

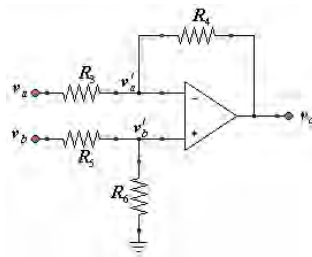
บทที่ 4

การจำลองสัญญาณ และการทดลอง

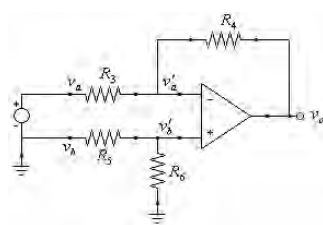
ในบทนี้จะกล่าวถึงการจำลองสัญญาณ วงจรขยายผลต่าง I.A วงจรเพิ่มอัตราการจัดสัญญาณโหมคร่วม และการทดลองวงจรขยายสัญญาณไบโโพอเทนเชียล ในเรื่องของอัตราขยายผลต่าง (Differential mode gain; G_D) อัตราการขยายโหมคร่วม (Common mode gain; G_C) อัตราการขจัดสัญญาณโหมคร่วม (Common mode rejection ratio; CMRR) และการกำจัดแรงดันไฟตรง (DC suppression)

4.1 วงจรขยายผลต่าง (Differential Amplifier ; DA)

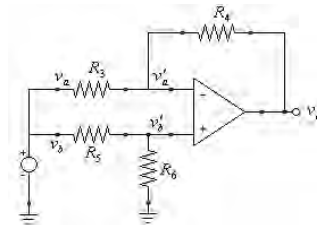
ในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรมจำลองสัญญาณแบบสไปซ์ (Spice base simulation) โดยใช้การจำลองด้วยรูประดับ 2 (L-2 Model) ในการจำลองสัญญาณ (Simulation signal) เพื่อหาอัตราการจัดสัญญาณโหมคร่วม ใช้วงจรในภาพประกอบ 4.1 ซึ่งการหาอัตราการขยายผลต่าง (G_D) ดังภาพประกอบ 4.1(ข) หาอัตราการขยายโหมคร่วม (G_C) ดังภาพประกอบ 4.1 (ค)



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพประกอบ 4.1 (ก) วงจรขยายผลต่าง

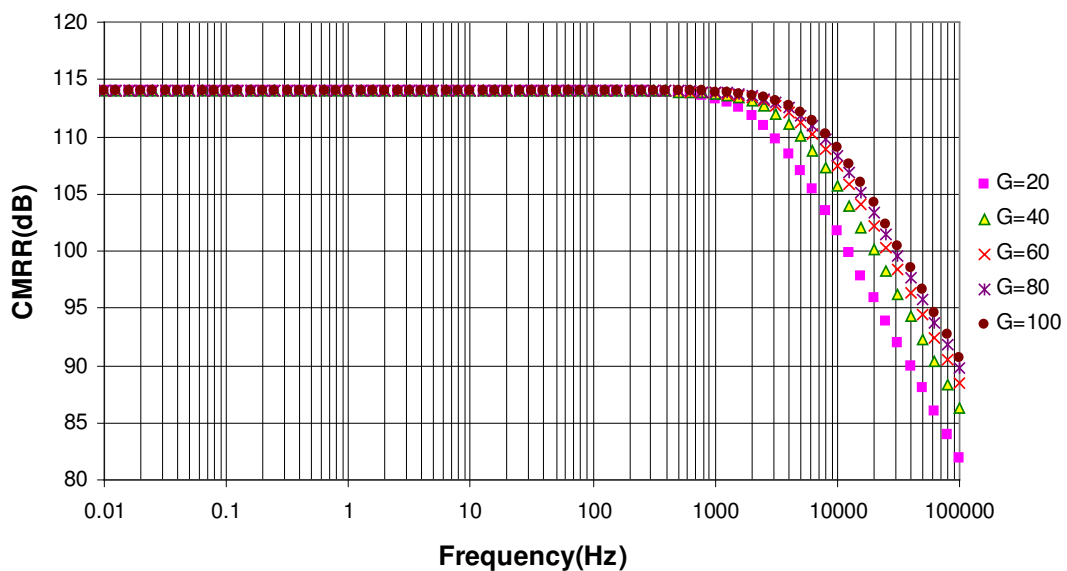
(ข) หาอัตราการขยายผลต่าง

(ค) หาอัตราการขยายโหมคร่วม

การจำลองสัญญาณในงานวิจัยนี้ เพื่อหาผลกระทบต่ออัตราขยายจัดสัญญาณ โหมดร่วม (CMRR) เนื่องจากอัตราขยายผลต่าง และค่าความผิดพลาดของความต้านทาน ซึ่งการจำลองสัญญาณได้เลือกใช้ออปแอมป์เบอร์ OP27 ตัวต้านทานมีค่าความผิดพลาด 0.001, 0.01, 0.1, 1, 5 และ 10% และการเปลี่ยนค่าอัตราขยายผลต่างที่ 20, 40, 60, 80 และ 100 เท่า โดยการป้อนสัญญาณแรงดันอินพุต 1 mV ความถี่ 100 Hz ซึ่งมีผลการจำลองสัญญาณดังนี้

4.1.1 ผลกระทบเนื่องจากอัตราขยายผลต่าง

วิธีการจำลองสัญญาณ โดยการปรับค่าอัตราขยายผลต่างดังนี้ 20, 40, 60, 80 และ 100 เท่า แล้ววัดและบันทึกสัญญาณเอาต์พุตที่เกิดขึ้นแต่ละครั้ง ผลการจำลองสัญญาณดังแสดงในภาพประกอบ 4.2

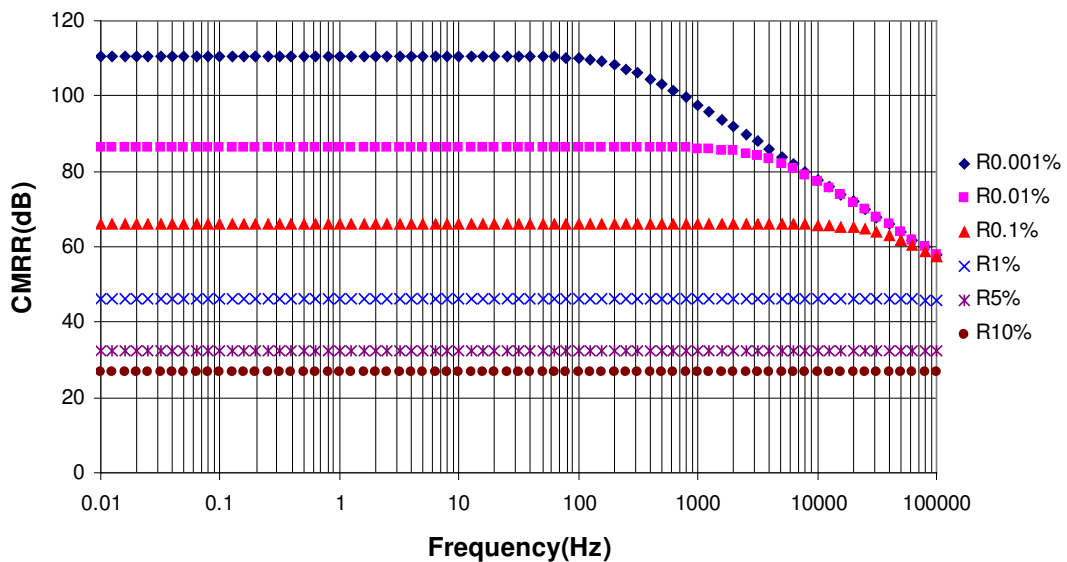


ภาพประกอบ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง CMRR กับ อัตราขยายผลต่าง(G_p) ที่ความถี่ 0.01 Hz ถึง 100 kHz

จากภาพประกอบ 4.2 จะเห็นว่าวงจรถายความแตกต่าง นั้นค่าอัตราขยายผลต่าง มีผลต่อค่า CMRR ของวงจรมากน้อยแค่ไหน ซึ่งจากกราฟในภาพประกอบ 4.2 การเพิ่มอัตราขยายผลต่าง จาก 20 เท่า เป็น 100 เท่า จะทำให้ค่า CMRR เพิ่มขึ้นเพียง 0.34 % เท่านั้นซึ่งถือว่าไม่มีนัยสำคัญ และขณะที่อัตราขยายผลต่างเพิ่มขึ้นก็จะส่งผลให้การตอบสนองความถี่ของวงจรมีขึ้นด้วย

4.1.2 ผลกระทบเนื่องจากความต้านทานที่มีค่าความผิดพลาด

การจำลองสัญญาณ โดยการใช้ความต้านทานที่มีค่าความผิดพลาด งานวิจัยนี้ได้ใช้ตัวต้านทานที่มีค่าความผิดพลาดดังนี้ 0.001, 0.01, 0.1, 1, 5 และ 10 % ตามลำดับ แล้ววัดและบันทึกสัญญาณเอาต์พุตที่เกิดขึ้นแต่ละครั้ง ผลการจำลองสัญญาณดังแสดงในภาพประกอบ 4.3



ภาพประกอบ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CMRR กับ ค่าความผิดพลาดความต้านทาน ที่ความถี่ 0.01 Hz ถึง 100 kHz

จากภาพประกอบ 4.3 พบว่าที่ความผิดพลาดของตัวต้านทาน 10 % จะทำให้ค่า CMRR ของวงจรมีค่าลดลงเหลือ 24.25 % แสดงให้เห็นว่าในวงจรขยายความต่างนั้น ค่าความผิดพลาดของตัวต้านทานจะส่งผลต่อค่า CMRR อย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นการเลือกใช้ความต้านทานจะต้องเลือกความต้านทานแต่ละตัวควรจะเท่ากัน หรือค่าความต้านทานที่มีความผิดพลาดน้อยที่สุดด้วย

4.2 วงจรขยายอินสตรูเมนเตชัน (Instrumentation Amplifier ; I.A)

การจำลองสัญญาณของวงจร I.A จะทำการทดลอง 2 กรณีคือ กรณีแรกจะพิจารณาเฉพาะภาคอินพุตของวงจร และกรณีสุดท้ายจะพิจารณาทั้งวงจร โดยวิธีการเปลี่ยนค่าอัตราขยายผลต่าง และการใช้ตัวต้านทานที่มีความผิดพลาดที่ค่าต่าง ๆ เพื่อศึกษาผลกระทบที่มีต่อวงจร

4.2.1 พิจารณาภาคอินพุตอย่างเดียว

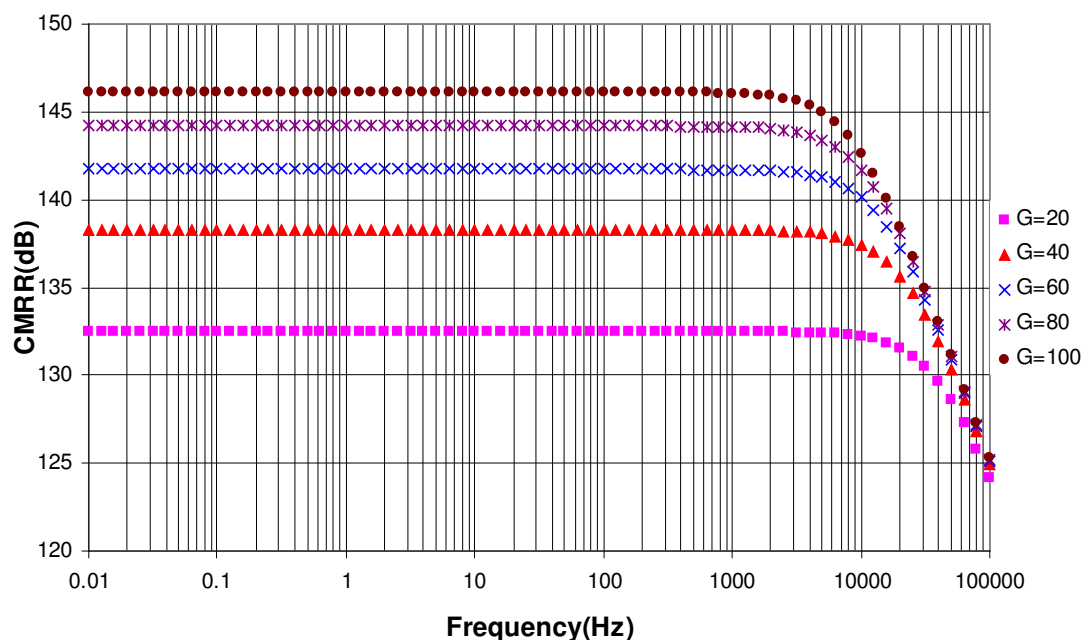
กรณีนี้จะจำลองสัญญาณโดยใช้ฮอปแอมป์ เบอร์ LM324, TL084 โดยการเปลี่ยนอัตราขยายผลต่างให้มีค่า 20, 40, 60, 80 และ 100 เท่า ตามลำดับ และความต้านทานที่มีค่าความผิดพลาด

พลาคค่าต่าง ๆ คือ 0.001, 0.01, 0.1, 1, 5 และ 10% ตามลำดับ เพื่อศึกษาผลกระทบที่มีต่ออัตราการขจัดสัญญาณ โหมดร่วมน

4.2.1.1 ผลกระทบเนื่องจากการปรับอัตราขยายผลต่างโดยใช้โอปแอมป์เบอร์ LM324, TL084

การปรับอัตราขยายผลต่างดังนี้ 20, 40, 60, 80 และ 100 เท่า โดยป้อนอินพุต 1 mV ความถี่ 100 Hz วัดและบันทึกสัญญาณเอาต์พุต ผลการจำลองสัญญาณดังแสดงในภาพประกอบ 4.4 - 4.5

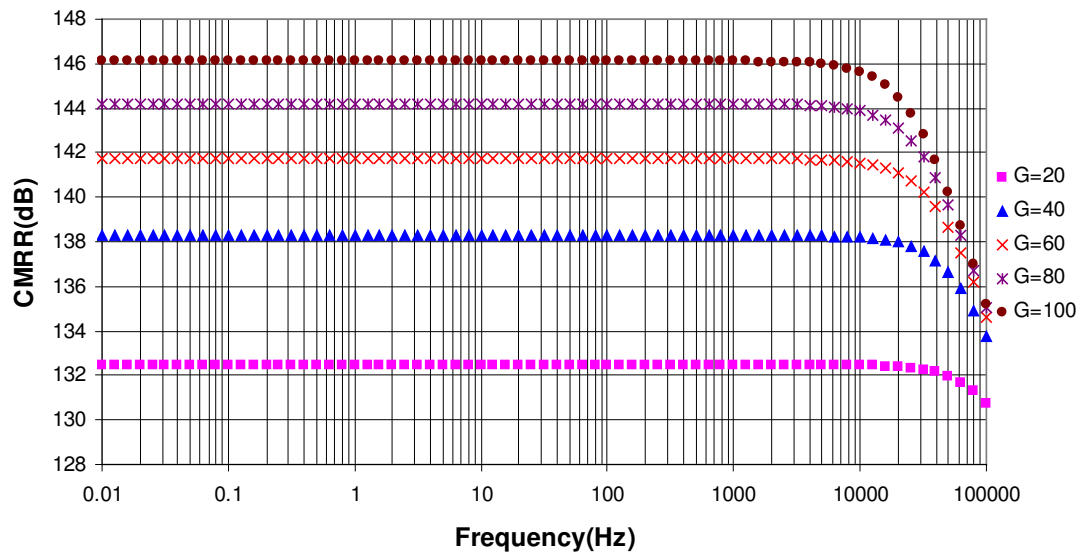
ก) โอปแอมป์เบอร์ LM324



ภาพประกอบ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CMRR กับ อัตราการขยายผลต่าง ที่ความถี่ 0.01 Hz ถึง 100 kHz เมื่อใช้โอปแอมป์เบอร์ LM324

จากภาพประกอบ 4.4 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มค่าอัตราการขยายผลต่าง ในภาคอินพุตของวงจร I.A นั้น จะทำให้ค่า CMRR เพิ่มขึ้นตาม เช่น จากกราฟ ถ้าเราเพิ่มอัตราการขยายผลต่างจาก 20 เท่า เป็น 100 เท่า จะทำให้ค่า CMRR เพิ่มขึ้นของวงจร 10.29 % และในขณะที่อัตราการขยายเพิ่มขึ้นจะทำให้การตอบสนองความถี่ของวงจรลดลง เช่นที่อัตราการขยายผลต่าง 100 เท่า วงจรจะตอบสนองต่อความถี่ได้สูงสุด 5 kHz ดังนั้นการเพิ่มอัตราการขยายผลต่างจะต้องระวังเรื่องการตอบสนองต่อความถี่ของวงจรด้วย

ข) ออปแอมป์เบอร์ TL084



ภาพประกอบ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CMRR กับ อัตราการขยายผลต่าง (G_p) ที่ความถี่ 0.01 Hz ถึง 100 kHz เมื่อใช้ออปแอมป์เบอร์ TL084

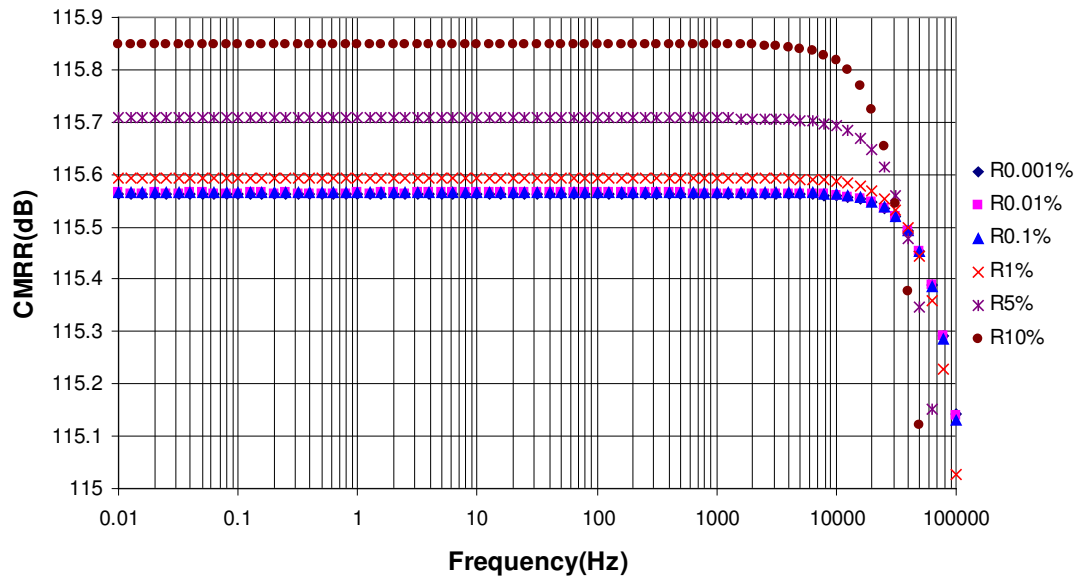
จากภาพประกอบ 4.5 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มค่าอัตราการขยายผลต่างในภาคอินพุทของ วงจร IA นั้น จะทำให้ค่า CMRR เพิ่มขึ้นตาม จากกราฟถ้าเราเพิ่มอัตราการขยายผลต่างจาก 20 เท่า เป็น 100 เท่า จะทำให้ค่า CMRR เพิ่มขึ้นของวงจร 10.30 % และในขณะที่อัตราการขยายเพิ่มขึ้นจะทำให้การตอบสนองความถี่ของวงจรลดลง เช่นที่อัตราการขยายผลต่าง 100 เท่า วงจรจะตอบสนองต่อความถี่ได้สูงสุด 20 kHz ถ้าเปรียบเทียบกับภาพประกอบ 4.4 ที่ใช้ออปแอมป์เบอร์ LM324 แล้วจะเห็นว่าการใช้ออปแอมป์เบอร์ TL084 ในภาพประกอบ 4.5 จะตอบสนองความถี่ได้สูงกว่า

4.2.1.2 ผลกระทบเนื่องจากความผิดพลาดความต้านทาน โดยใช้ แอมป์เบอร์

LM324 , TL084

วิธีการจำลองสัญญาณ โดยการใช้ค่าความต้านทานที่มีค่าความผิดพลาดงานวิจัยนี้ ได้ใช้ตัวต้านทานที่มีค่าความผิดพลาดดังนี้ 0.001, 0.01, 0.1, 1, 5 และ 10 % โดยป้อนอินพุท 1mV ความถี่ 100 Hz แล้ววัดและบันทึกสัญญาณเอาท์พุทที่เกิดขึ้นแต่ละครั้ง ผลการจำลองสัญญาณดัง แสดงในภาพประกอบ 4.6 – 4.7

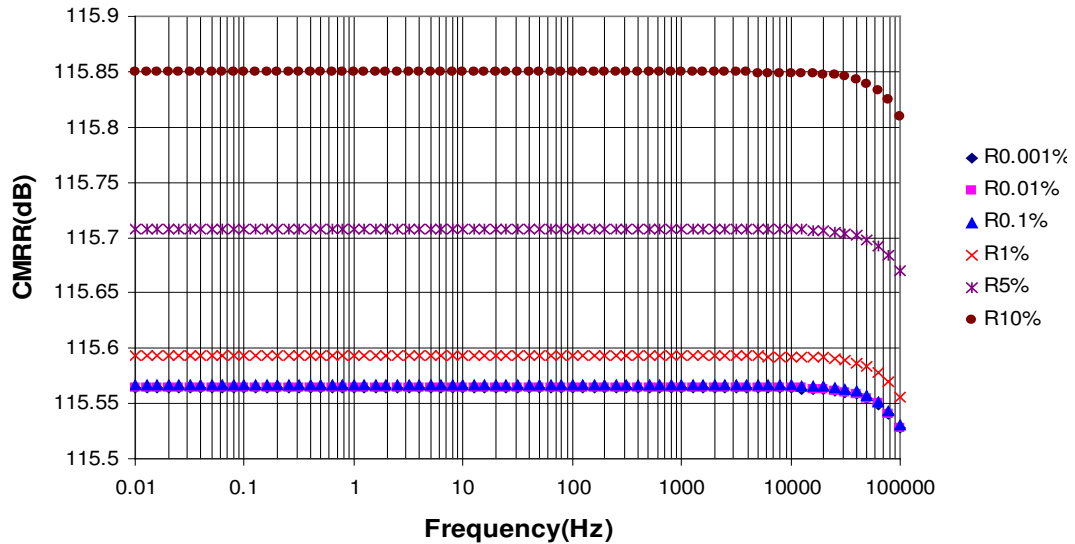
ก) ออปแอมป์เบอร์ LM324



ภาพประกอบ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CMRR กับ ความผิดพลาดของความต้านทาน ที่ความถี่ 0.01 Hz ถึง 100 kHz เมื่อใช้ออปแอมป์เบอร์ LM324

จากภาพประกอบ 4.6 พบว่าค่า CMRR ในภาคอินพุทของวงจร I.A นั้น ค่าความผิดพลาดของตัวต้านทานนั้นจะมีผลต่อค่า CMRR ของวงจรมากน้อยมาก ๆ จากกราฟในภาพประกอบ 4.6 ถ้าตัวต้านทานมีค่าผิดพลาดเปลี่ยนจาก 0.001 % เป็น 10 % จะทำให้ CMRR เปลี่ยนไป 0.25 % ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงที่ไม่มีนัยสำคัญ ดังนั้นตัวต้านทานที่ใช้ในวงจรจึงสามารถเลือกตัวต้านทานทั่วไปได้

ข) ออปแอมป์เบอร์ TL084



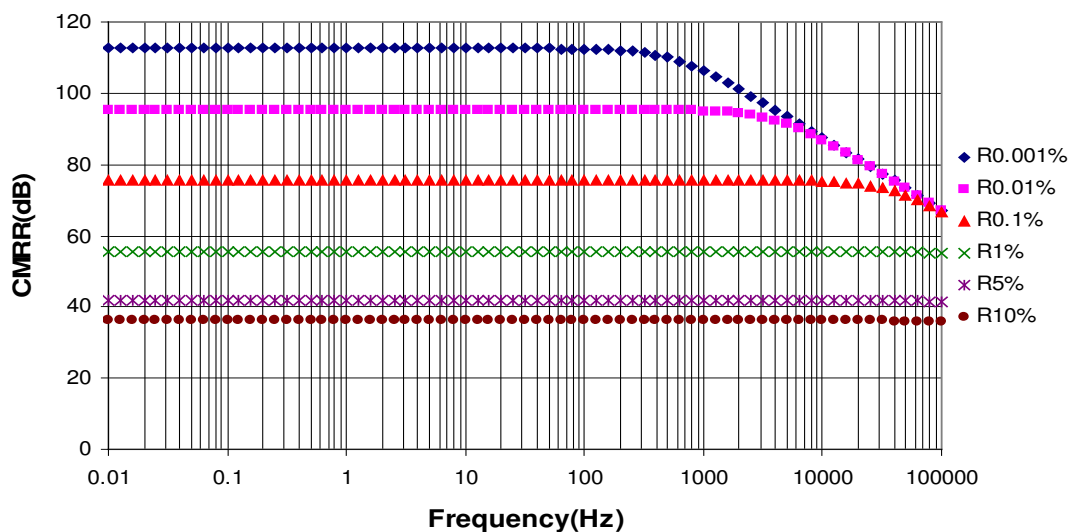
ภาพประกอบ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CMRR กับ ความผิดพลาดของความต้านทาน ที่ ความถี่ 0.01 Hz ถึง 100 kHz เมื่อใช้ออปแอมป์เบอร์ TL084

