

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

วงจรรวมของวงจรถยายเครื่องมือวัดโดยใช้วงจรถายพานกระแส

A Current Conveyor-Based Integrated Instrumentation Amplifier

หนังสืออ้างอิง
ห้ามนำออกนอกห้องสมุด

นายสมพร ธิติมูทา

Mr. Somporn Thitimutha



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.กอบชัย เดชหาญ

Advisor

Assoc. Prof. Dr. Kobchai Dejhan, Docteur (Telecom Paris)

วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2536

ISBN 974-621-091-2

เลขหมู่

เลขทะเบียน 21205

วัน เดือน ปี - 3 ค.ศ. 2537

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากหอสมุดฯ เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	III
ABSTRACT	IV
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 หลักการของวงจรขยายแบบอินสทรูเมนต์	2
2.1 บทนำ	2
2.2 วงจรขยายความแตกต่างแบบพื้นฐาน	2
2.3 วงจรขยายความแตกต่างแบบความต้านทานจุดเข้าสูง	4
2.4 การขยายแบบอินสทรูเมนต์	6
2.5 สรุป	11
บทที่ 3 หลักการของวงจรขยายแบบอินสทรูเมนต์ชนิดทำงานด้วยกระแส	12
3.1 บทนำ	12
3.2 วงจรสายพานกระแส	12
3.2.1 วงจรสายพานกระแสแบบใช้ OTA	13
3.2.2 วงจรสายพานกระแสแบบใช้มอสทรานซิสเตอร์	17
3.2.3 ผลการทดลองของวงจรสายพานกระแส	21
3.3 วงจรขยายแบบอินสทรูเมนต์	22
3.3.1 หลักการเบื้องต้น	22
3.3.2 วงจรขยายแบบอินสทรูเมนต์โดยใช้ OTA	24
3.4 ผลการทดลอง	26
3.5 บทสรุป	29

	หน้า
บทที่ 4 วงจรขยายแบบอินสทรูเมนต์แบบใหม่	30
4.1 บทนำ	30
4.2 หลักการเบื้องต้น	30
4.3 วงจรขยายแบบอินสทรูเมนต์แบบใหม่	32
4.4 ผลการทดลอง	33
4.5 สรุป	36
บทที่ 5 สรุปและแนวทางในการพัฒนาต่อ	37
5.1 สรุป	37
5.2 แนวทางในการพัฒนาต่อ	37
กิตติกรรมประกาศ	38
เอกสารอ้างอิง	39
ผลงานวิจัยที่ได้รับการพิมพ์เผยแพร่	40



บทคัดย่อ

หัวข้อวิทยานิพนธ์	วงจรรวมของวงจรถยายเครื่องมือวัดโดยใช้วงจรสายพานกระแส
ชื่อนักศึกษา	นายสมพร ธิติมุทา
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.กอบชัย เดชหาญ
ระดับการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา	2536

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการเสนอแนวทางหนึ่งที่ไม่เคยมีการเสนอมาก่อน ในการออกแบบวงจรถยายสัญญาณเครื่องมือวัด โดยปกติการออกแบบวงจรถยายสัญญาณเครื่องมือวัดมักจะใช้หลักการของวงจรเปลี่ยนศักดาให้เป็นกระแสมาใช้งานร่วมกัน แต่วิทยานิพนธ์นี้เสนอแนวทางอื่น คือการนำเอาวงจรถยายกระแสมาประยุกต์ใช้งานเพื่อทำเป็นวงจรถยายสัญญาณเครื่องมือวัด แนวทางที่เสนอจะเป็นการออกแบบวงจร โดยการเน้นให้สร้างได้โดยการใช้เทคโนโลยีของซีมอส ซึ่งเป็นที่นิยมกันมากในปัจจุบันนี้ ผลที่ตามมาจะสามารถสร้างได้ในรูปแบบของวงจรรวมขนาดใหญ่ได้ ในกรณีนี้ได้แสดงผลการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ และผลจากการทดลองประกอบกันเพื่อแสดงคุณสมบัติของวงจรที่ได้ออกแบบขึ้นมา

ABSTRACT

Thesis Title	A current conveyor-based integrated instrumentation amplifier.
Student	Somporn Thitimutha
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Kobchai Dejhan
Level of Study	Master of Engineering in Electrical Engineering.
Academic Year	1993

This thesis presents a technique to design instrumentation amplifier which has never been presented. Generally, an instrumentation amplifier uses the voltage-to-current circuit. However, in this thesis, a current conveyor circuit has been used. The proposed design idea aims at the use of CMOS technology which is available and this circuit can be implemented in integrated circuit form. This thesis also presents the computer aided calculation and the characteristics of this circuit are carried out.

บทที่ 1

บทนำ

1.1 วัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์

ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ มุ่งเน้นในการพัฒนาวงจรรายเครื่องมือวัดหรือที่เรียกว่า วงจรรายแบบอินสทรูเมนต์ให้มีสมรรถนะสูง โดยการทำงานของวงจรมีอยู่ในรูปของกระแส เป็นผลให้ผลตอบแทนทางความถี่ ทั้งทางด้านอัตราขยายความแตกต่างและอัตราขยายสัญญาณรวมมีค่าสูง ซึ่งในวงจรรายแบบอินสทรูเมนต์แบบทั่วไปที่มีการทำงานในรูปของศักดา จะมีผลตอบแทนทางความถี่ทั้งสองด้านนี้ต่ำมาก ดังนั้นในการประยุกต์ใช้งาน จึงถูกจำกัดในช่วงสัญญาณความถี่ต่ำ ๆ เท่านั้น วงจรรายแบบอินสทรูเมนต์ที่ได้พัฒนาขึ้นนี้จะใช้หลักการออกแบบวงจรรวมเป็นหลัก และสามารถควบคุมอัตราขยายสัญญาณความแตกต่างด้วยความต้านทานจากภายนอก และ/หรือกระแสควบคุมจากภายนอก ผลตอบแทนทางความถี่ของวงจรมีค่าคงที่ที่ทุกค่าอัตราขยาย

1.2 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์นี้ แบ่งออกเป็น 5 บท ดังรายละเอียดต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงวัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงหลักการของวงจรรายแบบอินสทรูเมนต์แบบทั่วไป ที่มีการทำงานของวงจรมีอยู่ในรูปของศักดา

บทที่ 3 กล่าวถึงหลักการของวงจรรายแบบอินสทรูเมนต์แบบที่มีการทำงานของวงจรมีอยู่ในรูปของกระแสที่ได้พัฒนาขึ้น โดยใช้วงจรรายพานกระแสเป็นหลัก และผลการทดลอง

บทที่ 4 กล่าวถึงหลักการของวงจรรายแบบอินสทรูเมนต์อีกแบบหนึ่งที่ใช้หลักการของวงจรมีเปลี่ยนศักดาเป็นกระแส และผลการทดลอง

บทที่ 5 บทสรุปและแนวทางในการทำวิจัยต่อจากวิทยานิพนธ์นี้

บทที่ 2

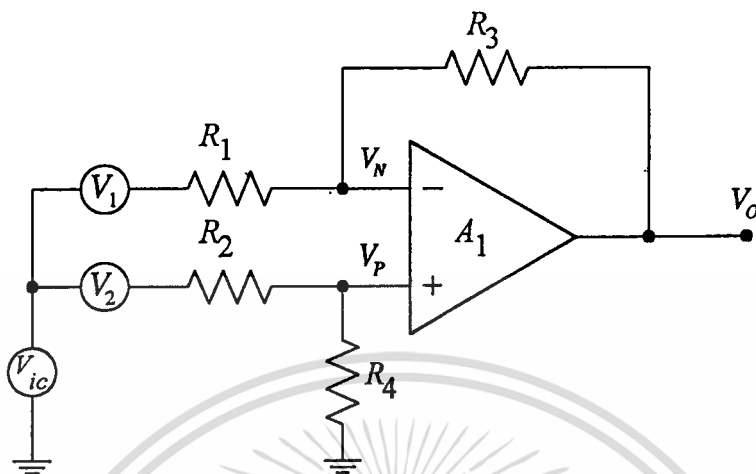
หลักการของวงจรขยายแบบอินสทรูเมนต์

2.1 บทนำ

วงจรขยายแบบอินสทรูเมนต์ เป็นวงจรที่มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางทั้งในด้านอุตสาหกรรมและทางการแพทย์ วงจรขยายแบบอินสทรูเมนต์จะใช้ในงานขยายสัญญาณจากแหล่งจ่ายสัญญาณที่มีพลังงานต่ำมาก ๆ ที่สามารถเกิดการรบกวนจากสัญญาณอื่น ๆ ที่ไม่ต้องการได้ง่าย เช่น สัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิล สเตนเกจ โพลีเมอร์ RTD สัญญาณไฟฟ้าจากกล้ามเนื้อ คลื่นสมองหรือคลื่นหัวใจ เป็นต้น ค่าความต้านทานภายในของแหล่งจ่ายสัญญาณดังที่ได้กล่าวมานี้จะมีค่าที่ค่อนข้างจะสูงไม่เป็นไปตามอุดมคติ เพื่อป้องกันการลดทอนของสัญญาณจากต้นกำเนิดสัญญาณ อันเนื่องมาจากความต้านทานจุดเข้าของวงจรขยายสัญญาณ วงจรขยายแบบอินสทรูเมนต์จึงต้องมีความต้านทานจุดเข้าที่สูงและยังต้องมีการลดทอน หรือแยกเอาสัญญาณรบกวนออกจากสัญญาณที่ต้องการได้ดี ซึ่งคุณสมบัตินี้จะสามารถพิจารณาได้จาก ความสามารถในการลดทอนร่วมหรืออัตราส่วนการลดทอนร่วม (Common mode rejection ratio) หรือ CMRR ซึ่งจะแสดงในค่าของอัตราส่วนระหว่างอัตราขยายความแตกต่างและอัตราขยายร่วม

2.2 วงจรขยายความแตกต่างแบบพื้นฐาน

วงจรขยายความแตกต่าง เป็นวงจรพื้นฐานหนึ่งที่ใช้สำหรับขยายสัญญาณความแตกต่างของสัญญาณจุดเข้า 2 สัญญาณ และให้สัญญาณจุดออกจุดเดียวซึ่งจะเป็นผลให้สัญญาณจุดออกที่ได้จะมีค่าของความแตกต่างของสัญญาณจุดเข้า และค่าสัญญาณร่วมจะถูกขจัดออกไป ค่าสัญญาณร่วมนี้ อาจจะเป็นสัญญาณรบกวนหรือสัญญาณไฟตรงที่แผงมาจากสัญญาณจุดเข้า วงจรขยายความแตกต่างแสดงในรูปที่ 2.2.1 โดยที่ V_1 และ V_2 คือสัญญาณจุดเข้า ส่วน V_{iC} คือสัญญาณจุดเข้าร่วม ความสัมพันธ์ระหว่างศักดาจุดออก V_0 และศักดาจุดเข้า V_1 และ V_2 เมื่อ $V_{iC} = 0$ ซึ่งก็คือ อัตราขยายความแตกต่างและสามารถหาได้ดังนี้



รูปที่ 2.2.1 วงจรขยายความแตกต่างแบบพื้นฐาน

ที่จุด V_N

$$\frac{(V_1 - V_N)}{R_1} = \frac{(V_N - V_o)}{R_3} \quad (2.2.1)$$

$$V_N \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} \right) = \frac{V_1 - V_o}{R_1 - R_3} \quad (2.2.2)$$

$$V_N = \frac{R_3}{R_1 + R_3} V_1 - \frac{R_1}{R_1 + R_3} V_o \quad (2.2.3)$$

ที่จุด V_P

$$\frac{(V_2 - V_P)}{R_2} = \frac{V_P}{R_4} \quad (2.2.4)$$

$$\frac{V_2}{R_2} = V_P \left(\frac{R_2 + R_4}{R_2 R_4} \right) \quad (2.2.5)$$

$$V_P = \frac{R_4}{R_2 + R_4} V_2 \quad (2.2.6)$$

จากคุณสมบัติของออปแอมป์จะได้ว่า $V_N = V_P$ ดังนั้น จากสมการที่ (2.2.3) และ (2.2.6) จะได้

$$\frac{R_4}{R_2 + R_4} V_2 = \frac{R_3}{R_1 + R_3} V_1 - \frac{R_1}{R_1 + R_3} V_o \quad (2.2.7)$$

$$V_o = \frac{R_3}{R_1} V_1 - \frac{R_4 (R_1 + R_3)}{R_1 (R_2 + R_4)} V_2 \quad (2.2.8)$$

ถ้ากำหนดให้ $R_1=R_2$ และ $R_3=R_4$ จากสมการที่ (2.2.8) จะได้

$$A_d = \frac{V_o}{(V_1 - V_2)} = \frac{R_3}{R_1} \quad (2.2.9)$$

สำหรับในกรณี

ของอัตราขยายร่วมจะสามารถหาได้โดยให้ $V_1=V_2=0$ ซึ่งจะได้ศักดา V_{iC} เป็น สัญญาณจุดเข้า จากสมการที่ (2.2.3) และ (2.2.6) จะได้

$$A_c = \frac{V_o}{V_{iC}} = \frac{R_3 R_2 - R_1 R_4}{R_1 (R_2 + R_4)} \quad (2.2.10)$$

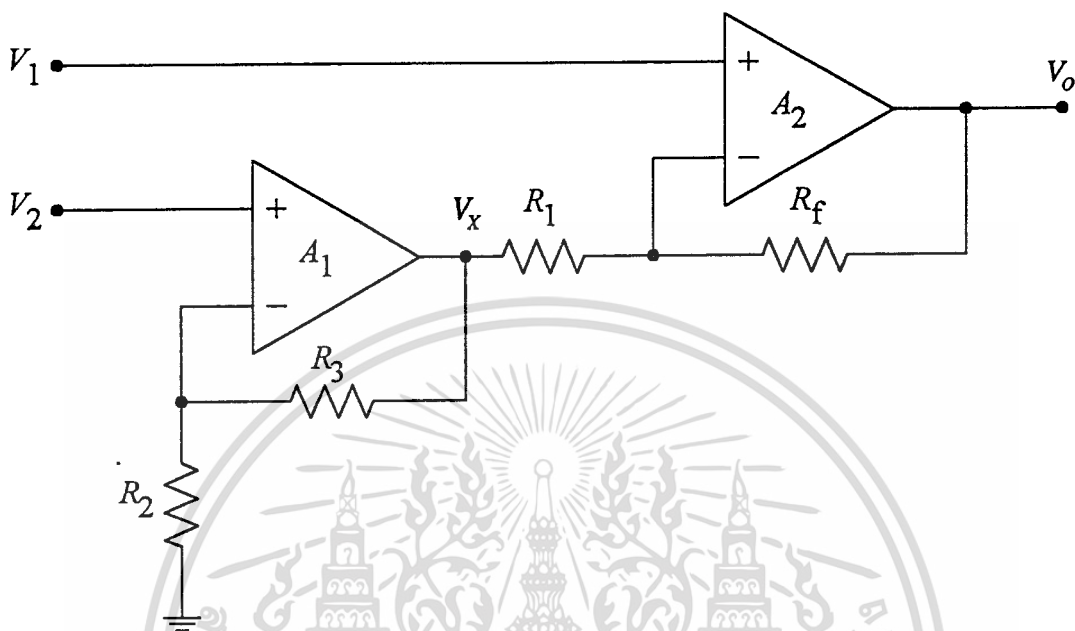
จากสมการที่ (2.2.10) จะได้ว่า ถ้าต้องการให้อัตราขยายร่วมมีค่าน้อยที่สุด ค่า R_3 และ R_2 จะต้องมีค่าที่ใกล้เคียงกับ R_1 และ R_4 มากที่สุด

