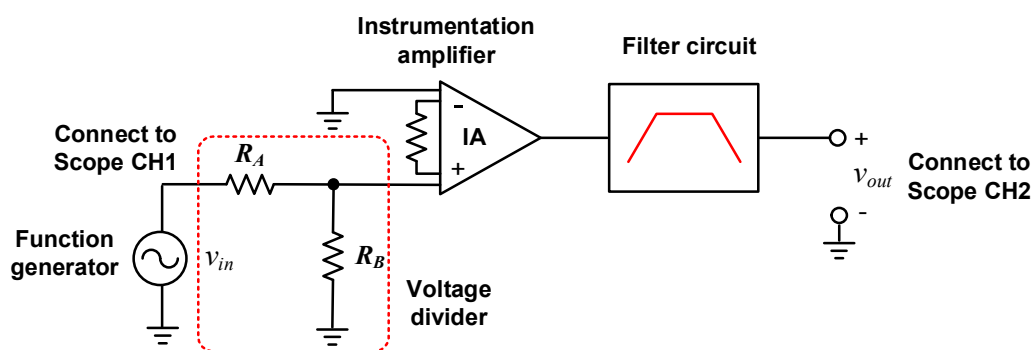
% Error ของค่าอัตราขยายผลต่างจากการทดลองเทียบกับการคำนวณ = $\frac{14.91 - 5}{5} \times 100\% = 1.8\%$

Error ของค่าอัตราขยายผลรวมจากการทดลองเทียบกับการคำนวณ = $\frac{16.05 \times 10^3 - 1.03 \times 10^4}{1.03 \times 10^3} = 487\%$

% Error ของค่า CMRR จากการทดลองเทียบกับการคำนวณ = $\frac{158.19 - 73.72}{73.72} \times 100\% = 21.07\%$

การทดลองที่ 2: วงจรขยายคลื่นไฟฟ้าหัวใจ

- 1) นำวงจรขยายแบบอินสตรูเมนเตชันที่ได้มาต่อเข้ากับวงจรกรองที่ได้จากการทดลองในครั้งแรก ดังแสดงในรูปที่ 4 (ให้ขาออกของวงจรขยายแบบอินสตรูเมนเตชันเป็นขาเข้าของวงจรกรอง)
- 2) ต่อวงจรแบ่งแรงดันดังแสดงในรูปที่ 4 เลือกอัตราส่วนการแบ่งแรงดันประมาณ 50 เท่า คำนวณค่าความต้านทานที่ต้องนำมาใช้ สาเหตุที่ต้องแบ่งแรงดันเนื่องจากเครื่องกำเนิดสัญญาณที่ใช้ในห้องปฏิบัติการฯ สามารถกำเนิดสัญญาณได้ขนาดเล็กสุด 100 mVpp ซึ่งถ้าป้อนเข้าวงจรโดยตรงจะเกิดการอิ่มตัวของวงจรได้ ค่าอัตราการลดทอน $Atten = \frac{R_B}{R_A + R_B}$
- 3) ต่อขาเข้าของวงจรขยายแบบอินสตรูเมนเตชันเข้ากับเครื่องกำเนิดสัญญาณ ผ่านทางวงจรแบ่งแรงดัน
- 4) วัดแรงดันขาเข้าและขาออก โดยต่อ CH1 ของ DSO เข้ากับขาเข้าของวงจรขยายแบบอินสตรูเมนเตชัน และต่อ CH2 ของ DSO เข้ากับขาออกของวงจรกรอง
- 5) ป้อนสัญญาณไซน์ที่มีความถี่ต่างๆ บันทึกขนาดของสัญญาณขาเข้าและขาออกลงในตาราง โดยให้บันทึกเป็นค่ายอดถึงยอด คำนวณค่าอัตราขยายตามสมการ $Gain(dB) = 20 \log \left(\frac{V_{out}}{V_{in} \times Atten} \right)$ เพื่อหาผลตอบสนองเชิงความถี่



รูปที่ 4: วงจรขยายคลื่นไฟฟ้าหัวใจซึ่งประกอบด้วยวงจรขยายแบบอินสตรูเมนเตชันและวงจรกรอง และการวัดผลตอบสนองเชิงความถี่

หมายเหตุ

- 1) ในการใช้ DSO (Digital storage oscilloscope) วัดสัญญาณ ช่องสัญญาณที่ 1 และ 2 ของ DSO ต้องถูกตั้งการเชื่อมโยงแบบ **DC (direct coupling)** เพื่อให้การวัดค่าอัตราขยายมีความถูกต้องที่ความถี่ต่ำมาก หากตั้งเป็นแบบ AC ขนาดของสัญญาณที่ความถี่ต่ำจะมีค่าลดลงเนื่องจากมีตัวเก็บประจุขนาดใหญ่ต่อระหว่างขั้วเข้ากับวงจรภายในตัวเครื่อง

