บทที่ 3

การออกแบบเครื่องขยายสัญญาณ

สัญญาณไฟฟ้าจากกล้ามเนื้อโดยปกติแล้วมีขนาดแรงดันที่ต่ำมาก คือ ประมาณ 50 ไมโครโวลท์ - 100 มิลลิโวลท์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการขยายสัญญาณก่อนที่จะนำไปประมวลผลต่อไป เครื่องขยายสัญญาณที่ใช้สำหรับขยายสัญญาณไฟฟ้าจากกล้ามเนื้อควรมีคุณสมบัติดังนี้

1.มีกำลังขยายสูง เนื่องจากสัญญาณไฟฟ้าจากกล้ามเนื้อมีขนาดน้อยมากดังนั้นเครื่องขยายจึงต้องมีกำลังขยายสูง

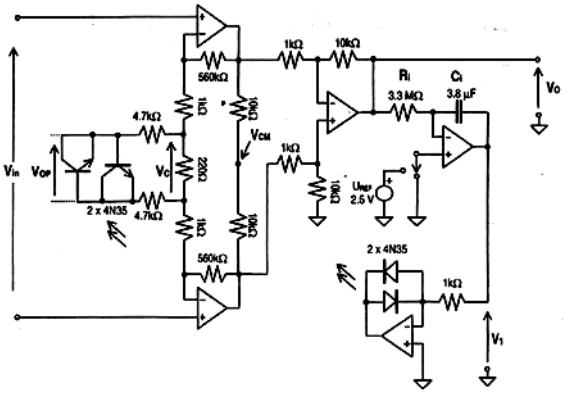
2. มีการตอบสนองที่ช่วงความถี่ 2 – 500 เฮิตรซ์ เนื่องจากสัญญาณไฟฟ้าจากกล้ามเนื้อที่วัดจาก Surface EMG มีความถี่อยู่ระหว่าง 5-500 เฮิตรซ์ ดังนั้นความถี่ที่สูงกว่านี้จึงไม่ต้องการนำมาวิเคราะห์

3. มี Common Mode Rejection Ratio (CMRR) สูง CMRR เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการกำจัดสัญญาณรบกวน หาได้จากอัตราส่วนของกำลังขยายเมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าที่แตกต่างกันเข้าที่ขั้วสัญญาณทั้งสองของแอมปลิไฟเออร์ต่อกำลังขยายเมื่อศักย์ไฟฟ้าที่เหมือนกันที่ขั้วทั้งสอง ในส่วนของวงจรขยายจะจัดวงจรในลักษณะของวงจรขยายความแตกต่าง (Difference Amplifier) หลักการลดสัญญาณรบกวนด้วยการใช้วงจรขยายความแตกต่างนี้ คือ จะไม่ขยายสัญญาณที่มีศักย์ไฟฟ้าที่เหมือนกัน ในทางตรงกันข้ามจะขยายสัญญาณที่มีศักย์ไฟฟ้าที่แตกต่างกัน

3.1 การออกแบบวงจร

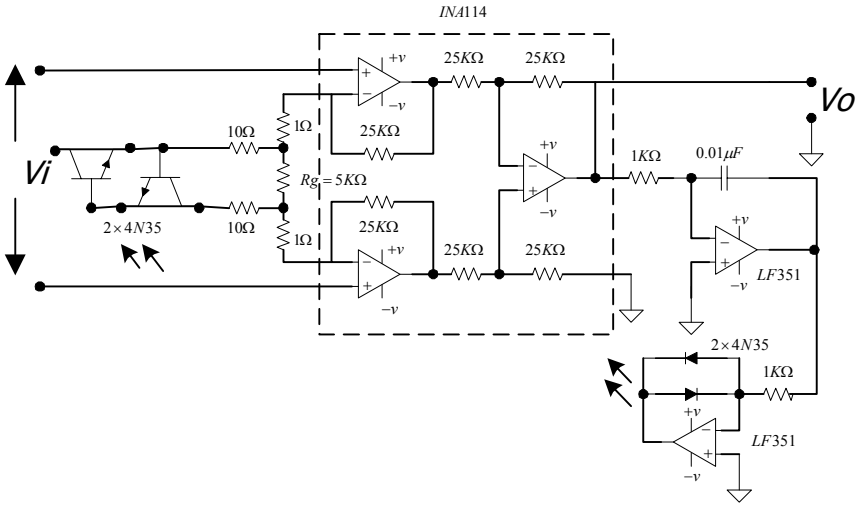
3.1.1 วงจรขยายอินสตรูเม้นต์ (Instrument Amplifier Circuit)