สำหรับค่าอัตราส่วนการทดลองทอนร่วม CMRR จะมีค่าเท่ากับ

$$CMRR = \frac{A_d}{A_c} = \frac{(R_2 + R_4)}{(R_3 R_2 - R_1 R_4)} \quad (2.2.11)$$

2.3 วงจรขยายความแตกต่างแบบความต้านทานจุดเข้าสูง

วงจรขยายความแตกต่างแบบพื้นฐาน จะมีค่าความต้านทานจุดเข้าที่มีค่าไม่สูงมากนัก ในขณะที่การประยุกต์ใช้งานโดยทั่วไป ต้องการวงจรขยายความแตกต่างที่มีค่าความต้านทานจุดเข้าที่สูงจะแสดงในรูปที่ 2.3.1 ซึ่งสามารถที่จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนของวงจรขยายแบบบวกและส่วนของวงจรขยายความแตกต่าง จากรูปที่ 2.3.1 สามารถที่จะหาอัตราขยายของวงจรได้ดังนี้



รูปที่ 2.3.1 วงจรขยายความแตกต่างแบบความต้านทานจุดเข้าสูง

ศักดา V_X จะมีค่าเท่ากับ

$$V_x = \left(1 + \frac{R_3}{R_2}\right) V_2 \quad (2.3.1)$$

และศักดา V_0 จะมีค่าเท่ากับ

$$V_o = -\frac{R_f}{R_1} V_x + \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) V_1 \quad (2.3.2)$$

จากสมการที่ (2.3.1) และ (2.3.2) จะได้

$$V_o = -\left(\frac{R_f}{R_1}\right) \left(1 + \frac{R_3}{R_2}\right) V_2 + \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) V_1 \quad (2.3.4)$$

ถ้ากำหนดให้ $R_1=R_3$ และ $R_2=R_f$ จะได้

$$V_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right)(V_1 - V_2) \quad (2.3.5)$$

$$A_d = \frac{V_o}{(V_1 - V_2)} = 1 + \frac{R_f}{R_1} \quad (2.3.6)$$

จากสมการที่ (2.3.6) จะได้ว่าค่าอัตราขยายความแตกต่าง A_d สามารถที่จะแปรค่าได้โดยการแปรค่า R_f หรือ R_1 แต่เนื่องจากการแปรค่าอัตราขยายนี้จะต้องแปรค่าความต้านทานครั้งละ 2 ตัว ซึ่งเป็นการไม่สะดวกจึงได้มีการปรับปรุงวงจรขึ้นมาใหม่ คือวงจรขยายแบบอินสทรูเมนต์

2.4 วงจรขยายแบบอินสทรูเมนต์

วงจรขยายแบบอินสทรูเมนต์จะเป็นวงจรขยายความแตกต่างที่ได้พัฒนาขึ้น เพื่อให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับวงจรขยายความแตกต่างในอุดมคติ และสามารถที่จะแปรค่าอัตราขยายได้ง่าย วงจรขยายแบบอินสทรูเมนต์แสดงในรูปที่ 2.4.1 ซึ่งจะประกอบไปด้วยออปแอมป์ 3 ตัว และแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกจะเป็นออปแอมป์ A_1 และ A_2 จะเป็นวงจรขยายแบบบวกที่สามารถแยกเขียนได้ในรูปที่ 2.4.2 ส่วนที่สองจะเป็นวงจรขยายความแตกต่างแบบพื้นฐาน ในการหาค่าจุดออก V_3 และ V_4 ของออปแอมป์ A_1 และ A_2 สามารถหาได้ดังนี้

จากรูปที่ 2.4.2(ก) จะได้

$$V_3 = \frac{2R_4 + R_5}{R_4 + R_5}V_1 - \frac{R_4}{R_4 + R_5}V_4 \quad (2.4.1)$$

จากรูปที่ 2.4.2(ข) จะได้

$$V_4 = \frac{2R_4 + R_5}{R_4 + R_5}V_2 - \frac{R_4}{R_4 + R_5}V_3 \quad (2.4.2)$$

จะได้ศักดาจุดออก V_{34} ของออปแอมป์ A_1 และ A_2 ดังนี้

$$V_{34} = V_3 - V_4 \quad (2.4.3)$$

$$V_{34} = \frac{2R_4 + R_5}{R_4 + R_5}(V_2 - V_2) + \frac{R_4}{R_4 + R_5}(V_3 - V_4) \quad (2.4.4)$$

จากสมการที่ (2.4.4) จะได้

$$V_{34} = \frac{2R_4 + R_5}{R_5}(V_1 - V_2) \quad (2.4.5)$$

สำหรับอัตราขยายของวงจรขยายความแตกต่างแบบพื้นฐานของออปแอมป์ A_3

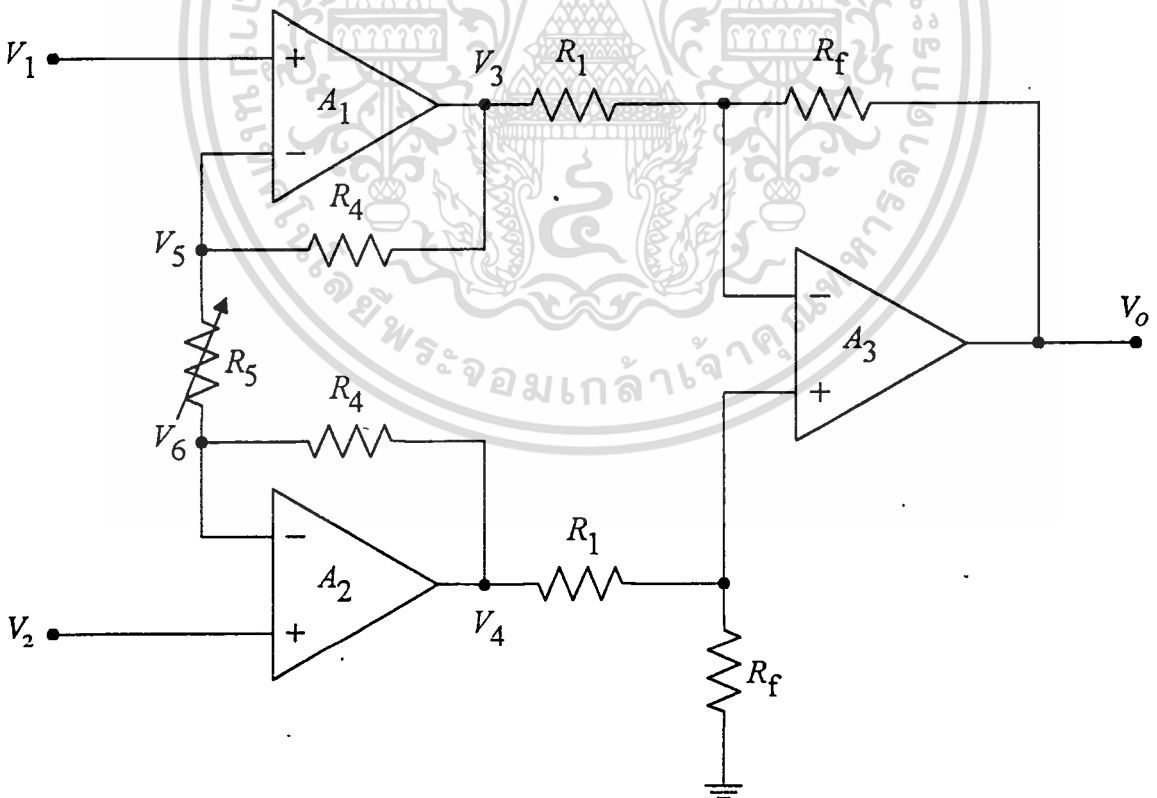
จะมีค่าเท่ากับ

$$\frac{V_o}{V_{34}} = -\frac{R_f}{R_1} \quad (2.4.6)$$

จากสมการที่ (2.4.5) และ (2.4.6) จะได้

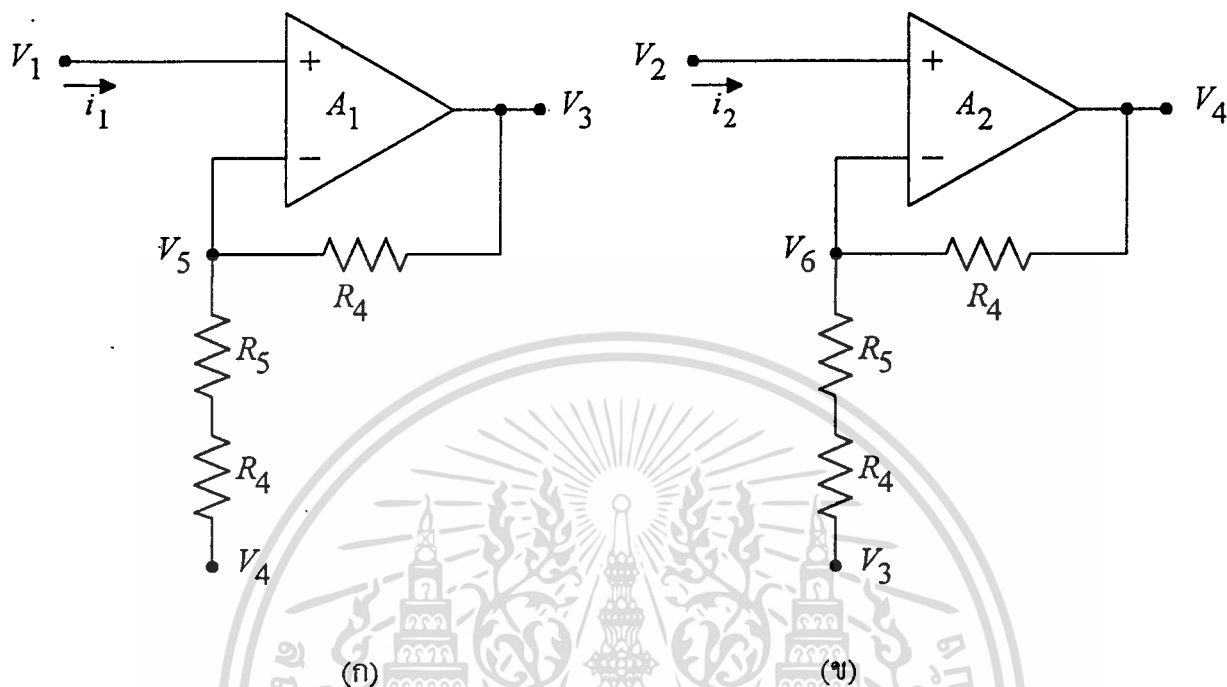
$$A_d = \frac{V_o}{(V_1 - V_2)} = -\left(\frac{2R_4 + R_5}{R_5}\right)\frac{R_f}{R_1} \quad (2.4.7)$$

$$= -\left(1 + \frac{2R_4}{R_5}\right)\left(\frac{R_f}{R_1}\right) \quad (2.4.8)$$



รูปที่ 2.4.1 วงจรขยายแบบอินสทรูเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4.2 (ก) วงจรส่วนแรกออปแอมป์ A_1 ของรูปที่ 2.4.1

(ข) วงจรส่วนแรกออปแอมป์ A_2 ของรูปที่ 2.4.1

จากสมการที่ (2.4.8) จะเห็นว่าอัตราขยายความแตกต่างของวงจรในรูปที่ 2.4.1 สามารถที่จะแปรค่าได้โดยการแปรค่า R_5 เพียงตัวเดียว สำหรับค่าความต้านทานจุดเข้าของ วงจรในรูปที่ 2.4.1 สามารถหาได้จากวงจรส่วนแรกในรูปที่ 2.4.2 โดยความต้านทานจุดเข้า R_{ix} ที่พิจารณาทางจุด V_x เมื่อให้ $V_3=0$ ของรูปที่ 2.4.2(ก) จะหาได้ดังนี้

$$V_1 - V_5 = \frac{V_3}{A_d} \quad (2.4.9)$$

เมื่อ A_d คืออัตราขยายของตัวออปแอมป์ A_1 และ $R_i \gg R_5 + R_4$ เมื่อ R_i คือความต้านทานจุดเข้าของออปแอมป์

$$V_5 = \frac{R_5 + R_4}{2R_4 + R_5} V_3 \quad (2.4.10)$$

แทนสมการที่ (2.4.10) ลงในสมการที่ (2.4.9) จะได้

$$V_1 = \frac{V_3}{A_d} + \frac{R_5 + R_4}{2R_4 + R_5} V_3 \quad (2.4.11)$$

$$V_3 = \frac{A_d(2R_4 + R_5)V_1}{(2 + A_d)R_4 + (1 + A_d)R_5} \quad (2.4.12)$$

เนื่องจากความต้านทานจุดเข้า $R_{ix} = V_1/i_1 = V_1/(V_1 - V_5)/R_i$ ดังนั้น จะได้

$$R_{ix} = R_i \frac{V_1}{V_3/A_d} \quad (2.4.13)$$

แทนค่าสมการที่ (2.4.12) ลงในสมการที่ (2.4.13) จะได้

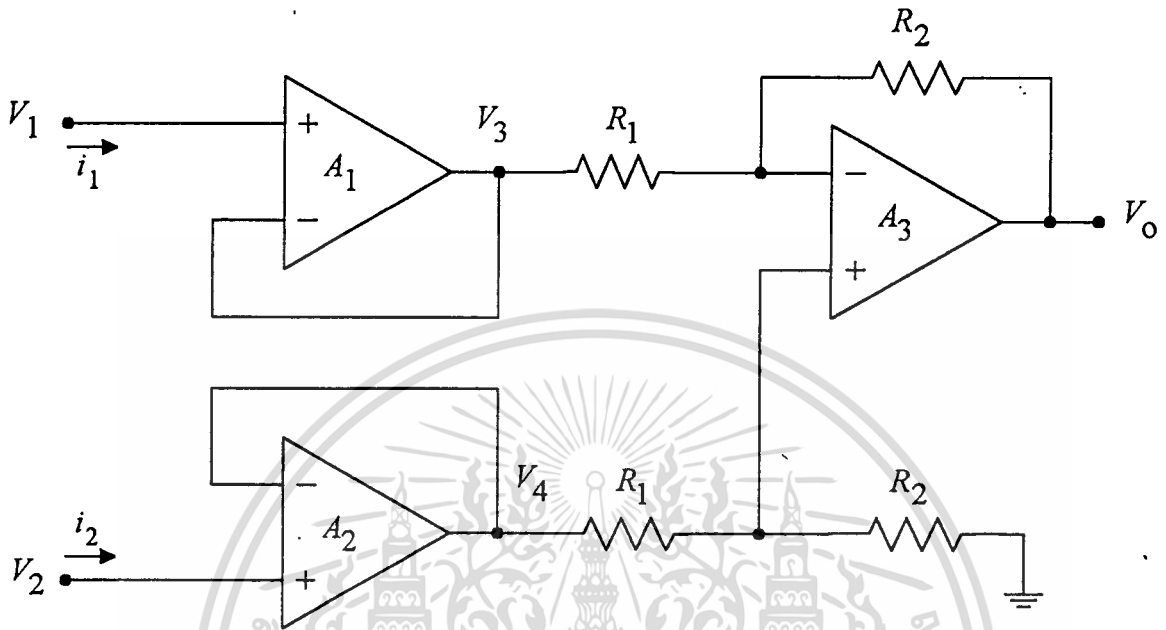
$$R_{ix} = A_d R_i \frac{(2 + A_d)R_4 + (1 + A_d)R_5}{A_d(2R_4 + R_5)} \quad (2.4.14)$$