จากภาพประกอบ 4.7 พบว่าค่า CMRR ในภาคอินพุทของวงจร I.A. นั้น ค่าความผิดพลาดของตัวต้านทานนั้นจะมีผลต่อค่า CMRR ของวงจรมากน้อยมาก ๆ จากกราฟในภาพประกอบ 4.7 ถ้าตัวต้านทานมีค่าผิดพลาดเปลี่ยนจาก 0.001 % เป็น 10 % จะทำให้ CMRR เปลี่ยนไป 0.25 % ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงที่ไม่มียัยสำคัญ ดังนั้นตัวต้านทานที่ใช้ในวงจรจึงสามารถเลือกตัวต้านทาน ทั่วไปได้

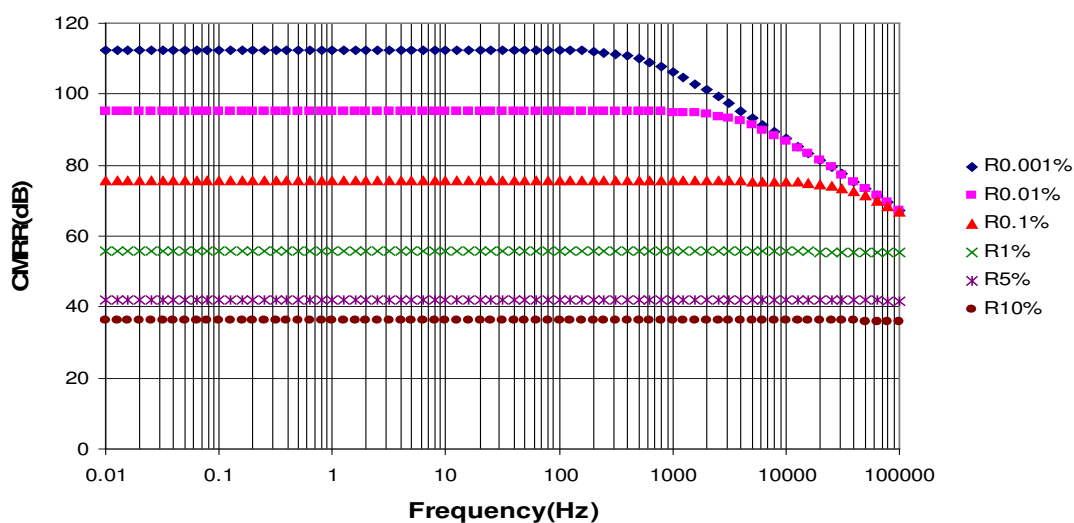
4.2.2 พิจารณาทั้งวงจร

กรณีนี้จะทดลองโดยใช้ออปแอมป์ เบอร์ LM324, TL084 เป็นภาคอินพุท และใช้ออปแอมป์เบอร์ OP27 เป็นภาคเอาต์พุท โดยแบ่งการทดลองสองกรณี คือ กรณีแรกจะทดลองว่าค่าความผิดพลาดของตัวต้านทาน จะมีผลกระทบต่อค่า CMRR ของวงจรหรือไม่ และกรณีสุดท้ายทดลองว่าอัตราขยายผลต่างจะมีผลกระทบต่อค่า CMRR ของวงจรหรือไม่

4.2.2.1 ผลกระทบเนื่องจากความผิดพลาดของตัวต้านทาน โดยให้ความต้านทานภาคอินพุทมีค่าผิดพลาด 1 และ 5 % ตามลำดับ และปรับค่าความต้านทานภาคเอาต์พุทให้มีค่าผิดพลาด 0.001, 0.01, 0.1, 1, 5 และ 10 % ตามลำดับ เมื่อป้อนสัญญาณอินพุทขนาด 1 mV ความถี่ 100 Hz ซึ่งผลการทดลองดังแสดงภาพประกอบ 4.8–4.9

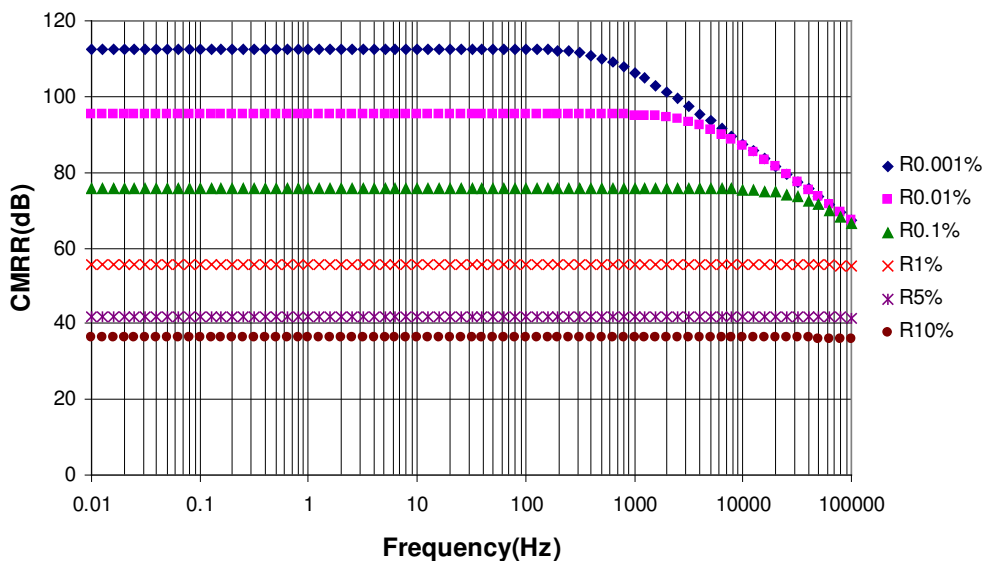


ภาพประกอบ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CMRR กับ ความต้านทานภาคอินพุตที่มีค่าผิดพลาด 1% ค่าความต้านทานภาคเอาต์พุตที่มีค่าผิดพลาด 0.001, 0.01, 0.1, 1, 5 และ 10 % ตามลำดับ ที่ความถี่ 0.01 Hz ถึง 100 kHz เมื่อ IC # LM324 เป็นอินพุต

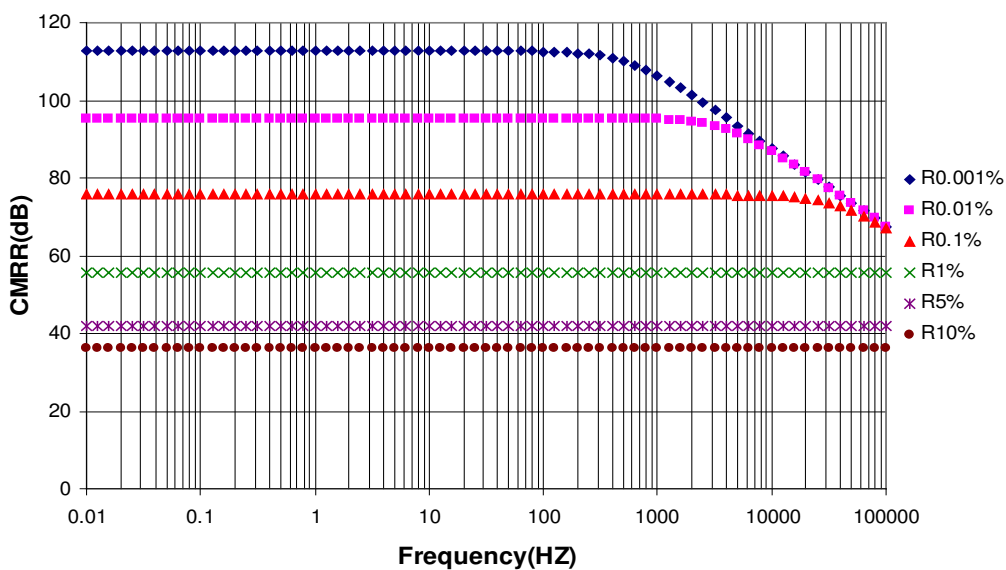


ภาพประกอบ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CMRR กับ ความต้านทานภาคอินพุตที่มีค่าผิดพลาด 1% ค่าความต้านทานภาคเอาต์พุตที่มีค่าผิดพลาด 0.001, 0.01, 0.1, 1, 5 และ 10 % ตามลำดับ ที่ความถี่ 0.01 Hz ถึง 100 kHz เมื่อ IC # TL084 เป็นอินพุต

จากภาพประกอบ 4.8 และ 4.9 เป็นสัญญาณเอาต์พุทของวงจร I.A. จะเห็นว่าความผิดพลาดของตัวต้านทาน มีผลต่อค่า CMRR ของวงจร ถ้าตัวต้านทานมีค่าผิดพลาดมากจะทำให้ค่า CMRR ของวงจรลดลงมาก เช่น ตัวต้านทานมีค่าผิดพลาดจาก 0.001 % (R0.001%) เป็น 10 % (R10%) จะทำให้ค่า CMRR ลดลงเหลือ 32.11 % และ 32.09 % ตามลำดับ ดังนั้นในวงจร I.A. จะ ตั้ อ ง เลือกตัวต้านทานที่มีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุดเพื่อให้ค่า CMRR มีค่าสูง



ภาพประกอบ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CMRR กับ ความต้านทานภาคอินพุทที่มีค่าผิดพลาด 5 % ค่าความต้านทานภาคเอาต์พุทที่มีค่าผิดพลาด 0.001,0.01,0.1,1,5 และ 10 % ตามลำดับ ที่ความถี่ 0.01 Hz ถึง 100 kHz เมื่อ IC # LM324 เป็นอินพุท

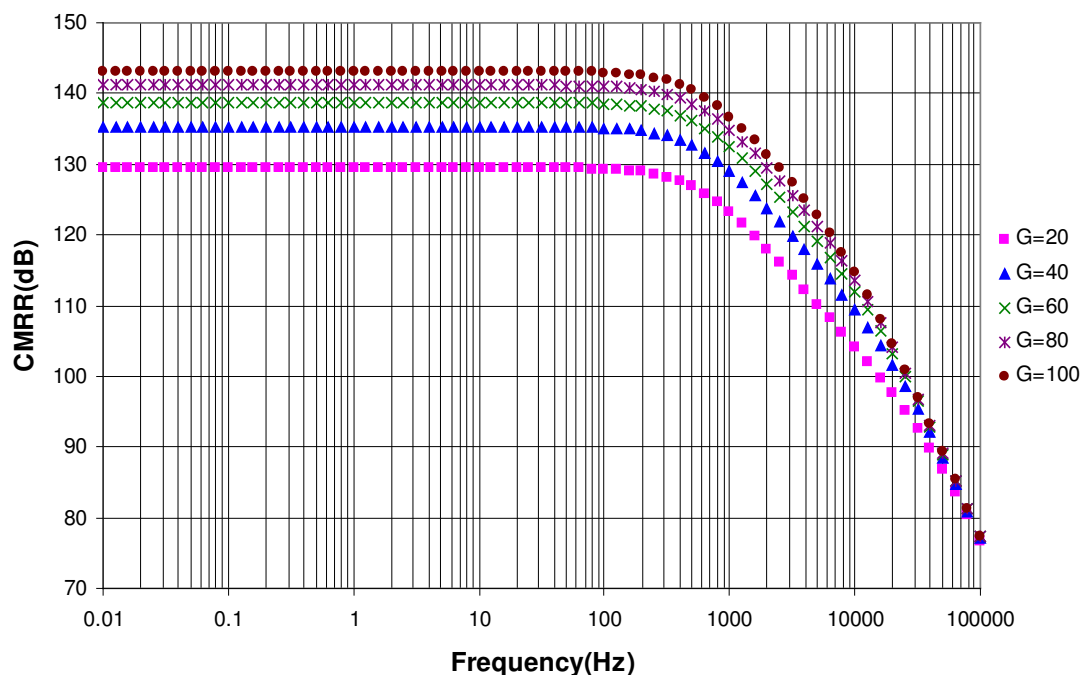


ภาพประกอบ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CMRR กับ ความต้านทานภาคอินพุทที่มีค่า

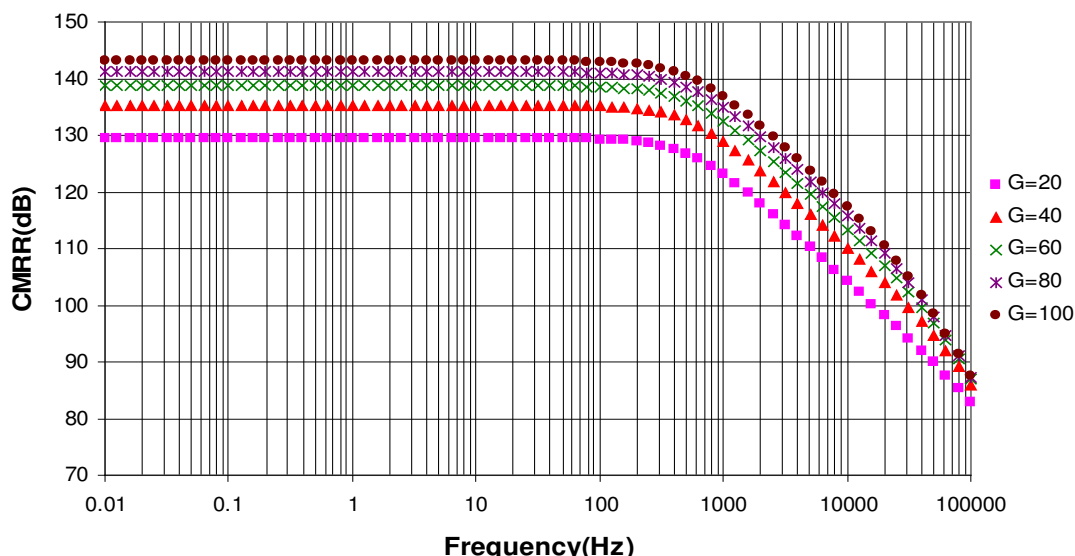
ผิดพลาด 5 % ค่าความต้านทานภาคเอาต์พุตมีค่าผิดพลาด 0.001, 0.01, 0.1, 1, 5 และ 10 % ตามลำดับ ที่ความถี่ 0.01 Hz ถึง 100 kHz เมื่อ IC # TL084 เป็นอินพุต

จากภาพประกอบ 4.10 และ 4.11 เป็นสัญญาณเอาต์พุตของวงจร I.A. พบว่าจะมีค่าใกล้เคียงกับภาพประกอบ 4.8 และ 4.9 มาก ซึ่งภาคอินพุตของทั้งสองวงจร จะใช้ค่าความผิดพลาด 1 และ 5 % ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าภาคอินพุตของวงจรไม่ขึ้นอยู่กับค่าความผิดพลาดของตัวต้านทาน ซึ่งเป็นไปตามหลักการในหัวข้อ 4.2.1.2 ดังนั้นวงจร I.A. ค่า CMRR จะขึ้นอยู่กับความผิดพลาดของภาคเอาต์พุตเท่านั้น เช่น ตัวต้านทานมีค่าผิดพลาดจาก 0.001 % (R0.001%) เป็น 10 % (R10%) จะทำให้ค่า CMRR ลดลงเหลือ 32.11 % และ 32.18 % ตามลำดับ

4.2.2.2 ผลกระทบเนื่องจากการปรับอัตราขยายผลต่าง โดยปรับให้มีค่า 20, 40, 60, 80 และ 100 เท่า ตามลำดับ เมื่อป้อนแรงดันอินพุตขนาด 1 mV ความถี่ 100 Hz วัดและบันทึกสัญญาณเอาต์พุต ซึ่งผลการทดลองดังแสดงภาพประกอบ 4.12 - 4.13



ภาพประกอบ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CMRR กับ อัตราการขยายผลต่าง ที่ความถี่ 0.01 Hz ถึง 100 kHz เมื่อใช้ออปแอมป์เบอร์ LM324 เป็นอินพุต



ภาพประกอบ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CMRR กับ อัตราการขยายผลต่าง ที่ความถี่ 0.01 Hz ถึง 100 kHz เมื่อใช้ออปแอมป์เบอร์ TL084 เป็นอินพุท

จากภาพประกอบ 4.12 และ 4.13 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มค่าอัตราการขยายผลต่าง จะทำให้ค่า CMRR ของวงจรเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นวงจร I.A. ถ้าต้องการให้ค่า CMRR เพิ่มขึ้น เราสามารถทำได้โดยเพิ่มค่ามีค่าอัตราการขยายผลต่าง ซึ่งเป็นไปตามหลักการในหัวข้อ 4.2.1.1 เช่น ถ้าเราเพิ่มอัตราการขยายผลต่างจาก 20 เท่า (CMRR=129.43 dB) เป็น 100 เท่า ค่า CMRR ของวงจรจะเพิ่มขึ้น 10.53 % (CMRR=143.07 dB)

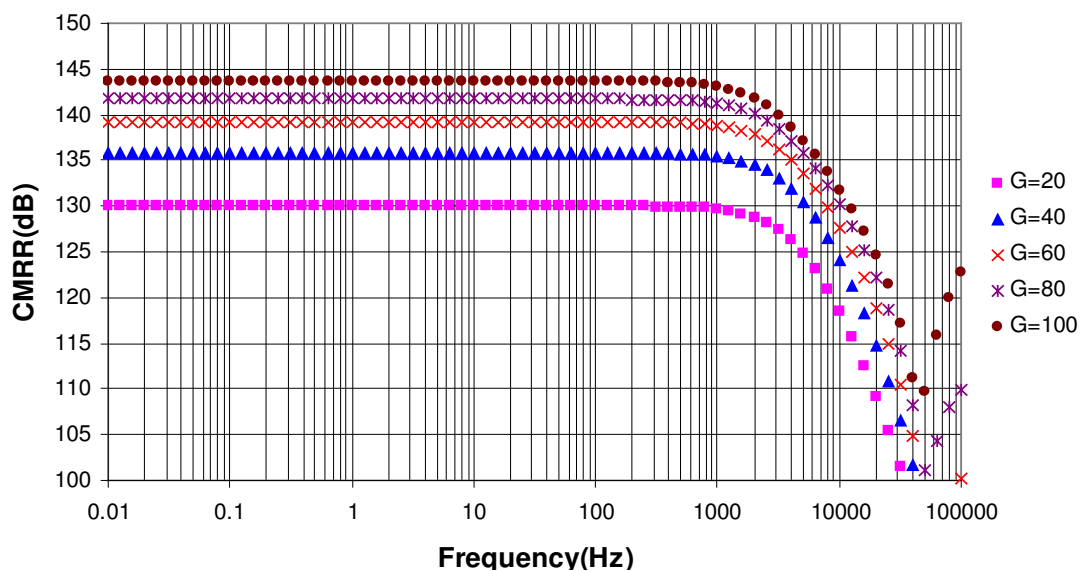
4.3 วงจรเพิ่มอัตราการขจัดสัญญาณโหมคร่วม (CMRR enhancement Circuit)

การทดลองของวงจร วงจรเพิ่มอัตราการขจัดสัญญาณโหมคร่วม จะทำการทดลอง 2 กรณี คือ กรณีแรกจะพิจารณาเฉพาะภาคอินพุทของวงจร และกรณีสุดท้ายจะพิจารณาทั้งวงจร โดยวิธีการปรับอัตราการขยายผลต่าง และปรับความผิดพลาดของตัวต้านทาน เพื่อศึกษาผล กระทบที่มีต่อค่าอัตราการขจัดสัญญาณโหมคร่วม (CMRR)

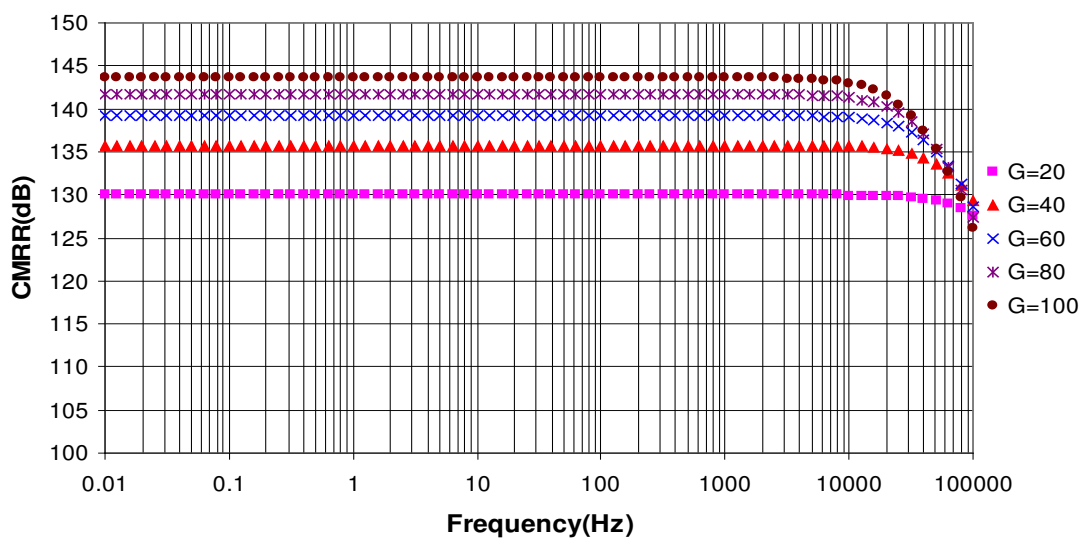
4.3.1 พิจารณาภาคอินพุทอย่างเดียว

กรณีนี้จะทดลองโดยใช้ออปแอมป์ เบอร์ LM324, TL084 โดยการปรับค่าอัตราการขยายผลต่างเป็น 2, 3, 20, 40, 60, 80 และ 100 เท่า ตามลำดับ และเปลี่ยนค่าความต้านทานที่ค่าความผิดพลาดขนาดต่าง ๆ คือ 0.001, 0.01, 0.1, 1, 5 และ 10% โดยป้อนแรงดันสัญญาณอินพุท 1 mV ความถี่ 100 Hz ว่ามีผลกระทบต่ออัตราการขจัดสัญญาณโหมคร่วม (CMRR) อย่างไร

4.3.1.1 ผลกระทบเนื่องจากการปรับค่าอัตราขยายผลต่างเป็น 2, 20, 40, 60, 80 และ 100 เท่า โดยใช้โอปแอมป์เบอร์ LM324 ตามลำดับ ผลการจำลองสัญญาณจะได้ สัญญาณแรงดัน เอาท์พุทดังภาพประกอบ 4.14 – 4.15



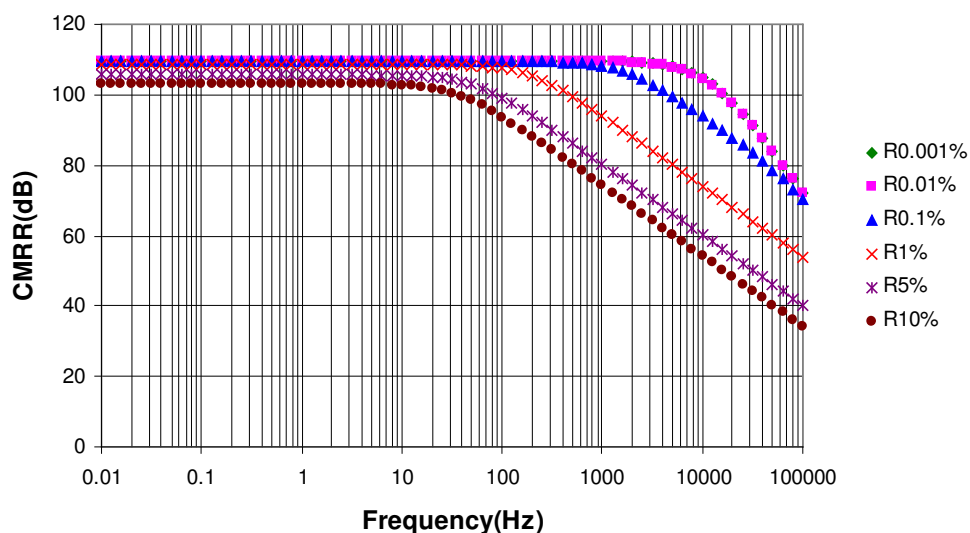
ภาพประกอบ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CMRR กับ อัตราการขยายผลต่าง ที่ความถี่ 0.01 Hz ถึง 100 kHz โดยใช้โอปแอมป์เบอร์ LM324



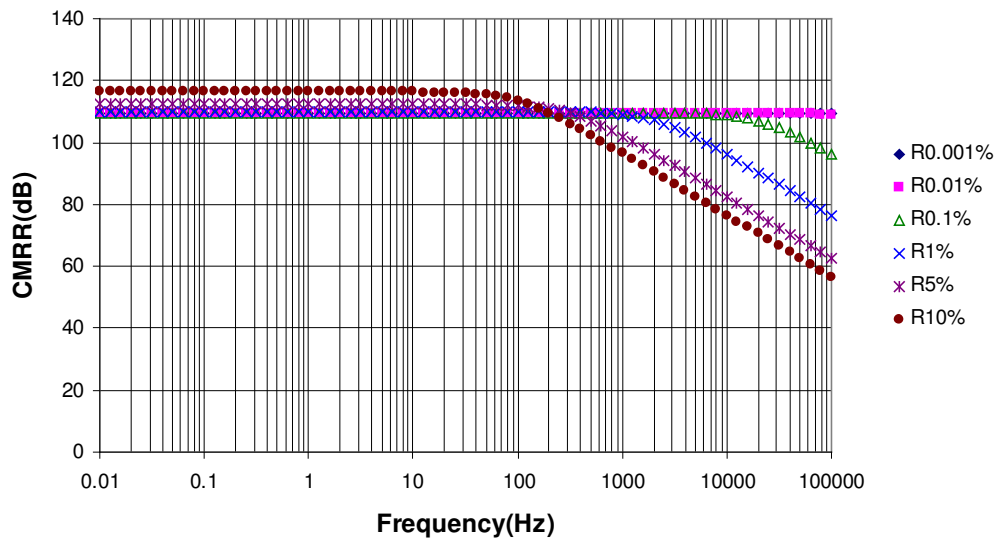
ภาพประกอบ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CMRR กับ อัตราการขยายผลต่าง ที่ความถี่ 0.01 Hz ถึง 100 kHz โดยใช้โอปแอมป์เบอร์ TL084