ค่า $R_A = 330 \text{ k}\Omega$ ค่า $R_B = 6.8 \text{ k}\Omega$ ค่า $Atten = \frac{R_B}{R_A + R_B} = \frac{1}{50}$

f (Hz)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
V_{in} (mV _{pp})	592.5	592.5	592.5	592.5	592.5	592.5	592.5	592.5	592.5
V_{out} (mV _{pp})	1418.75	2,637.5	3,625	4,362.5	4,875	5,250	5,512.5	5,700	5,862.5
Gain (dB)	41.56	46.95	49.71	51.32	52.29	52.93	53.35	53.64	53.89

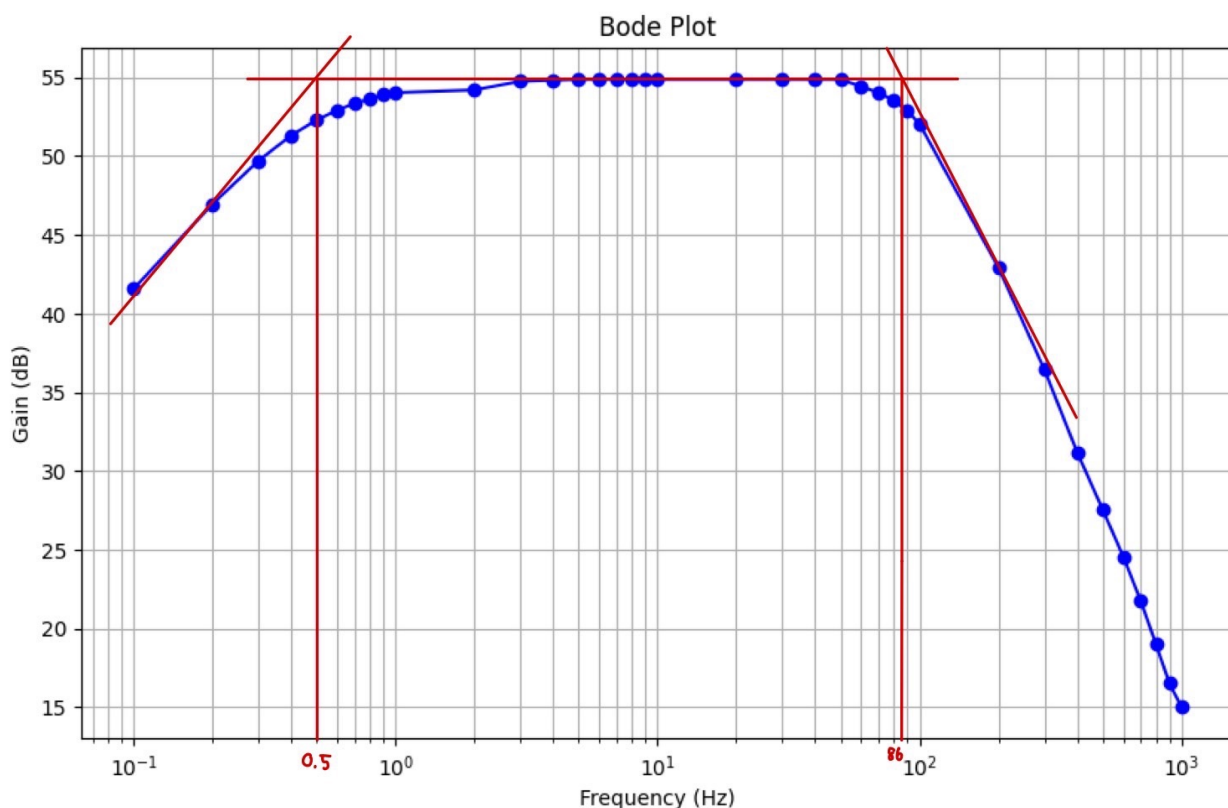
f (Hz)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
V_{in} (mV _{pp})	592.5	592.5	592.5	592.5	592.5	592.5	592.5	592.5	592.5
V_{out} (mV _{pp})	5962.5	6,075	6,475	6,525	6,562.5	6,562.5	6,562.5	6,562.5	6,562.5
Gain (dB)	54.03	54.20	54.75	54.82	54.87	54.87	54.87	54.87	54.87