และเนื่องจาก $A_d \gg 2$ ดังนั้น

$$R_{ix} = A_d R_i \frac{(R_4 + R_5)}{(2R_4 + R_5)} \quad (2.4.15)$$

จากสมการที่ (2.4.15) จะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานจุดเข้า R_{ix} จะมีค่าที่สูงมากและในทำนองเดียวกัน ความต้านทานจุดเข้าที่พิจารณาจากจุด V_2 ก็จะมีค่าที่เท่ากับกับความต้านทานจุดเข้า R_{ix}

สำหรับในกรณีที่ต้องการความต้านทาน จุดเข้าของวงจรขยายแบบอินสทรูเมนต์ ให้มีค่าที่สูงมากขึ้น สามารถที่จะทำได้โดยการเปลี่ยนวงจรส่วนแรกของวงจรในรูปที่ 2.4.1 ให้เป็นวงจรขยายแบบตามสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 2.4.3 สำหรับในกรณีนี้



รูปที่ 2.4.3 วงจรขยายแบบอินสทรูเมนต์ที่ชนิดความต้านทานจุดเข้าสูงมาก

ค่าอัตราขยายสัญญาณ โดยทั่วไปจะกำหนดให้คงที่ เนื่องจากการแปรค่าความต้านทานจะต้องแปรครั้งละสองตัว อัตราขยายความแตกต่างของวงจรจะมีค่าเท่ากับอัตราขยายความแตกต่างแบบพื้นฐานดังนี้

$$V_o = \frac{R_2}{R_1} (V_1 - V_2) \quad (2.4.16)$$

สำหรับความต้านทานจุดเข้าที่พิจารณาจากจุด V_1 สามารถหาได้ดังนี้

$$R_{i_1} = \frac{V_1}{i_1} = \frac{V_1 R_1}{V_1 - V_3} \quad (2.4.17)$$

เมื่อ R_i คือความต้านทานจุดเข้าของตัวออปแอมป์ A_1 และ $V_3 = (V_1 - V_3) A_d$ โดยที่ A_d คืออัตราขยายแบบรูปเปิดของออปแอมป์ A_1 ดังนั้น จากสมการที่ (2.4.17) จะได้

$$R_{ix} = \frac{V_1 R_i}{(1 + A_d - A_d) V_1} = R_i (1 + A_d) \quad (2.4.18)$$

จากสมการที่ (2.4.18) จะได้ว่าค่าความต้านทานจุดเข้า R_{ix} จะมีค่าที่สูงกว่าความต้านทานจุดเข้าของวงจรในรูปที่ 2.4.1 ดังในสมการที่ (2.4.15)

2.5 สรุป

วงจรขยายความแตกต่างที่ได้กล่าวผ่านมานี้ เป็นวงจรขยายที่ใช้โอปแอมป์เป็นหลัก การทำงานของวงจรจะอาศัยการป้อนกลับด้วยความต้านทาน ซึ่งโดยปกติความต้านทานที่ใช้ในแต่ละตัวจะมีค่าผิดพลาดในตัวเองอยู่ เป็นผลให้เกิดค่าผิดพลาดขึ้น โดยเฉพาะค่าอัตราส่วนการลดทอนร่วม (CMRR) จะมีค่าที่ไม่เป็นไปตามอุดมคติ ทำให้การประยุกต์การใช้งานไม่เป็นไปตามที่ได้คาดหวังไว้ ประกอบกับตัวโอปแอมป์เองจะมีผลตอบสนองทางความถี่ที่ต่ำไม่เหมาะสมกับการใช้งานในย่านที่มีสัญญาณความถี่ที่สูงได้ จึงได้มีการพัฒนางจรขึ้นใหม่เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวซึ่งจะได้กล่าวถึงในบทต่อไป

บทที่ 3

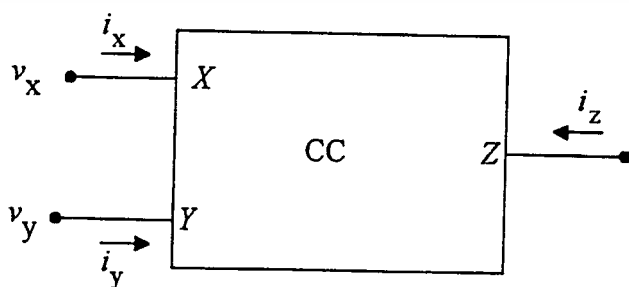
หลักการของวงจรขยายแบบอินสทรูเมนต์ที่ชนิดทำงานด้วยกระแส

3.1 บทนำ

วงจรขยายแบบอินสทรูเมนต์ที่ได้กล่าวถึงในบทที่ 2 เป็นวงจรขยายแบบอินสทรูเมนต์ชนิดทำงานด้วยศักดา ซึ่งใช้วงจรรวมออปแอมป์เป็นหลัก ออปแอมป์จะเป็นวงจรรวมที่มีขนาดวงจรที่ใหญ่และมีผลตอบสนองทางความถี่ไม่สูงนัก เป็นผลให้ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรขยายแบบอินสทรูเมนต์ที่ใช้ออปแอมป์เป็นหลัก มีผลตอบสนองทางความถี่ที่ต่ำ โดยเฉพาะผลตอบสนองทางความถี่ของอัตราส่วนการลดทอนร่วมจะมีค่าที่ต่ำมาก [1] ไม่เหมาะสำหรับการใช้งานที่ความถี่สูงได้ โดยทั่วไปผลตอบสนองทางความถี่ของอัตราส่วนการลดทอนร่วมจะมีค่าประมาณ 100 Hz ในบทที่ 3 นี้จึงได้นำเสนอวงจรขยายแบบอินสทรูเมนต์อีกแบบหนึ่งขึ้น การทำงานของวงจรจะอยู่ในรูปของกระแสทั้งหมด และมีผลตอบสนองทางความถี่ที่สูง โดยเฉพาะผลตอบสนองทางความถี่ของอัตราส่วนการลดทอนร่วม วงจรหลักที่ใช้สำหรับการพัฒนาวงจรขยายแบบอินสทรูเมนต์ชนิดทำงานด้วยกระแสจะเป็นวงจรสายพานกระแสชนิดที่สอง (Second generation current conveyor, CCI)

3.2 วงจรสายพานกระแส

วงจรสายพานกระแสจะเป็นวงจรที่ได้รับการพัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 1970 โดย Sedra และ Smith [2] วงจรสายพานกระแสจะมีสัญลักษณ์แสดงในรูปที่ 3.2.1 และมีคุณสมบัติแสดงในสมการที่ (3.2.1) และ (3.2.2)



รูปที่ 3.2.1 สัญลักษณ์ของวงจรสายพานกระแส

$$\begin{bmatrix} i_y \\ v_x \\ i_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & \pm 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_y \\ i_x \\ v_z \end{bmatrix} \quad (3.2.1)$$

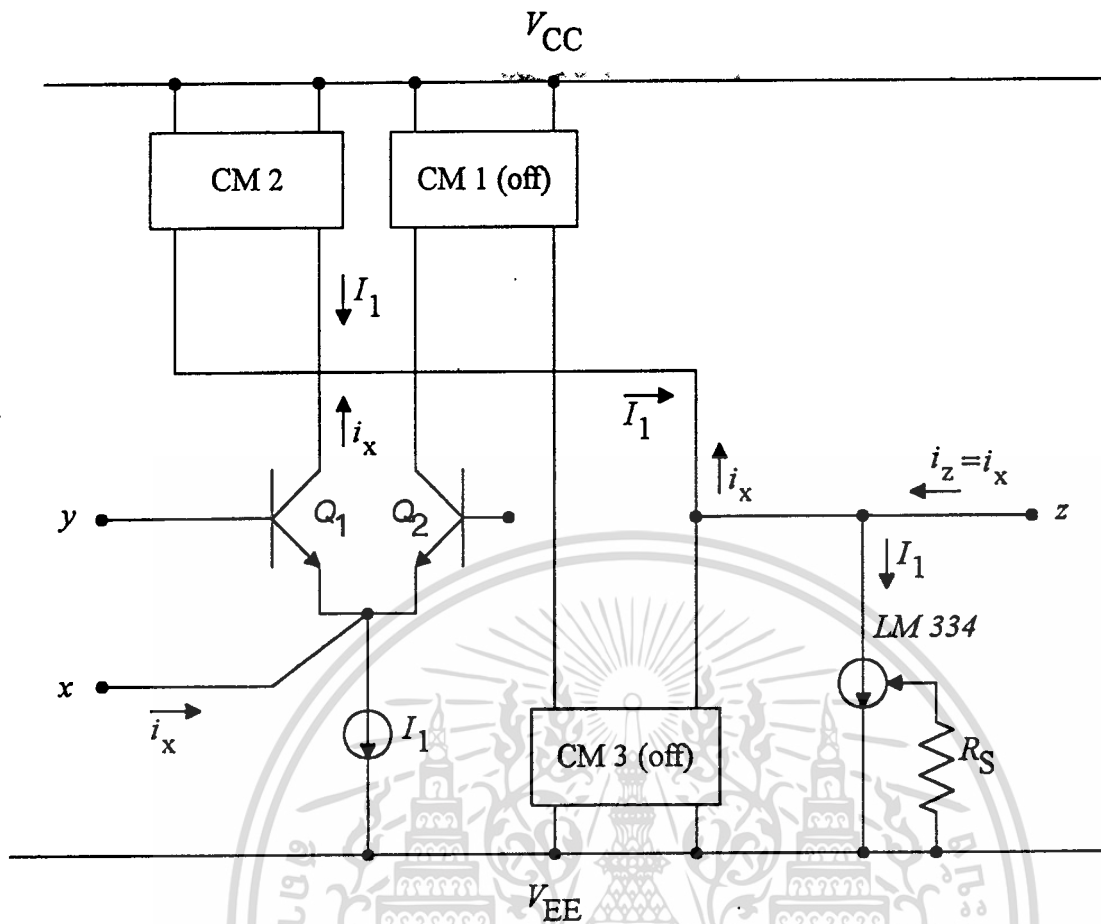
และ

$$\begin{bmatrix} i_y \\ v_x \\ i_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & \pm 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_y \\ i_x \\ v_z \end{bmatrix} \quad (3.2.2)$$

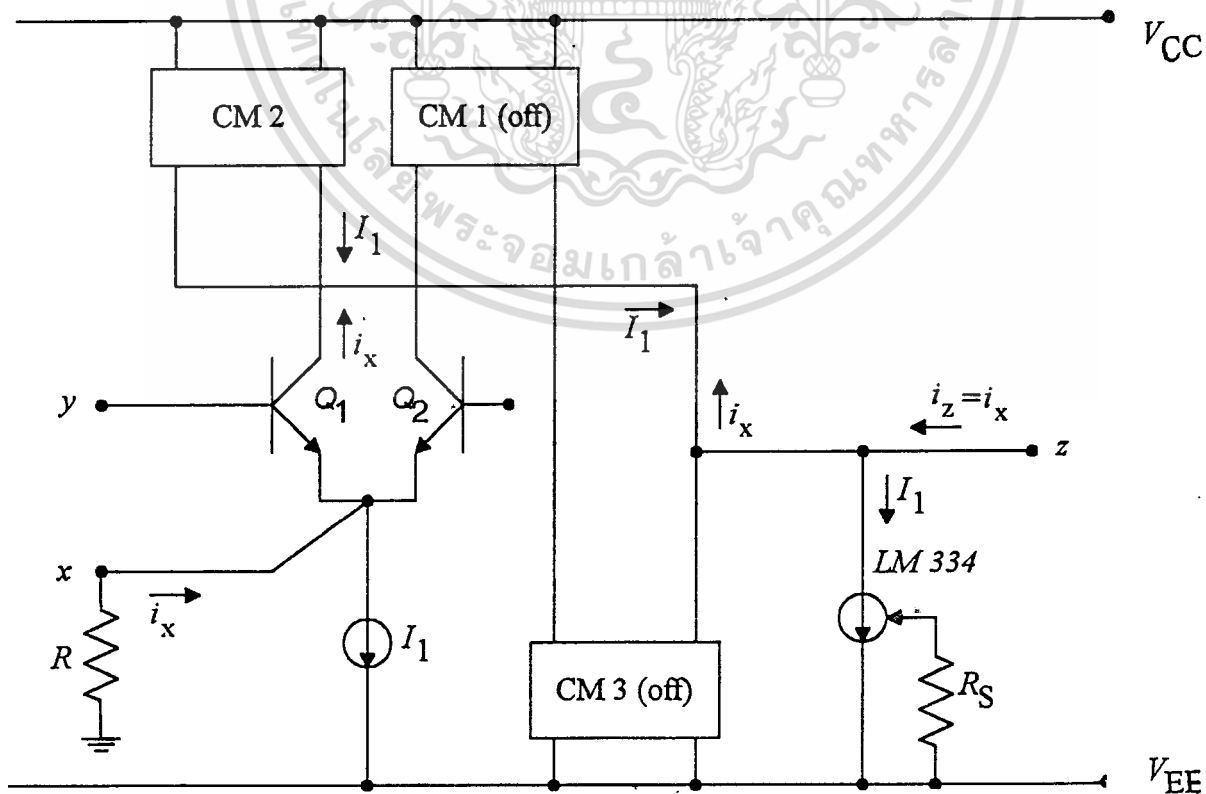
โดยที่สมการที่ (3.2.1) เป็นคุณสมบัติของวงจรสายพานกระแสชนิดที่หนึ่งและในสมการที่ (3.2.2) เป็นคุณสมบัติของวงจรสายพานกระแสชนิดที่สอง ในที่นี้จะใช้วงจรสายพานกระแสชนิดที่สองเป็นหลักและจะเรียกแต่เพียงวงจรสายพานกระแส วงจรสายพานกระแสที่ได้นำมาพัฒนาเป็นวงจรขยายอินสทรูเมนต์จะมี 2 วงจร คือวงจรสายกระแสที่พัฒนามาจากวงจรขยายความนำ (OTA) ที่เป็นไอซีสำเร็จเบอร์ CA3280 และวงจรสายพานกระแสแบบใช้ CMOS