จากภาพประกอบ 4.14 และ 4.15 พบว่าภาคอินพุทของวงจรเพิ่มอัตราการจัดสัญญาณ โหมดคร่อม (CMRR enhancement Circuit) ค่า CMRR จะมีค่ามากขึ้น เมื่อเพิ่มค่าอัตราขยายผลต่าง เช่น จากภาพประกอบ 4.14 และ 4.15 อัตราขยายผลต่าง เพิ่มขึ้นจาก 20 เท่า (CMRR=129.96 dB) เป็น 100 เท่า (CMRR=143.63 dB) CMRR จะเพิ่มขึ้น 10.52 % และการตอบสนองความถี่ของวงจรได้สูงที่ 3 kHz และ 20 kHz ตามลำดับ ที่อัตราขยายผลต่าง 100 เท่า

4.3.1.2 ผลกระทบเนื่องจากความผิดพลาดของตัวต้านทาน โดยปรับค่าผิดพลาด เป็น 0.001, 0.01, 0.1, 1, 5 และ 10% ตามลำดับ เมื่อใช้ออปแอมป์เบอร์ LM324, TL084 ตามลำดับ ผลการจำลองสัญญาณจะได้สัญญาณแรงดันเอาต์พุตดังภาพประกอบ 4.16 -417



ภาพประกอบ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CMRR กับ ค่าผิดพลาดของตัวต้านทานเป็น 0.001, 0.01, 0.1, 1, 5 และ 10 % ตามลำดับ ที่ความถี่ 0.01 Hz ถึง 100 kHz โดยใช้ ออปแอมป์เบอร์ LM324



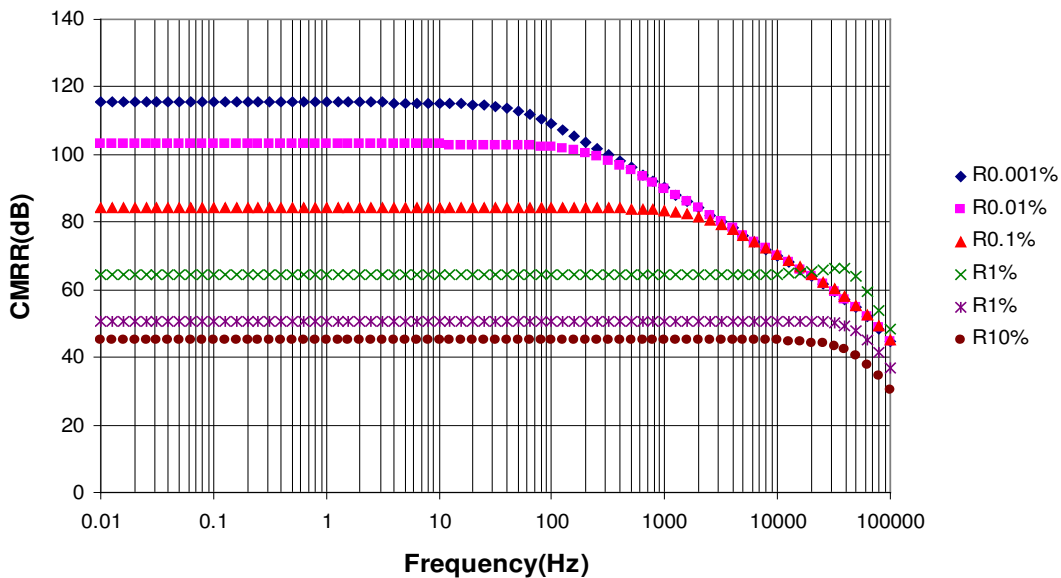
ภาพประกอบ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CMRR กับ ค่าผิดพลาดของตัวต้านทานเป็น 0.001, 0.01, 0.1, 1, 5 และ 10 % ตามลำดับ ที่ความถี่ 0.01 Hz ถึง 100 kHz โดยใช้ ออปแอมป์เบอร์ TL084

จากภาพประกอบ 4.16 และ 4.17 พบว่าความผิดพลาดของตัวต้านทานทำให้ค่า CMRR เปลี่ยนแปลงโดยไม่มีนัยสำคัญ แต่จะมีผลต่อการตอบสนองความถี่ ซึ่งจากภาพประกอบ 4.16 - 4.17 ความผิดพลาดยิ่งมาก การตอบสนองความถี่ยิ่งลดลง เช่น ที่ความต้านทานผิดพลาด 10 % (R10%) จะตอบสนองความถี่ที่ 40 Hz และ 200 Hz ตามลำดับ ดังนั้นการเลือกใช้ตัวต้านทาน จะ ตั้ อ ง เลือกตัวต้านทานที่มีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด เพื่อให้ค่า CMRR มีค่าสูง และตอบสนองความถี่ได้สูง

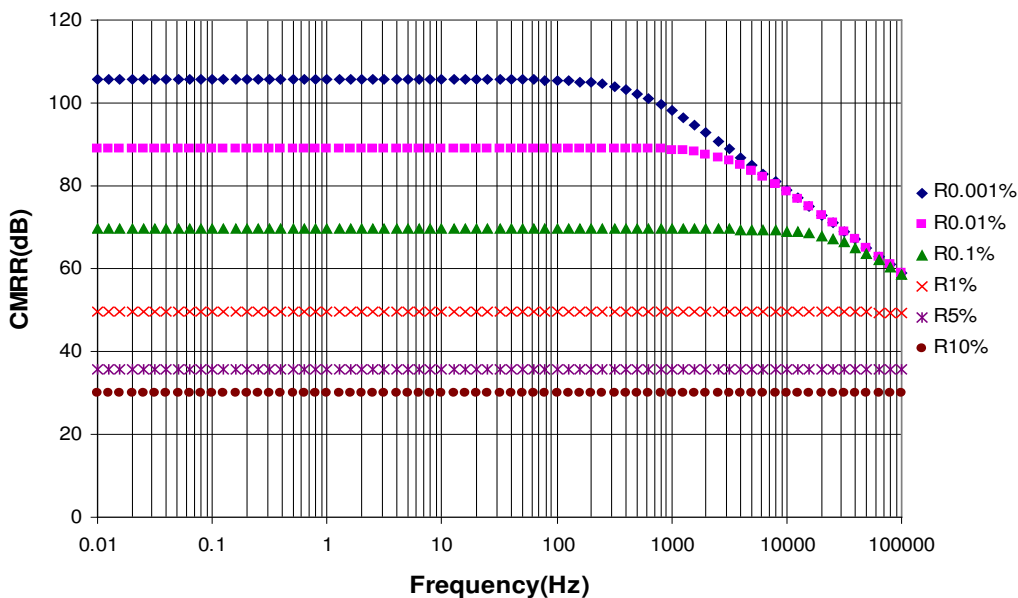
4.3.2 พิจารณาทั้งวงจร

กรณีนี้จะทดลองใช้ออปแอมป์ เบอร์ LM324, TL084 เป็นภาคอินพุท และใช้ออปแอมป์เบอร์ OP27 เป็นภาคเอาต์พุท โดยแบ่งการทดลอง 2 เงื่อนไข โดยเงื่อนไขแรกจะทดลองว่า ค่าความผิดพลาดของตัวต้านทาน จะมีผลกระทบต่อค่า CMRR ของวงจรอย่างไร และเงื่อนไขสุดท้าย ทดลองว่าอัตราขยายผลต่างจะมีผลกระทบต่อค่า CMRR ของวงจรอย่างไร

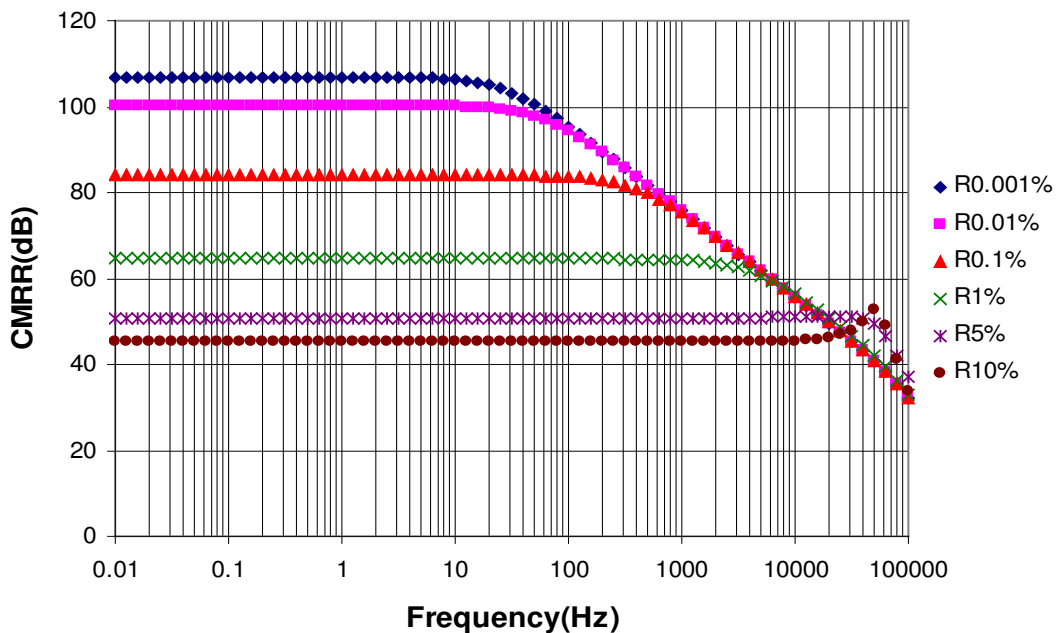
4.3.2.1 ใช้ออปแอมป์ เบอร์ LM324, TL084 เป็นภาคอินพุทตามลำดับ และใช้ออปแอมป์เบอร์ OP27 เป็นภาคเอาต์พุท โดยกำหนดให้ความต้านทานภาคอินพุทมีค่าผิดพลาด 1 และ 5 % ตามลำดับ แล้วเปลี่ยนความต้านทานภาคเอาต์พุทให้มีค่าความผิดพลาด 0.001, 0.01, 0.1, 1, 5 และ 10 % ตามลำดับ เมื่อป้อนสัญญาณแรงดันอินพุท 1 mV ความถี่ 100 Hz ซึ่งผลการจำลองสัญญาณดังแสดงภาพประกอบ 4.18 – 4.21



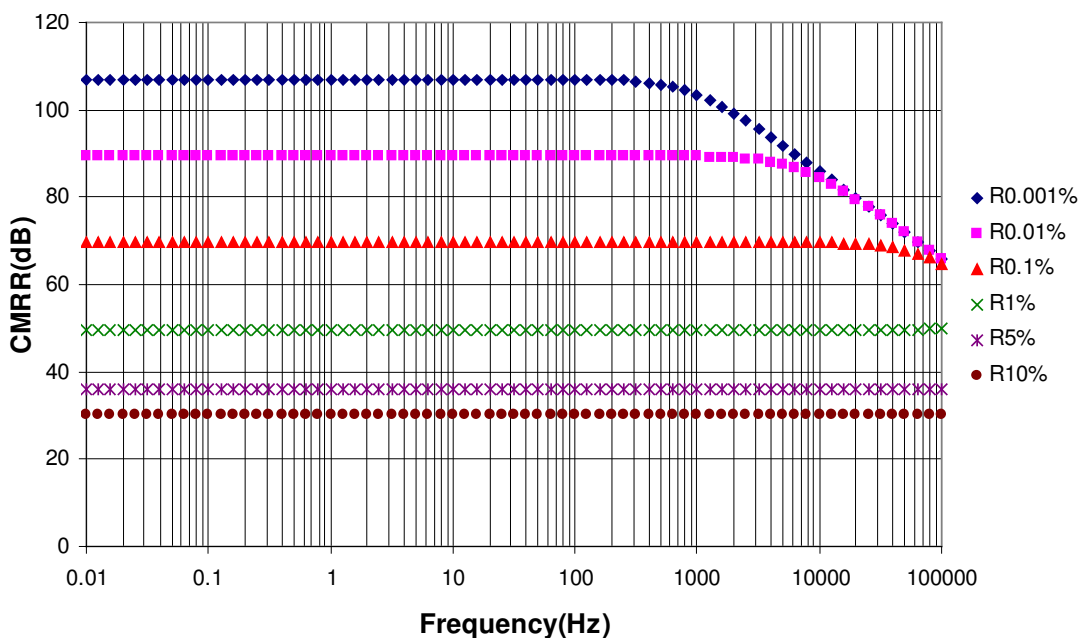
ภาพประกอบ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CMRR กับความต้านทานภาคอินพุตที่มีค่าผิดพลาด 1% ค่าความต้านทานภาคเอาต์พุตที่มีค่าผิดพลาด 0.001, 0.01, 0.1, 1, 5 และ 10 % ตามลำดับ ที่ความถี่ 0.01 Hz ถึง 100 kHz ใช้โอปแอมป์ # LM324



ภาพประกอบ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CMRR กับ ความต้านทานภาคอินพุตที่มีค่าผิดพลาด 1% ค่าความต้านทานภาคเอาต์พุตที่มีค่าผิดพลาด 0.001, 0.01, 0.1, 1, 5 และ 10 % ตามลำดับ ที่ความถี่ 0.01 Hz ถึง 100 kHz ใช้โอปแอมป์ # TL084



ภาพประกอบ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CMRR กับ ความต้านทานภาคอินพุตที่มีค่าผิดพลาด 5% ค่าความต้านทานภาคเอาต์พุตที่มีค่าผิดพลาด 0.001, 0.01, 0.1, 1, 5 และ 10 % ตามลำดับ ที่ความถี่ 0.01 Hz ถึง 100 kHz ใช้โอปแอมป์ # LM324

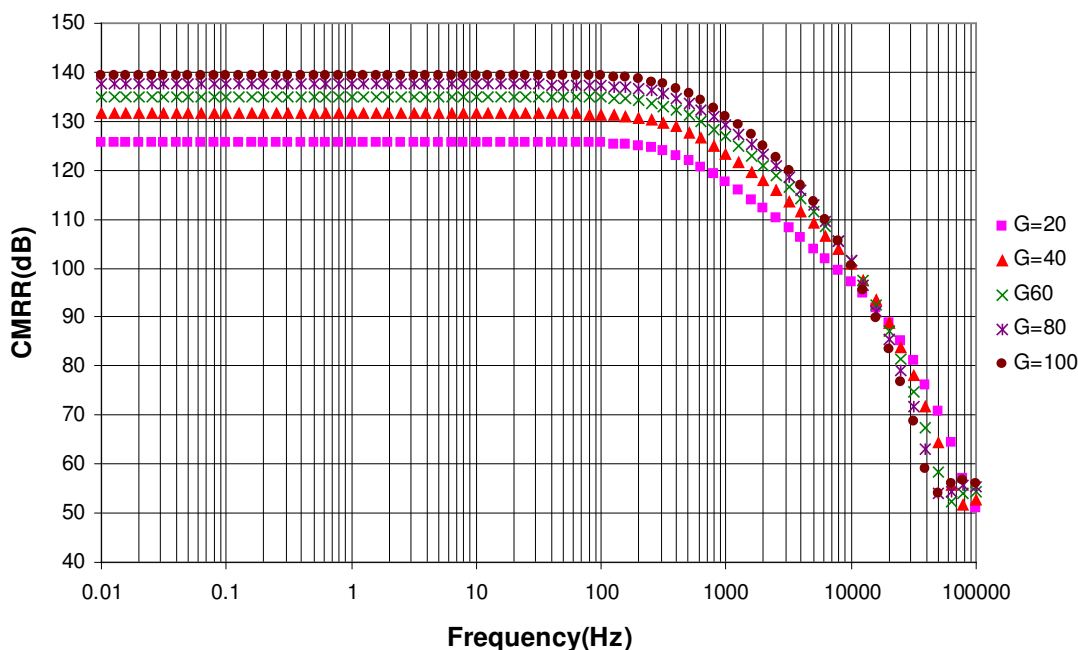


ภาพประกอบ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CMRR กับ ความต้านทานภาคอินพุตที่มีค่าผิดพลาด 5 % ค่าความต้านทานภาคเอาต์พุตที่มีค่าผิดพลาด 0.001, 0.01, 0.1, 1, 5

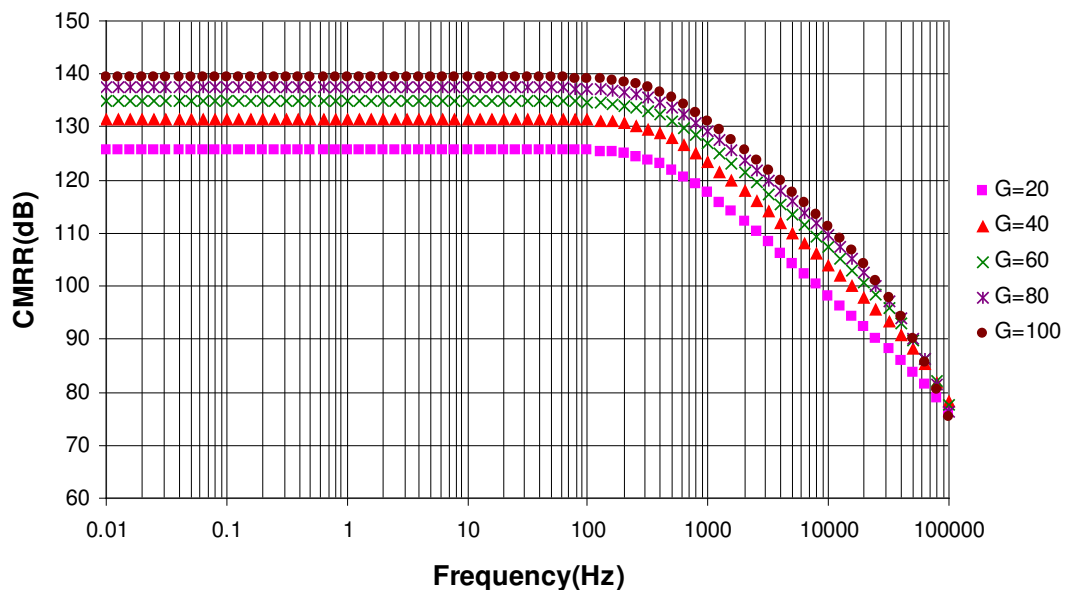
และ 10 % ตามลำดับ ที่ความถี่ 0.01 Hz ถึง 100 kHz ใช้โอปแอมป์ # TL084

จากภาพประกอบ 4.18 – 4.21 เป็นสัญญาณเอาต์พุตของวงจรเพิ่มอัตราการจัดสัญญาณ โหมดคร่อม (CMRR enhancement Circuit) จะเห็นว่าความผิดพลาดของตัวต้านทาน มีผลต่อค่า CMRR ของวงจร ถ้าตัวต้านทานมีค่าผิดพลาดมากจะทำให้ค่า CMRR ของวงจรถดลงมาก เช่น ที่ตัวต้านทานผิดพลาด 10 %(R10%) จะทำให้ค่า CMRR ลดลงเหลือ 45.06 dB และ 45.20 dB ตามลำดับ ดังนั้นในวงจรเพิ่มอัตราการจัดสัญญาณ โหมดคร่อม (CMRR enhancement Circuit) **จึง** **ต้** **อ** **ง** เลือกตัวต้านทานที่มีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด เพื่อให้ค่า CMRR มีค่าสูง

4.3.2.2 ใช้โอปแอมป์ เบอร์ LM324, TL084 เป็นภาคอินพุต และใช้โอปแอมป์ เบอร์ OP27 เป็นภาคเอาต์พุต โดยปรับค่าอัตราขยายผลต่างของวงจรเป็น 20, 40, 60, 80 และ 100 เท่า ตามลำดับ เมื่อป้อนสัญญาณแรงดันอินพุต 1 mV ความถี่ 100 Hz ซึ่งผลการจำลองสัญญาณดังแสดงภาพประกอบ 4.22 – 4.23



ภาพประกอบ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CMRR กับ อัตราการขยายผลต่าง (G_D) ที่ความถี่ 0.01 Hz ถึง 100 kHz โดยใช้โอปแอมป์ เบอร์ LM324 เป็นภาคอินพุต และใช้โอปแอมป์เบอร์ OP27 เป็นภาคเอาต์พุต



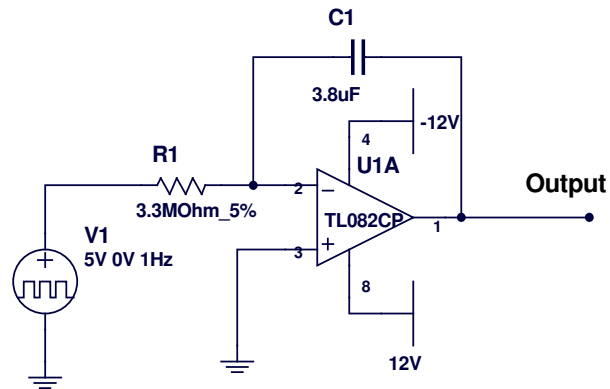
ภาพประกอบ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CMRR กับ อัตราการขยายผลต่าง (G_D) ที่ความถี่ 0.01 Hz ถึง 100 kHz โดยใช้อปแอมป์ เบอร์ TL084 เป็นภาคอินพุท และใช้ออปแอมป์เบอร์ OP27 เป็นภาคเอาต์พุท

จากภาพประกอบ 4.22 และ 4.23 พบว่าค่า CMRR ของวงจรจะขึ้นอยู่กับค่าอัตราการขยายผลต่าง นั่นคือ ถ้าเพิ่มค่าอัตราการขยายผลต่าง ค่า CMRR ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นถ้าเราต้องการค่า CMRR ของวงจรสูง เราสามารถทำได้โดยการเพิ่มอัตราการขยายผลต่างของวงจรให้ มีค่ามากขึ้น

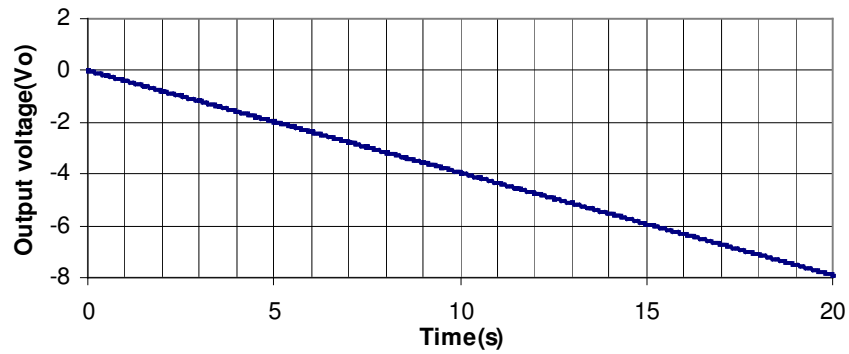
4.4 การกำจัดแรงดันไฟตรง (DC Suppression)

4.4.1 การกำจัดแรงดันไฟตรงด้วยวงจรอินทิเกรต (Integrator)

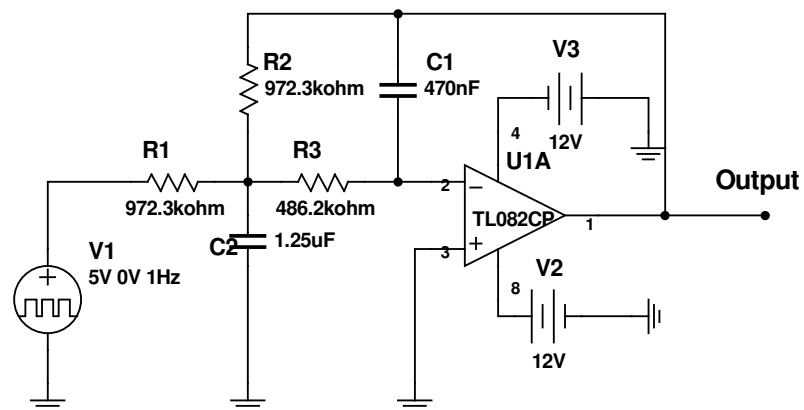
ในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาเรื่องสัญญาณแรงดันไฟตรงที่เกิดขึ้นในวงจรขยายสัญญาณไบโโพอเทนเชียล ประกอบด้วยสัญญาณแรงดันออฟเซตที่เกิดขึ้นเนื่องจากออปแอมป์ และแรงดันไฟตรงครึ่งเซลล์ (Half – Cell Potential) ที่เกิดจากจุดที่วัดระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวหนังของคนไข้ ซึ่งแรงดันไฟตรงที่เกิดขึ้นนี้จะถูกขยายให้มีค่ามากขึ้นที่เอาต์พุท ถ้าแรงดันไฟตรงมีค่ามากจะทำให้วงจรขยายไบโพอเทนเชียลอิมตัว ดังนั้นการกำจัดแรงดันไฟตรงที่เกิดขึ้นเป็นเรื่องสำคัญ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทดลองใช้วงจรอินทิเกรต และวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (low pass filter) แบบต่าง ๆ เช่น แบบ Butterworth, Chebyshev, Inverse Chebyshev, และ Bessel – Thomson