ในการออกแบบวงจรที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ใช้รูปแบบของวงจรขยายอินสตรูเม้นต์ (Spinelli, E. M. และ Mayosky, M. A. 2000 : 1616-1619) โดยมีความสามารถในการกำจัดแรงดันออฟเซตทั้งที่เป็นบวกและลบอันเนื่องมาจากร่างกายได้ โดยการใช้เทคนิคการป้อนกลับทางแสงจากเอาท์พุทมายังอินพุทของวงจร แรงดันออฟเซตนี้หากปะปนเข้าไปในวงจรจะทำให้วงจรไม่สามารถทำการขยายสัญญาณได้ทั้งนี้เพราะวงจรเกิดการอิ่มตัว วงจรที่ได้ออกแบบไว้แสดงดังภาพประกอบ 3-1



ภาพประกอบ 3-1 วงจรของ Spinelli, E. M. และ Mayosky, M. A.

จากวงจรของภาพประกอบ 3-1 ในส่วนของวงจรที่จัดเป็นวงจรขยายอินสตรูเม้นต์ได้ใช้วงจรรวม (Integrated Circuit : IC) สำเร็จรูปเบอร์ INA 114 ของบริษัท เบอร์บราว์ คอร์เปอร์เรชั่น จำกัด แทนซึ่งจะได้วงจรใหม่เป็นดังภาพประกอบ 3-2



ภาพประกอบ 3-2 วงจรขยายที่สามารถกำจัดแรงดันออฟเซตเมื่อใช้กับวงจรรวมเบอร์ INA114

ในวงจรนี้สามารถกำหนดอัตราการขยายได้ด้วยสมการที่ 3-1

$$Gain(dB) = 1 + \frac{50K}{Rg} \qquad (3\text{-}1)$$

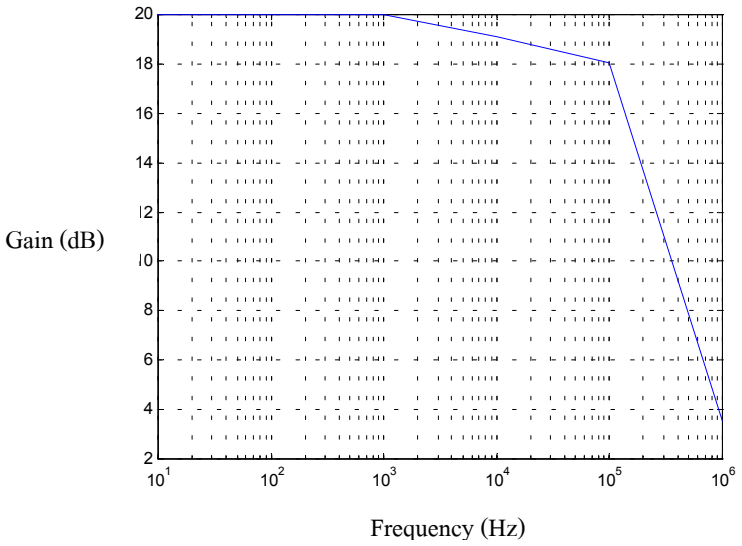
จากสมการที่ 3-1 จะเห็นได้ว่ามี Rg เป็นตัวกำหนดอัตราการขยายซึ่งสมการนี้เป็นคุณสมบัติของวงจรขยายอินสตรูเม้นต์ แต่เมื่อนำมาประกอบเข้ากับวงจรที่ใช้งานจะมีคุณสมบัติอีกตัวที่จะต้องพิจารณาด้วยคือ ความสามารถที่จะกำจัดแรงดันออฟเซ็ตที่เกิดขึ้นจากตัวคน หากวงจรมีอัตราการขยายมากเกินไปก็จะทำให้ย่านความสามารถที่จะกำจัดแรงดันออฟเซ็ตแคบ ในทางตรงกันข้ามหากวงจรมีอัตราการขยายต่ำก็จะมีความสามารถกำจัดแรงดันออฟเซ็ตในย่านที่กว้างกว่า ในที่นี้จะเลือกใช้ Rg = 5KΩ ทำการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติต่างๆของวงจรโดยที่ให้แรงดันอินพุท (v_i) 10 mV ขณะเดียวกันก็ปรับเปลี่ยนความถี่ พร้อมทั้งสังเกตแรงดันด้านเอ้าต์พุท (v_o) ของวงจร โดยที่อัตราการขยายสัญญาณหน่วยเป็น dB ซึ่งสามารถหาได้โดยใช้สมการ 3-2 และได้ผลการทดลองดังตาราง 3-1 และภาพประกอบ 3-3