3.2.1 วงจรสายพานกระแสแบบใช้ OTA

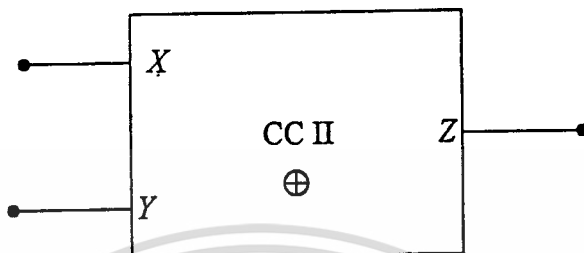
วงจรสายพานกระแสแบบใช้ OTA เบอร์ CA3280 [3] แสดงในรูปที่ 3.2.2 โดยคุณสมบัติของ OTA นี้จะมีขาสำหรับต่ออุปกรณ์ภายนอกระหว่างขาอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 ถ้าให้ทรานซิสเตอร์ Q_2 หยุคนำกระแสโดยปล่อยให้ขาเบสของทรานซิสเตอร์ Q_2 ลอย วงจรสะท้อนกระแส CM1 และ CM3 จะหยุคนำกระแสด้วย เมื่อต่อวงจรดึงกระแสคงที่ LM334 เข้าที่จุดออกของสัญญาณโดยมีอัตราการดึงกระแสเท่ากับ I_1 วงจรในรูปที่ 3.2.2 จะทำหน้าที่เป็นวงจรสายพานกระแส ซึ่งมีสัญลักษณ์แสดงในรูปที่ 3.2.3(ข) การทำงานของวงจรสายพานกระแสจะสามารถอธิบายได้ดังนี้ จากรูปที่ 3.2.3(ก) เมื่อ R คือความต้านทานที่ต่อเข้าที่ขา อิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q_2 หรือที่จุด X ถ้าป้อนศักดา V_y เข้าที่จุด y ศักดา V_y จะถูกส่งผ่านไปยังจุด X ด้วยค่าขนาดที่เท่ากับ V_y เนื่องจากทรานซิสเตอร์ Q_1 จะต่อเป็นวงจรขยายแบบตามศักดา ดังนั้น ศักดา $V_x = V_y$ จะตกคร่อมความต้านทาน R ซึ่งจะได้กระแส $i_x = V_x/R$ กระแส i_x จะถูกส่งผ่านไปยังขาคอลเล็กเตอร์ของ Q_1



รูปที่ 3.2.2 วงจรสายพานกระแสแบบใช้ OTA



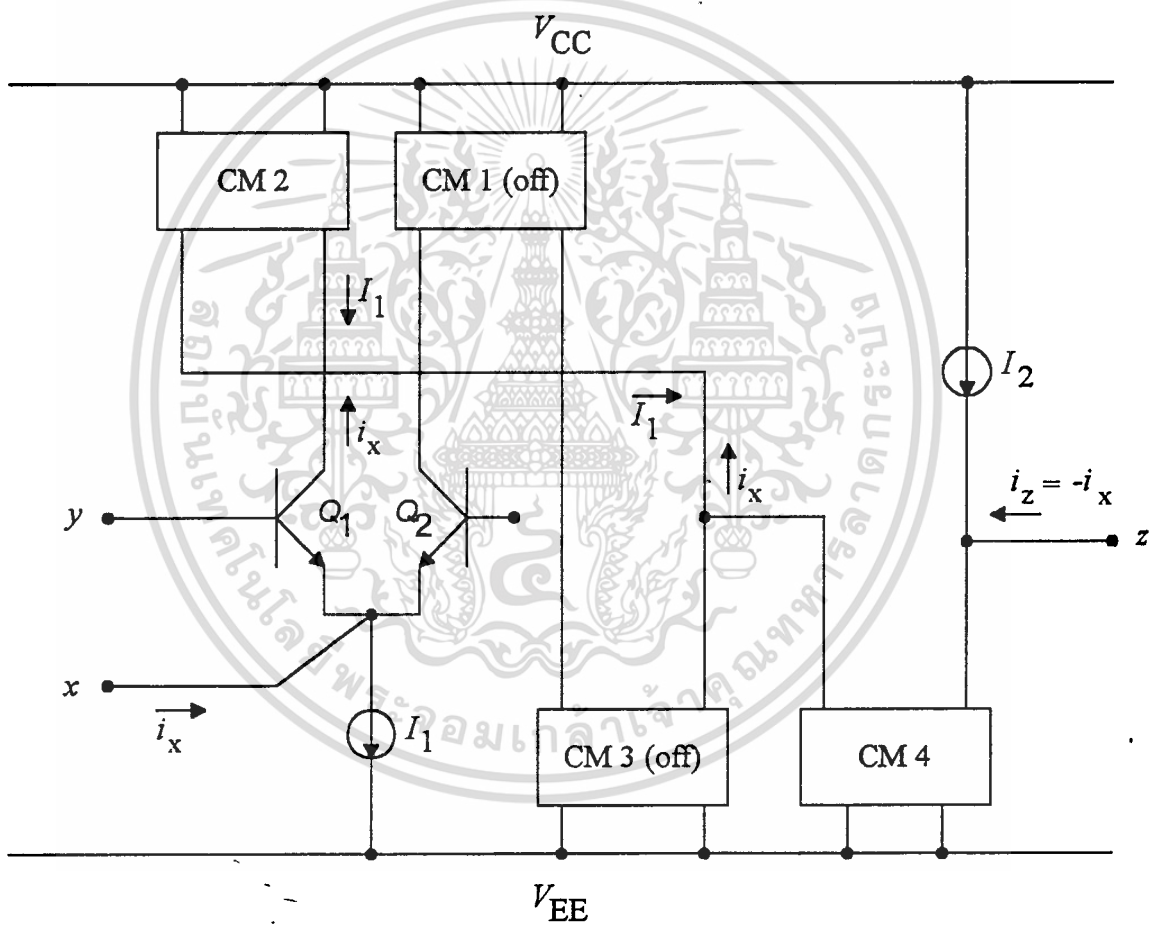
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับอาจารย์ผู้สอนเท่านั้น ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 รูปที่ 3.2.3 (ก) การทำงานของวงจรสายพานกระแส
 ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2.3 (ข) สัญลักษณ์วงจรสายพานกระแส

และต่อไปยังวงจรสะท้อนกระแส CM2 โดยกระแส i_x จะถูกสะท้อนไปยังจุด z เป็นกระแส i_z

ในรูปที่ 3.2.2 กระแส i_x และ i_z จะมีทิศทางที่เหมือนกัน ดังนั้น จะเรียกวจรสายพานกระแสนี้ว่าสายพานกระแสแบบบวก (CCII⊕) ในกรณีที่ต้องการวงจรสายพานกระแสที่มีกระแส $i_z = -i_x$ จะสามารถทำได้โดยการเพิ่มวงจรสะท้อน CM4 เข้าไปในรูปที่ 3.2.2 ดังแสดงในรูปที่ 3.2.4 การทำงานของวงจรสามารถอธิบายได้ดังนี้ เมื่อให้ศักดา V_y เข้าที่จุด y ศักดาจุด y จะถูกส่งผ่านไปยังจุด x เป็นผลให้เกิดกระแส $i_x = V_x/R$ กระแส i_x จะถูกส่งผ่านไปยังวงจรสะท้อนกระแส CM4 ด้วยวงจรสะท้อนกระแส CM2 ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ $I_1 - i_x$ ดังนั้นกระแส i_z ที่จุด z จะมีค่าเท่ากับ $-i_x$ จะเห็นได้ว่ากระแส $i_z = -i_x$ จะมีทิศทางที่ตรงข้ามกันและจะเรียกวจรสายพานกระแสนี้ว่าวงจรสายพานกระแสแบบลบ



รูปที่ 3.2.4 วงจรสายพานกระแสแบบลบโดยใช้ OTA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับสมรรถนะของวงจรสายพานกระแสแบบใช้ OTA จะพิจารณาได้ดังนี้ ความต้านทานจุดเข้า (r_y) ที่พิจารณาเข้าไปยังจุด y จะมีค่าเท่ากับความต้านทานจุดเข้าของวงจรตามศักดา [4] ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ

$$r_y = (\beta_2 + 1)(r_{e2} + R) \quad (3.2.3)$$

เมื่อ r_{e2} มีค่าเท่ากับ V_T / I_1 โดยที่ V_T คือค่าศักดาความร้อน ส่วนความต้านทานจุดออก (r_x) เมื่อพิจารณาเข้าไปยังจุด x จะมีค่าเท่ากับ [5]

$$r_x = r_{e2} \quad (3.2.4)$$

ส่วนความต้านทานจุดออกที่พิจารณาเข้าไปยังจุด z จะมีค่าสูงมาก เนื่องจากจะเป็นการขนานกันของความต้านทานที่ขาคอลเล็กเตอร์ของวงจรสะท้อนกระแส CM2 และตัวดึงกระแสคงที่ LM334 ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างศักดา V_y และ V_x ซึ่งจะมีความสัมพันธ์เหมือนกับวงจรตามศักดา [4] และ สามารถหาได้ดังนี้

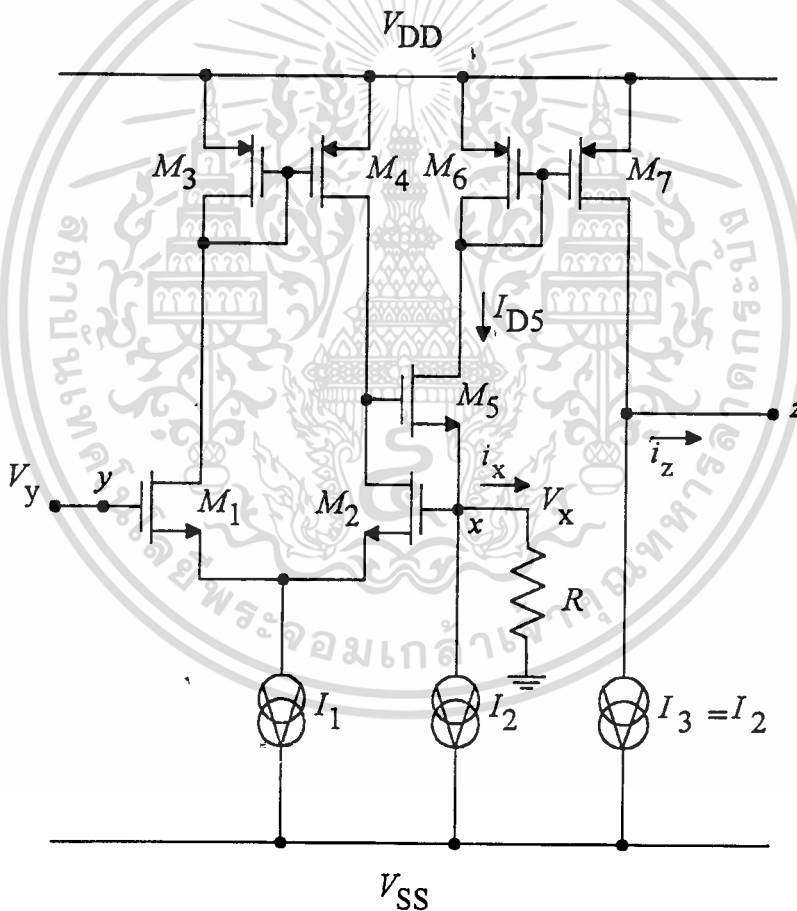
$$V_x = \frac{R}{R + r_{e2}} V_y \quad (3.2.5)$$

ศักดา V_x และ V_y จะมีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด เมื่อค่าความต้านทาน $R \gg r_{e2}$

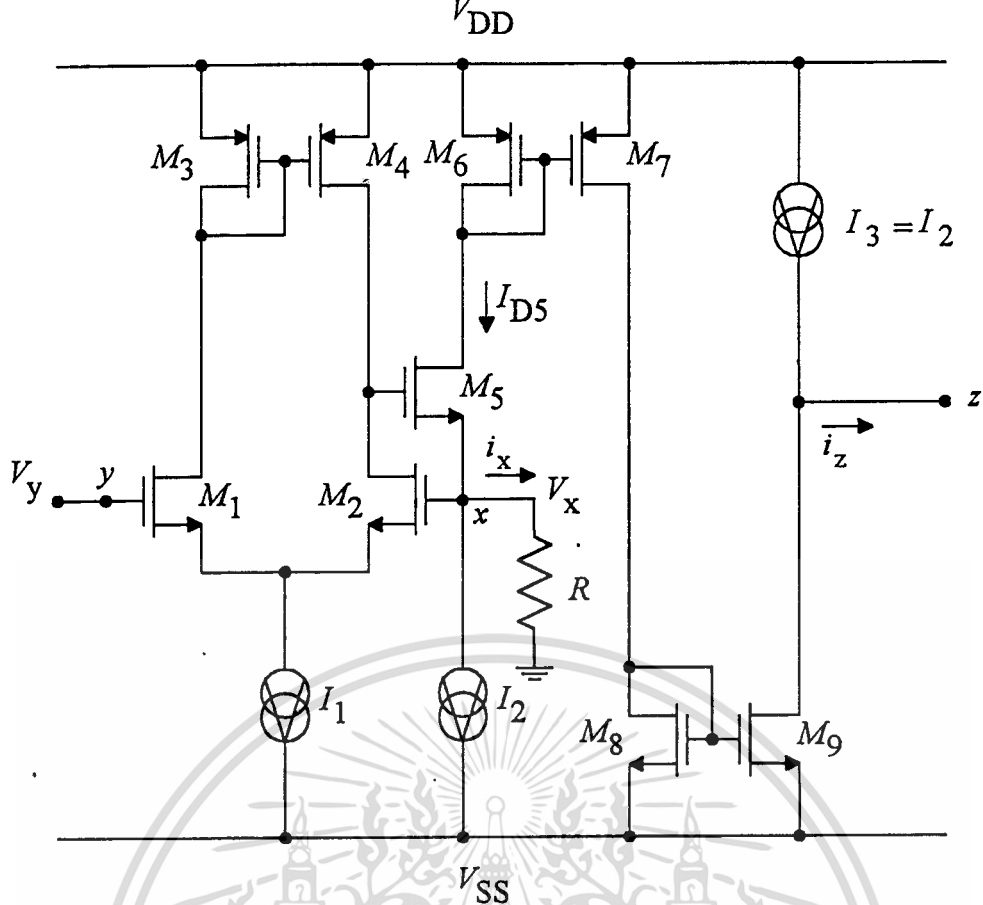
3.2.2 วงจรสายพานกระแสแบบใช้มอสทรานซิสเตอร์

วงจรสายพานกระแสแบบใช้มอสทรานซิสเตอร์ แสดงในรูปที่ 3.2.5 โดยที่มอสทรานซิสเตอร์ในแต่ละตัวจะทำงานในช่วงอิ่มตัว (Saturation region) และมอสทรานซิสเตอร์ M_1, M_2, M_3 และ M_4 และ $M_6 - M_7$ มีคุณสมบัติที่เหมือนกันทุกประการ วงจรสะท้อนกระแส M_3-M_4 และ M_6-M_7 จะมีอัตราการส่งผ่านกระแสเท่ากับหนึ่ง วงจรสะท้อนกระแส M_3-M_4 จะกำหนดให้กระแสเดรนของทรานซิสเตอร์ M_1 และ M_2 มีค่าเท่ากัน เป็นผลให้ศักดาคกร่อมระหว่างขาเกตและขาซอร์สมีค่าเท่ากันด้วย ($V_{GS1} = V_{GS2}$) เมื่อป้อนศักดา V_y เข้าที่จุด Y ศักดา V_y นี้จะถูกส่งผ่านไปยังจุด X ($V_x = V_y$) ทรานซิสเตอร์ M_5 จะทำหน้าที่ส่งผ่านกระแสจากขาซอร์สไปยังขาเดรน ถ้าศักดา $V_y > 0$ และ R คือความต้านทานที่ต่อระหว่างพอร์ท X ลงศักดาดิน จะได้