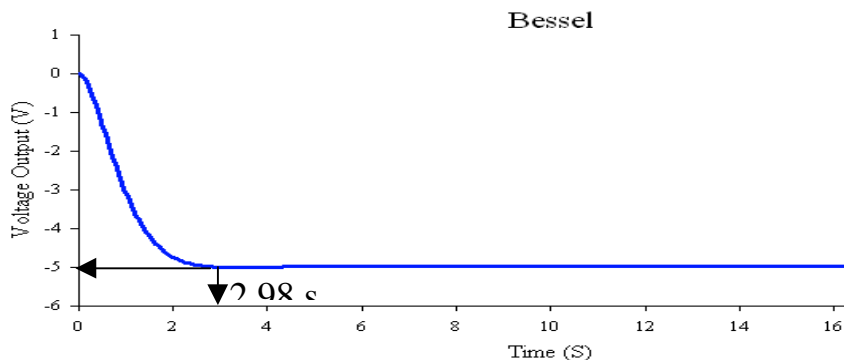
ภาพประกอบ 4.24 วงจรอินทิเกรต



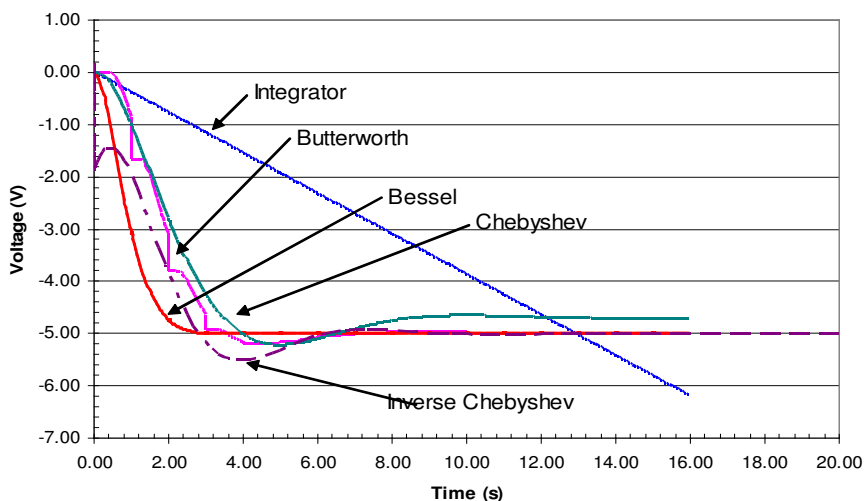
ภาพประกอบ 4.25 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรอินทิเกรต



ภาพประกอบ 4.26 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน แบบ Bessel – Thomson



ภาพประกอบ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับเวลาการตอบสนองของวงจร

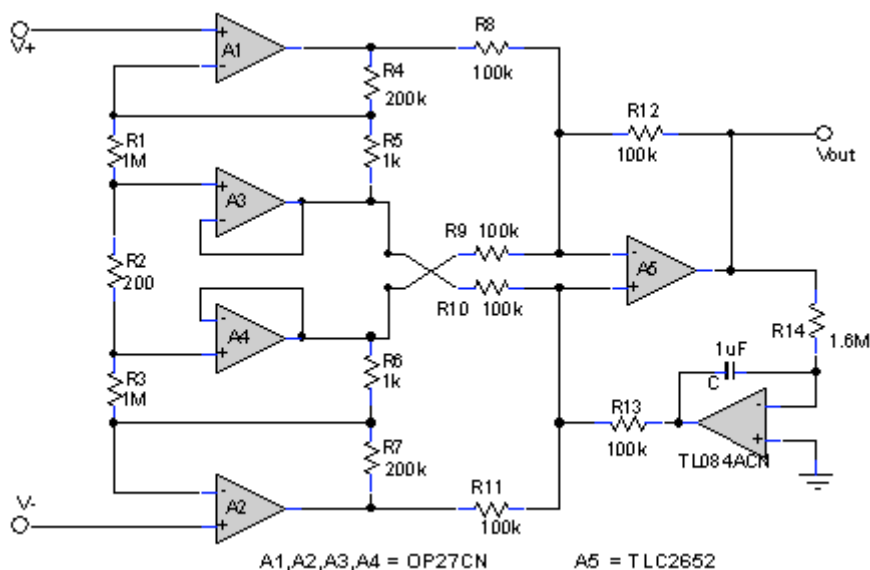


ภาพประกอบ 4.28 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการตอบสนองสัญญาณเอาต์พุตกับเวลาของวงจร Integrator และวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแต่ละแบบ

ตารางที่ 4.1 แสดงเวลาการตอบสนองของวงจรแต่ละแบบที่ได้จากการทดลอง

	Integrator Circuit	Low pass Filters Circuit			
		Butterworth	Chebyshev	Inverse Cheb.	Bessel
Time(sec.)	12.92	3.18	3.96	2.98	2.80

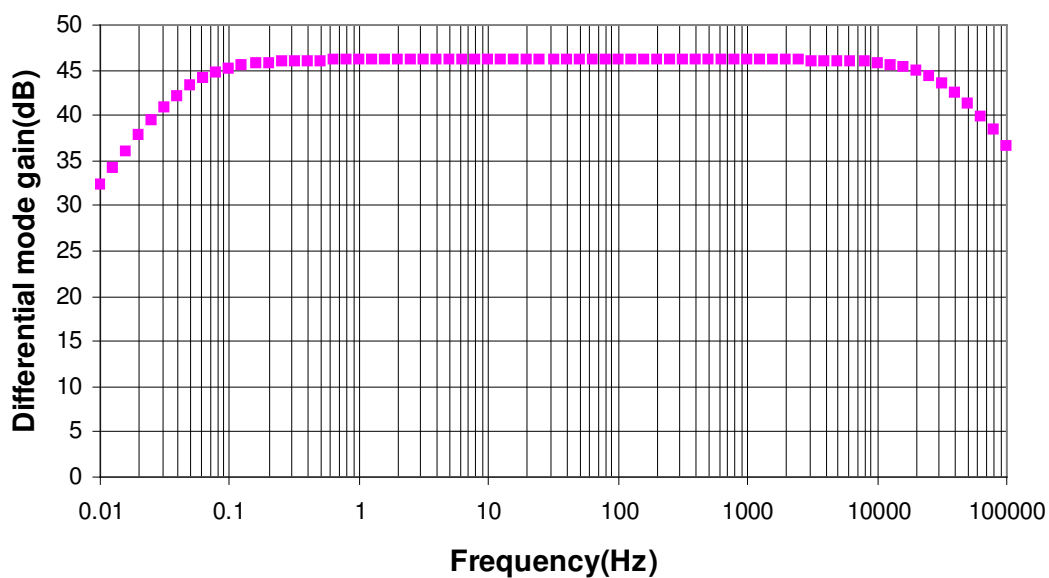
จากการออกแบบและทดสอบวงจรกรองความถี่ต่ำ งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแต่ละแบบ มาประกอบเข้ากับวงจรเพิ่มอัตราการจัดสัญญาณ โหมดร่วม (CMRR enhancement circuit) ดังภาพประกอบ 4.29 เพื่อลดหรือกำจัดแรงดันไฟตรงที่เกิดขึ้น ในการวัดสัญญาณไบโโพอเทนเชียล



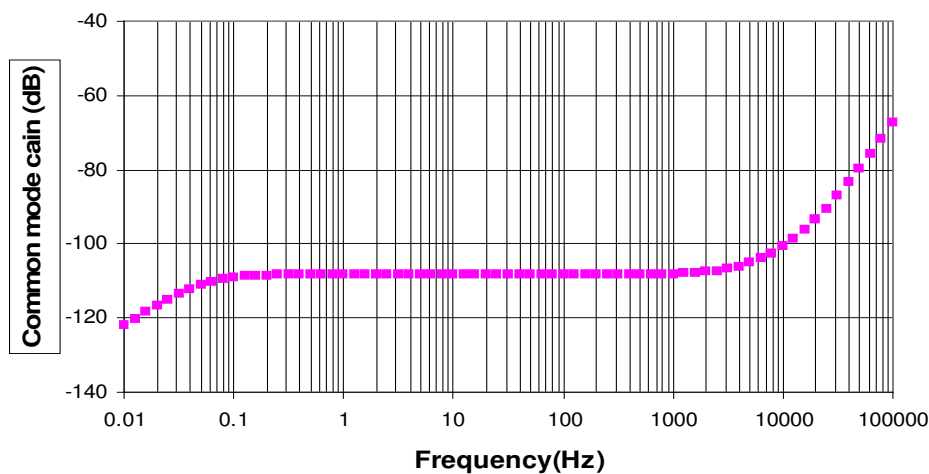
ภาพประกอบ 4.29 การต่อวงจรอินทิเกรตเพื่อกำจัดแรงดันไฟตรง

4.4.1.1 ผลการจำลองสัญญาณ

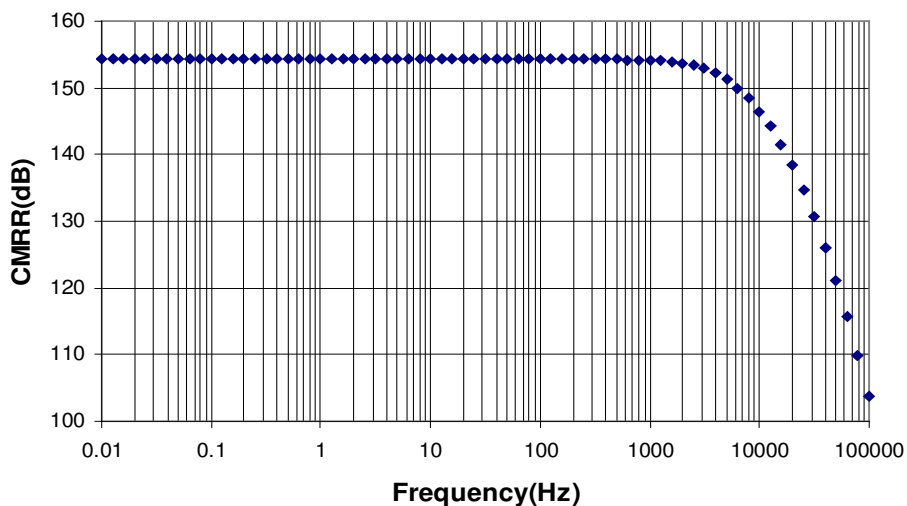
การจำลองสัญญาณใช้ ออปแอมป์เบอร์ OP27AZ สำหรับ A1, A2, A5 และ TLC2652CP สำหรับ A3, A4, A6 โดยใช้ตัวต้านทานที่มีค่าความผิดพลาด 5% ($R1 = 1\text{ M}\Omega$, $R_g = 200\ \Omega$, $R2 = 200\text{ k}\Omega$, $R3 = 1\text{ k}\Omega$, $R4 = 100\text{ k}\Omega$ and $R5 = 1.6\text{ M}\Omega$). และคาปาซิเตอร์ขนาด $1\ \mu\text{F}$ ผลการจำลองสัญญาณดังภาพประกอบ 4.30 – 4.32



ภาพประกอบ 4.30 อัตราการขยายผลต่าง



ภาพประกอบ 4.31 อัตราการขยายโหมคร่วม



ภาพประกอบ 4.32 อัตราการขจัดสัญญาณโหมคร่วม(CMRR)

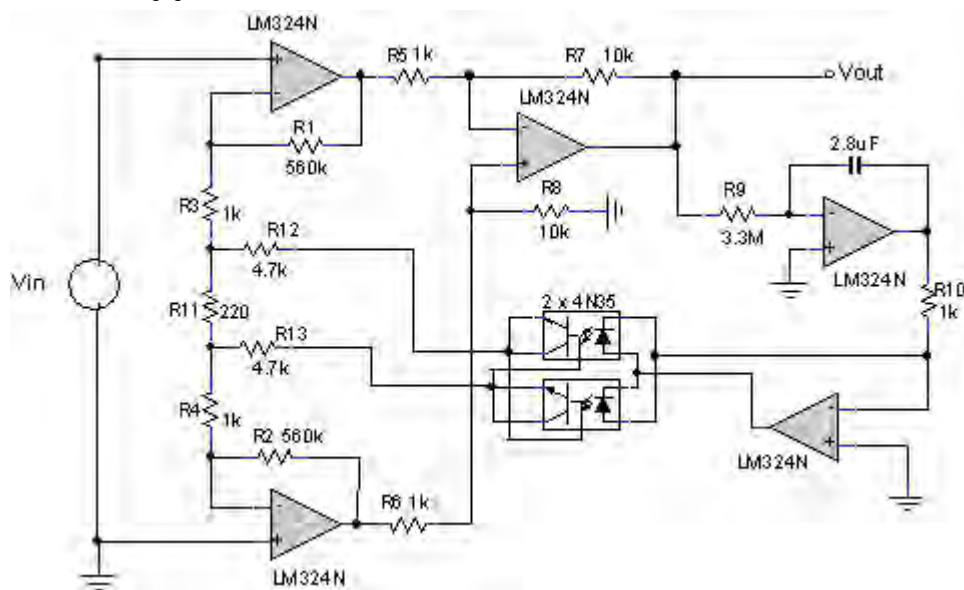
4.4.1.2 สรุปผลการทดลอง

วงจรขยายสัญญาณไบโโพลาร์เซี่ยลนี้ใช้โอปแอมป์จำนวน 5 ตัว และวงจรอินทิเกรต ซึ่งการเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีค่า CMRR สูง และค่าดีซีออฟเซตต่ำ ๆ ซึ่งผลการจำลองสัญญาณวงจรมีอัตราการขจัดสัญญาณโหมคร่วม(CMRR) 154.32 dB และสามารถกำจัดแรงดันไฟตรงได้ ± 66 mV โดยตอบสนองความถี่ได้กว้างถึง 34 kHz และการตอบสนองเฟสได้ดี

ส่วนการใช้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านประกอบกับวงจรเพิ่มอัตราการขจัดสัญญาณโหมคร่วมนั้น ผลจากการจำลองสัญญาณปรากฏว่าวงจรไม่สามารถใช้งานได้ เนื่องจากวงจรเกิดการอิมิตัว จากสัญญาณป้อนกลับเพื่อกำจัดแรงดันไฟตรงของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

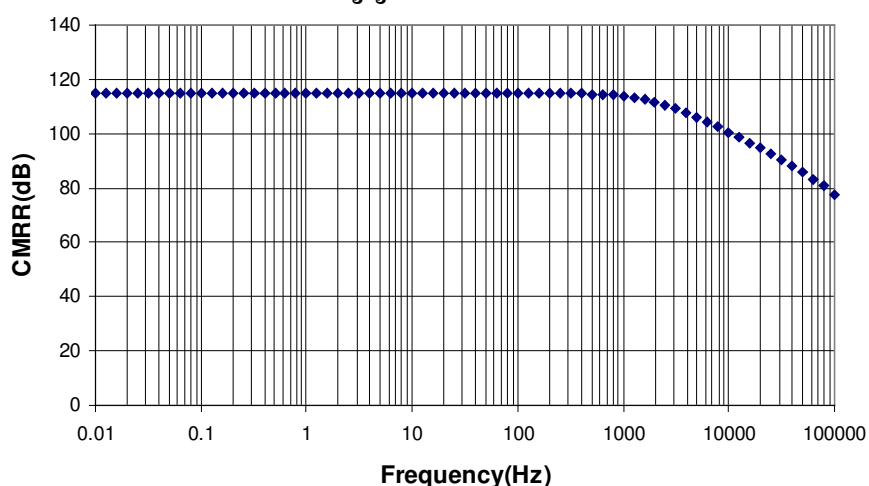
4.4.2 การกำจัดแรงดันไฟตรงด้วยออปโตคอปเปอร์ (Optocoupler DC Suppression)

สำหรับวงจรนี้ ผู้วิจัยได้ทำการจำลองสัญญาณ (Simulations) ของภาพประกอบ 4.33 เพื่อหาอัตราการจัดสัญญาณโหมคร่วม (CMRR) อัตราการขยาย (gain) โดยใช้ไอซีเบอร์ TL084CN, และ LM324N ตามลำดับ และป้อนสัญญาณแรงดันอินพุทขนาด 1 mV ความถี่ 100 Hz ซึ่งผลการจำลองสัญญาณ ดังภาพประกอบ 4.34 – 4.39

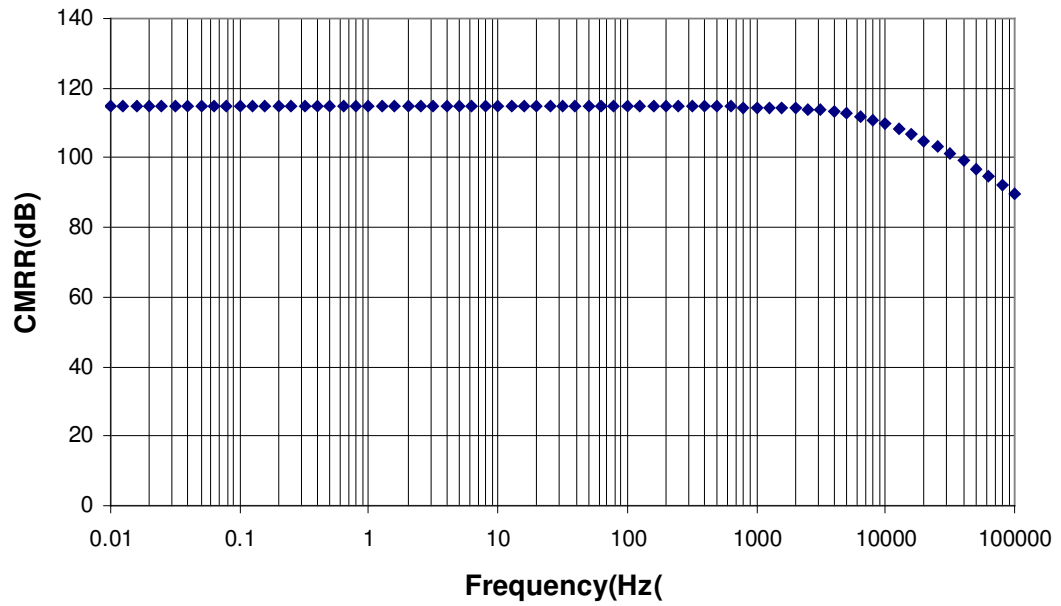


ภาพประกอบ 4.33 วงจรกำจัดแรงดันไฟตรงด้วยออปโตคอปเปอร์ (Optocoupler DC Suppression Circuit)

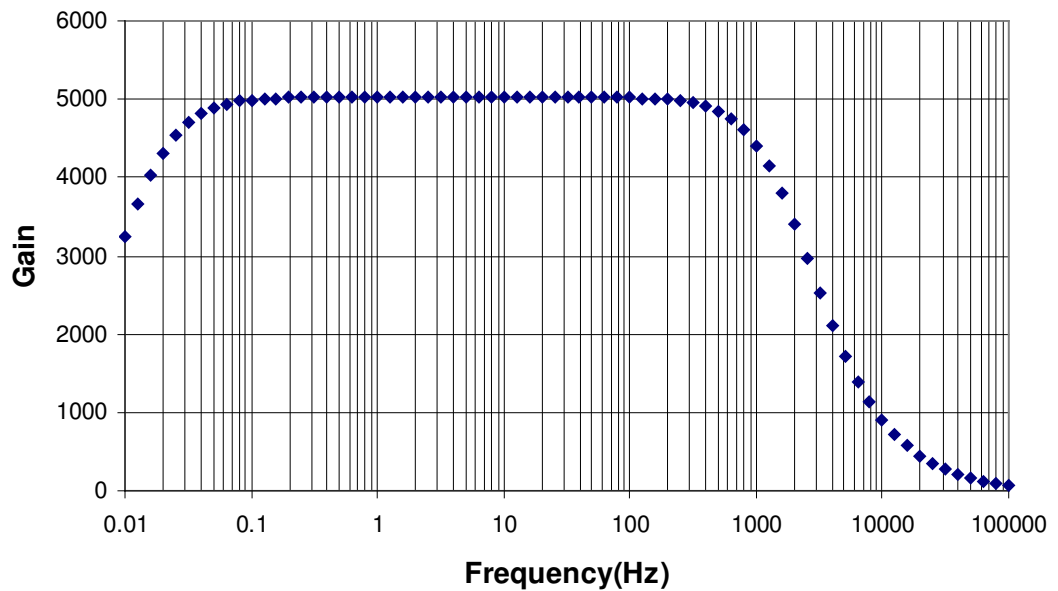
4.4.2.1 ผลการจำลองสัญญาณ



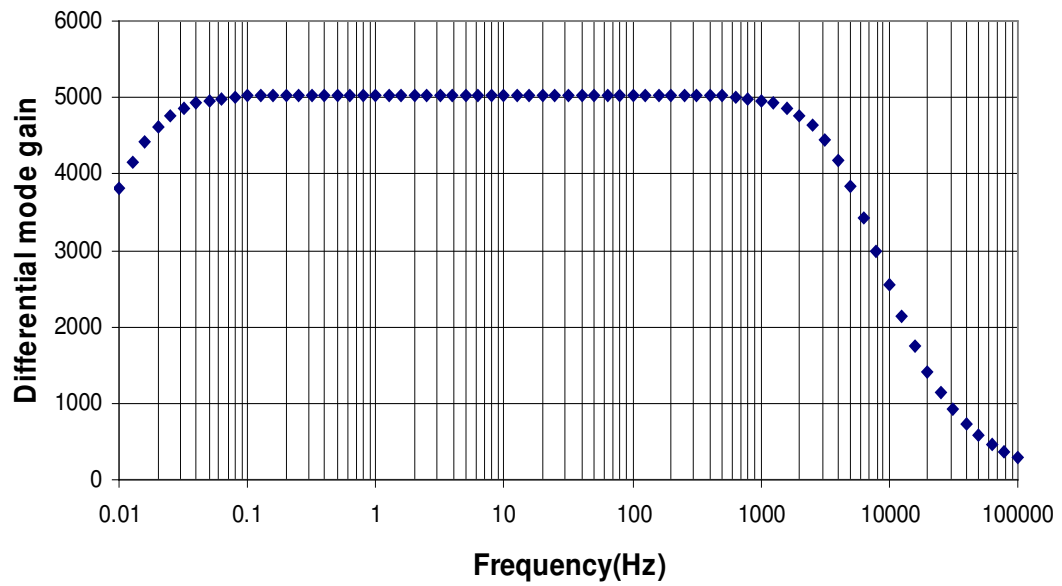
ภาพประกอบ 4.34 ความสัมพันธ์สัญญาณเอาต์พุทของวงจรระหว่างค่า CMRR กับ Frequency (เมื่อใช้ IC # LM324)



ภาพประกอบ 4.35 ความสัมพันธ์สัญญาณเอาต์พุตของวงจรระหว่างค่า CMRR กับ Frequency (เมื่อใช้ IC # TL084CN)



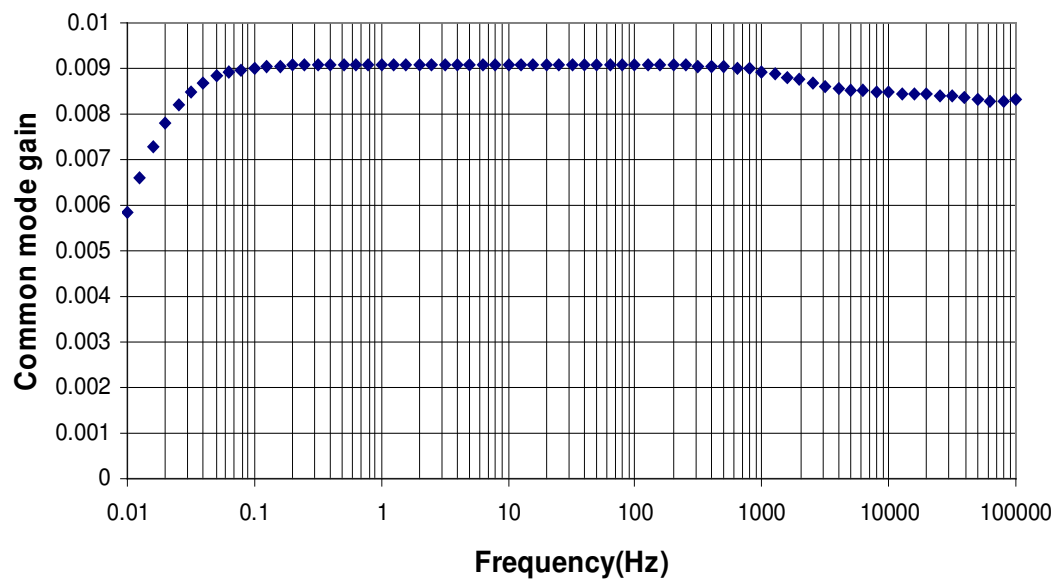
ภาพประกอบ 4.36 ความสัมพันธ์สัญญาณเอาต์พุตของวงจรระหว่างค่า Differential mode gain กับ Frequency (เมื่อใช้ IC# LM324)



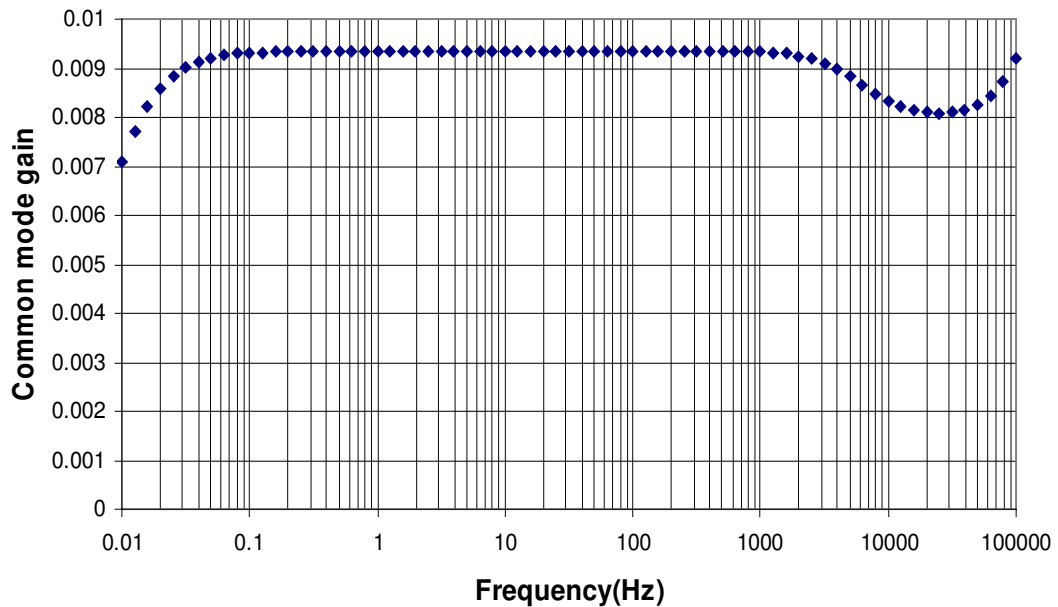
ภาพประกอบ 4.37 ความสัมพันธ์สัญญาณเอาต์พุตของวงจรระหว่างค่า Differential mode gain