f (Hz)	10	20	30	40	50	60	70	80	90
V_{in} (mV _{pp})	592.5	592.5	592.5	592.5	592.5	592.5	592.5	592.5	592.5
V_{out} (mV _{pp})	6,562.5	6,562.5	6,562.5	6,562.5	6,562.5	6,237.5	5,950	5,125	5,212.5
Gain (dB)	54.87	54.87	54.87	54.87	54.87	54.43	54.02	53.53	52.87

f (Hz)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
V_{in} (mV _{pp})	592.5	592.5	592.5	592.5	592.5	592.5	592.5	592.5	592.5	592.5
V_{out} (mV _{pp})	4,750	1,662.5	787.5	430	283.75	200.63	145.0	105.13	79.38	66.88
Gain (dB)	52.06	42.94	36.45	31.20	27.58	24.57	21.75	19.00	16.52	15.03

หมายเหตุ นิสิตสามารถใช้โปรแกรม Excel หรือโปรแกรมอื่นช่วยวาดกราฟได้ แต่ต้องระบุข้อมูลให้ถูกต้องและครบถ้วน เช่น ชื่อแกน หน่วยของแกน

กราฟผลตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรกรอง



ให้ใช้เส้นตรงใกล้เคียงเพื่อหาความถี่ตัดมุมที่ความถี่ต่ำและความถี่สูง เปรียบเทียบผลที่ได้กับผลการทดลองของวงจรกรองในครั้งที่แล้ว

(แสดงการวัดความถี่ตัดผ่าน โดยการใช้เส้นตรงใกล้เคียงลงบนกราฟ)

ค่าอัตราขยาย (จากการวัด) 54.87 dB

ค่าอัตราขยายจากการออกแบบ (อัตราขยายของ IA x อัตราขยายวงจรกรอง) $5 \times 11.12 = 55.6$
 $20 \log_{10}(55.6) = 54.93 \text{ dB}$

ค่าความถี่ตัดผ่าน (Cut-off frequency) ด้านต่ำ

ค่าที่วัดได้จากการวัด 0.5 เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากวงจรกรอง 0.453

ค่าความถี่ตัดผ่าน (Cut-off frequency) ด้านสูง

ค่าที่วัดได้จากการวัด 86 เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากวงจรกรอง 100.1

อภิปรายผลของค่าความถี่ตัดผ่านของวงจรขยายคลื่นไฟฟ้าหัวใจ เหมือนหรือแตกต่างจากวงจรกรองใน การทดลองที่แล้ว หรือไม่ พร้อมทั้งให้เหตุผลประกอบ

ความถี่ตัดผ่านของวงจรขยายคลื่นไฟฟ้าหัวใจทั้งด้านต่ำและด้านสูงมีค่าใกล้เคียงกับ

การทดลองปีที่ 1 เนื่องจากวงจรขยายแบบอินสตรูเมนต์ได้ออกเข้ากับวงจรการทดลอง

แรกไม่มีสมบัติการบิด歪 ความถี่ที่ได้จึงมาจากวงจรเฟืองแบ่งได้ยาก และ อัตราขยายที่

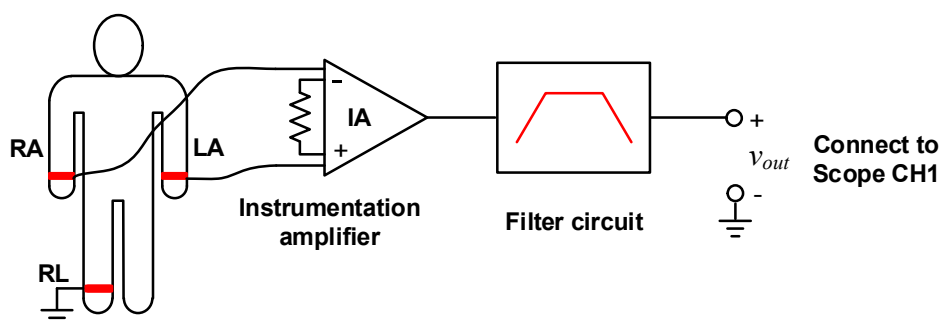
ได้มีค่าสูงชัน % Error ความถี่ตัดผ่านด้านต่ำ = $\frac{105 - 0.453}{0.453} \times 100\% = 1038\%$

% Error ความถี่ตัดผ่านด้านสูง = $\frac{186 - 100.11}{100.11} \times 100\% = 14.09\%$