ได้กระแส i_x ที่ไหลผ่านความต้านทาน R ที่มีค่าเท่ากับ $i_x = V_y/R$ และกระแสเดรน I_{D5} ของทรานซิสเตอร์ M_5 จะมีค่าเท่ากับ $I_2 + i_x$ กระแส I_{D5} นี้จะถูกวงจรสะท้อนกระแส M_6 - M_7 ส่งผ่านไปยังพอร์ท z โดยมีตัวดึงกระแสคงที่ I_3 คือค่ากระแส I_2 ออกจากพอร์ท Z ซึ่งจะได้กระแสจุดออก i_z มีค่าเท่ากับผลต่างของกระแส $I_2 + i_x$ และ I_3 โดยจะมีค่าเท่ากับ i_x วงจรสายพานกระแสจะเป็นวงจรสายพานกระแสแบบบวก สำหรับวงจรสายพานกระแสแบบลบสามารถทำได้ดังแสดงในรูปที่ 3.2.6 โดยเพิ่มวงจรสะท้อนกระแส M_8 - M_9 เป็นตัวส่งผ่าน กระแส $I_2 + i_x$ ไปยังพอร์ท z โดยมีตัวจ่ายกระแสคงที่ I_3 ขดเซกกระแส I_2 เป็นผลให้กระแส i_z มีทิศทางที่ตรงข้ามกับกระแส i_x หรือ $i_z = -i_x$



รูปที่ 3.2.5 วงจรสายพานกระแสแบบใช้ทรานซิสเตอร์



รูปที่ 3.2.6 วงจรสายพานกระแสแบบลบ

สมรรถนะของวงจรสายพานกระแสในรูปที่ 3.2.5 สามารถหาได้ดังนี้ เนื่องจากตัวดึงกระแสที่ I_2 มีความต้านทานที่จุดออกสูงมาก ดังนั้นสามารถที่จะตัดผลของสัญญาณขนาดเล็กที่มีต่อตัวดึงกระแสที่ I_2 ออกไปได้ ความสัมพันธ์ระหว่างศักดา V_x และ V_y สามารถที่จะหาได้ดังนี้

$$V_x = \left[\frac{g_{m2}}{(g_{m2} + g_{d2} + g_{d4})} \right] V_y \quad (3.2.6)$$

เมื่อ g_{di} และ g_{mi} คือค่าความนำเดรนและค่าความนำของทรานซิสเตอร์ M_1 จากสมการที่ (3.2.6) จะเห็นได้ว่าศักดา V_x จะมีค่าใกล้เคียงกับ V_y เมื่อ $g_{m2} \gg (g_{d2} + g_{d4})$ ส่วนความต้านทานจุดออกที่พิจารณาจากพอร์ท x สามารถที่จะหาได้โดยการป้อนศักดา V_x เข้าที่พอร์ท x และพิจารณาค่าของกระแส i_x ที่ไหลเข้ายังพอร์ท x ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ

$$r_x = \frac{v_x}{i_x} \cong \frac{(g_{m1} + g_{m2})(g_{d2} + g_{d4})}{g_{m1} g_{m2} g_{m5}} \quad (3.2.7)$$

ส่วนความต้านทานจุดออกที่พิจารณาจากพอร์ท z จะสามารถประมาณได้ว่ามีค่าเท่ากับการขนานกันของความต้านทานจุดออกของวงจรสะท้อนกระแส $M_6 - M_7$ และตัวตั้งกระแสคงที่ I_3 ซึ่งสามารถที่จะเขียนได้ดังนี้

$$r_z = \frac{1}{g_{d7} + g_{d13}} \quad (3.2.8)$$

เมื่อ g_{d13} คือค่าความนำแคเรนของตัวตั้งกระแสคงที่ I_3

สำหรับผลตอบสนองต่อความถี่สูงของวงจรสายพานกระแสระหว่างกระแส i_x และศักดา v_y ซึ่งจะได้ดังนี้

$$\frac{I_x}{v_y} = \frac{1}{R} \left[1 - \frac{g_{d2} + g_{d4}}{g_{m2} + g_{d2} + g_{d4}} \right] \left[\frac{T_1 S + 1}{T_2 S + 1} \right] \quad (3.2.9)$$

โดยที่

$$T_1 = \frac{C_2(g_{d2} + g_{d4}) + C_5 g_{m2}}{g_{m2} g_{m5}}$$

$$T_2 = \frac{(C_2 + C_3)(g_{d2} + g_{d4}) + C_5 g_{m2}}{g_{m2} g_{m5}}$$

เมื่อ C_2 และ C_5 คือประจุที่เกิดขึ้นระหว่างขาเกตและซอร์ทของทรานซิสเตอร์ M_2 และ M_5 ตามลำดับ

ส่วนผลตอบสนองทางความถี่ที่พอร์ท z จะหาได้จาก

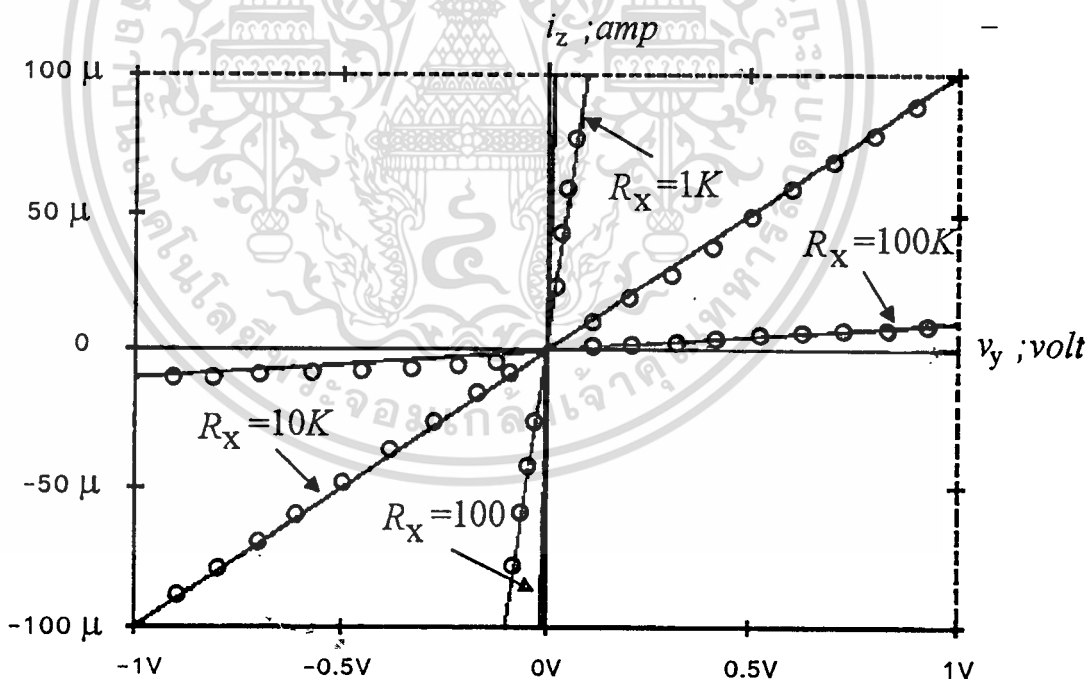
$$\frac{i_z}{i_x} = \frac{g_{m7}}{g_{m6} \left(\frac{C_6 S}{g_{m6}} + 1 \right)} = \frac{g_{m7}}{g_{m6} (T_3 S + 1)} \quad (3.2.10)$$

เมื่อ $C_6 = C_{gs6} + C_{gs7}$ และ C_{gsi} คือค่าประจุระหว่างขาเกตและซอร์ทของทรานซิสเตอร์ M_i จากสมการที่ (3.2.9) ต่อ T_1 และ T_2 จะมีค่าที่ใกล้เคียงกันซึ่งจะมีผลจำกัดทางความถี่ของวงจรสายพานกระแส้น้อยมาก ส่วนค่า T_3 จะมีค่าที่มากกว่า T_1 และ T_2 ซึ่งค่า T_3 นี้จะเป็นตัวจำกัดสมรรถนะทางความถี่ของวงจรสายพานกระแสในรูปแบบที่ 3.2.5

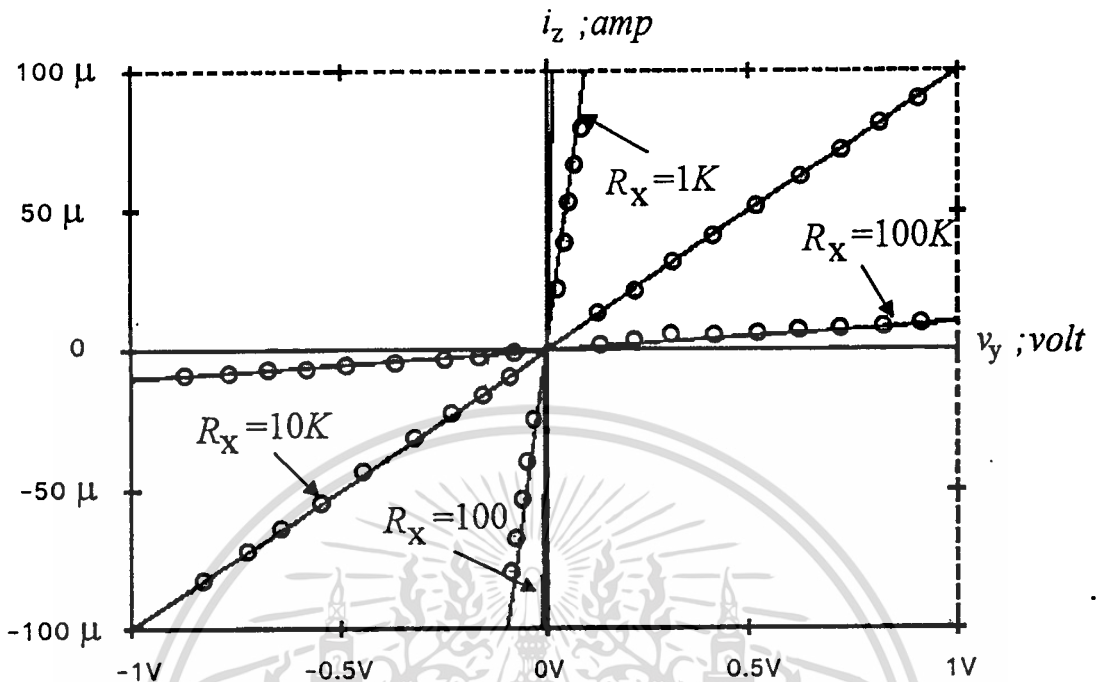
3.2.8 ผลการทดลองของวงจรสายพานกระแส

วงจรสายพานกระแสแบบใช้ OTA ได้ทดลองต่อวงจรขึ้นโดยใช้ไอซี OTA เบอร์ CA3280 และกำหนดให้วงจรจ่ายกระแสคงที่ LM334 มีกระแส $I_1=500\mu A$ ส่วนความต้านทาน $R=100\Omega, 1k\Omega, 10k\Omega$ และ $100k\Omega$ สำหรับวงจรสะท้อนกระแส CM4 ใช้วงจรสะท้อนกระแสสำเร็จรูปเบอร์ TL011 ในรูปที่ 3.2.7 เป็นผลการทดลองเมื่อแปรค่าศักดา V_y ที่พอร์ท Y

ส่วนผลการทดลองของวงจรสายพานกระแสแบบใช้มอสทรานซิสเตอร์ ได้ต่อวงจรขึ้นโดยใช้มอสทรานซิสเตอร์ CD4007 ส่วนวงจรจ่ายกระแสคงที่ $I_1=100\mu A$ และ $I_2=I_3=300\mu A$ สำหรับความต้านทาน $R=100\Omega, 1k\Omega, 10k\Omega$ และ $100k\Omega$ ในรูปที่ 3.2.8 แสดงผลการทดลองโดยการแปรค่าศักดา V_y ที่พอร์ท Y และพิจารณากระแส i_z



รูปที่ 3.2.7 ผลการทดลองของวงจรสายพานกระแสแบบใช้ OTA

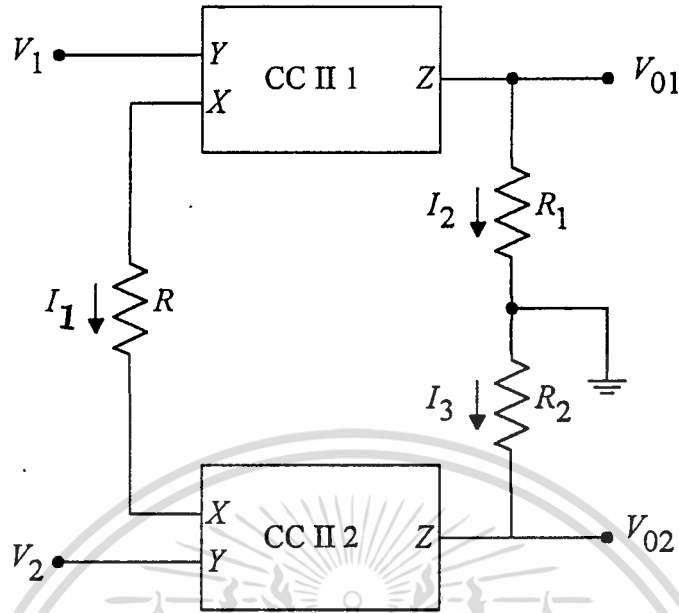


รูปที่ 3.2.8 ผลการทดลองของวงจรสายพานกระแสแบบใช้มอสทรานซิสเตอร์

3.3 วงจรขยายแบบอินสทรูเมนต์

3.3.1 หลักการเบื้องต้น

วงจรขยายแบบอินสทรูเมนต์แบบพื้นฐานแสดงในรูปที่ 3.3.1 จากคุณสมบัติของวงจรสายพานกระแส ถ้าศักดา V_y ถูกส่งผ่านไปยังพอร์ท X อย่างแม่นยำ หรือ $V_x = V_y$ และกระแส i_x ถูกส่งผ่านไปยังพอร์ท Z, $i_x = i_z$ ดังนั้น ศักดา V_1 และ V_2 จะถูกส่งไปต่อคร่อมความต้านทาน R เป็นผลให้เกิดกระแส I_1 ขึ้น ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ $(V_1 - V_2)/R$



รูปที่ 3.3.1 วงจรขยายแบบอินสทรูเมนต์

กระแส I_1 จะถูกส่งผ่านไปยังพอร์ต z โดยที่ $I_3 = I_2 = I_1$ ศักดาจุดออก V_{01} และ V_{02} จะมีค่าเท่ากับ

$$V_{01} = I_2 R_1 = \frac{R_1}{R} (V_1 - V_2) \quad (3.3.1)$$

$$V_{02} = -I_3 R_2 = \frac{R_2}{R} (V_2 - V_1) \quad (3.3.2)$$

จากสมการที่ (3.3.1) และ (3.3.2) จะเห็นได้ว่า ในกรณีศักดาจุดเข้าร่วม $V_1 = V_2$ จะได้อัตราขยายร่วม (Common-mode gain) = 0 โดยที่ไม่ขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานที่ไม่สมพียงกัน ดังเช่น ใช้ออปแอมป์ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2