$$Gain(dB) = 20\log\frac{v_0}{v_i} \qquad (3\text{-}2)$$

ตาราง 3-1 ผลการทดสอบวงจรในภาพประกอบ 3-2

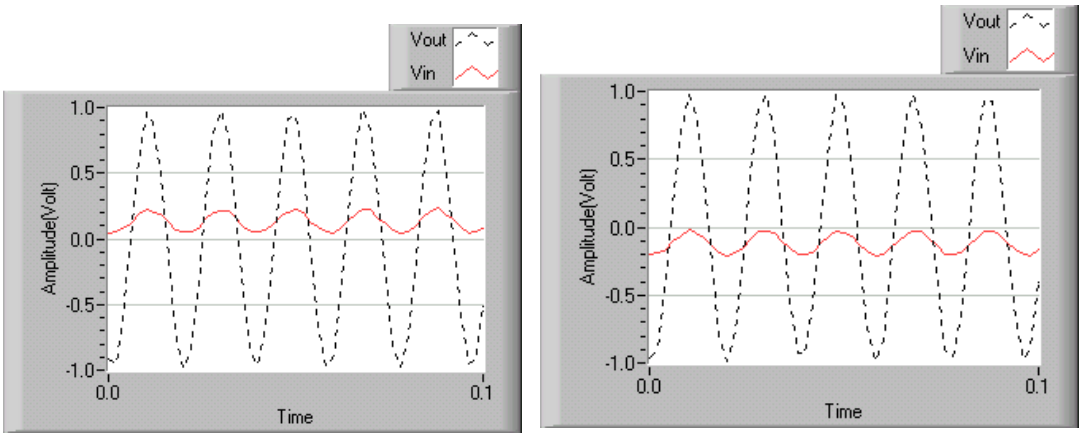
f(Hz)	V_0(mV)	Gain(dB)
10	100	20
20	100	20
30	100	20
40	100	20
50	100	20
60	100	20
70	100	20
80	100	20
90	100	20
100	100	20
200	100	20

f(Hz)	V_0(mV)	Gain(dB)
300	100	20
400	100	20
500	100	20
600	100	20
700	100	20
800	100	20
900	100	20
1 K	100	20
10 K	90	19.09
100 K	80	18.05
1000 K	15	3.52



ภาพประกอบ 3-3 ผลการตอบสนองของวงจรขยายภาพประกอบ 3-2

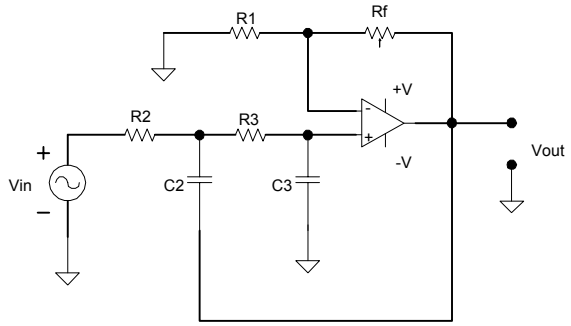
จากภาพประกอบ 3-3 วงจรมีอัตราการขยายสัญญาณประมาณ 20 dB ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 10 เฮิรตซ์ - 160 กิโลเฮิรตซ์ และมีช่วงการกำจัดแรงดันออฟเซตที่ -150 ถึง + 150 มิลลิโวลท์ ดังภาพประกอบ 3-4 ซึ่งยืนยันได้ว่าวงจรสามารถทำงานได้ครอบคลุมย่านความถี่ของสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อ คือประมาณ 10 - 500 เฮิรตซ์ได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามเพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนความถี่สูงที่จะเข้ามาปะปน จึงได้จัดสร้างวงจรกรองความถี่ต่ำเพิ่มขึ้นมาซึ่งเป็นวงจรที่ออกแบบโดยใช้ตัวกรองความถี่ต่ำแบบบัตเตอร์เวิตซ์อันดับสอง (Second Order Butterworth Filter)