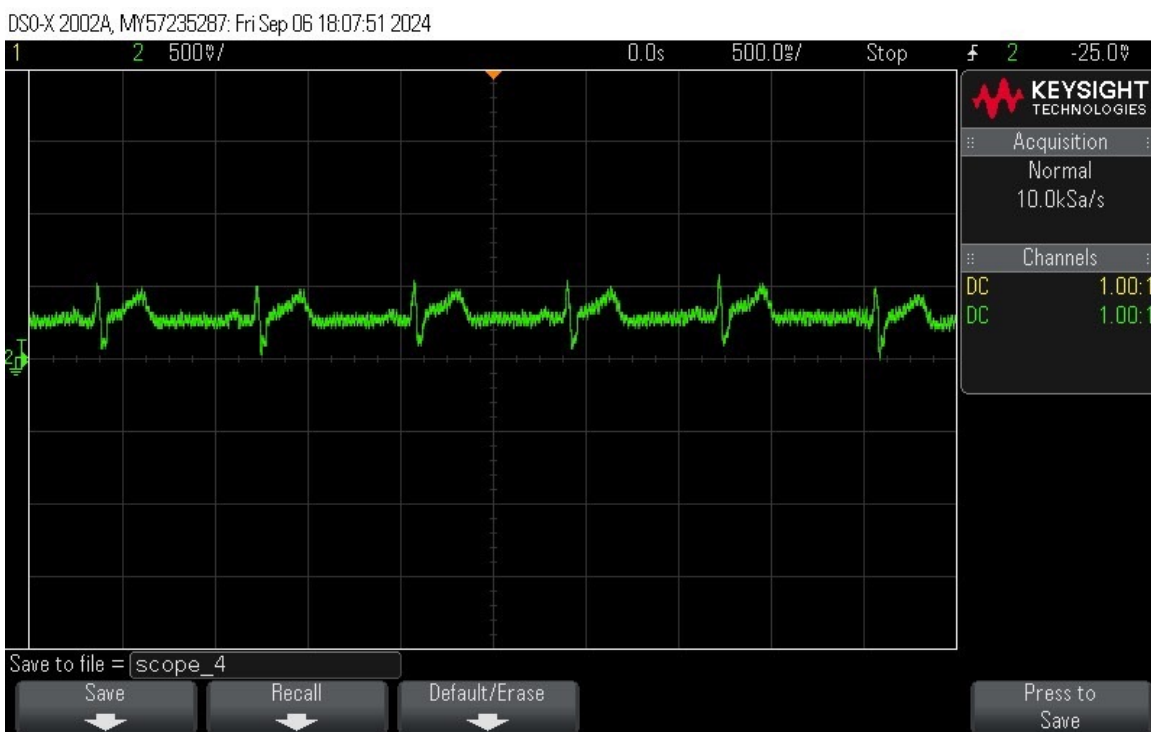
การทดลองที่ 3: การวัดสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจ

ให้อาสาสมัครในกลุ่ม 1 คน เป็นตัวอย่าง นำสายสัญญาณและขั้วอิเล็กโทรดที่กำหนดให้ ต่อเข้ากับ แขนซ้าย แขนขวา และขาขวาดังรูปที่ 5 ต่อขาออกของวงจรเข้ากับ DSO CH1

- ปรับสเกลแนวนอนของออสซิลโลสโคป เป็น 200 ms/Div (จะเห็นรูปคลื่น ECG ประมาณ 2-4 รูปคลื่น)
- ปรับสเกลแกนตั้งของออสซิลโลสโคป เป็น 1 V/Div หรือสามารถใช้สเกลอื่นได้ให้เห็นสัญญาณชัดเจน
- บันทึกรูปคลื่นสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจลงใน thumb drive โดยบันทึกแบบเป็นไฟล์รูปภาพ (นามสกุล .png หรือ .jpg) และ บันทึกแบบเป็นไฟล์ข้อมูล (นามสกุล .CSV)



รูปที่ 5: การวัดสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจ



รูปที่ 6: สัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจที่บันทึกได้

อภิปรายผลการทดลองเกี่ยวกับรูปคลื่นไฟฟ้าหัวใจที่วัดได้

สัญญาณที่ได้จากกราฟ Oscilloscope ในการวัดพบว่า มีความเร็วขดค่อนข้างมาก มีสัญญาณรบกวนมากปะปน ลักษณะเป็นตาบเท่าๆกันเป็นช่วงๆในแต่ละตาจะมีขดตรงขึ้นมาเป็นช่วงที่สามารถจับสัญญาณหัวใจได้ ในช่วงที่เหลืออีกขม่อมแสดงเป็นผลมาจากสัญญาณไฟ 50 Hz แสดงว่าวงจรอินพุตเมเนจโมได้ สามารถจับสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจได้ดี