3.3.2 วงจรขยายแบบอินสทรูเมนต์ที่ใช้ OTA

วงจรขยายแบบอินสทรูเมนต์ที่ใช้ OTA แสดงในรูปที่ 3.3.2 โดยที่วงจรทางด้านซ้ายและขวาจะมีรูปแบบที่เหมือนกัน หรือก็คือการใช้ OTA ที่ต่อเป็นวงจรสายพานกระแส เพื่อให้วงจรขยายแบบอินสทรูเมนต์นี้ทำงานได้อย่างแม่นยำ จึงต้องกำหนดให้ $R_1 \gg 2r_e$ เมื่อ $r_e = V_T/I_1$ กระแส I จะไหลผ่านความต้านทาน R_1 ที่มีค่าเท่ากับ

$$I = (V_1 - V_2) / R_1 \quad (3.3.3)$$

และเนื่องจากวงจรสะท้อนกระแสในวงจรจะมีค่าอัตราขยายเท่ากับ 1 ดังนั้น ศักดาจุดออก V_{O1} และ V_{O2} สามารถเขียนได้ดังนี้

$$V_{O1} = (V_1 - V_2) \frac{R_3}{R_1} \quad (3.3.4)$$

$$V_{O2} = (V_2 - V_1) \frac{R_4}{R_1} \quad (3.3.5)$$

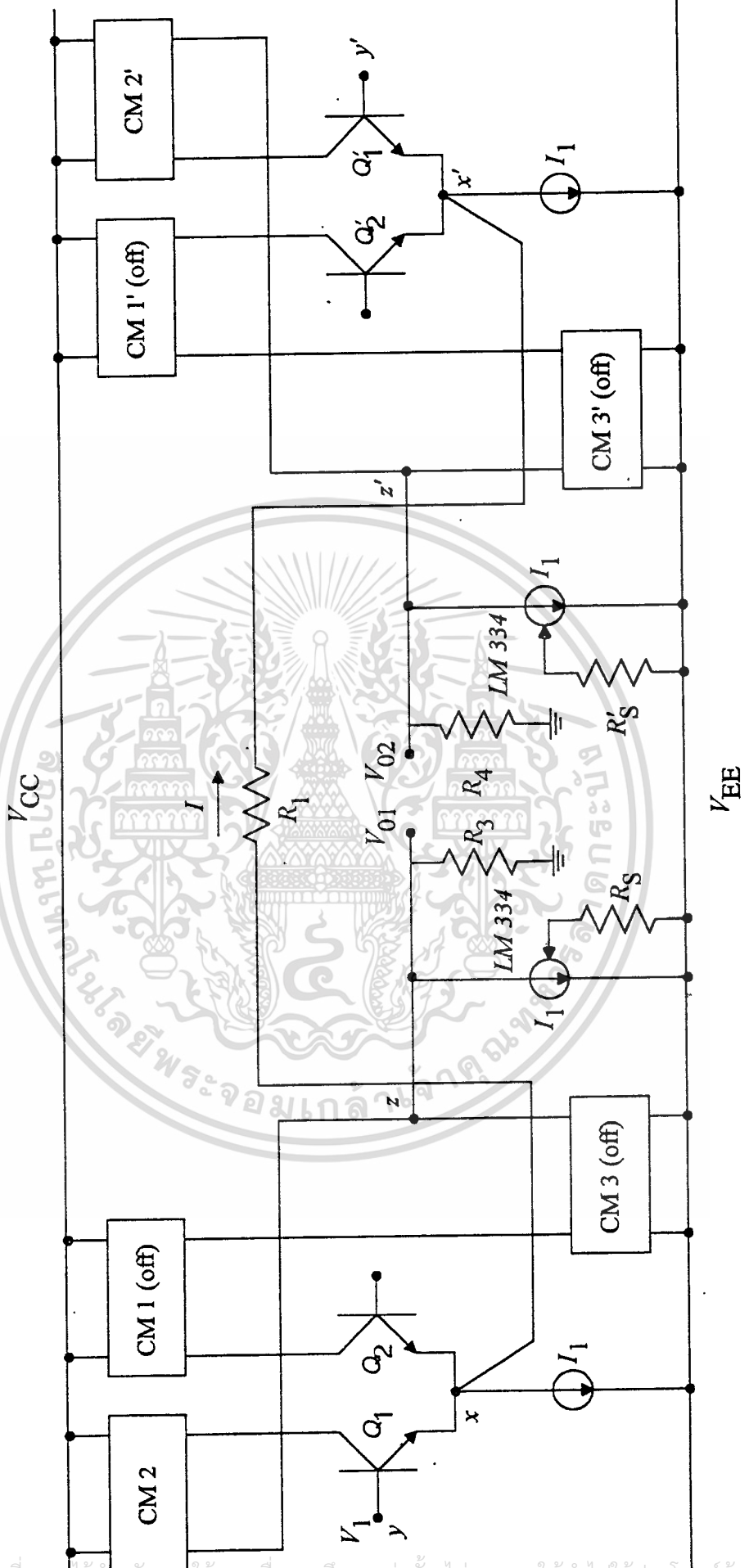
จากสมการที่ (3.3.4) และ (3.3.5) ถ้า $V_1 = V_2$ จะได้อัตราขยายร่วมหรือ Common-mode gain เท่ากับศูนย์

สำหรับผลตอบสนองทางความถี่ของอัตราขยาย ความแตกต่างของวงจรขยายแบบอินสทรูเมนต์ โดยใช้วงจรสายพานกระแสในรูปที่ 3.3.1 จะขึ้นอยู่กับผลตอบสนองทางความถี่ของตัวสายพานกระแส ผลตอบสนองทางความถี่ของพอร์ท X และ Y จะมีค่าที่สูงมาก ดังสมการที่ (3.2.9) ในหัวข้อ 3.2.2 ซึ่งค่าผลตอบสนองทางความถี่ค่านี้นี้จะมีผลน้อยมากเมื่อเทียบกับผลตอบสนองทางความถี่ระหว่างพอร์ท x และพอร์ท z ที่มีผลมากกว่า ดังสมการที่ (3.2.10) ในหัวข้อ 3.2.2 จากสมการที่ (3.3.4) และ (3.3.5) ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรในรูปที่ 3.3.1 จะสามารถเขียนได้ดังนี้

$$V_{O1} = \frac{R_1 (V_1 - V_2)}{R (T_1 S + 1)} \quad (3.3.6)$$

และ

$$V_{O2} = \frac{R_2 (V_1 - V_2)}{R (T_2 S + 1)} \quad (3.3.7)$$



รูปที่ 3.3.2 วงจรขยายแบบอินสทรูเมนต์ที่ใช้ OTA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ T_1 และ T_2 เป็นค่าเวลาคงตัว (Time constant) ระหว่างพอร์ท X และ พอร์ท Z ของวงจรสายพานกระแส CCII1 และ CCII2 ตามลำดับ ส่วนผลตอบสนองทางความถี่ของอัตราส่วนการลดทอนร่วมจะมีค่าคงที่ขึ้นอยู่กับความไม่สมพจน์กันของวงจรสายพานกระแสระหว่างพอร์ท x และพอร์ท y. ถ้ากำหนดให้ $V_1 = V_2 = V_{CM}$ จะสามารถหากระแส I_1 ในรูปที่ 3.3.1 ได้ดังนี้

$$I_1 = \frac{1}{R} \left[\frac{V_1}{(T_{x1}S+1)} - \frac{V_2}{(T_{x2}S+1)} \right] \quad (3.3.8)$$

และ

$$V_{o1} = \frac{R_1}{R} \frac{(T_{x1} - T_{x2})S}{(T_{x1}S+1)(T_{x2}S+1)(T_1S+1)} V_{CM} \quad (3.3.9)$$

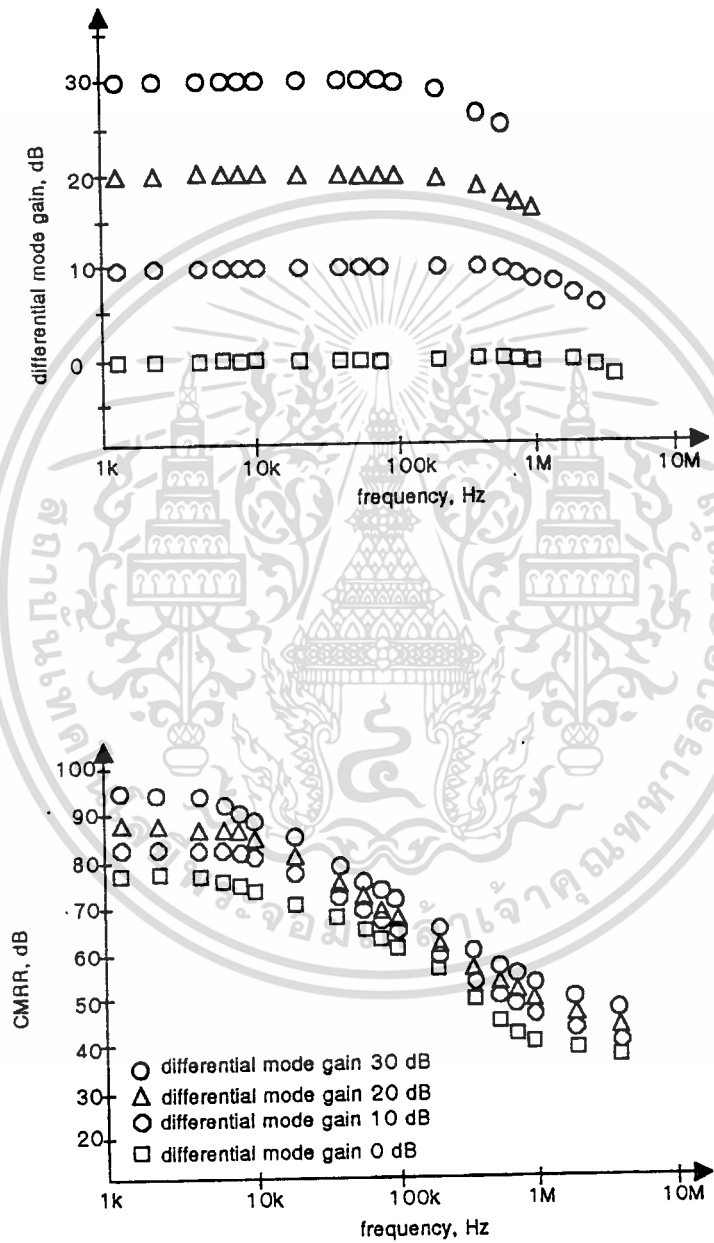
เมื่อ T_{x1} และ T_{x2} คือค่าเวลาคงตัวของวงจรสายพานกระแส CCII1 และ CCII2 ระหว่างพอร์ท X และพอร์ท Y ส่วน T_1 คือเวลาคงตัวของสายพานกระแสระหว่างพอร์ท X และพอร์ท Z ดังนั้น ค่าอัตราส่วนการลดทอนร่วม (CMRR) จะสามารถหาได้จากสมการที่ (3.3.6) และ (3.3.9)

$$CMRR = \frac{A_{d01}}{A_{CM01}} = \frac{(T_{x1}S+1)(T_{x2}S+1)}{(T_{x1} - T_{x2})S} \quad (3.3.10)$$

เมื่อ A_{d01} และ A_{CM01} คืออัตราขยายความแตกต่างและอัตราขยายร่วมของจุดออกที่ V_{O1}

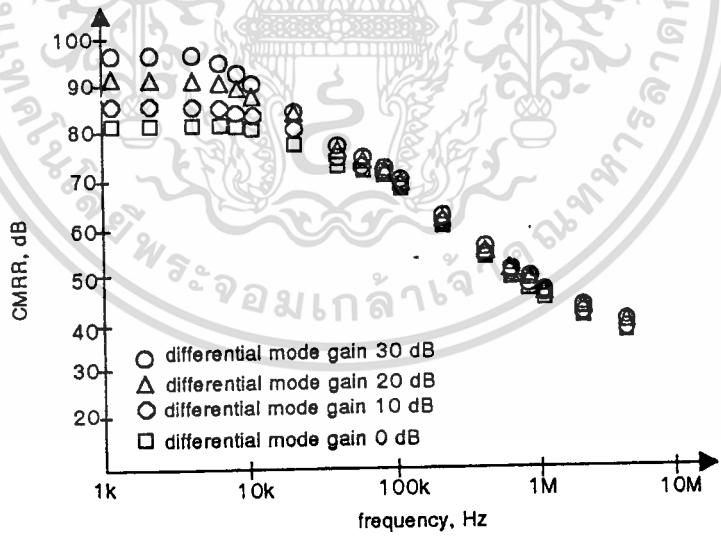
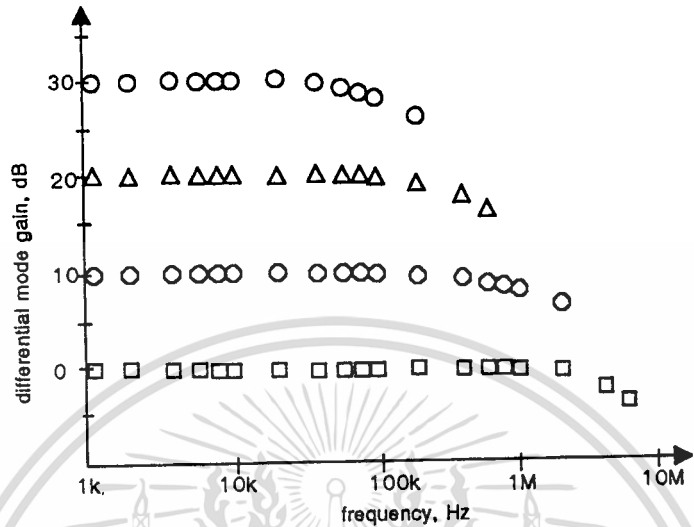
3.4 ผลการทดลอง

หลักการของวงจรขยายแบบอินสทรูเมนต์ ในรูปที่ 3.3.1 ได้นำมาต่อทดลองโดยใช้วงจรสายพานกระแสทั้งสองแบบที่ได้พัฒนาขึ้น ในวงจรสายพานกระแสแบบแรกใช้ไอซีโอทีเอเบอร์ CA3280 และวงจรจ่ายกระแสคงที่ LM334 และกำหนดให้ดึงกระแสคงที่ที่ $I_1 = 3\text{mA}$ และ $R_1 = 500\Omega$ และแปรค่า R_3 เพื่อกำหนดค่าอัตราขยายที่ 0, 10, 20 และ 30 dB ซึ่งจะได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.4.1 และจะได้ค่าผลตอบสนองทางความถี่ที่ 220 kHz ถึง 4 MHz แล้ว CMRR อยู่ในช่วง 78 dB ถึง 95 dB สำหรับรูปที่ 3.4.2 จะเป็นผลการทดลองเมื่อใช้วงจรสายพานกระแสแสดงในรูปที่ 3.2.5 โดยกำหนดให้กระแส I มีค่าเท่ากับ 1 mA ซึ่งจะได้ผลตอบสนองทางความถี่เท่ากับ 100 kHz ถึง 3.6 MHz และค่า CMRR อยู่ในช่วง 82 dB ถึง 96 dB



รูปที่ 3.4.1 ผลการทดลองโดยใช้วงจรสายพานกระแสแบบแรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดก็ตาม ห้ามนำไปเผยแพร่หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4.2 ผลการทดลองโดยใช้วงจรสายพานกระแสแบบที่สอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 บทสรุป

วงจรรขยายแบบอินสทรูเมนต์ที่ได้เสนอขึ้นในบทนี้จะใช้วงจรสายพานกระแสเป็นหลัก การทำงานของวงจรจะเป็นการทำงานแบบกระแส ซึ่งจะเป็ผลให้ผลตอบสนองทางความถี่มีค่าสูง สมรรถนะของวงจรทั้งของวงจรสายพานกระแสและวงจรรขยายแบบอินสทรูเมนต์ ได้ถูกยืนยันด้วยผลการวิเคราะห์และผลการทดลอง