ภาพประกอบ 3-4 ความสามารถในการกำจัดแรงดันออฟเซตอยู่ในย่าน -150 ถึง 150 มิลลิโวลท์

3.1.2 วงจรกรองความถี่ต่ำแบบบัตเตอร์เวิตซ์อันดับสอง (Second Order Butterworth Filter)

วงจรกรองความถี่ต่ำสามารถออกแบบได้หลายวิธีด้วยกัน เช่น วิธีเชบบิ้เชฟ (Chebyshev) วิธีบัตเตอร์เวิตซ์, วิธีเบสเซล (Bessel) และวิธีเอลลิปทิค (Elliptic) เป็นต้น แต่วิธีที่เป็นที่นิยมคือ วิธีบัตเตอร์เวิตส์ เนื่องจากมีวิธีการออกแบบที่ง่ายสะดวกและให้อัตราการขยายที่คงที่ในช่วงความถี่ต่ำผ่าน ดังภาพประกอบ 3-5



ภาพประกอบ 3-5 วงจรกรองความถี่ต่ำแบบบัตเตอร์เวิตซ์อันดับสอง

วงจรดังภาพประกอบ 3-5 เป็นวงจรอันดับสอง (Second Order) สามารถปรับแต่ง Gain ได้โดยการปรับ R_1 และ R_f ในขณะที่ความถี่ตัดด้านสูง (High Cut off Frequency : f_H) สามารถหาได้โดยใช้สมการที่ 3-3 และมีผลตอบสนองวงจรดังภาพประกอบ 3-6

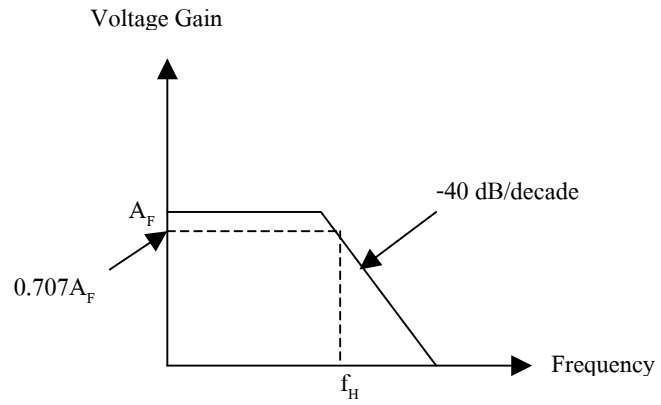
$$f_H = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_2 R_3 C_2 C_3}} \tag{3-3}$$

ในส่วนของการตอบสนองของวงจรนั้นสามารถหาได้จากสมการที่ 3-4

$$\left|\frac{v_o}{v_i}\right| = \frac{A_F}{\sqrt{1+(f/f_H)^4}} \tag{3-4}$$

เมื่อ $A_F = 1+\frac{R_F}{R_1}$ = Passband Gain

f = ความถี่ขาเข้า



ภาพประกอบ 3-6 ผลตอบสนองวงจรกรองความถี่ต่ำแบบบัตเตอร์เวิตซ์อันดับสองในอุดมคติ

ขั้นตอนการออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำอันดับสอง มีดังนี้ (Gayakwad, R. A. 1988 : 277-279)