กับ

Frequency (เมื่อใช้ IC# TL084CN)



ภาพประกอบ 4.38 ความสัมพันธ์สัญญาณเอาต์พุตของวงจรระหว่างค่า Common mode gain กับ Frequency (เมื่อใช้ IC# LM324)

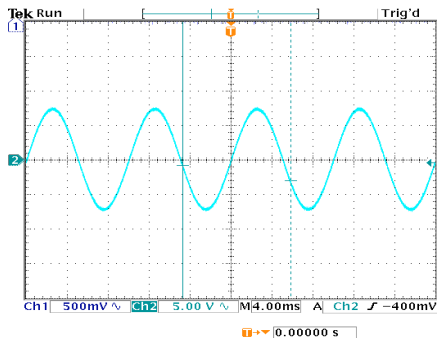


ภาพประกอบ 4.39 ความสัมพันธ์สัญญาณเอาต์พุตของวงจรระหว่างค่า Common mode gain กับ Frequency (เมื่อใช้ IC# TL084CN)

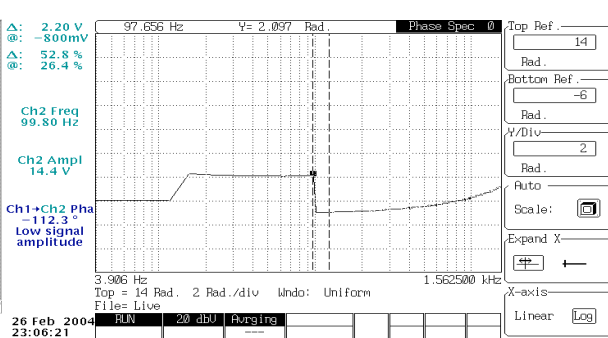
จากภาพประกอบ 4.34 – 4.39 พบว่าวงจรการกำจัดแรงดันไฟตรงด้วยออฟโตคอปเปอร์ ค่า CMRR จะมีค่าสูงถึง 114.86 dB และ 114.62 dB ตามลำดับ เนื่องจากวงจรมีค่าอัตราขยายสัญญาณสูงมาก และการตอบสนองความถี่ได้สูง 1 kHz และ 3 kHz ตามลำดับ ส่วนการตอบสนองเฟสของวงจรอยู่ในช่วงความถี่ 0.1 Hz – 1 kHz

4.4.2.2 การประกอบวงจร และผลการทดลอง

เมื่อจำลองสัญญาณผู้วิจัยได้ประกอบวงจรจริงโดยใช้ความต้านทานที่มีค่าความผิดพลาด 1% ทำการวัดหาอัตราขยาย (gain) เฟส (phase) โดยใช้สัญญาณอินพุต ขนาด 1 mV ความถี่ 100 Hz โดยใช้ออปแอมป์เบอร์ TL082CP และ MC1458 ซึ่งผลการวัดและบันทึกผลการทดลองดังแสดงในภาพประกอบ 4.40 - 4.41

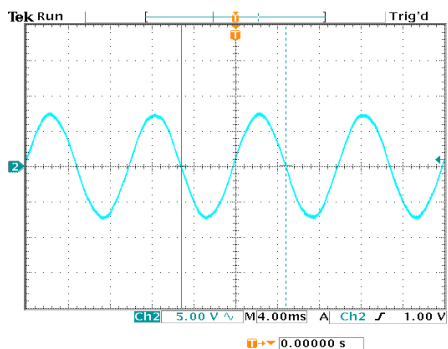


(ก) สัญญาณเอาต์พุต

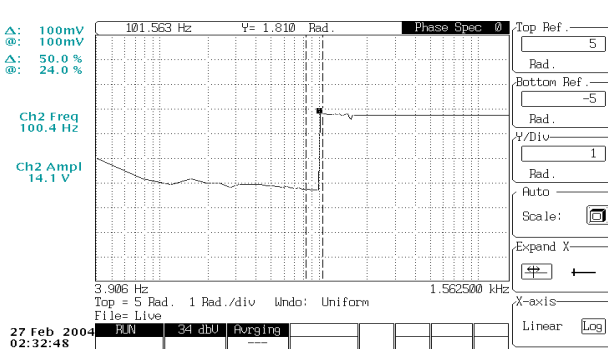


(ข) สัญญาณเฟสเอาต์พุต

ภาพประกอบ 4.40 ผลการวัดค่าต่างๆ ของวงจรโดยใช้ IC# TL082CP



(ก) สัญญาณเอาต์พุต



(ข) สัญญาณเฟสเอาต์พุต

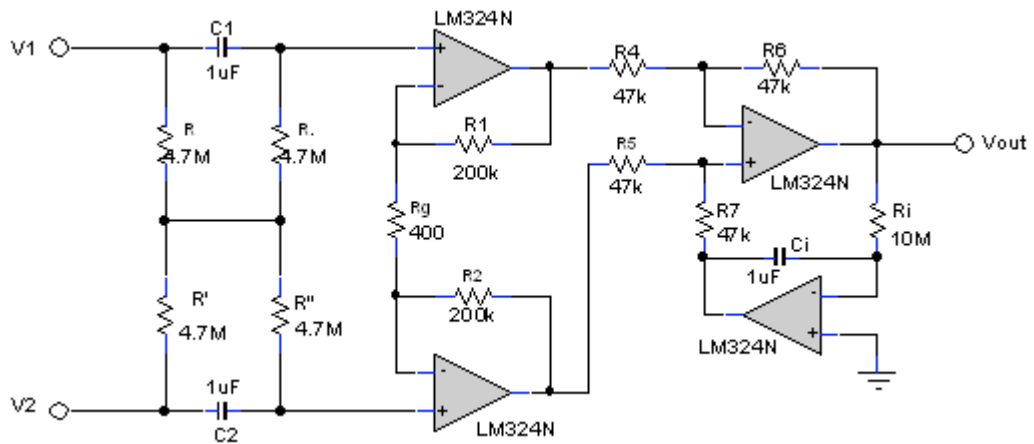
ภาพประกอบ 4.41 ผลการวัดค่าต่างๆ ของวงจรโดยใช้ IC# MC1458P

4.4.2.3 สรุปผลการทดลอง

จากการประกอบวงจรจริง พบว่าวงจรการกำจัดแรงดันไฟตรงด้วยการส่งผ่านทางแสง (Optocoupler DC Suppression) นั้น เป็นวงจรที่มีอัตราการขยายสัญญาณสูง มีการตอบสนองต่อเฟสได้ไม่ดี และสามารถกำจัดแรงดันไฟตรงได้ ± 8 mV

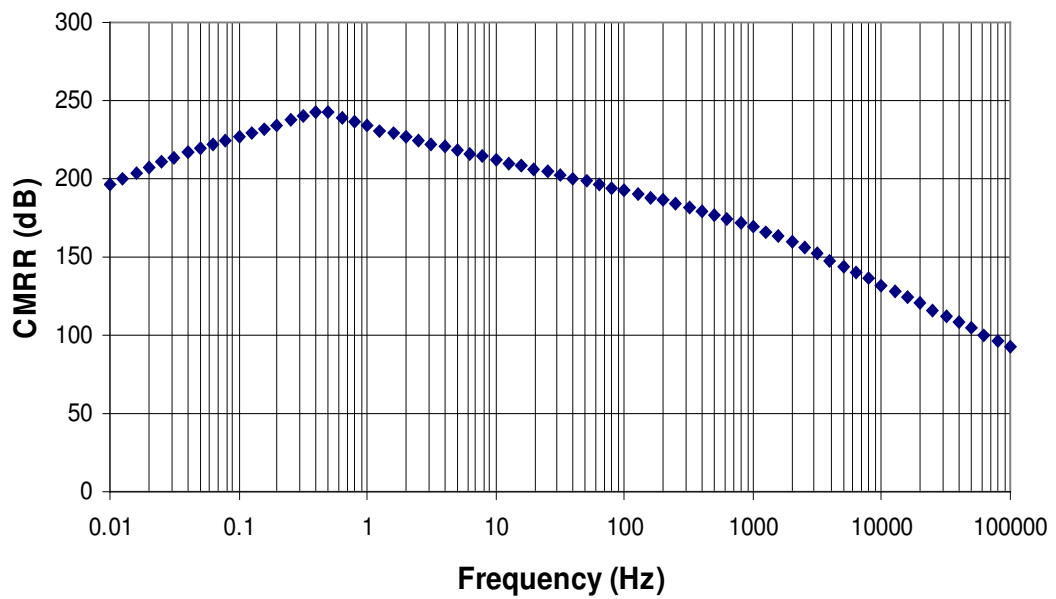
4.4.3 การกำจัดแรงดันไฟตรงโดยการต่อคาปาซิเตอร์เป็นภาคหน้า

สำหรับวงจรนี้ ผู้วิจัยได้ทำการจำลองสัญญาณของภาพประกอบ 4.42 เพื่อหาอัตราการขยาย (gain) เฟส (phase) และฮาร์โมนิก (harmonic) โดยใช้ไอซีเบอร์ LM324N และ TL084CN ตามลำดับ ซึ่งผลการจำลองสัญญาณ ดังภาพประกอบ 4.43 – 4.48

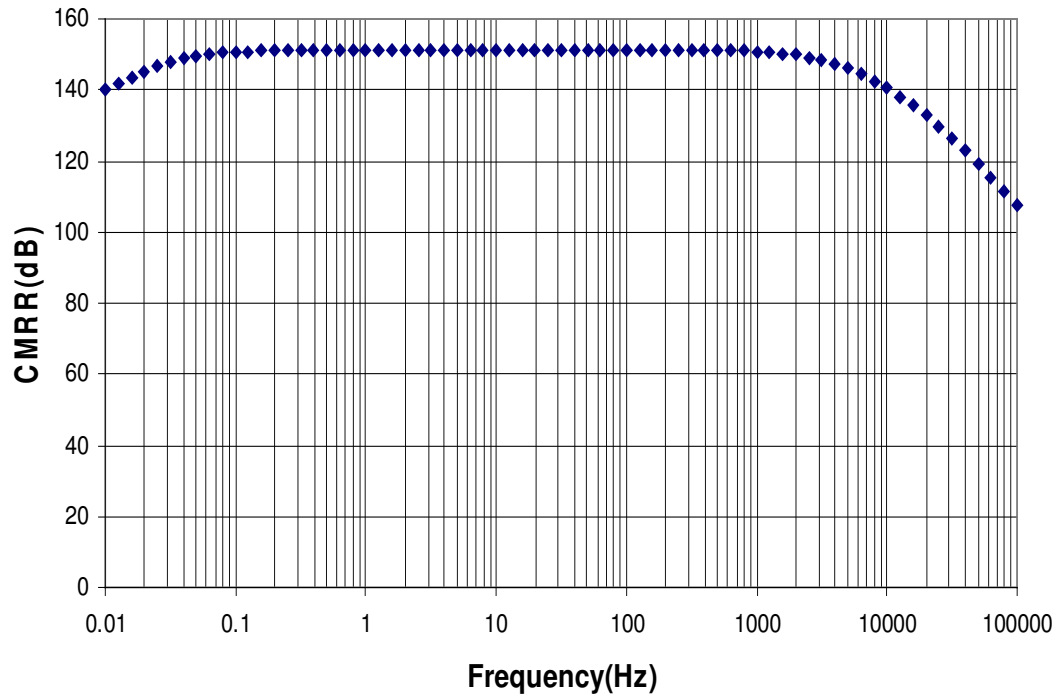


ภาพประกอบ 4.42 วงจรกำจัดแรงดันไฟตรงโดยการต่อคาปาซิเตอร์เป็นภาคหน้า

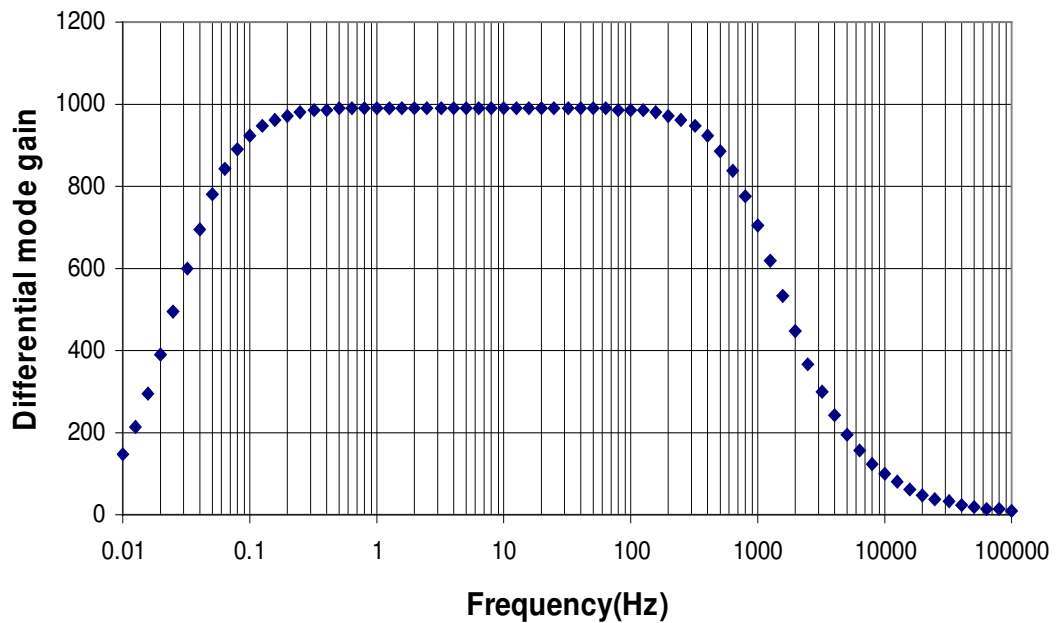
4.4.3.1 ผลการจำลองสัญญาณ



ภาพประกอบ 4.43 ความสัมพันธ์สัญญาณเอาต์พุตของวงจรระหว่างค่า CMRR กับ Frequency (เมื่อใช้ IC# LM324)

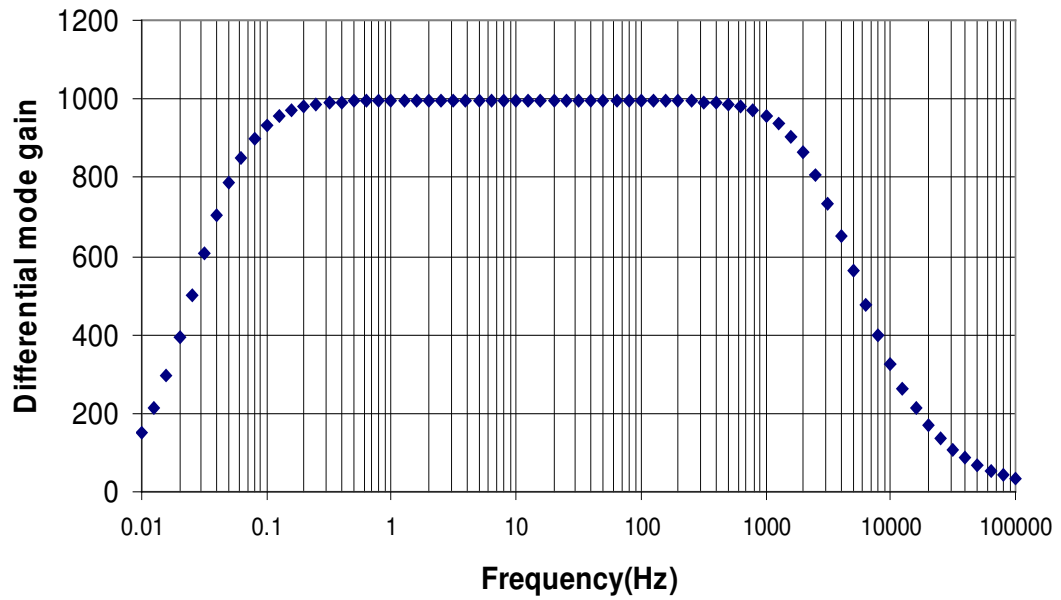


ภาพประกอบ 4.44 ความสัมพันธ์สัญญาณเอาต์พุตของวงจรระหว่างค่า CMRR กับ Frequency (เมื่อใช้ IC # TL084CN)

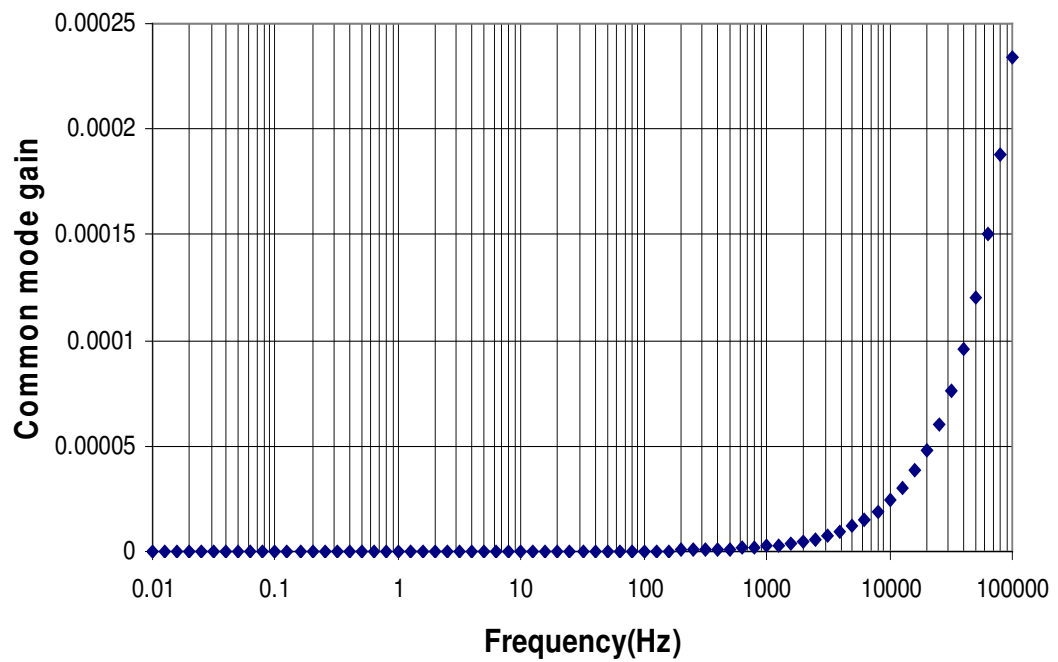


ภาพประกอบ 4.45 ความสัมพันธ์สัญญาณเอาต์พุตของวงจรระหว่างค่า Differential mode gain กับ

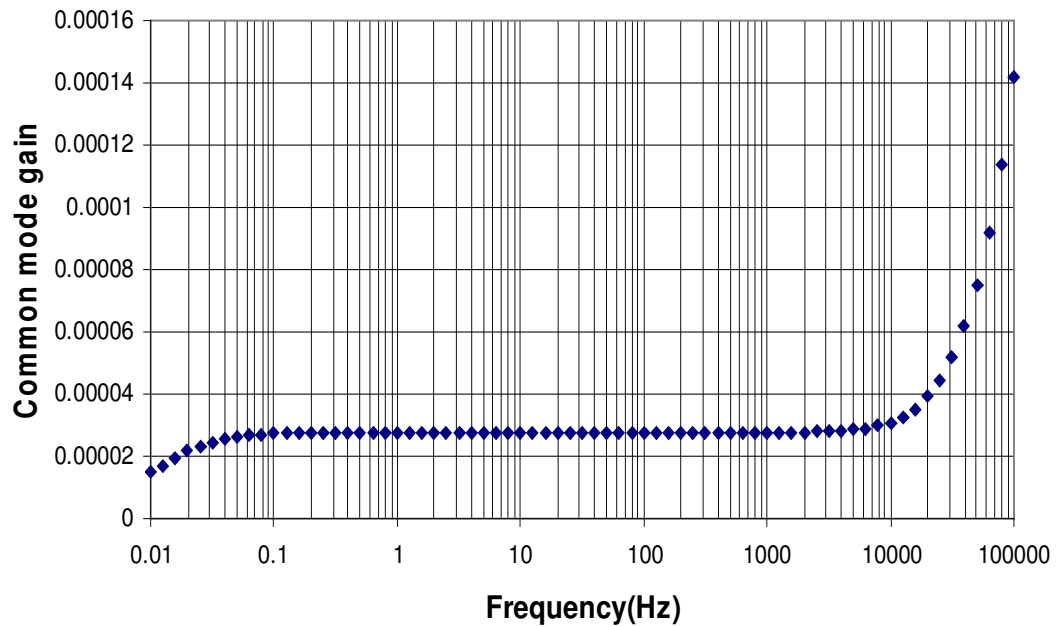
Frequency (เมื่อใช้ IC# LM324)



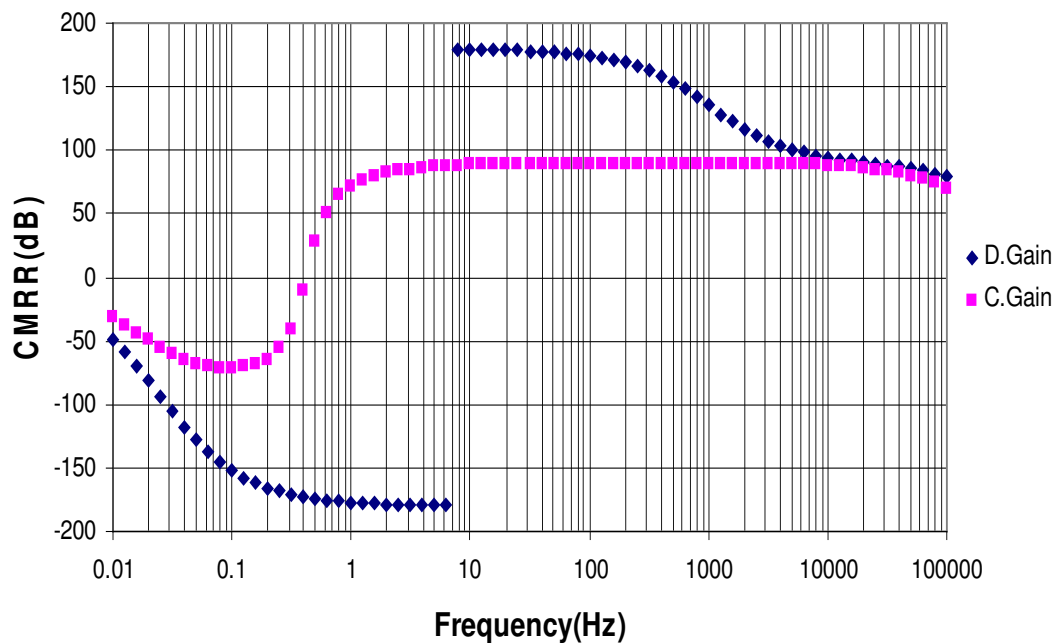
ภาพประกอบ 4.46 ความสัมพันธ์สัญญาณเอาต์พุตของวงจรระหว่างค่า Differential mode gain กับ Frequency (เมื่อใช้ IC # TL084CN)



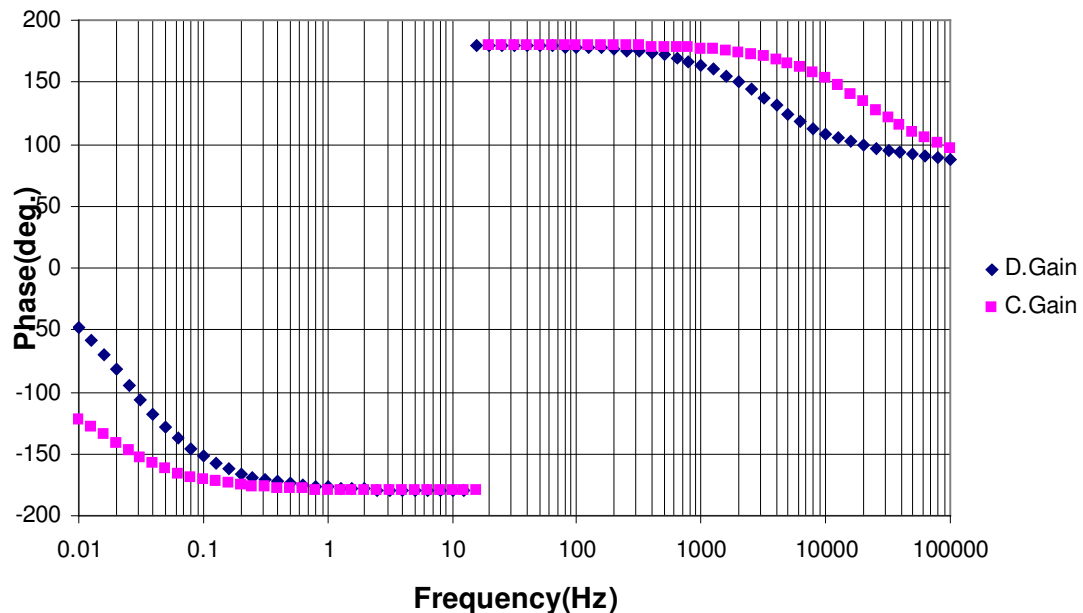
ภาพประกอบ 4.47 ความสัมพันธ์สัญญาณเอาต์พุตของวงจรระหว่างค่า Common mode gain กับ Frequency (เมื่อใช้ IC# LM324)



ภาพประกอบ 4.48 ความสัมพันธ์สัญญาณเอาต์พุตของวงจรระหว่างค่า Common mode gain กับ Frequency (เมื่อใช้ IC # TL084CN)