บทที่ 4

วงจรถยายแบบอินสทรูเมนต์แบบใหม่

4.1 บทนำ

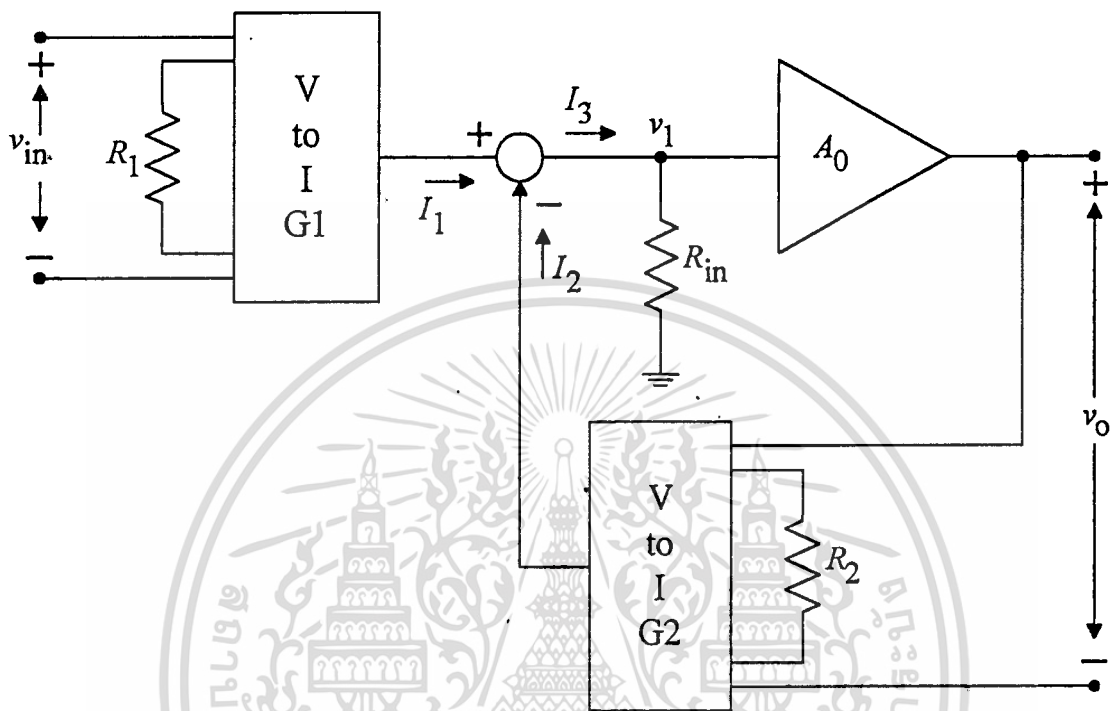
ในบทนี้เป็นการเสนอหลักการออกแบบวงจรถยายแบบอินสทรูเมนต์แบบใหม่อีกวิธีหนึ่ง ที่มีการทำงานในรูปของกระแส และสามารถแปรค่าอัตราขยายได้โดยการแปรค่าอัตราส่วนของ ความต้านทานจากภายนอก 2 ตัว ข้อดีของวงจรถยายแบบอินสทรูเมนต์แบบใหม่นี้จะมี ความต้านทานที่จุดออกของสัญญาณที่ต่ำ ซึ่งสามารถที่จะนำสัญญาณจุดออกไปใช้งาน ได้ทันทีโดยไม่ต้องมีวงจรถตามักคาหรือวงจรถกันชน (Buffer)

4.2 หลักการเบื้องต้น

หลักการเบื้องต้นของวงจรถยายแบบอินสทรูเมนต์แบบใหม่ แสดงในรูปที่ 4.2.1 จาก รูปที่ 4.2.1 จะประกอบไปด้วยวงจรถเปลี่ยนศักดาเป็นกระแสสองวงจรถ และวงจรถขยายศักดาที่มี อัตราขยายสัญญาณมีค่าเป็นอนันต์ การทำงานของวงจรถในรูปที่ 4.2.1 สามารถอธิบายได้ดังนี้ เมื่อป้อนศักดา V_{in} ให้กับวงจรถเปลี่ยนศักดาเป็นกระแส G_1 G_1 จะเปลี่ยนศักดา V_{in} โดยที่ กระแส I_1 จะมีค่าเท่ากับ $\frac{V_{in}}{R_1}$ ในขณะที่เดียวกันวงจรถเปลี่ยนศักดาเป็นกระแส G_2 จะทำการ เปลี่ยนศักดาจุดออก V_0 ให้เป็นกระแส I_2 ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ $\frac{V_0}{R_2}$ กระแส I_1 จะถูกนำมาหัก ลบกับกระแส I_2 ผลต่างของกระแสทั้งสองจะถูกเปลี่ยนเป็นศักดา V_1 โดยความต้านทาน R_{in} ซึ่งความต้านทาน R_{in} นี้จะเป็นความต้านทานจุดเข้าของวงจรถขยาย A_o หรือความต้านทานที่ต่อ เข้ามาจากภายนอก ศักดา V_1 จะมีค่าเท่ากับ $R_{in}(I_1 - I_2)$ ศักดา V_1 จะถูกขยายโดยวงจรถขยายศักดา A_o ให้ศักดาจุดออก V_o ดังนั้น ศักดาจุดออก V_o จะสามารถเขียนได้ดังนี้

$$V_o = A_o(I_1 - I_2)R_{in} \quad (4.1.1)$$

$$V_o = A_o\left(\frac{V_{in}}{R_1} - \frac{V_o}{R_2}\right)R_{in} \quad (4.1.2)$$



รูปที่ 4.2.1 หลักการเบื้องต้น

$$V_o \left(1 + \frac{A_o R_{in}}{R_1}\right) = \frac{A_o R_{in}}{R_1} V_{in} \quad (4.1.3)$$

ถ้ากำหนดให้ $A_o \gg 1$, $R_{in} \gg 1$ และ $\frac{A_o R_{in}}{R_2} \gg 1$ จากสมการที่ (4.1.3) จะสามารถเขียนได้

ดังนี้

$$V_o = \frac{R_2}{R_1} V_{in} \quad (4.1.4)$$

จากสมการที่ 4.1.4 จะเป็นได้ว่าอัตราขยายรวมของวงจรในรูปที่ 4.2.1 สามารถกำหนดได้ด้วยอัตราส่วนของ R_2 และ R_1 ส่วนศักดาจุดออก V_o สามารถที่จะนำไปใช้งานได้โดยตรง เนื่องจากความต้านทานจุดออกของวงจรขยาย A_o จะมีค่าที่ต่ำ

4.3 วงจรขยายแบบอินสทรูเมนต์แบบใหม่

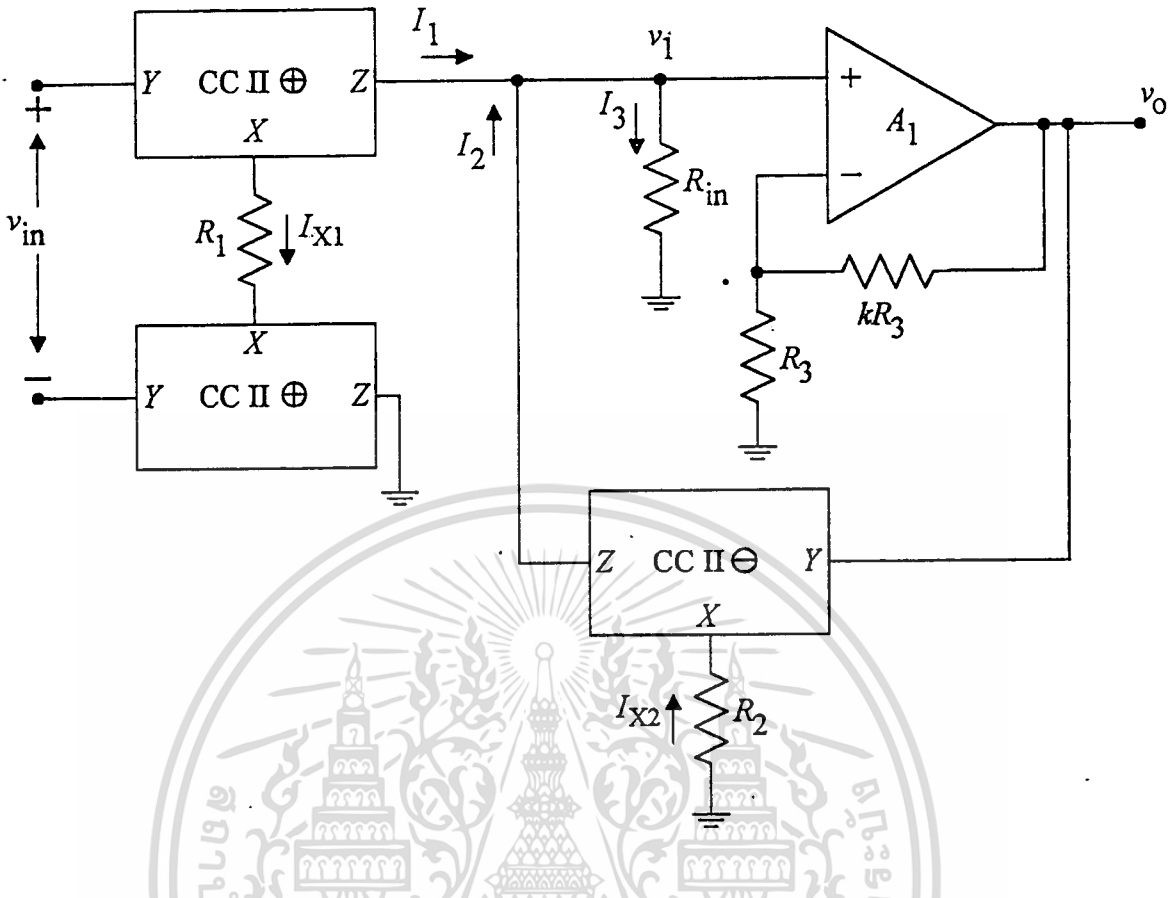
วงจรขยายแบบอินสทรูเมนต์แบบใหม่ที่ใช้ในการทดลองได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ แสดงในรูปที่ 4.3.1 ซึ่งจะใช้วงจรสายพานกระแสแทนวงจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแสเป็นหลัก โดยวงจรสายพานกระแสจะใช้ทั้งชนิดบวกและลบ ส่วนวงจรขยายศักดาจะใช้ออปแอมป์แทนการทำงานของวงจรในรูปที่ 4.3.1 จะอธิบายได้ดังนี้ กำหนดให้กระแสที่ไหลเข้าออปแอมป์ A_1

มีค่าเท่ากับศูนย์ เมื่อป้อนศักดาจุดเข้า V_{in} ศักดา V_{in} จะถูกเปลี่ยนเป็นกระแส I_{X1} ที่มีค่าเท่ากับ $\frac{V_{in}}{R_1}$ โดยกระแส I_1 จะมีทิศทางและขนาดเท่ากับ I_{X1} ส่วนกระแส I_2 จะมีค่าเท่ากับ $-I_{X2}$ ซึ่ง

I_{X2} มีค่าเท่ากับ $\frac{-V_o}{R_2}$ และเนื่องจากความต้านทานจุดออกของพอร์ท Z ของวงจรสายพาน

กระแสมีค่าสูงมาก ดังนั้นจึงสามารถที่จะนำจุดออกที่พอร์ท z ของ $CCII\oplus$ และ $CCII\ominus$ มาต่อร่วมกัน ได้ซึ่งจะได้ผลต่างของกระแส I_1 และ I_2 โดยผลต่างของกระแสนี้จะถูกนำไปเปลี่ยนเป็นศักดา V_1 โดยความต้านทาน R_{in} และศักดา V_1 จะถูกขยายโดยวงจรขยายออปแอมป์ A_1 เป็นศักดาจุดออก V_o ซึ่งค่าอัตราขยายศักดาจะมีค่าเท่ากับ K ดังนั้น ถ้าเลือกค่าความต้านทาน R_{in} และค่าอัตราขยาย K ให้มีค่าสูงมาก สมการที่ (4.1.4) ก็ยังคงนำมาใช้ได้กับวงจรในรูปที่ 4.3.1 เช่นกัน

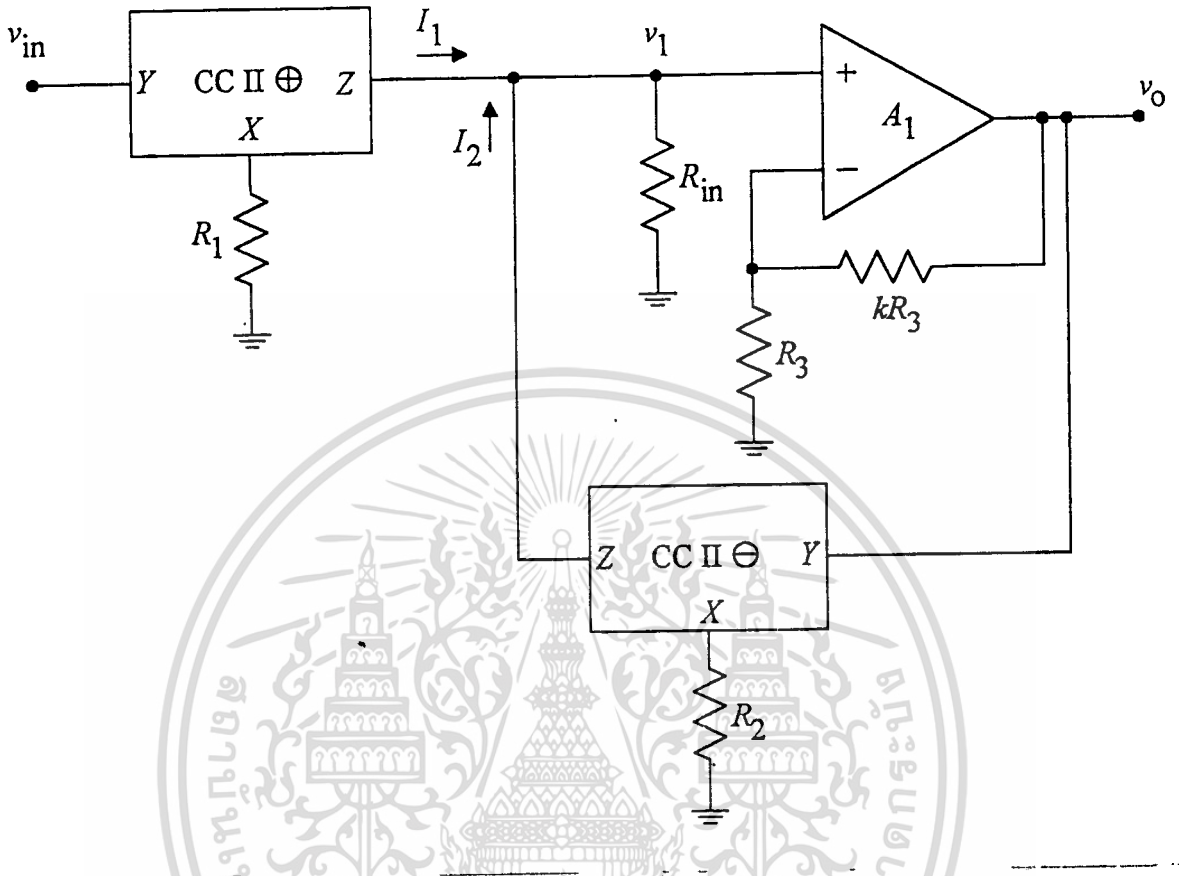
ส่วนสมรรถนะของวงจรในรูปที่ 4.3.1 ในส่วนของจุดเข้าของสัญญาณจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัววงจรสายพานกระแสเอง สำหรับในส่วนของจุดออกของสัญญาณจะขึ้นอยู่กับวงจรขยายศักดาที่นำมาใช้งาน สำหรับผลตอบสนองทางความถี่จากที่ได้กล่าวผ่านมาแล้วในบทที่ 2 และ 3 วงจรสายพานกระแสจะมีผลตอบสนองทางความถี่สูงมาก ส่วนตัวออปแอมป์เองจะมีผลตอบสนองทางความถี่ที่ไม่สูงมากนัก ดังนั้น ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรในรูปที่ 4.3.1 จึงขึ้นอยู่กับวงจรขยายศักดาที่นำมาใช้งาน