1.กำหนดความถี่คัตออฟ 500 เฮิตรซ์

2.กำหนดค่าของตัวเก็บประจุ C2 และ C3 ในที่นี้เท่ากับ 0.01 μF

3.คำนวณค่าของตัวต้านทาน R2 และ R3 โดยใช้สมการ 3-5

$$R = \frac{1}{2\pi \times f \times c} \tag{3-5}$$

แทนค่า

$$R = \frac{1}{2\pi \times 500 \times 0.01 \times 10^{-6}} = 31.85k\Omega$$

เลือกใช้ค่ามาตรฐาน 33 $k\Omega$

4.คำนวณค่าของ R_f โดยกำหนดค่า R_1 ในที่นี้เท่ากับ 15 kΩ และใช้สมการ 3-6

$$R_f = 0.586R_1 \tag{3-6}$$

แทนค่า

$$R_f = 0.586 \times 15k\Omega = 8.79k\Omega$$

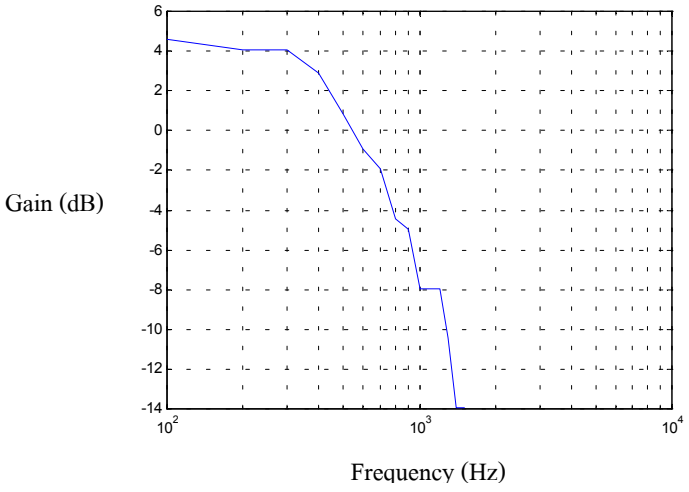
เลือกใช้ค่ามาตรฐาน 10 $k\Omega$

นำอุปกรณ์ประกอบเป็นวงจรพร้อมทั้งป้อนสัญญาณอินพุทแรงดัน 0.2 โวลท์ ขณะเดียวกันก็เปลี่ยนความถี่พร้อมทั้งสังเกตแรงดันด้านเอ้าต์พุทของวงจรมีผลการตอบสนองดังตาราง 3-2

ตาราง 3-2 ผลการทดสอบวงจรกรองความถี่ต่ำแบบบัตเตอร์เวิตซ์อันดับสอง

f(Hz)	V_0(V)	Gain(dB)	f(Hz)	V_0(V)	Gain(dB)
100	0.3	3.52	800	0.10	-6.02
200	0.3	3.52	900	0.08	-7.95
300	0.27	2.60	1 K	0.06	-10.45
400	0.25	1.93	1.1 K	0.06	-10.45
500	0.20	0	1.2 K	0.05	-12.04
600	0.16	-1.93	1.3 K	0.04	-13.97
700	0.13	-3.74	1.4 K	0.04	-13.97

เมื่อนำมาพล็อตลงกราฟ Logscale เป็นดังภาพประกอบ 3-7



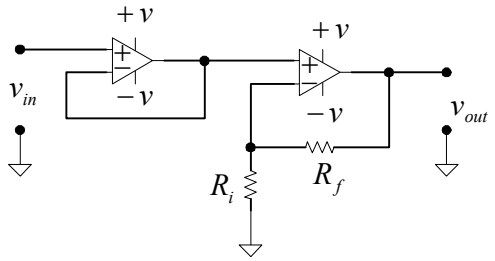
ภาพประกอบ 3-7 ผลตอบสนองของวงจรกรองความถี่ต่ำบัตเตอร์เวิตซ์อันดับสองในการทดลอง

จากภาพประกอบ 3-7 จะเห็นได้ว่าวงจรมีอัตราการขยายสัญญาณประมาณ 4 dB และมีย่านการคัตออฟตำแหน่ง -3 dBที่ความถี่ประมาณ 500 เฮิตรซ์ ซึ่งตรงกับที่ได้ออกแบบเอาไว้ อย่างไรก็ตามเพื่อความมั่นใจว่าเครื่องขยายมีอัตราขยายที่เพียงพอได้จึงเพิ่มวงจรขยายอีกหนึ่งวงจร

3.1.3 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส (Noninverting Amplifier Circuit)

การต่อวงจรขยายในลักษณะนี้เป็นการต่อที่ง่ายและไม่ซับซ้อนใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ไม่มากนัก โดยที่ทางด้านอินพุทของวงจรจะต่อด้วยวงจรบัฟเฟอร์ (Buffer Circuit) เพื่อป้องกันการดึงกระแสที่ด้านอินพุท รูปแบบของวงจรแสดงดังภาพประกอบ 3-8 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟสกำหนดอัตราการขยายด้วยสมการที่ 3-7

$$Gain(dB) = \frac{R_f}{R_i} + 1 \qquad (3\text{-}7)$$



ภาพประกอบ 3-8 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส

ในการทดลอง กำหนดให้ R_f เท่ากับ 10 K และ R_i เท่ากับ 1 K ป้อนแรงดันอินพุทขนาด 0.2 โวลท์ ให้แก่วงจรขณะเดียวกันก็ปรับเปลี่ยนความถี่ พร้อมทั้งสังเกตแรงดันด้านเอาต์พุทของวงจร มีผลการตอบสนองดังตาราง 3-3

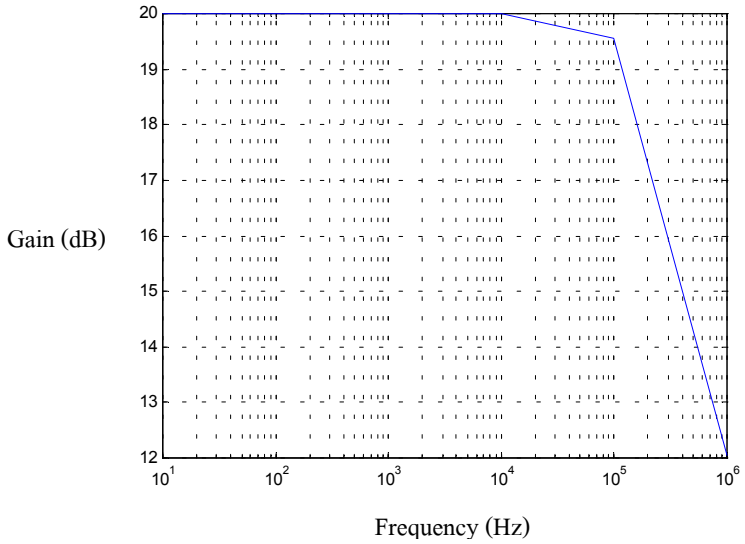
ตาราง 3-3 ผลการทดสอบวงจรขยายแบบไม่กลับเฟส

f(Hz)	V_0(V)	Gain(dB)	f(Hz)	V_0(V)	Gain(dB)
10	2	20	40	2	20
20	2	20	50	2	20
30	2	20	60	2	20

ตาราง 3-3(ต่อ)

f(Hz)	V_0(V)	Gain(dB)	f(Hz)	V_0(V)	Gain(dB)
70	2	20	600	2	20
80	2	20	700	2	20
90	2	20	800	2	20
100	2	20	900	2	20
200	2	20	1 K	2	20
300	2	20	10 K	2	20
400	2	20	100 K	1.9	19.55
500	2	20	1000 K	0.8	12.04

เมื่อนำมาพล็อตลงกราฟ Logscale เป็นดังภาพประกอบ 3-9



ภาพประกอบ 3-9 ผลตอบสนองของวงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส

จากภาพประกอบ 3-9 วงจรมีอัตราการขยายสัญญาณประมาณ 20 dB ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 10 เฮิตรซ์ - 200 กิโลเฮิตรซ์

3.2 การทดสอบคุณสมบัติและการทำงานของเครื่องขยายสัญญาณ

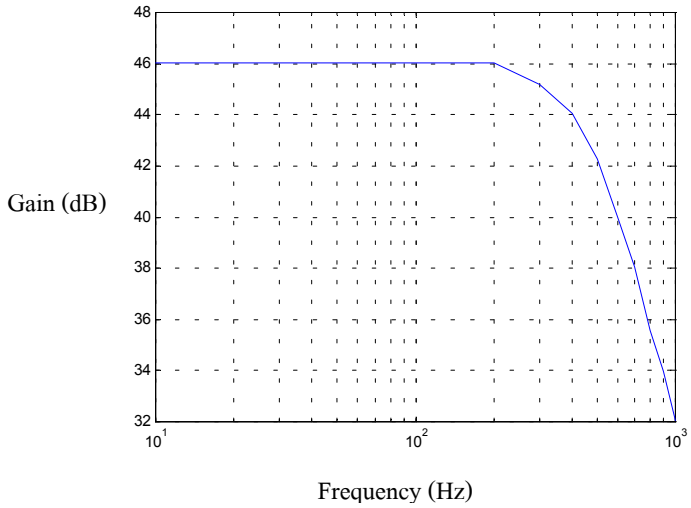
3.2.1 อัตราการขยายสัญญาณ

เมื่อนำวงจรต่างๆมาประกอบเข้าด้วยกันเพื่อสร้างเครื่องขยายสัญญาณ ป้อนแรงดันอินพุทขนาด 10 มิลลิโวลท์ ขณะเดียวกันก็ปรับเปลี่ยนความถี่พร้อมทั้งสังเกตแรงดันด้านเอาต์พุทของเครื่องขยายสัญญาณ คุณสมบัติของเครื่องเป็นดังตาราง 3-4 และมีผลการตอบสนองต่อความถี่ดังภาพประกอบ 3-10