ภาพประกอบ 4.49 ความสัมพันธ์สัญญาณเอาต์พุตของวงจรระหว่างค่า Phase กับ Frequency (เมื่อใช้ IC # LM324)

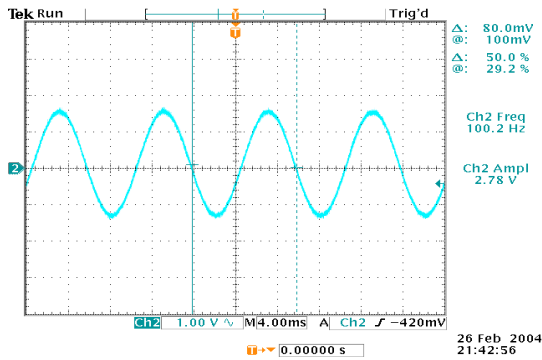


ภาพประกอบ 4.50 ความสัมพันธ์สัญญาณเอาต์พุตของวงจรระหว่างค่า Phase กับ Frequency (เมื่อใช้ IC # TL084CN)

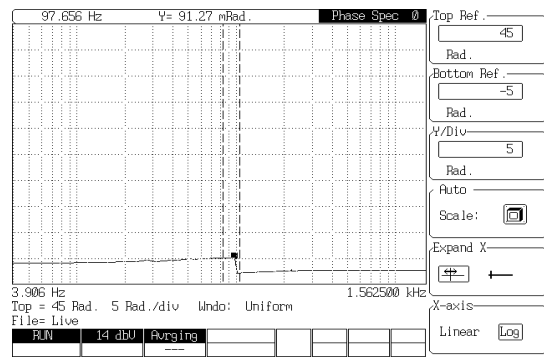
จากภาพประกอบ 4.43 – 4.50 พบว่าวงจรกำจัดแรงดันไฟตรงโดยการต่อคาปาซิเตอร์เป็นภาคหน้าค่า CMRR ที่ใช้ออปแอมป์เบอร์ LM324 ไม่คงที่ เนื่องจากความถี่เพิ่มขึ้นค่า CMRR จะลดลง ส่วนออปแอมป์เบอร์ TL084 นั้นค่า CMRR จะคงที่และมีค่าสูง อันเนื่องมาจากอัตราขยายสัญญาณสูง 1000 เท่า และการตอบสนองความถี่อยู่ในช่วง 0.1 Hz – 1 kHz ส่วนการตอบสนองของเฟสไม่ดี เพราะที่ความถี่ 10 Hz จะเกิดการกลับเฟสจาก -180 องศา เป็น +180 องศา

4.4.3.2 การประกอบวงจร และผลการทดลอง

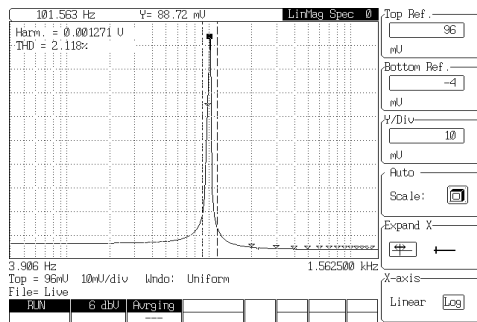
เมื่อจำลองสัญญาณแล้วผู้วิจัยได้ประกอบวงจรจริงโดยใช้ความต้านทานที่มีค่าความผิดพลาด 1% ทำการวัดหาอัตราขยาย(gain) เฟส (phase) โดยใช้สัญญาณอินพุตขนาด 1 mV ความถี่ 100 Hz และใช้ออปแอมป์เบอร์ TL084CP และ LM324 ตามลำดับ ซึ่งผลการวัดและบันทึกผลการทดลองแสดงดังภาพประกอบ 4.51-4.52



(ก) สัญญาณเอาท์พุท

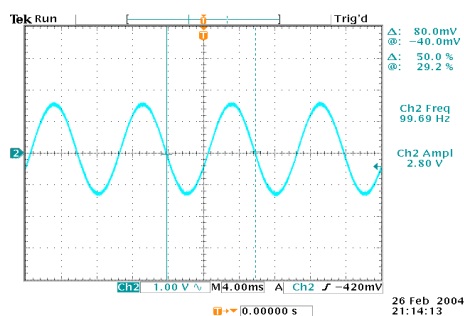


(ข) สัญญาณเฟสเอาท์พุท

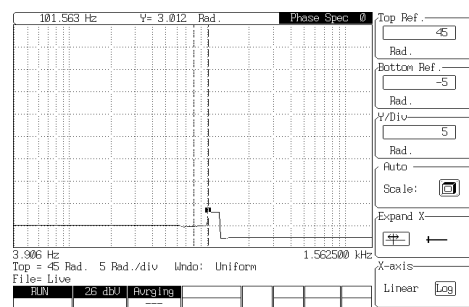


(ค) สัญญาณฮาร์โมนิก

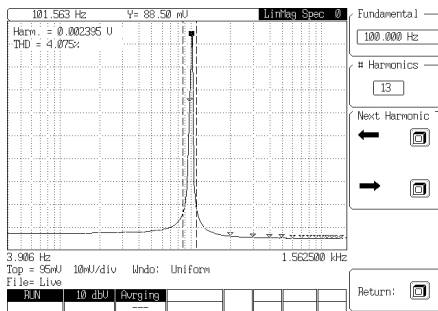
ภาพประกอบ 4.51 ผลการวัดค่าต่างๆ ของวงจรโดยใช้ IC# LM324



(ก) สัญญาณเอาท์พุท



(ข) สัญญาณเฟสเอาท์พุท



(ค) สัญญาณฮาร์โมนิก

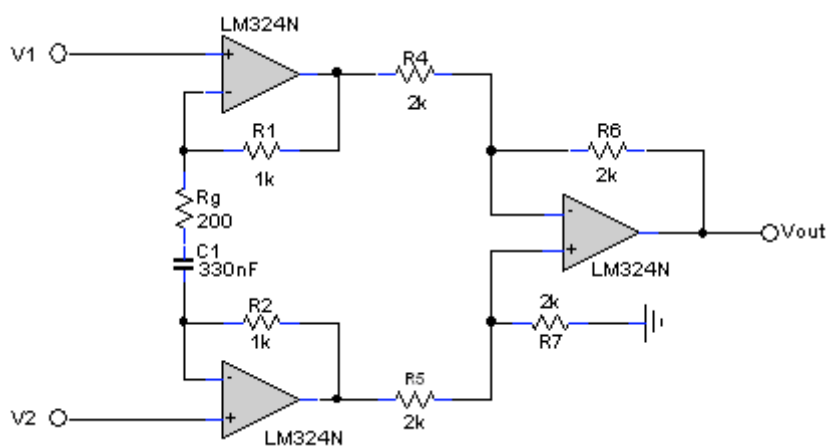
ภาพประกอบ 4.52 ผลการวัดค่าต่างๆ ของวงจรโดยใช้ IC# TL084CN

4.4.3 สรุปผลการทดลอง

จากการประกอบวงจรจริง และทดลอง พบว่าวงจรการกำจัดแรงดันไฟตรงโดยการต่อคาปาซิเตอร์เป็นภาคหน้า นั้น วงจรมีอัตราการขยายสูงมาก ประมาณ 2500 – 2900 เท่า ตอบสนองต่อเฟสไม่ดี และมีความสามารถกำจัดแรงดันไฟตรงได้สูงมาก เนื่องจากมีการต่อคาปาซิเตอร์ที่ภาคหน้า

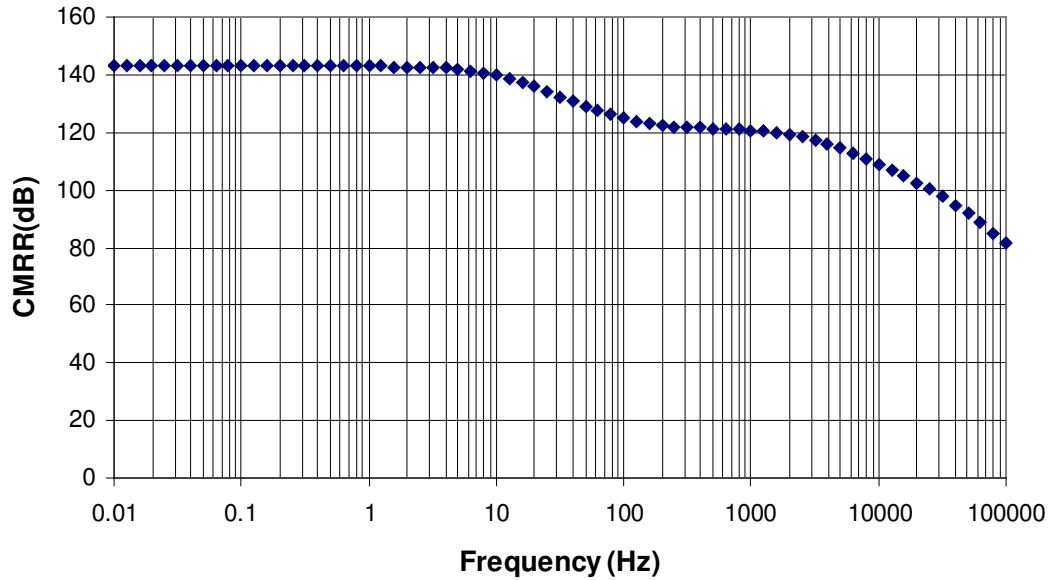
4.4.4 การกำจัดแรงดันไฟตรงโดยการต่อคาปาซิเตอร์อนุกรมกับ R_g

สำหรับวงจรนี้ ผู้วิจัยได้ทำการจำลองสัญญาณของภาพประกอบ 4.53 เพื่อหาอัตราการขยาย (gain) เฟส (phase) และฮาร์โมนิก (harmonic) โดยใช้ไอซีเบอร์ TL084CN และ LM324N โดยให้ $V_{in} = 1 \text{ mV}$, 100 Hz ไฟเลี้ยงวงจร $\pm 12 \text{ V}$ ซึ่งผลการจำลองสัญญาณ ดังภาพประกอบ 4.54 – 4.55

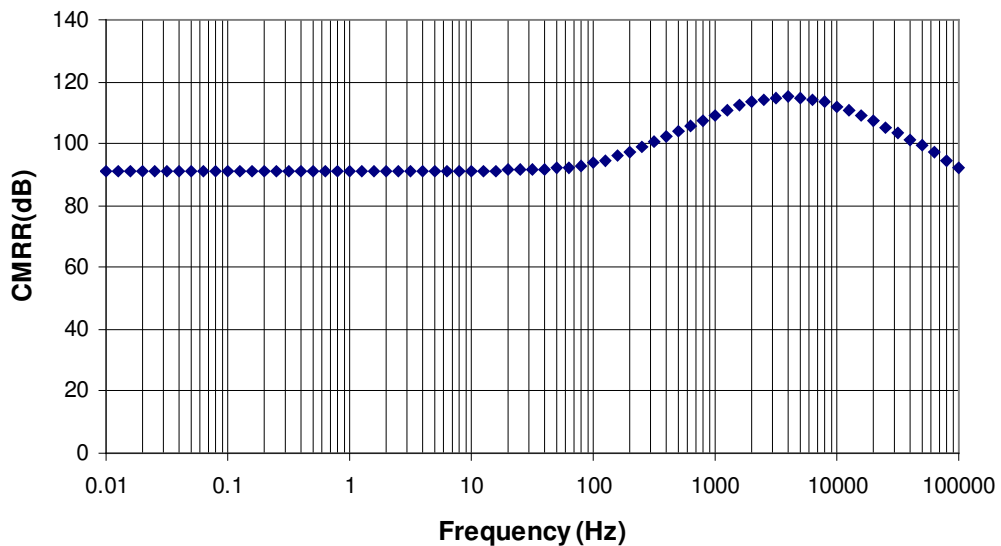


ภาพประกอบ 4.53 วงจรกำจัดแรงดันไฟตรงโดยการต่อคาปาซิเตอร์อนุกรมกับ R_g

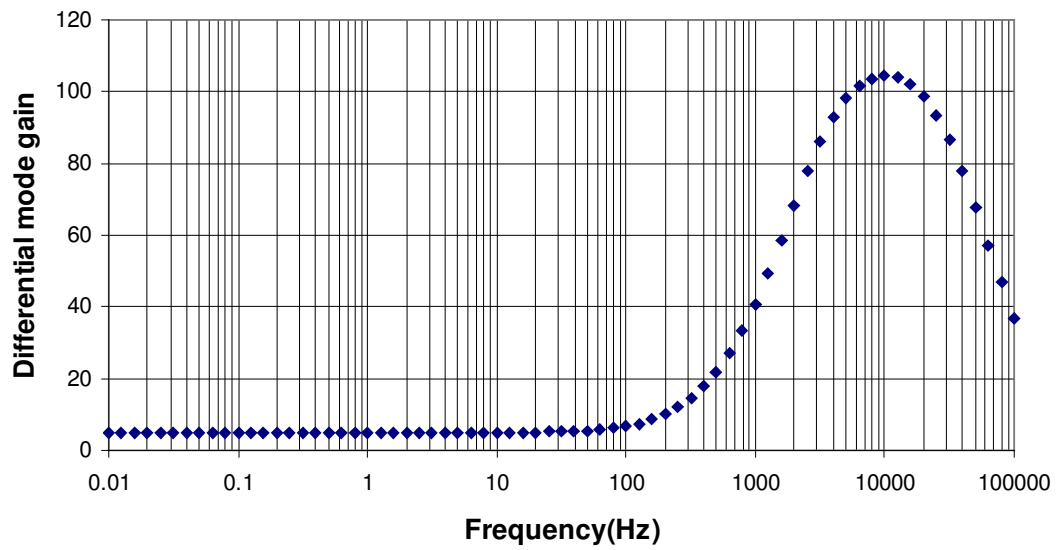
4.4.4.1 ผลการจำลองสัญญาณ



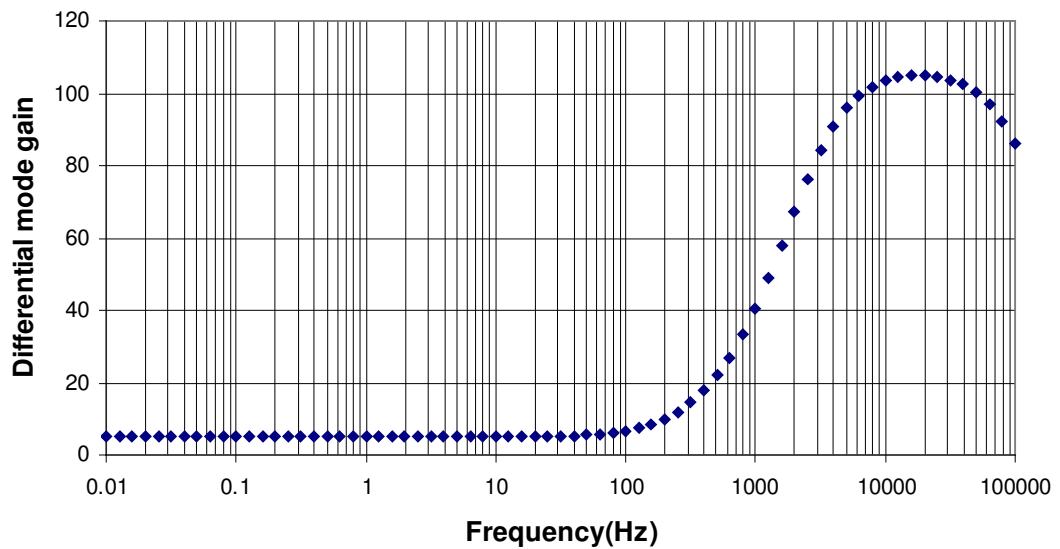
ภาพประกอบ 4.54 ความสัมพันธ์สัญญาณเอาต์พุตของวงจรระหว่างค่า CMRR กับ Frequency (เมื่อใช้ IC# LM324)



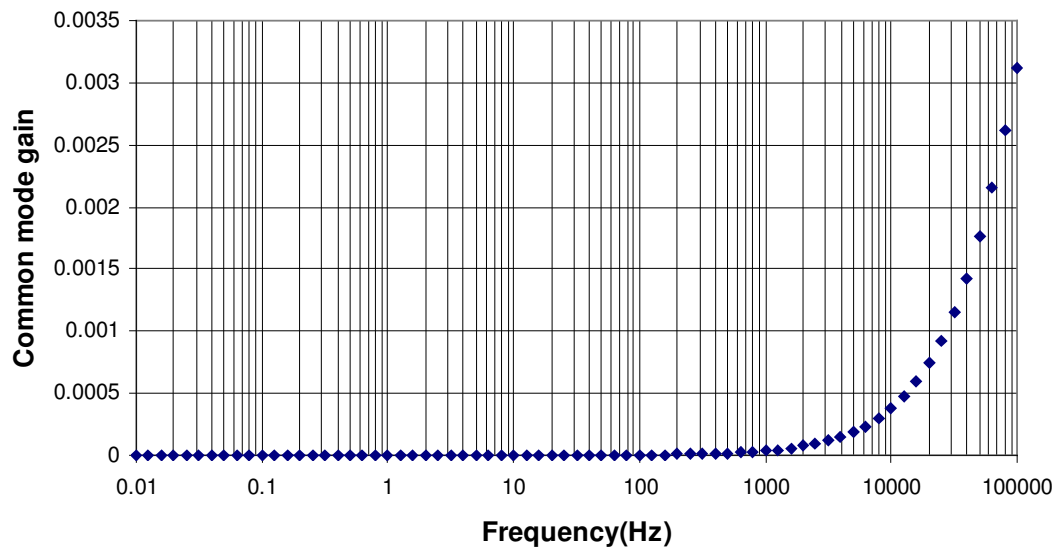
ภาพประกอบ 4.55 ความสัมพันธ์สัญญาณเอาต์พุตของวงจรระหว่างค่า CMRR กับ Frequency (เมื่อใช้ IC # TL084CN)



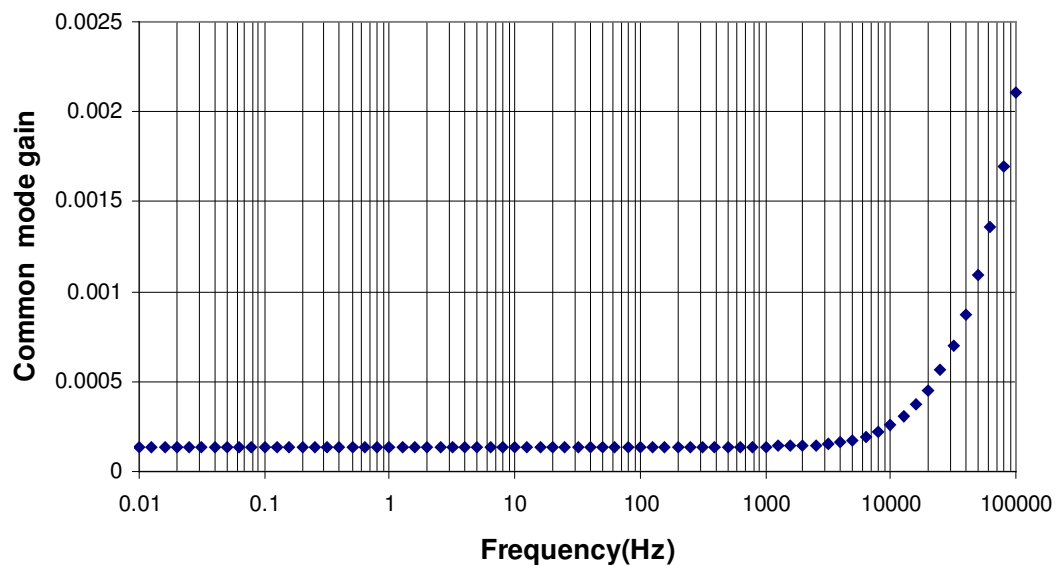
ภาพประกอบ 4.56 ความสัมพันธ์สัญญาณเอาต์พุตของวงจรระหว่างค่า Differential mode gain กับ Frequency (เมื่อใช้ IC# LM324)



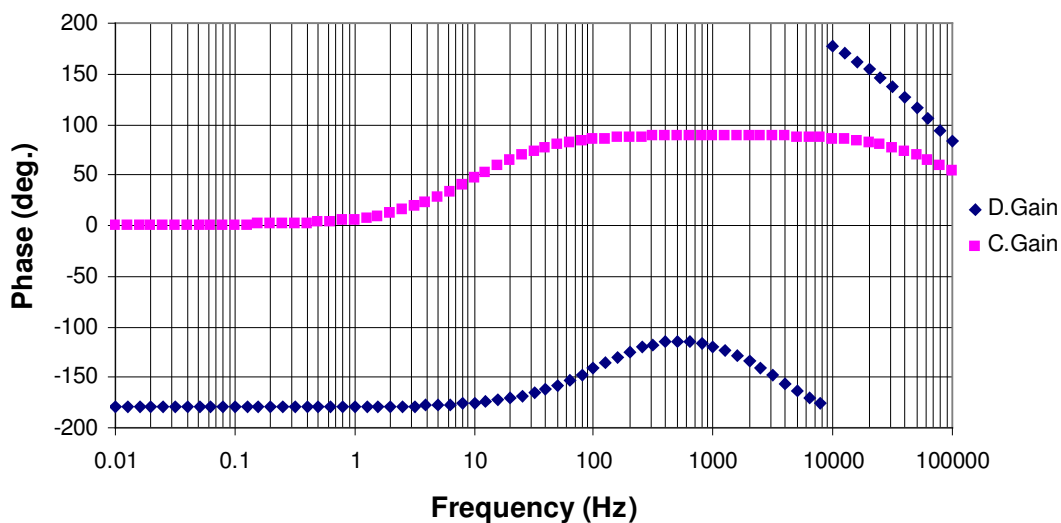
ภาพประกอบ 4.57 ความสัมพันธ์สัญญาณเอาต์พุตของวงจรระหว่างค่า Differential mode gain กับ Frequency (เมื่อใช้ IC # TL084CN)



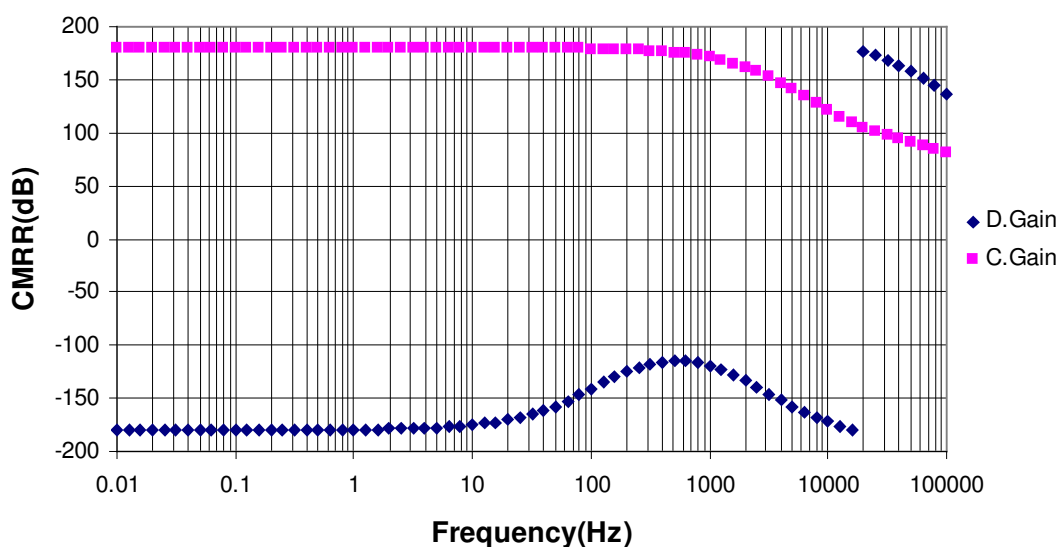
ภาพประกอบ 4.58 ความสัมพันธ์สัญญาณเอาต์พุตของวงจรระหว่างค่า Common mode gain กับ Frequency (เมื่อใช้ IC# LM324)



ภาพประกอบ 4.59 ความสัมพันธ์สัญญาณเอาต์พุตของวงจรระหว่างค่า Common mode gain กับ Frequency (เมื่อใช้ IC # TL084CN)



ภาพประกอบ 4.60 ความสัมพันธ์สัญญาณเอาต์พุตของวงจรระหว่างค่า Phase กับ Frequency (เมื่อใช้ IC # LM324)



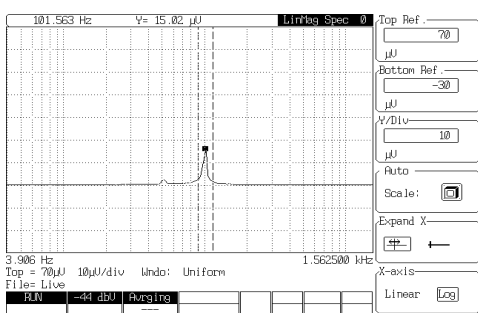
ภาพประกอบ 4.61 ความสัมพันธ์สัญญาณเอาต์พุตของวงจรระหว่างค่า Phase กับ Frequency (เมื่อใช้ IC # TL084CN)

จากภาพประกอบ 4.54 – 4.61 พบว่าวงจรกำลังแรงดันไฟตรงโดยการต่อคาปาซิเตอร์เป็น ภาคหน้าค่า CMRR ที่ใช้ออปแอมป์เบอร์ LM324 ไม่คงที่ เนื่องจากความถี่เพิ่มขึ้นค่า CMRR จะลดลง ส่วนออปแอมป์เบอร์ TL084 นั้นค่า CMRR จะคงที่และมีค่าสูง อันเนื่องมาจาก