รูปที่ 4.3.1 วงจรขยายอินสทรูเมนต์แบบใหม่ที่ใช้ในการทดลอง

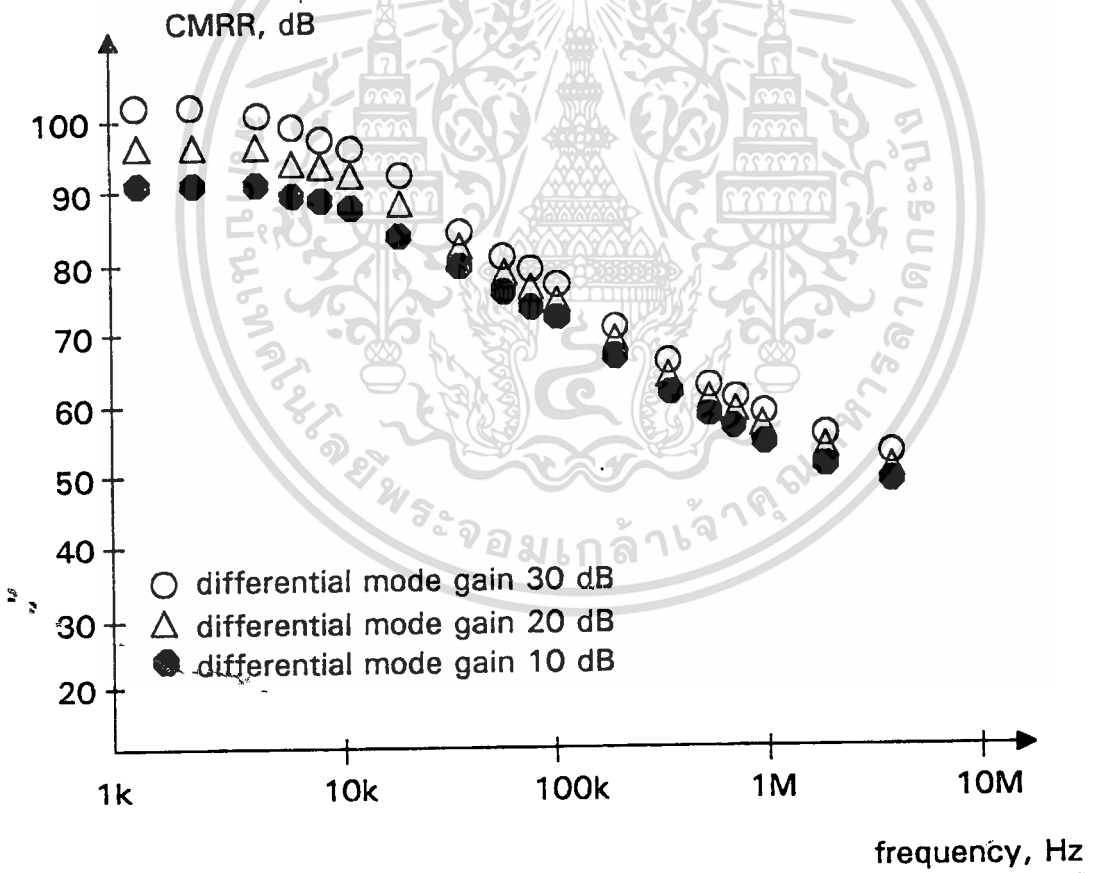
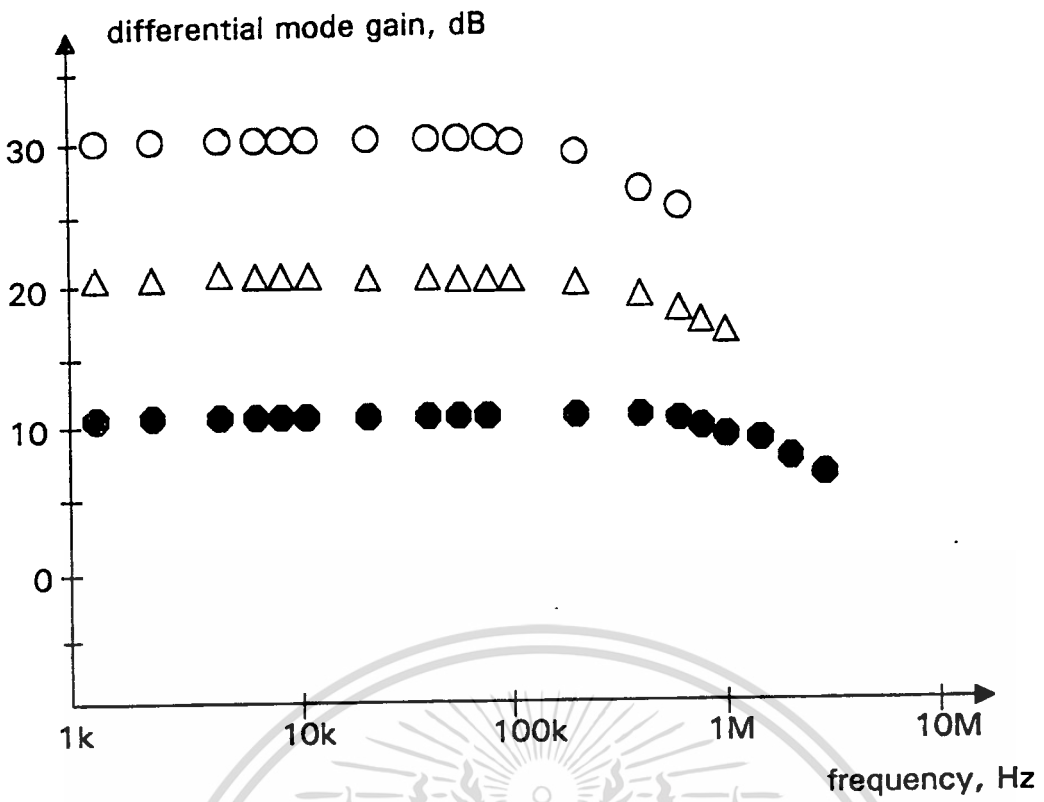
4.4 ผลการทดลอง

เพื่อความสะดวกในการต่อวงจร เพื่อทดลองในการสนับสนุนหลักการในวิทยานิพนธ์นี้ ได้ทำการต่อวงจรขึ้น โดยให้ศักดาจุดเข้า V_{in} อ้างอิงกับศักดาดิน ดังแสดงในรูปที่ 4.4.1



รูปที่ 4.4.1 วงจรที่ใช้ในการทดลอง

วงจรสายพานกระแส $CCII+$ และ $CCII-$ จะใช้วงจรที่แสดงในรูปที่ 3.2.1 ส่วนออปแอมป์ A_1 เลือกใช้ไอซีเบอร์ LF351 และมีอัตราขยายต่อกับ 100 โดยให้ $R_3=1k\Omega$ และ $R_{in}=10k\Omega$ ส่วนค่า R_1 และ R_2 แปรค่าไปเพื่อให้ได้ค่าอัตราขยายของวงจรรวมเท่ากับ 10 dB, 20 dB และ 30 dB ในรูปที่ 4.4.2 แสดงผลการทดลองของวงจรรูปที่ 4.4.1 ซึ่งจะได้ ผลตอบสนองทางความถี่เท่ากับ 120 kHz ถึง 4 MHz และค่า CMRR อยู่ในช่วง 94 dB ถึง 104 dB



รูปที่ 4.4.2 ผลการทดลองวงจรในรูปที่ 4.4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 สรุป

วงจรรขยายแบบอินสทรูเมนต์แบบใหม่ที่ได้นำเสนอในบทนี้ จะมีการทำงานในรูปแบบของกระแสและสามารถแปรค่าอัตราขยายได้โดยการแปรค่าอัตราส่วนของความต้านทานสองตัว ข้อดีของวงจรมันก็คือ ความต้านทานจุดออกที่ต่ำสามารถนำสัญญาณจุดออกไปใช้งานได้ทันที และมีค่าอัตรการลดทอนร่วมที่สูง



บทที่ 5

สรุปและแนวทางในการพัฒนาต่อ

5.1 สรุป

วงจรรขยายอินสตรูเมนต์ที่ได้นำเสนอขึ้นในวิทยานิพนธ์นี้มี 2 วงจรด้วยกัน โดยทั้งสองวงจรมีการทำงานในรูปแบบของกระแส วงจรรขยายแบบอินสตรูเมนต์แบบแรกจะใช้วงจรสายพานกระแสต่อร่วมกับความต้านทาน ในการประยุกต์ใช้งานจะมีข้อจำกัดอยู่บ้างเนื่องจากจุดออกของสัญญาณจะมีความต้านทานจุดออกที่สูง ส่วนวงจรรขยายแบบอินสตรูเมนต์แบบที่สองใช้วงจรเปลี่ยนศักดาเป็นกระแสเป็นหลัก วงจรในแบบที่สองนี้การใช้งานจะมีความสะดวกกว่าในแบบแรกมาก ค่าอัตราขยายรวมของวงจรมีค่าที่กำหนดได้จากอัตราส่วนของความต้านทานสองค่า และความต้านทานจุดออกของวงจรจะมีค่าที่ต่ำสามารถนำสัญญาณจุดออกไปใช้งานได้โดยตรงสมรรถนะของวงจรรขยายแบบอินสตรูเมนต์ทั้งสอง สามารถที่จะยืนยันได้ด้วยผลการทดลองซึ่งจะเห็นได้จากค่าอัตราขยายของวงจร จะสามารถแปรค่าได้ในช่วงกว้างโดยที่ผลตอบสนองทางความถี่ยังคงกว้างอยู่ ในทำนองเดียวกันอัตราการลดทอนร่วมจะมีค่าที่สูง และผลตอบสนองทางความถี่จะมีค่าที่สูงมาก เมื่อเทียบกับวงจรรขยายแบบอินสตรูเมนต์แบบใช้ออปแอมป์ 3 ตัว ที่มีผลตอบสนองทางความถี่ในช่วงไม่เกิน 1 kHz

5.2 แนวทางในการพัฒนาต่อ

การพัฒนาต่อไปของวงจรรขยายแบบอินสตรูเมนต์ในวิทยานิพนธ์นี้ สามารถทำการพัฒนาเพิ่มเติมได้ 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ ในส่วนแรกสำหรับวงจรรขยายแบบอินสตรูเมนต์ในแบบแรก จะพัฒนาต่อในด้านของความต้านทานจุดออกของวงจรที่ยังมีค่าที่สูงอยู่ และในส่วนที่สองสำหรับวงจรรขยายแบบอินสตรูเมนต์แบบที่สอง เนื่องจากมีการใช้ออปแอมป์ในส่วนของสัญญาณจุดออกเป็นผลให้วงจรทั้งหมดจะมีขนาดที่ใหญ่ ทำให้ต้นทุนในการผลิตเป็นวงจรรวมสูง จึงต้องมีการปรับปรุงแก้ไขเพื่อลดขนาดของวงจรรขยายศักดาออปแอมป์นี้ให้มีขนาดเล็กลง

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จขึ้นมาได้ด้วยความกรุณาจาก รศ.ดร.กอบชัย เดชหาญ ที่ได้แนะนำและชี้แนวทางที่เป็นประโยชน์ในการทำวิจัย ตลอดระยะเวลาที่ศึกษาอยู่ ซึ่งผู้เขียนขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ด้วย

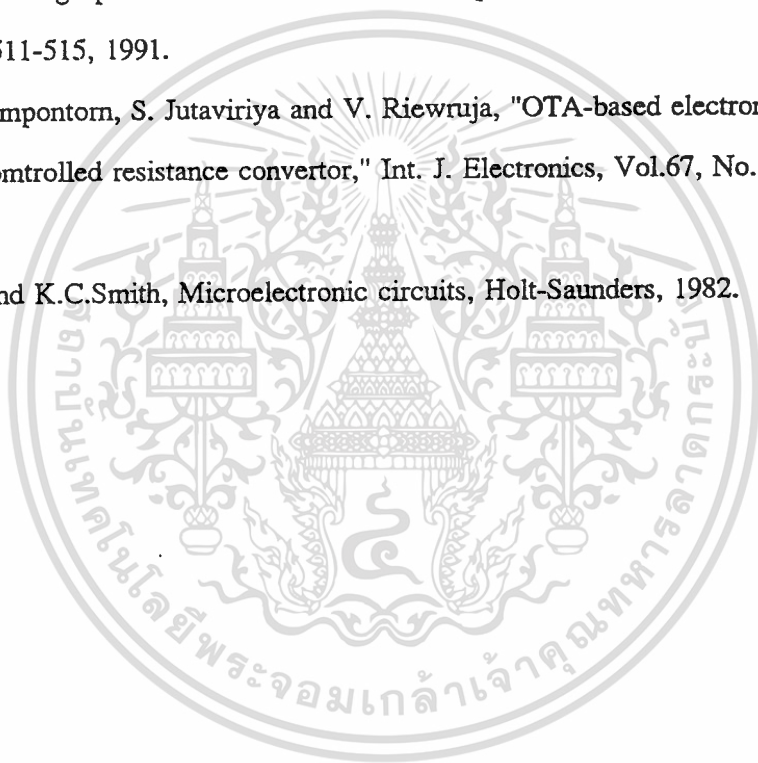
สมพร ชิติมุทา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Ramon Pallas-Areny and John G. Webster, "Common mode rejection ratio in differential amplifier," IEEE Trans. Instrumentation and Measurement, Vol.40, No.4, pp.669-676, 1991
- [2] A. Sedra and K.C. Smith, "A second generation current conveyor and its applications," IEEE Trans., Vol. CT-17, pp.132-154, 1970.
- [3] W. Surakamponorn, V. Riewruja, C. Surawatpunya and S. Yodladda, "Instrumentation amplifiers using operational transconductance amplifiers," Int. J. Electronics, Vol.71, No.3, pp.511-515, 1991.
- [4] W. Surakamponorn, S. Jutaviriya and V. Riewruja, "OTA-based electronically tunable voltage-controlled resistance convertor," Int. J. Electronics, Vol.67, No.1, pp.81-85, 1989.
- [5] A-Sedra and K.C.Smith, Microelectronic circuits, Holt-Saunders, 1982.



ผลงานวิจัยที่ได้รับการพิมพ์เผยแพร่

- [1] วงจรรวมของวงจรขยายเครื่องมือวัดโดยใช้วงจรสายพานกระแส ตีพิมพ์ในเอกสารการประชุมทางวิชาการ วิศวกรรมไฟฟ้า ประจำปี 2534 จัดโดยวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย วันที่ 23-26 พฤษภาคม 2534 ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