ตาราง 3-4 ผลการทดลองของเครื่องขยายสัญญาณ

f(Hz)	V_0(V)	Gain(dB)	f(Hz)	V_0(V)	Gain(dB)
10	2	46.02	300	1.82	45.20
20	2	46.02	400	1.6	44.08
30	2	46.02	500	1.3	42.27
40	2	46.02	600	1	40.00
50	2	46.02	700	0.8	38.06
60	2	46.02	800	0.6	35.56
70	2	46.02	900	0.5	33.97
80	2	46.02	1 K	0.4	32.04
90	2	46.02	10 K	-	-
100	2	46.02	100 K	-	-
200	2	46.02	1000 K	-	-

จากภาพประกอบ 3-10 จะเห็นได้ว่าอัตราการขยายสัญญาณของเครื่องขยายสัญญาณประมาณ 46 dB หรือ 200 เท่า ความถี่คัตออฟที่ตำแหน่ง -3 dB อยู่ที่ความถี่ประมาณ 500 เฮิตรซ์ ซึ่งตรงกับที่คำนวณไว้ อีกทั้งเครื่องนี้สามารถกำจัดแรงดันออฟเซตได้ในย่านประมาณ -150 ถึง 150 มิลลิโวลท์ อีกด้วย



ภาพประกอบ 3-10 ผลตอบสนองของเครื่องขยายสัญญาณ

3.2.2 อัตราการลดทอนสัญญาณชนิดคอมมอนโหมด (CMRR)

จากหลักการของ CMRR คือ จะไม่ขยายสัญญาณที่มีศักย์ไฟฟ้าเหมือนกัน ในทางตรงกันข้ามจะขยายสัญญาณที่มีศักย์ไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ซึ่งจะสามารถหาได้จากสมการ 3-8

$$CMRR(dB) = 20\log\frac{A_d}{A_c} \qquad (3\text{-}8)$$

เมื่อ A_d คือ อัตราการขยายแบบ Differential Mode

A_c คือ อัตราการขยายแบบ Common Mode

- วิธีการหาค่า A_d ทำได้โดยป้อนแรงดันไฟฟ้าความถี่ 50 เฮิตรซ์ ที่มีขนาดที่แตกต่างกันให้กับด้านอินพุทของเครื่องขยายและสังเกตแรงดันที่เอ้าต์พุท ดังตาราง 3-5

ตาราง 3-5 ผลการทดลองการขยายสัญญาณแบบ Differential Mode

แรงดันอินพุท (V_I)	แรงดันเอาต์พุท (V_0)	อัตราการขยาย(เท่า)
10 mV	2 V	200

- วิธีการหาค่า A_c ทำได้โดยป้อนแรงดันไฟฟ้าความถี่ 50 เฮิตรซ์ ที่มีขนาดที่เท่ากันให้กับอินพุทของเครื่องขยายสัญญาณและสังเกตแรงดันที่เอ้าต์พุท ดังตาราง 3-6

ตาราง 3-6 ผลการทดลองการขยายสัญญาณแบบ Common Mode

แรงดันอินพุท (V_i)	แรงดันเอาต์พุท (V_0)	อัตราการขยาย(เท่า)
3.2 V	100 mV	0.031

จากอัตราการขยายสัญญาณของตาราง 3-5 และ 3-6 สามารถคำนวณค่า CMRR ได้ คือ

$$CMRR(dB) = 20\log\frac{200}{0.031} = 70.17dB$$

สรุปคุณสมบัติของเครื่องขยายสัญญาณเครื่องนี้คือ ใช้ไฟเลี้ยง ± 12 โวลท์ มีอัตราการขยายสัญญาณเท่ากับ 46 dB ผลตอบสนองความถี่ที่ย่าน 10 - 500 เฮิตรซ์ สามารถกำจัดแรงดันออฟเซตได้ -150 ถึง 150 มิลลิโวลท์ และค่า CMRR เท่ากับ 70.17 dB ที่ความถี่ 50 เฮิตรซ์