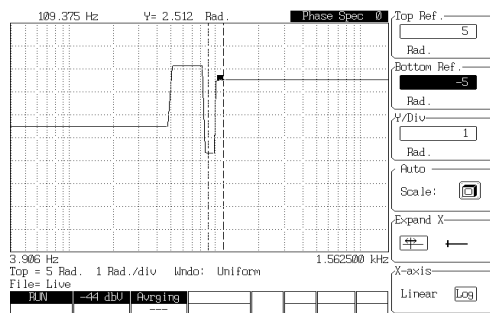
อัตราการขยายสัญญาณสูง 1000 เท่า และการตอบสนองความถี่อยู่ในช่วง 0.1 Hz – 1 kHz ส่วนการตอบสนองของเฟสไม่คงที่

4.4.4.2 การประกอบวงจร และผลการทดลอง

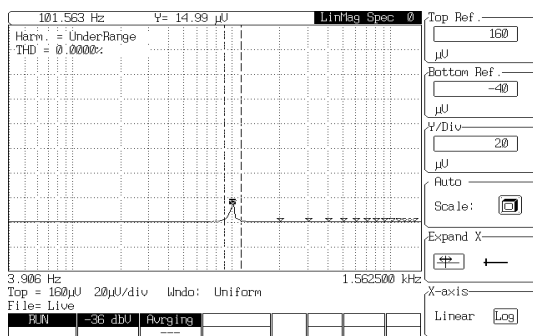
เมื่อได้จำลองสัญญาณแล้วผู้วิจัยได้ประกอบวงจรจริงโดยใช้ความต้านทานที่มีค่าความผิดพลาด 1 % ทำการวัดหาอัตราการขยาย(gain) เฟส (phase) และฮาร์โมนิก (harmonic) โดยใช้สัญญาณอินพุท ขนาด 1 mV ความถี่ 100 Hz และไอซีเบอร์ TL084CN ซึ่งผลการวัดค่าดังภาพประกอบ 4.62



(ก) สัญญาณเอาต์พุต



(ข) สัญญาณเฟสเอาต์พุต



(ค) สัญญาณฮาร์โมนิก

ภาพประกอบ 4.62 ผลการวัดค่าต่างๆ ของวงจรโดยใช้ IC# TL084CN

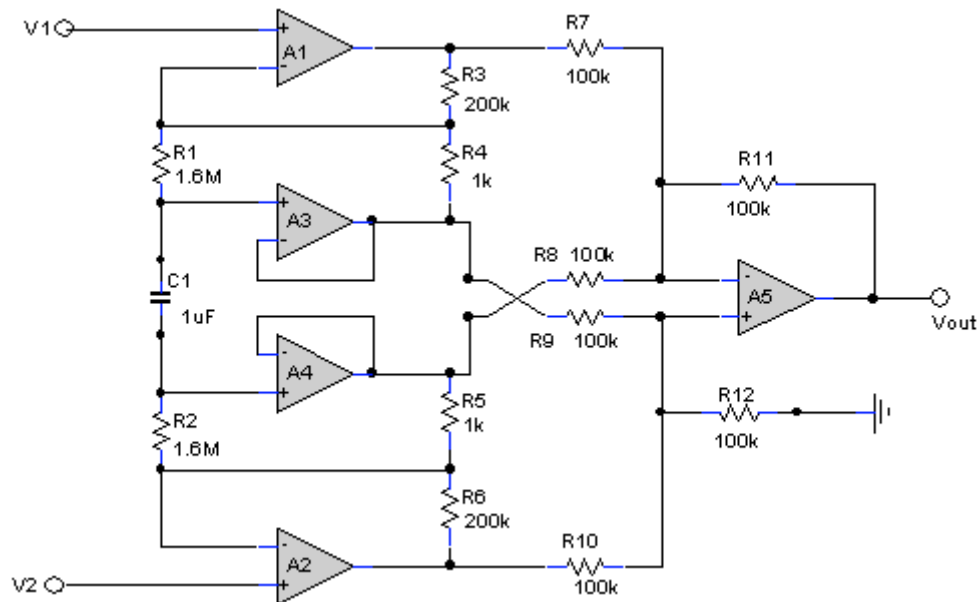
4.4.4.3 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่าวงจรการกำจัดแรงดันไฟตรงโดยการต่อคาปาซิเตอร์อนุกรมกับ Rg นั้น วงจรมีอัตราการขยายต่ำมาก ส่วนการตอบสนองต่อเฟสได้ไม่ดี เนื่องจากเกิดการ

กลับเฟสที่ความถี่ช่วง 50 Hz – 115 Hz ส่วนฮาร์โมนิกของวงจรนั้นมีต่ำมาก และวงจรสามารถ
กำจัดแรงดันไฟตรงได้สูงมาก

4.5 วงจรขยายสัญญาณไบโโพอเทนเชียล

คุณสมบัติของวงจรขยายสัญญาณไบโพอเทนเชียลที่ต้องการคือ สามารถกำจัดสัญญาณรบกวนได้ดี โดยการให้ค่า CMRR สูง และกำจัดสัญญาณแรงดันไฟตรงที่เกิดจากแรงดันครึ่งเซลล์และแรงดันออฟเซตของออปแอมป์ จากเหตุผลดังกล่าว ผู้วิจัยจึงเลือกวงจรในภาพประกอบ 3.6 สำหรับการเพิ่มค่า CMRR และเลือกหลักการกำจัดแรงดันไฟตรงจากวงจรในภาพประกอบ 3.9 เมื่อนำ 2 วงจรมารวมกันจะได้ดังภาพประกอบ 4.63 จากนั้นผู้วิจัยได้จัดสร้างและประกอบเป็นวงจรจริงลงบนแผ่นปริ้นท์ (PCB) โดยใช้ $R1 = R2 = 1.6 \text{ M}\Omega$, $R3 = R6 = 200 \text{ k}\Omega$, $R4 = R5 = 1 \text{ k}\Omega$, $R7 = R8 = R9 = R10 = R11 = R12 = 100 \text{ k}\Omega$, $C1 = 1 \text{ }\mu\text{F}$ และ $R3$ ผู้วิจัยได้ใช้หลายค่าเพื่อทดลองหาอัตราขยาย ดังภาพประกอบ 4.64



ภาพประกอบ 4.63 วงจรขยายสัญญาณไบโพอเทนเชียลที่ใช้ในงานวิจัย

จากภาพประกอบ 4.63 สัญญาณเอาต์พุตที่เกิดขึ้นจากการรวมสัญญาณเข้าด้วยกันสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.1

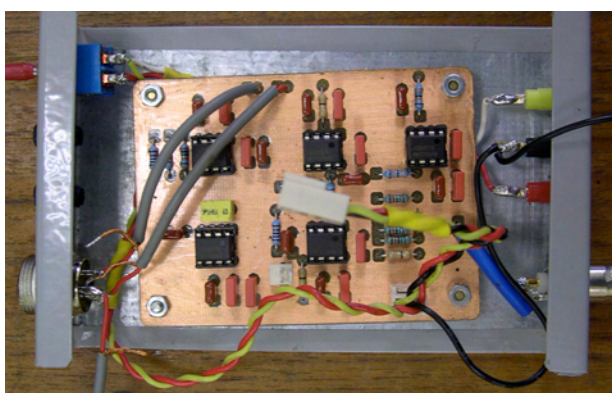
$$V_{out} = A_D \left(\frac{2sR_1C_1}{1+2sR_1C_1} \right) (V(in+) - V(in-)) \quad (4.1)$$

และวงจรมีอัตราขยายผลต่างของวงจรสามารถได้จาก สมการที่ 4.2

$$A_D = 1 + \frac{R_2}{R_3 // R_1} \quad \text{with } R_1 \gg R_3$$

$$A_D = 1 + \frac{R_2}{R_3} \quad (4.2)$$

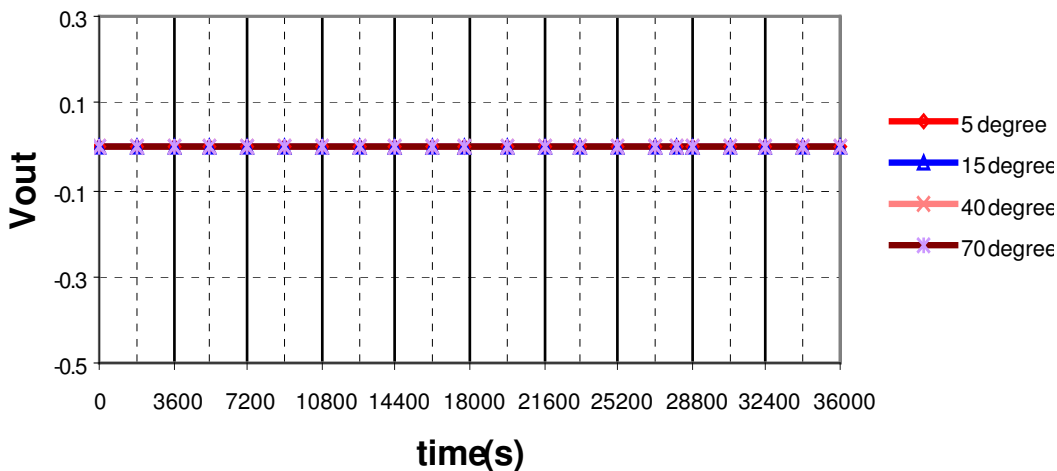
เมื่อ A_D คืออัตราขยายผลต่าง (Differential mode gain)
ค่าคงที่ทางเวลา (time constant) ของวงจรเท่ากับ $2(R_1)(C_1)$



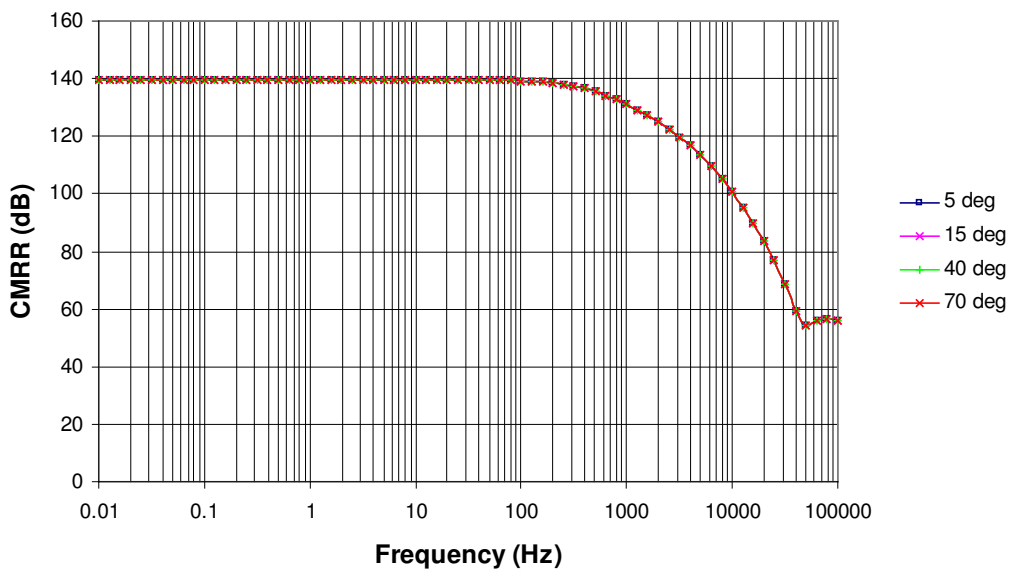
ภาพประกอบ 4.64 แสดงการเชื่อมต่ออุปกรณ์วงจรที่ประกอบแล้ว

4.5.1 การจำลองสัญญาณ

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรมจำลองสัญญาณแบบสไปซ์ (Spice base simulation) โดยใช้การจำลองด้วยรูประดับ 2 (L-2 Model) ที่ความแปรปรวนของอุณหภูมิ ตั้งแต่ 5–70 องศาเซลเซียสในการจำลองสัญญาณ เพื่อศึกษาว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ มีผลกระทบต่อค่าอัตราการขจัดสัญญาณโดยรวมและค่าครีฟท์ (drift) ของวงจรหรือไม่ โดยการปรับค่าอุณหภูมิของตัวต้านทานที่ 5, 15, 40 และ 70 องศาเซลเซียส ผลการจำลองสัญญาณ ดังแสดงในภาพประกอบ 4.65-4.66



ภาพประกอบ 4.65 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเอาต์พุตกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ที่เวลา 0- 36000 sec. (0 –10 ชั่วโมง)

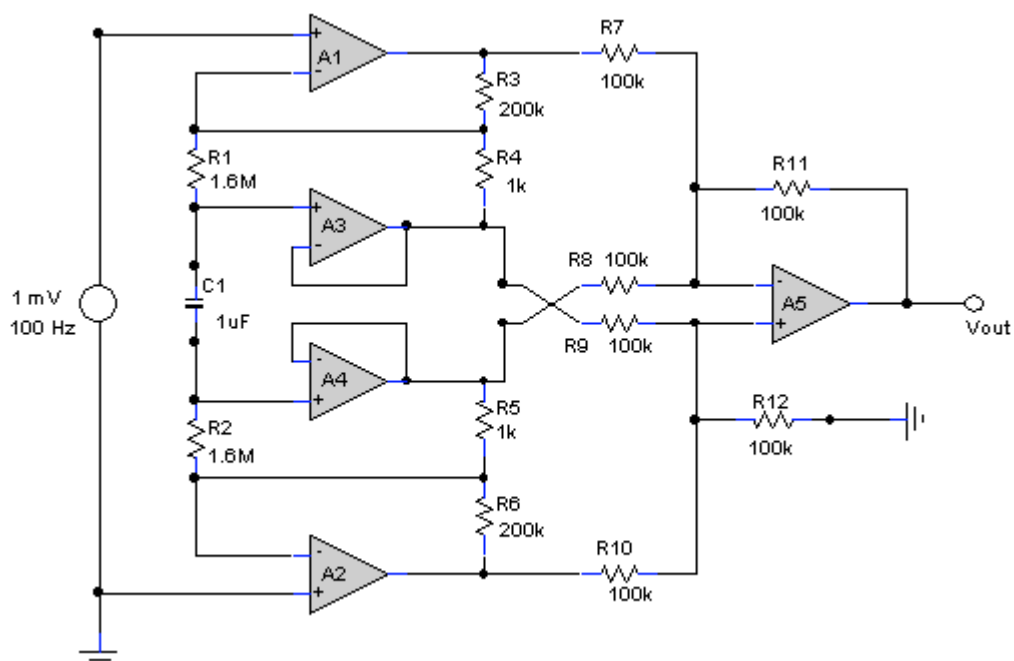


ภาพประกอบ 4.66 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CMRRกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ที่ความถี่ 0.01 Hz ถึง 100 kHz

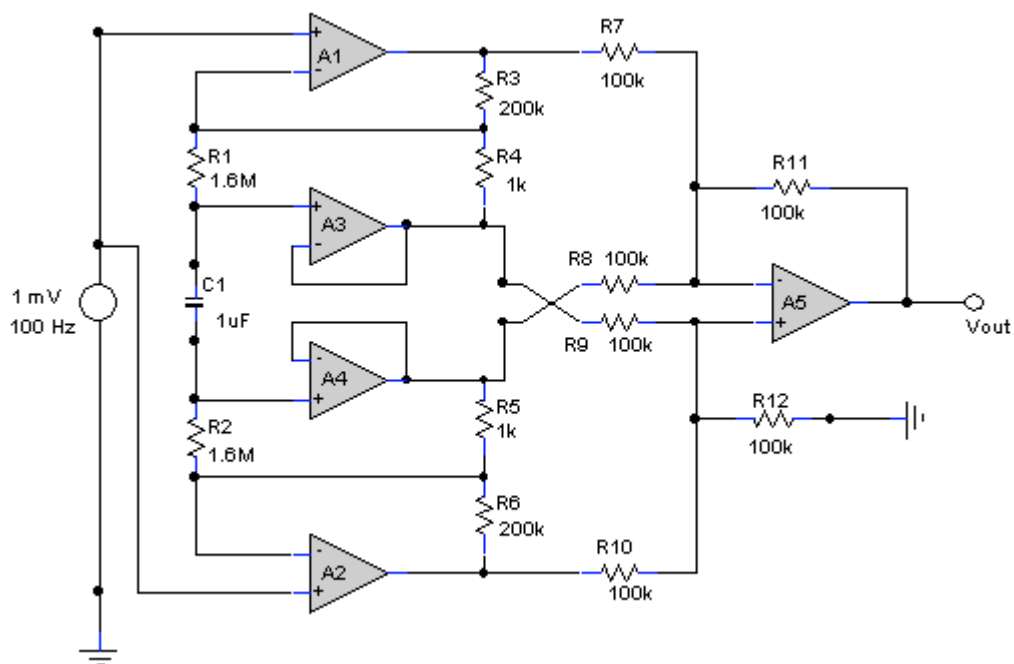
จากภาพประกอบ 4.65 และ 4.66 พบว่า การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอุปกรณ์ในวงจรขยายสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 5, 10, 40 และ 70 องศา ทำให้ค่า CMRR และค่าสัญญาณแรงดันเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังนั้นวงจรนี้จึงมีเสถียรภาพในการทำงาน เนื่องจากอุณหภูมิ ไม่มีผลต่อค่า CMRR และผลของการเกิดสภาวะครีพท์ (drift)

4.5.2 การทดลอง และผลการทดลอง

เมื่อได้ประกอบวงจรแล้วนำวงจรไปทดลองวัดค่าอัตราขยายความแตกต่าง โดยมีป้อนแรงดันอินพุต (Input voltage) 1 mV ความถี่ 100 Hz ลักษณะการต่อเพื่อวัดอัตราขยายผลต่าง ดังภาพประกอบ 4.67 และวัดค่าอัตราขยายโหมคร่วม โดยปรับค่าแรงดันอินพุต ที่ความถี่ 100 Hz และปรับค่าแรงดันอินพุต จนกระทั่งได้สัญญาณเอาต์พุต ที่มีรูปสัญญาณที่ดีที่สุด ลักษณะการต่อวงจรเพื่อวัดค่าอัตราขยายโหมคร่วม ดังภาพประกอบ 4.68 ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องมือ ประกอบด้วย Tektronix TDS3000 Series Oscilloscopes, FLUKE 5500A CALIBRATOR, Function Generator IWATSU Model SG-4101, KEITHLEY Model 2000 Multimeter, FFT Network Analyzer Stanford Research Systems Model SR770 และได้เลือกใช้ตัวต้านทานที่มีค่าผิดพลาด 1 % ภาพประกอบ 4.67 และเลือกใช้อปแอมป์ เบอร์ต่าง ๆ เช่น LF351, LF411, OP27, TLC2652 และ MAX430 เป็นต้น เมื่อวัดค่าอัตราขยายความแตกต่าง และอัตราขยายโหมคร่วม จึงคำนวณหาค่า อัตราการขยายสัญญาณโหมคร่วม (CMRR)

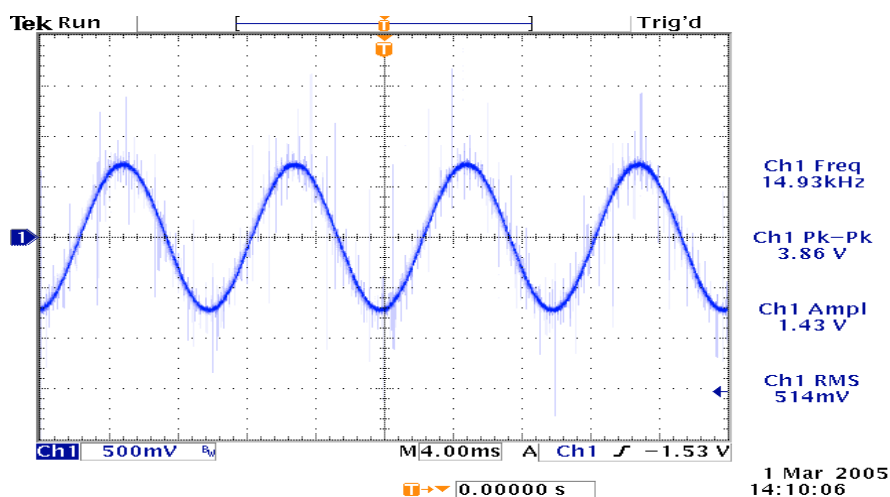


ภาพประกอบ 4.67 การต่อแรงดันอินพุต เพื่อวัดอัตราขยายความแตกต่าง

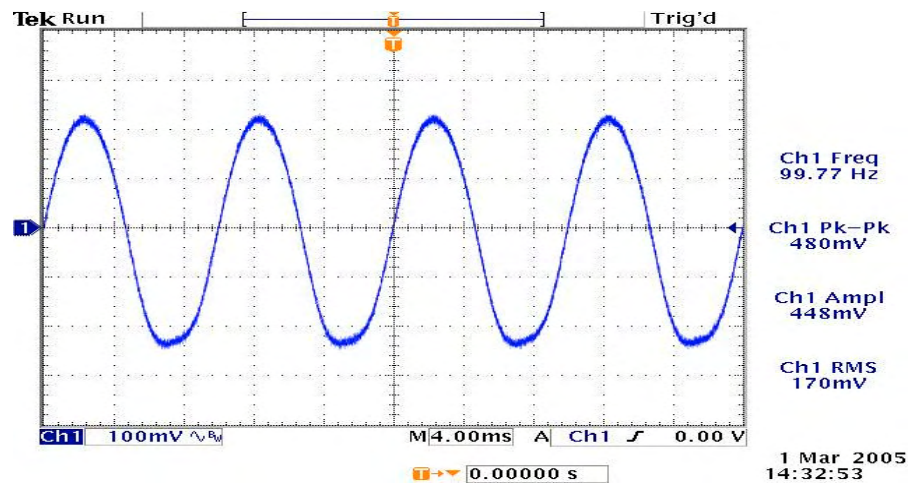


ภาพประกอบ 4.68 การต่อแรงดันอินพุตเพื่อวัดอัตราขยายโหมคร่วม

4.5.2.1 ให้ A1, A2, A3, A4 และ A5 ใช้ ออปแอมป์เบอร์ LF351 โดยมีสัญญาณเอาท์พุทของวงจรดังภาพประกอบ 4.69 – 4.70



ภาพประกอบ 4.69 แสดงสัญญาณเอาท์พุทแบบ Differential mode gain โดย $V_{in} = 1 \text{ mV}$



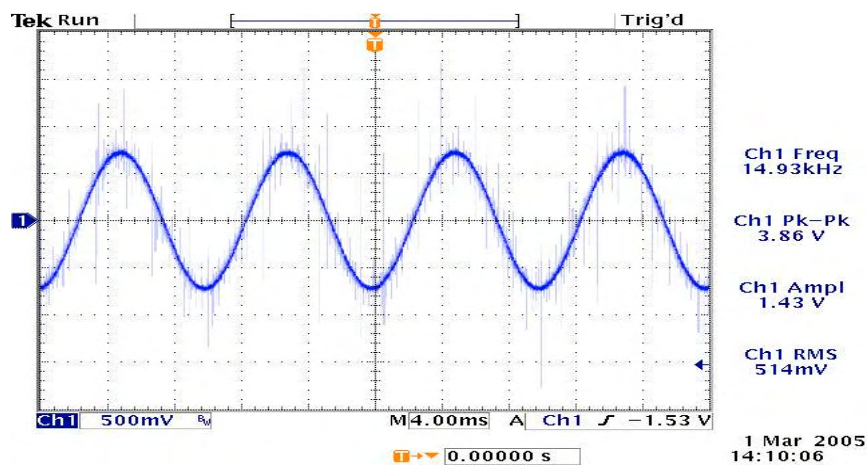
ภาพประกอบ 4.70 แสดงสัญญาณเอาต์พุตแบบ Common mode gain โดย $V_{in} = 5\text{ V}$

ตารางที่ 4.2 ผลของสัญญาณเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณไบโโพรเพนเชียล โดย A1, A2, A3, A4 และ A5 ใช้ ออปแอมป์เบอร์ LF351

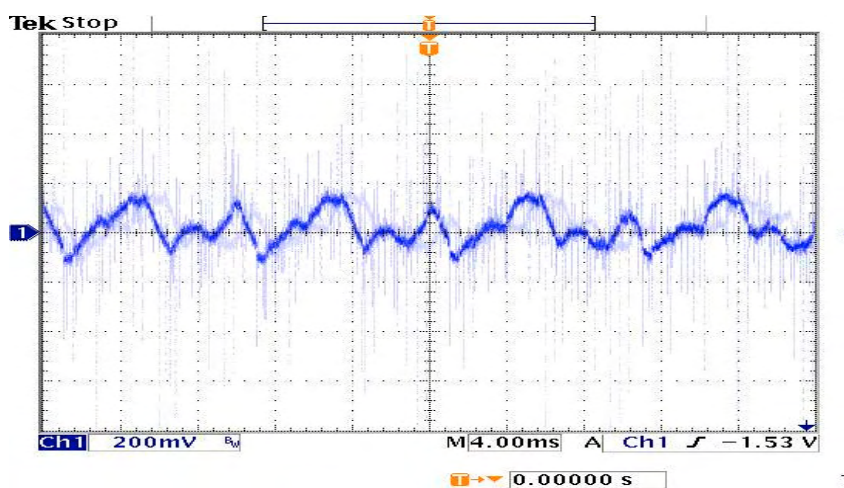
อัตราขยายความแตกต่าง (A_D)			อัตราขยายโหมคร่วม (A_C)			อัตราการจัดสัญญาณโหมคร่วม (CMRR, dB)
V_{in} (mV)	V_{out} (mV)	A_D (dB)	V_{in} (V)	V_{out} (mV)	A_C (dB)	
1	510	54.15	5	170	-29.37	83.25

จากภาพประกอบ 4.69 - 4.70 พบว่าการใช้ออปแอมป์เบอร์ LF351 ในวงจรขยายสัญญาณไบโโพรเพนเชียล นั้นให้ผลตอบสนองแบบ Differential mode gain ได้ตามสมการ 4.2 แต่ผลตอบสนองแบบ Common mode gain มีค่ามาก ทำให้วงจรมีค่า CMRR ต่ำ

4.5.2.2 ให้ A1, A2. และ A5 ใช้ IC # LF351 และ A3, A4 ใช้ IC # MAX430 จะได้ผลของสัญญาณเอาต์พุตของวงจรมีค่าดังภาพประกอบ 4.71 - 4.72



ภาพประกอบ 4.71 แสดงสัญญาณเอาต์พุต แบบ Differential mode gain โดย $V_{in} = 1 \text{ mV}$



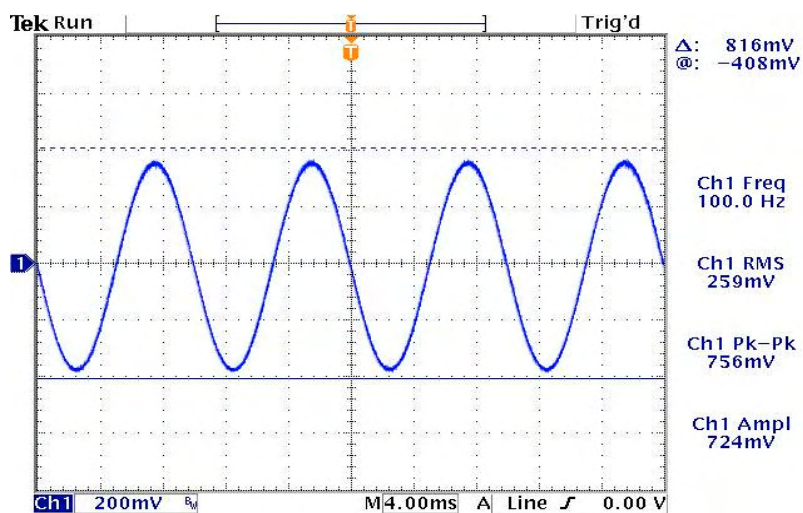
ภาพประกอบ 4.72 แสดงสัญญาณเอาต์พุต แบบ Common mode gain โดย $V_{in} = 4 \text{ V}$

ตารางที่ 4.3 ผลของสัญญาณเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณไบโโพลาร์เจ็ท โดย A1, A2, และ A5 ใช้ ออปแอมป์เบอร์ LF351 และ A3, A4 ใช้ ออปแอมป์เบอร์ MAX430

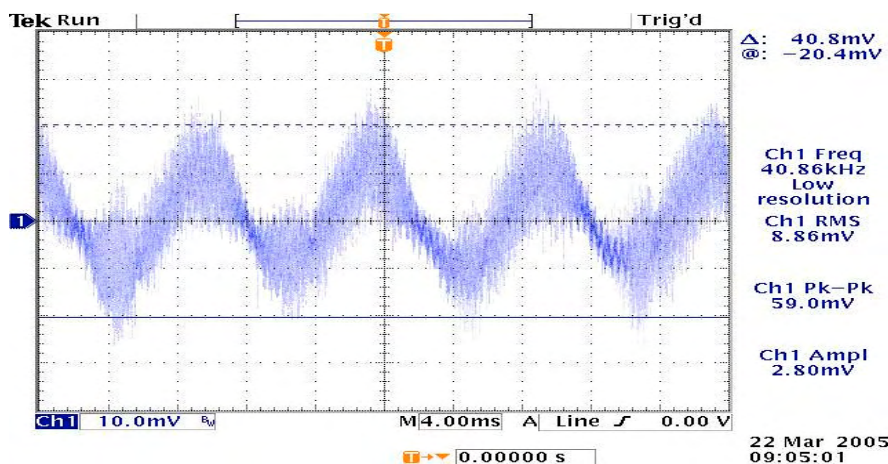
อัตราขยายความแตกต่าง (A_D)			อัตราขยายโหมคร่วม (A_C)			อัตราการจัดสัญญาณโหมคร่วม (CMRR, dB)
V_{in} (mV)	V_{out} (mV)	A_D (dB)	V_{in} (V)	V_{out} (mV)	A_C (dB)	
1	514	54.21	4	98.7	-32.15	86.36

ผลการทดลองในภาพประกอบ 4.71 - 4.72 แสดงว่าวงจรขยายสัญญาณไบโโพลาร์โพรเพนเซียล ให้ผลตอบสนองสัญญาณแบบ Differential mode gain ได้ตามสมการ 4.2 แต่ผลตอบสนองสัญญาณแบบ Common mode gain นั้นจะมีความถี่สูงปะปนออกมาด้วย ซึ่งเกิดจากออปแอมป์เบอร์ MAX430 ที่เป็น Chopper Operation Amplifier และวงจรยังมีค่า CMRR ต่ำ

4.5.2.3 ให้ A1, A2, A3, A4 และ A5 ใช้ออปแอมป์เบอร์ OP27 ผลของสัญญาณเอาต์พุตของวงจรดังภาพประกอบ 4.73 - 4.74



ภาพประกอบ 4.73 แสดงสัญญาณเอาต์พุตที่จับได้ แบบ Differential mode โดย $V_{in} = 1\text{ mV}$

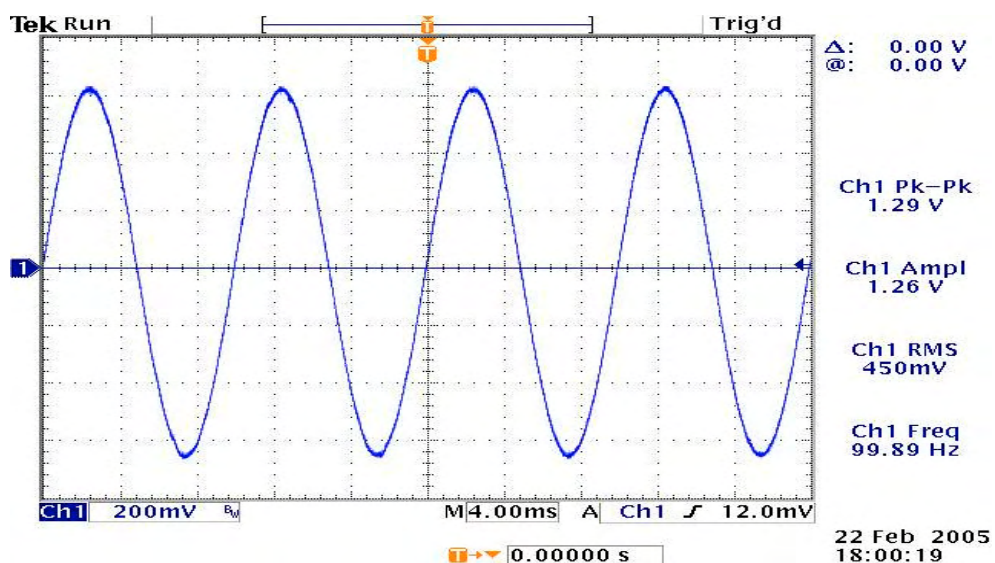


ภาพประกอบ 4.74 แสดงสัญญาณเอาต์พุตที่บันทึกได้ แบบ Common mode โดย $V_{in} = 6.5 \text{ V}$ ตารางที่ 4.4 ผลของสัญญาณเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณไบโโพลาร์เชิงซีลโดย A1, A2, A3, A4 และ A5 ใช้ ออปแอมป์เบอร์ OP27

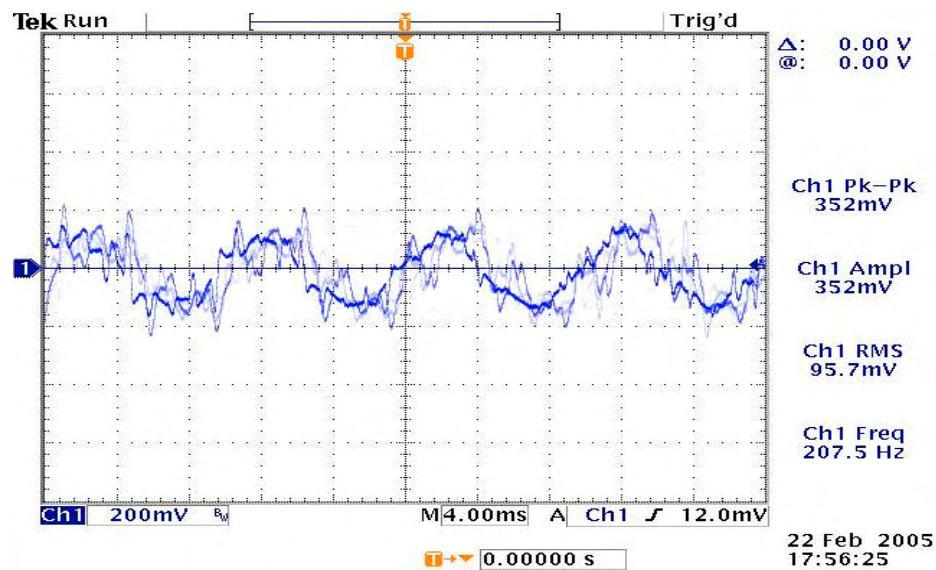
อัตราขยายความแตกต่าง (A_D)			อัตราขยายโหมคร่วม (A_C)			อัตราการจัดสัญญาณโหมคร่วม (CMRR, dB)
V_{in} (mV)	V_{out} (mV)	A_D (dB)	V_{in} (V)	V_{out} (mV)	A_C (dB)	
1	259	48.26	6.5	8.47	-57.70	105.96

ผลการทดลองในภาพประกอบ 4.73 - 4.74 แสดงว่าวงจรขยายสัญญาณไบโโพลาร์เชิงซีลให้ผลตอบสนองสัญญาณแบบ Differential mode gain เป็นไปตามสมการ 4.2 แต่ผลตอบสนองสัญญาณแบบ Common mode gain นั้นจะถูกรบกวนด้วยความถี่สูง แต่วงจรมีค่า CMRR สูง

4.5.2.4 ให้ A1, A2, A3, A4 และ A5 ใช้ ออปแอมป์เบอร์ TLC2652 จะได้ผลของการทำงานของวงจรดังภาพประกอบ 4.75 – 4.76



ภาพประกอบ 4.75 แสดงสัญญาณเอาต์พุตที่บันทึกได้ แบบ Differential mode โดย $V_{in} = 1 \text{ mV}$

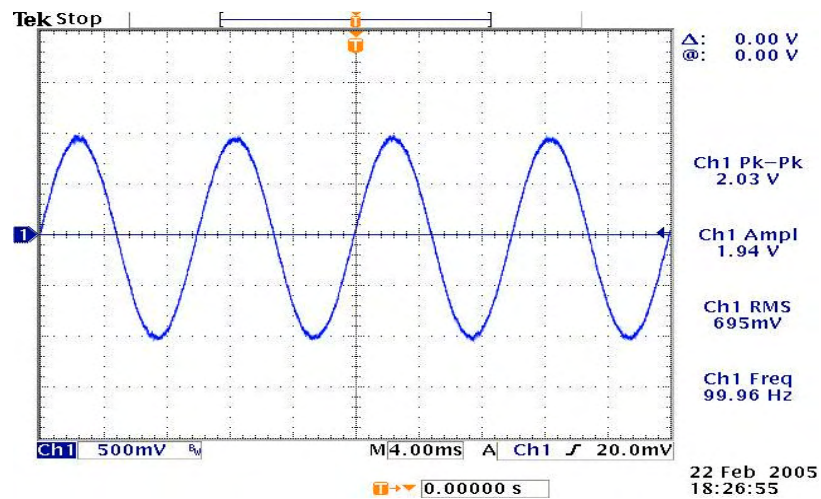


ภาพประกอบ 4.76 แสดงสัญญาณเอาต์พุตที่บันทึกได้ แบบ Common mode โดย $V_{in} = 1\text{ V}$
 ตารางที่ 4.5 ผลของสัญญาณเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณไบโโพลาร์เทนชันเซลโดย A1, A2, A3,
 A4 และ A5 ใช้ ออปแอมป์เบอร์ TLC2652

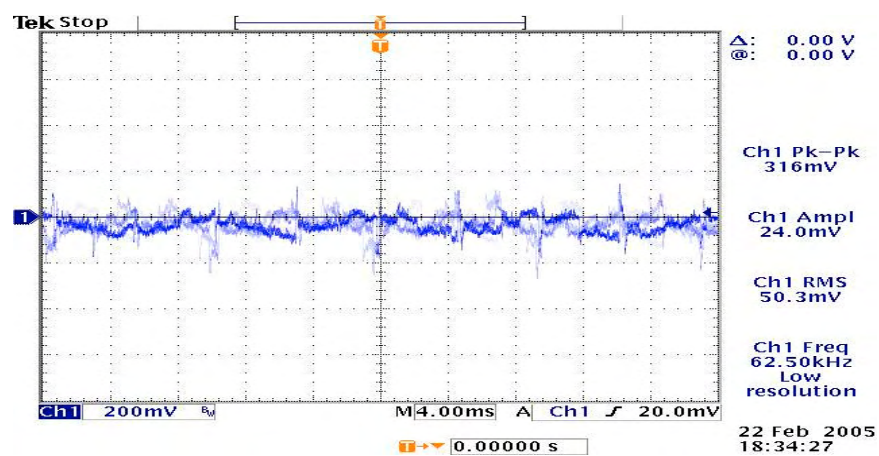
อัตราขยายความแตกต่าง (A_D)			อัตราขยายโหมคร่วม (A_C)			อัตราการจัดสัญญาณโหมคร่วม (CMRR, dB)
V_{in} (mV)	V_{out} (mV)	A_D (dB)	V_{in} (V)	V_{out} (mV)	A_C (dB)	
1	450	53.06	1	95.7	-20.38	73.44

ผลการทดลองในภาพประกอบ 4.75 - 4.76 แสดงว่าวงจรขยายสัญญาณไบโโพลาร์เทนชันเซล ให้ผลตอบสนองสัญญาณแบบ Differential mode gain ได้ตามสมการ 4.2 แต่ผลตอบสนองสัญญาณแบบ Common mode gain นั้นจะมีความถี่สูงปะปนออกมาด้วย ซึ่งเกิดจากออปแอมป์เบอร์ TLC2652 ที่เป็น Chopper Operation Amplifier และวงจรยังมีค่า CMRR ต่ำมาก

4.5.2.5 ให้ A1, A2, A3, A4 และ A5 ใช้อปแอมป์เบอร์ H17741 จะได้ผลของการทำ
งานของวงจรดังภาพประกอบ 4.78 – 4.79



ภาพประกอบ 4.77 แสดงสัญญาณเอาต์พุตที่บันทึกได้ แบบ Differential mode โดย $V_{in} = 1 \text{ mV}$



ภาพประกอบ 4.78 แสดงสัญญาณเอาต์พุตที่บันทึกได้ แบบ Common mode โดย $V_{in} = 1 \text{ V}$

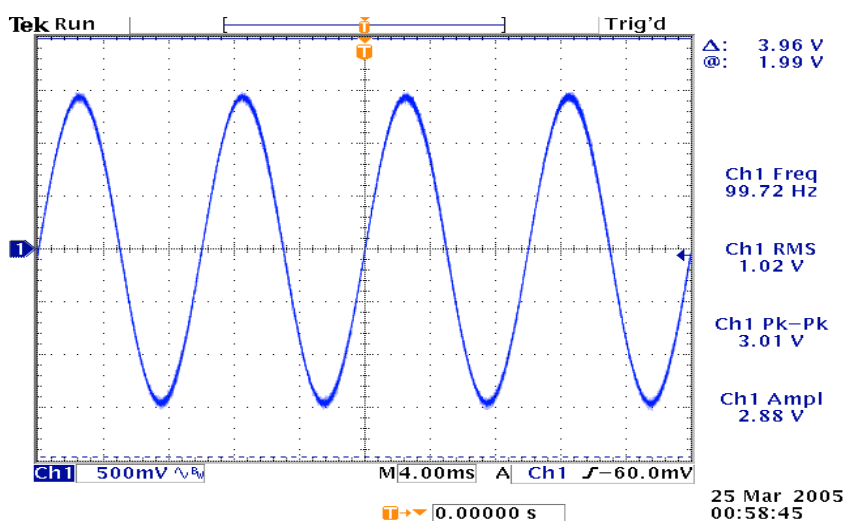
ตารางที่ 4.6 ผลของสัญญาณเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณไบโโพลาร์เชิงลบโดย A1, A2, A3,
A4 และ A5 ใช้ อปแอมป์เบอร์ H17741

อัตราขยายความแตกต่าง (A_D)			อัตราขยายโหมคร่วม (A_C)			อัตราการจัดสัญญาณโหมคร่วม (CMRR, dB)
V_{in} (mV)	V_{out} (mV)	A_D (dB)	V_{in} (V)	V_{out} (mV)	A_C (dB)	

1	695	56.83	1	50.3	-25.96	82.79

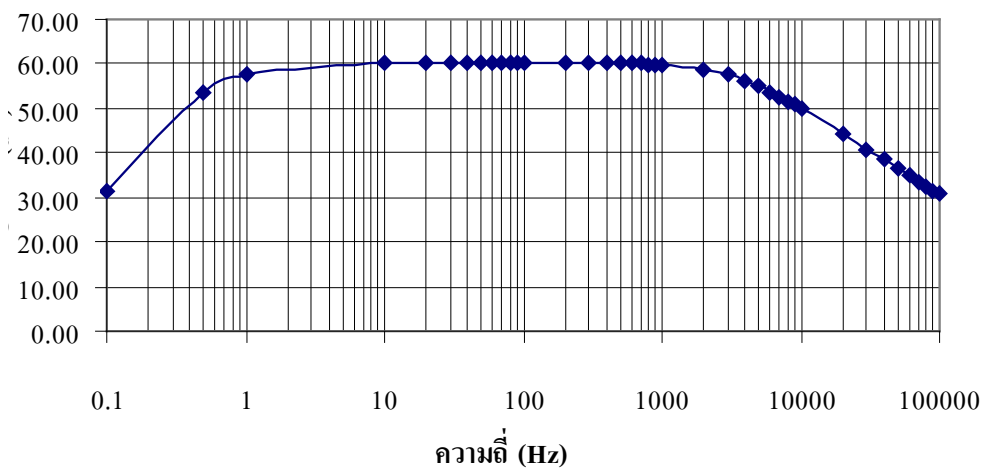
ผลการทดลองในภาพประกอบ 4.77 - 4.78 แสดงว่าวงจรขยายสัญญาณไบโโพลาร์โพรเพนเซียล ให้ผลตอบสนองสัญญาณแบบ Differential mode gain ได้ตามสมการ 4.2 แต่ผลตอบสนองสัญญาณแบบ Common mode gain นั้นจะมีสัญญาณรบกวนมาก และวงจรยังมีค่า CMRR ต่ำ

4.5.2.6 ให้ A1, A2, A3, A4 และ A5 ใช้ ออปแอมป์เบอร์ LF411 จะได้ผลของการทำงานของวงจรดังภาพประกอบ 4.79 - 4.80



ภาพประกอบ 4.79 แสดงสัญญาณเอาต์พุตที่บันทึกได้ แบบ Differential mode โดย $V_{in} = 1\text{ mV}$

อัตราขยายความถี่

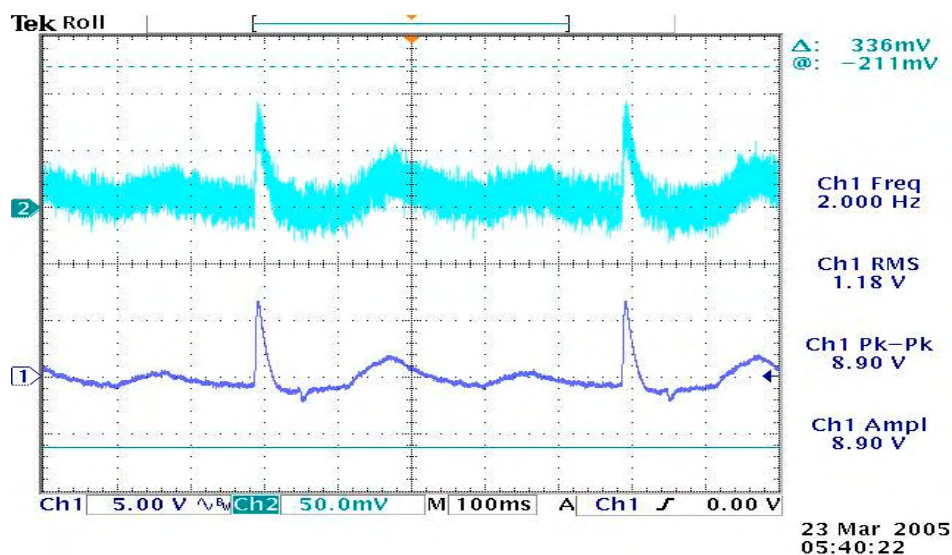


ภาพประกอบ 4.80 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายกับความถี่

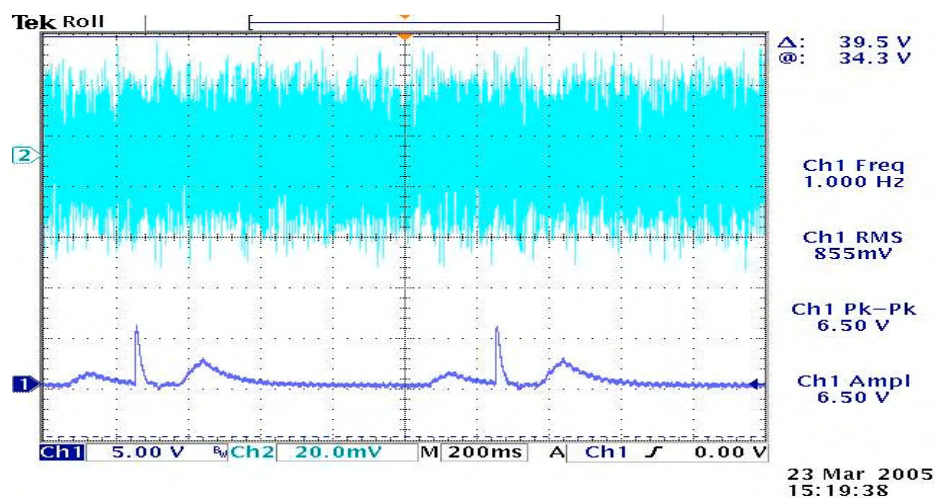
ตารางที่ 4.7 ผลของสัญญาณเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณไบโโพลาร์เซิลโดย A1, A2, A3, A4 และ A5 ใช้ ออปแอมป์เบอร์ LF411

อัตราขยายความแตกต่าง (A_D)			อัตราขยายโหมดร่วม (A_C)			อัตราการจัดสัญญาณโหมด ร่วม (CMRR, dB)
V_{in} (mV)	V_{out} (mV)	A_D (dB)	V_{in} (V)	V_{out} (mV)	A_C (dB)	
1	1020	60.17	3.6	6.5	-54.86	115.03

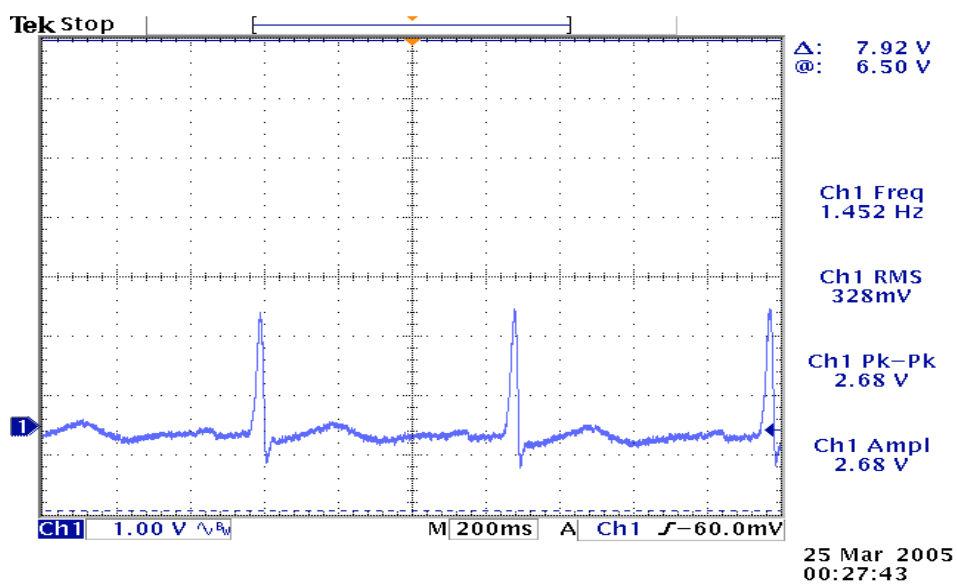
ผลการทดลองในภาพประกอบ 4.79 - 4.80 แสดงว่าวงจรขยายสัญญาณไบโโพลาร์เซิลให้ผลตอบสนองสัญญาณแบบ Differential mode gain เป็นไปตามสมการ 4.2 และวงจรนี้มีค่าผลตอบสนอง CMRR สูงมาก



ภาพประกอบ 4.81 กราฟสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจ จากเครื่อง ECG Simulator โดยกราฟด้านบนเป็นสัญญาณ ECG ขนาด 1 V ลดทอน 100 เท่า กราฟด้านล่างเป็นสัญญาณ ECG ที่ผ่านวงจรขยายสัญญาณไบโโพลาร์เซิล ที่ใช้ในงานวิจัยนี้



ภาพประกอบ 4.82 กราฟสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจ จากเครื่อง ECG Simulator โดยกราฟด้านบน เป็นสัญญาณ ECG ขนาด 1 mV กราฟด้านล่างเป็นสัญญาณ ECG ที่ผ่านวงจรขยายสัญญาณไบโโพอเทนเชียล ที่ใช้ในงานวิจัยนี้



ภาพประกอบ 4.83 สัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจของอาสาสมัคร